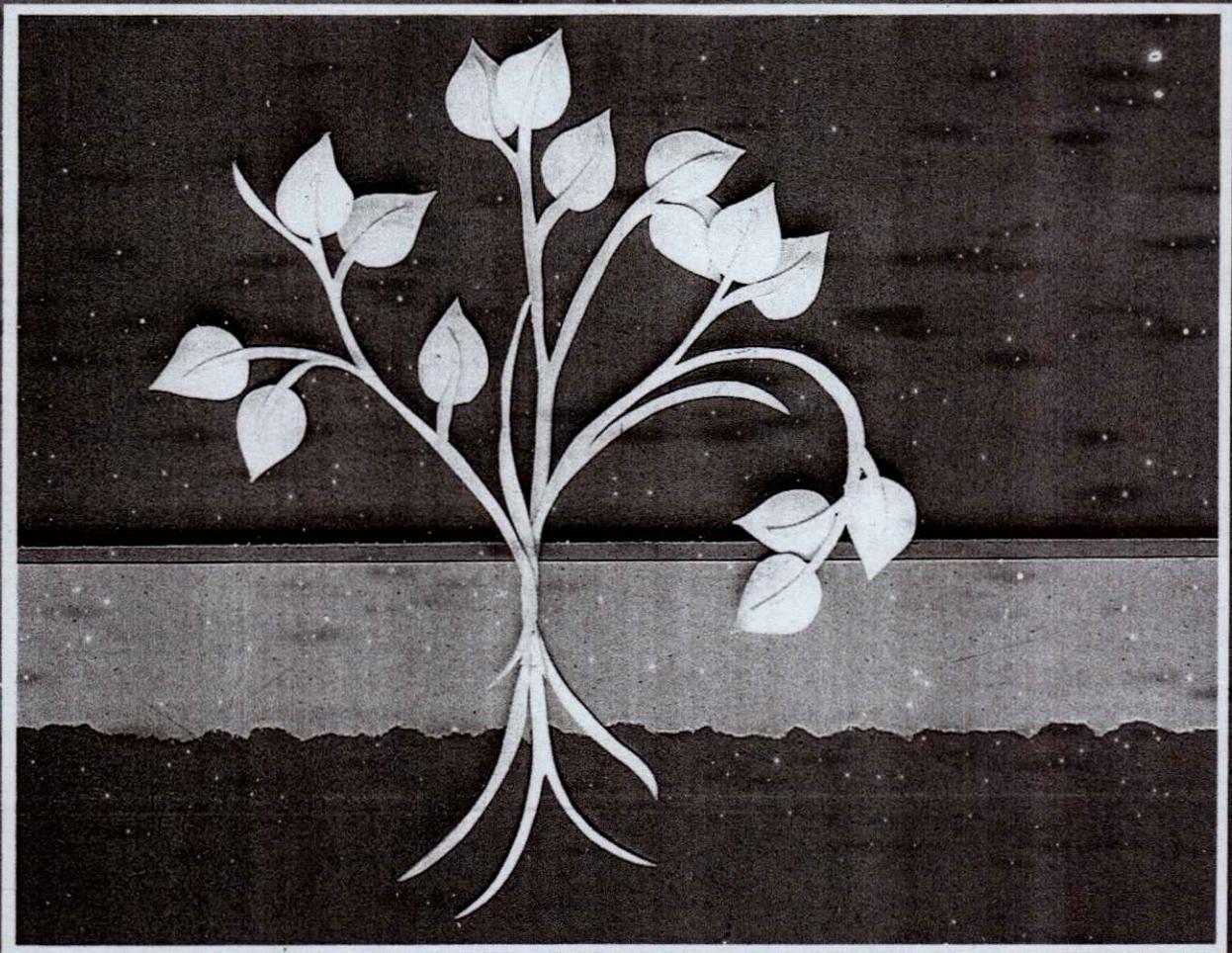


ISSN 0187-5779

TERRA

OCTUBRE - DICIEMBRE DE 1997 • VOLUMEN 15 • NUMERO 4



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

TERRA

SOCIEDAD MEXICANA DE LA CIENCIA DEL SUELO A.C.

MESA DIRECTIVA 1997-1999

Presidente

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 Álvarez Sánchez

M.C. Ricardo Torres Cossío

Dr. 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 Álvarez 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.
Octubre - Diciembre de 1997 Volumen 15 Número 4

ISSN 0187 - 5779

Los artículos publicados son responsabilidad absoluta de los autores. Se autoriza la reproducción parcial o total de esta revista, citándola como fuente de información. Las contribuciones a esta revista deben enviarse, en original y dos copias, redactados 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 Aalmer 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

OCTUBRE - DICIEMBRE DE 1997 • VOLUMEN 15 • NUMERO 4

DIVISION I

- 341 Formas y distribución de los óxidos de Fe, Al y Si y su relación con la pedogénesis de tres pedones en una toposecuencia.
Adolfo Campos C.
- 349 Variabilidad espacial de la humedad en un Rhodic ferrasol regado por aspersión.
Hanoi Medina, Angel Utset, Teresa López y Reynaldo Rey
- 355 Estimación de un componente del balance de humedad mediante reflectometría de dominio del tiempo.
José Dimas López Martínez, Juan Francisco Pissani Zúñiga y David García Arellano
- 359 Coeficientes de calibración del reflectómetro de dominio del tiempo en suelos de la Comarca Lagunera.
José Dimas López-Martínez y Juan F. Pissani-Zúñiga
- 365 Desarrollo de valores de referencia para Cd y Pb en suelos regados con aguas residuales.
Christina Siebe

DIVISION II

- 371 Estados nutrimentales del aguacatero en un suelo de Ando fertilizado con N, P y K durante seis años consecutivos.
Gustavo A. Baca Castillo, Juan José Aguilar Melchor, Alfredo López Jiménez, Angel Martínez Garza y Fernando García C.
- 383 *Pseudomonas* fluorescentes como agentes de control de bacterias patógenas de plantas: I. Selección de cepas de *Pseudomonas* productoras de sideróforos.
R. Farías-Rodríguez, R. Godínez, E. Zamora y J.J. Peña-Cabriales
- 391 *Pseudomonas* fluorescentes como agentes de control de bacterias patógenas de plantas: II. Inoculación en planta.
R. Farías-Rodríguez, E. Zamora y J.J. Peña-Cabriales

DIVISION III

- 397** Evaluación en campo de una rastra de discos excéntrica.
Noel Chávez A., Lidia Trejo Q., Moisés Torres L. y Ramón García A.
- 405** Fertilización nitrogenada en vid 'Malaga Roja' en la Comarca Lagunera.
Raúl Mancilla y D.I. y Jesús Santamaría César
- 413** Producción de forraje y contenido de proteína en variedades de triticale en monocultivo y mezclas a diferentes densidades de siembra en la Comarca Lagunera.
Víctor M. Escobedo Torres, Raúl Serrato Sánchez, Ricardo Aguilera Rangel y Felipe del Río Olague

Indice de autores	421
Revisores	422
Normas para publicación	423

TERRA

MEXICAN SOCIETY OF SOIL SCIENCE

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

Dr. Víctor M. Ordaz Chaparro
M.C. José Cisneros Dominguez
Dr. Prometeo Sánchez García
Dr. Fernando de León González
Dra. Edna Alvarez 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

STYLE EDITOR

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

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
October - December, 1997 Volume 15 Num. 4

ISSN 0187 - 5779

The authors take full responsibility for the articles published. Partial or total reproduction of the content of this journal is authorized, as long as this publication is cited as the information source. When submitting articles to this journal, an original and two copies must be sent to:
Editor de la Revista TERRA, 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 Luzzio 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

OCTOBER - DECEMBER, 1997 • VOLUME 15 • NUMBER 4

DIVISION I

- 341 Forms and distribution of Fe, Al, and Si oxides and their relation to pedogenesis of three pedons along a toposequence.
Adolfo Campos C.
- 349 Spatial variability of the moisture in a Rhodic ferrasol under sprinkler irrigation.
Hanoi Medina, Angel Utset, Teresa López, and Reynaldo Rey
- 355 Estimation of a component of water balance using time-domain reflectometry.
José Dimas López Martínez, Juan Francisco Pissani Zúñiga, and David García Arellano
- 359 Calibration coefficients of time domain reflectometry in soils of the Comarca Lagunera.
José Dimas López-Martínez and Juan F. Pissani-Zúñiga
- 365 Development of reference values for Cd and Pb in soils irrigated with untreated sewage effluents.
Christina Siebe

DIVISION II

- 371 Nutritional status of avocado in an Ando soil fertilized with N, P and K along six consecutive years.
Gustavo A. Baca Castillo, Juan José Aguilar Melchor, Alfredo López Jiménez, Angel Martínez Garza, and Fernando García C.
- 383 Fluorescent *Pseudomonas* as control agents on plant pathogen bacteria: I. Selection of siderophore-producing *Pseudomonas* strains.
R. Farías-Rodríguez, R. Godínez, E. Zamora, and J.J. Peña-Cabriales
- 391 Fluorescent *Pseudomonas* as control agents on plant pathogen bacteria: II. Plant inoculation.
R. Farías-Rodríguez, E. Zamora, and J.J. Peña-Cabriales

DIVISION III

- 397** Field evaluation of an eccentric disk harrow.
Noel Chávez A., Lidia Trejo Q., Moisés Torres L., and Ramón García A.
- 405** Nitrogen fertilization of grape vines 'Red Malaga' in the Comarca Lagunera.
Raúl Mancilla y D.I. and Jesús Santamaría César
- 413** Herbage production and crude protein content of triticale varieties in monoculture and mixtures sown at different seeding rates at Comarca Lagunera.
Víctor M. Escobedo Torres, Raúl Serrato Sánchez, Ricardo Aguilera Rangel, and Felipe del Río Olague

Authors index	421
Reviewers	422
Publication rules	423

FORMS AND DISTRIBUTION OF Fe, Al, AND Si OXIDES AND THEIR RELATION TO PEDOGENESIS OF THREE PEDONS ALONG A TOPOSEQUENCE

Formas y Distribución de los Oxidos de Fe, Al y Si y su Relación con la Pedogénesis de Tres Pedones en una Toposecuencia

Adolfo Campos C.¹

RESUMEN

En tres suelos de una toposecuencia se estudiaron los contenidos de óxidos de hierro, de aluminio y de silicio. Se utilizaron tres técnicas químicas selectivas y los extractantes fueron el reactivo oxalato ácido (o), el reactivo ditionito citrato bicarbonato (d) y la disolución total ácida (t). Los contenidos de hierro extraídos con ditionito (óxidos de hierro libres totales) fueron muy altos, variaron de 3.5 a 5.2 % Fe_d, ellos constituyen más de 60 % del hierro total. El hierro extraído con oxalato (óxidos de hierro amorfos) varió de 0.15 a 0.54 % Fe_o y representó menos de 12.5 % del hierro libre total. La relación de actividad del hierro (Fe_o/Fe_d) fue muy baja, varió de 0.03 a 0.10, eso revela que la mayor parte de los óxidos de hierro están en forma cristalina. Las cantidades de aluminio extraídas con ditionito fueron ligeramente altas, variaron de 0.70 a 1.0 % y seguramente provienen del aluminio de sustitución que está presente en la hematita y en la goethita. Las cantidades de silicio extraídas con oxalato fueron extremadamente bajas, ello revela que en estos suelos no hay alofano. Con base en los resultados del estudio se concluye que los suelos manifiestan un estado de alteración avanzado.

Palabras clave: Suelo tropical, caliza, métodos de extracción selectiva, Chiapas, México

SUMMARY

In three soils of a toposequence, contents of iron, aluminum and silicon oxides were studied. Three selective chemical techniques were utilized: acid-oxalate reagent (o), dithionite-citrate-bicarbonate reagent (d), and total acid dissolution (t). The content of iron

extracted with dithionite (total free iron oxides) was very high: it varied from 3.52 to 5.19 % Fe_d, constituting more than 60 % of the total iron. The iron extracted with oxalate (amorphous iron oxides) varied from 0.15 to 0.54 % Fe_o and represented less than 12.5 % of the total free iron. The active iron ratio (Fe_o/Fe_d) was very low, varying from 0.03 to 0.10; this reveals that most iron oxides are crystalline in form. The amounts of aluminum extracted with dithionite are slightly higher: they varied from 0.70 to 1.0 % and probably arises from the substituting aluminum for iron in hematite and goethite. The amount of silicon extracted with oxalate was extremely low; this reveals a lack of allophane in the soils. From this study, the conclusion can be drawn that the state of these soils is one of advanced weathering.

Index words: Tropical soil, limestone, selective extraction methods, Chiapas, Mexico.

INTRODUCTION

Due to their abundant vegetation, soils of the humid tropics appear to be highly fertile. However, fundamental knowledge, along with practice on these soils, shows that the main problem in management of tropical forestland lies in the naturally low fertility of the substratum: an acid pH, high levels of exchangeable aluminum, low levels of exchangeable bases and substantial amounts of organic material in forest soils but not in crop soils. The tropical forest maintains a very closed nutrient cycle. Most nutrients are stored in the biomass and in the A and O (organic) horizons of the soil. The losses occurring in this system are very low; this is why lush vegetation exists without any sign of nutritional deficiencies (Boul and Sanchez., 1986; Lal, 1989; Sanchez, 1976; Sanchez and Salinas, 1981). The mineralogical composition of many highly weathered soils comprises mainly kaolinite clays and small to moderate amounts of iron and aluminum

¹Instituto de Ecología, A.C., Apartado Postal 63, 91000 Xalapa, Veracruz (México)
e-mail: camposad@sun.ieco.conacyt.mx

Aceptado: Diciembre de 1997.

oxides. The latter exist in the soil in the form of crystalline oxides; only a small amount of Al and Fe is associated with complex organic forms (Juo *et al.*, 1974; Lindsay, 1991; Schwertmann, 1991; Uehara and Gillman, 1981). The clay fractions of most soils consist primarily of layer silicates in association with small amounts of accessory minerals, including various oxides and oxyhydroxides of iron (Bigham *et al.*, 1978a; Stucki, 1985). The profile distribution of the various forms of iron and aluminum has been used as a criterion in interpreting soil formation processes. The distribution of these pedogenic oxides and hydroxides in the soil profile helps, therefore, in describing the type, the direction and the extent of pedogenic processes (Blume and Schwertmann, 1969; Fey, 1983).

Sensitivity to environmental parameters on one side and the specific pedoenvironment in the tropics on the other makes the iron oxide minerals an important tool to understand the formation to tropical soils (Schwertmann, 1990).

Chao and Zhou (1983) evaluated several extracting solutions for their efficiency and specificity in dissolving amorphous iron oxides and reported that 1M hydrochloric acid in half an hour extracted almost as much iron as ammonium oxalate would extract from hematite and weakly crystallized iron hydroxides, but far less from magnetite. Two analytical methods are commonly used in estimating percentages of iron oxides in soils: the acid ammonium oxalate method proposed by Schwertmann (1964), McKeague and Day (1966), and the dithionite-citrate-bicarbonate method proposed by Mehra and Jackson (1960). The oxalate extraction is presumed to remove the x ray-amorphous and organic-bound iron oxides. The dithionite extraction is presumed to remove crystalline iron oxides in addition to the oxalate-extractable fractions (Kunze and Dixon, 1986; Vodyanitskiy, 1992; Walker, 1983; Whitton and Churchman, 1987).

A previous study of forest soils of a tropical region of Chiapas, Mexico showed high quantities of exchangeable aluminum and low quantities of exchangeable bases. It is also evident that these soils have high phosphorous fixation (Campos and Dubroeuq, 1992). Under natural forest, these soils have favorable structure and water retention properties (Campos, 1995).

The present study examines the forms and distribution of iron, aluminum and silicon oxides in three soils derived from limestone in a humid tropical environment.

MATERIALS AND METHODS

Soils

The genetic horizons of three soil pedons were sampled. The pedons correspond to three topographical segments of a toposequence 10 km in length which is located in the northern part of the Montes Azules Biosphere Reserve in Chiapas, Mexico and consists of a geological substratum of limestone from the Upper Cretaceous Period (Campos and Dubroeuq, 1992) (Figure 1). The location of the sample sites is shown in Figure 2. The steepest segment of the toposequence sustains a soil less than 50 cm thick (Rendoll); this segment was not sampled.

Analytic Methods

Soil samples were air-dried and passed through a 2-mm sieve prior to analysis. Organic C content was determined by the dichromate oxidation method (Black, 1967). Effective cation exchange capacity was measured by the summation of exchangeable bases and exchange acidity. Exchangeable bases were extracted in 1M NH_4OAc at pH 7. Ca and Mg ions were determined with atomic absorption spectrophotometer, while Na and K ions were determined with flame photometer (Blakemore *et al.*, 1987). Particle-size distribution was determined by Day (1965) method. Soil pH was determined in soil paste in water and 1M KCl using a Beckman pH meter. In order to identify the various forms of Al, Fe and Si oxides, the ammonium oxalate extraction method by Blakemore *et al.* (1987) and dithionite-citrate-bicarbonate by Mehra and Jackson (1960) were used. A total chemical analysis was also conducted for Al, Fe and Si using a decomposition with acid digestion vessel (Bernas, 1968; Page, 1982). The determination of elements was done using atomic absorption.

Diagnostic analytical data of the soils used in this study are given in Table 1.

RESULTS AND DISCUSSION

The results of the selective extraction and of the total dissolution of aluminum, iron and silicon oxides are shown in Table 2. The solubility of these elements in the varying extractants shows differences between soils as well as their degree of weathering.

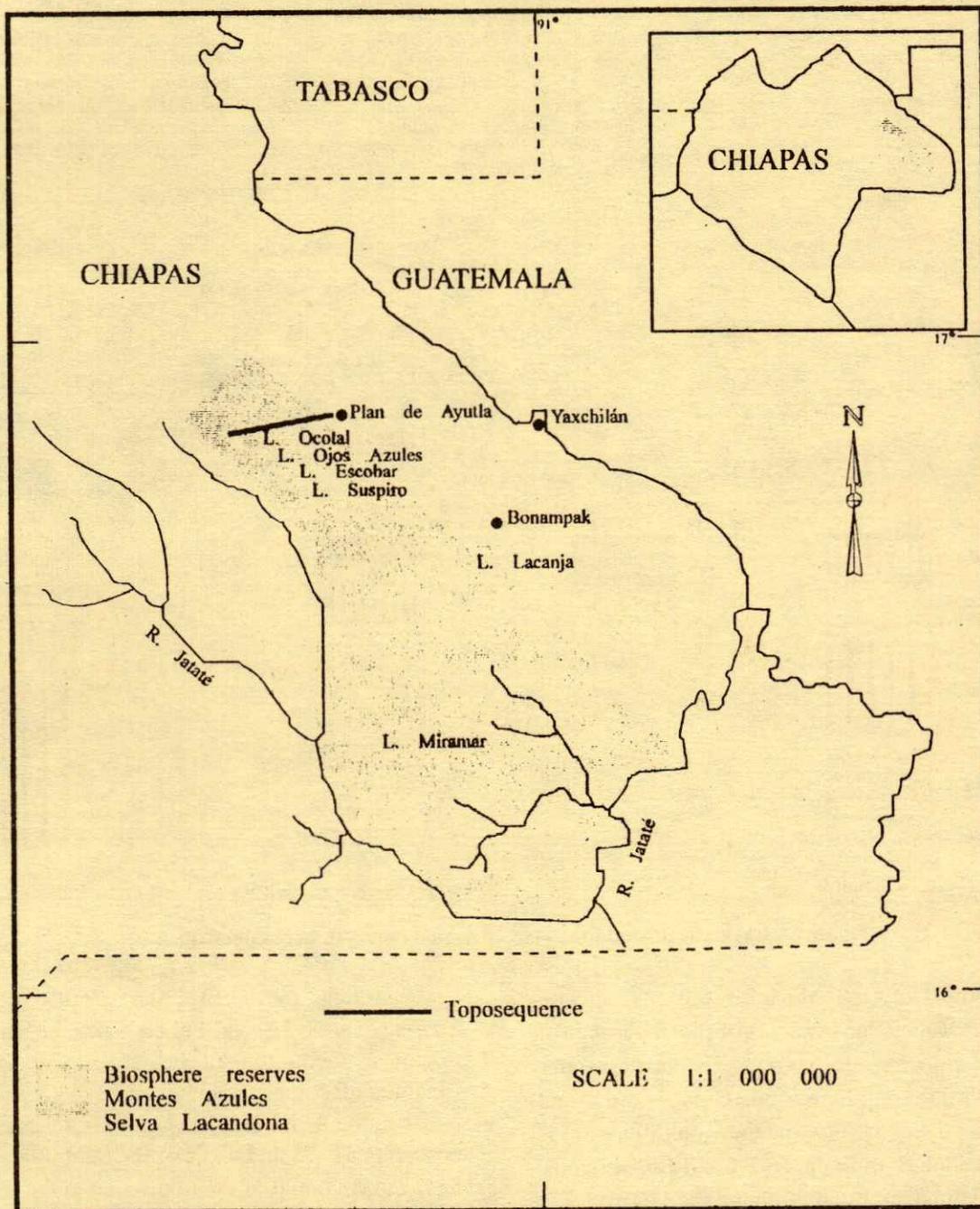


Figure 1. Map showing the location of the toposequence.

The pedon found on the upper topographical level (Figure 2), classified as Ombroaquic Kandihumult (Soil Survey Staff, 1992), shows a slight increase in the oxalate extractable iron (amorphous iron oxide) with an increase in depth. The A and B1 horizons have 0.14 and 0.26 % Fe_o , while the Btc21 and Btc22 horizons have a 0.40 % Fe_o content. The iron extractable in dithionite-citrate-bicarbonate (total free iron oxides) also shows a

slight increase with increasing depth. The A and B1 horizons have 3.52 and 3.79 % Fe_d , while the Btc21 and Btc22 horizons contain 4.06 and 4.08 % Fe_d . The total amounts of iron (Fe_t) differ little from those extracted with dithionite. Thus the A and B1 horizons maintain 4.17 and 4.49 % Fe_t and Btc21 and Btc22 have 5.77 and 5.87 % Fe_t , respectively.

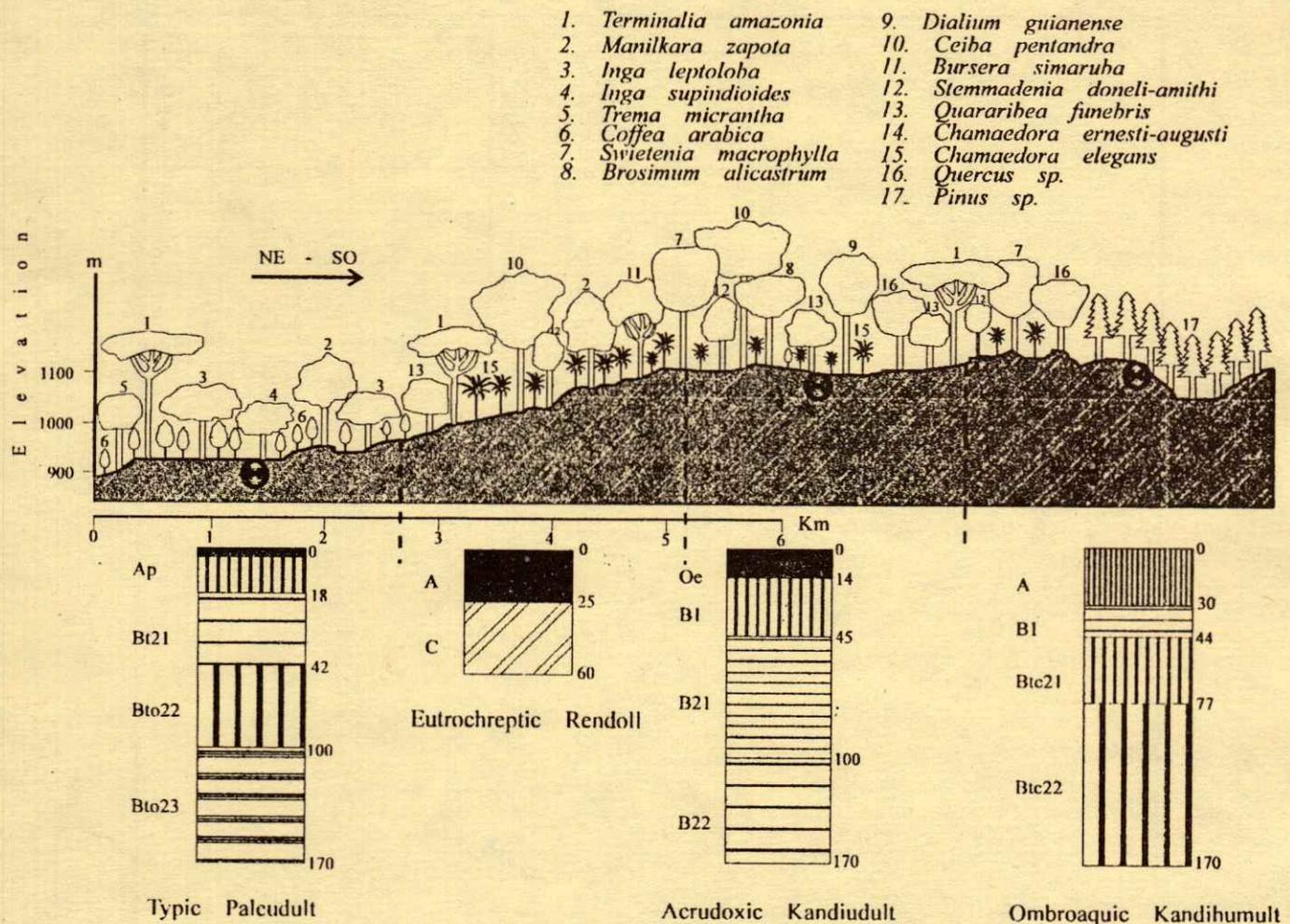


Figure 2. Schematic diagram showing soils and vegetation in the toposequence.

The quantities of iron which were extracted with oxalate are very low in the horizons of the upper part of the pedon and low in the deeper part. This demonstrates that there is little amorphous iron. Only 3.9, 6.8 and 9.8 % of the total free iron (extracted with dithionite) is in a non-crystalline form in the A, B1 and Btc horizons, respectively. Moreover, by multiplying the Fe_o by 1.7, a semi-quantitative estimate was made of the amount of ferrihydrite present in the soil (Childs, 1985; Parfitt and Childs, 1988). Thus there is less than 0.68 % of this mineral in the soil; the smallest amount is found in the horizons of the upper part of the pedon.

Furthermore, the results of dissolution in dithionite suggest the presence of crystalline iron oxides. A slight increase in Fe_d is seen in the profile with the increase of depth. The highest contents occur in the Btc horizons (Table 2).

According to Parfitt and Childs (1988), the difference in the Fe_d and Fe_o content represents the iron present as goethite and hematite. The Ombroaquic Kandihumult soil has 3.4, 3.5, and 3.7 % crystalline iron oxides in the A, B1 and Btc horizons, respectively. This represents 81, 78 and 63 % of the total iron and suggest that a large amount of the iron found in the soil exists in the form of crystalline oxides (goethite, hematite). This means that of the total iron, only 15 % in the A and B1 horizons and 30 % in the Btc horizon is present in the silicates.

The Fe_o/Fe_d ratio is very low, varying from 0.04 to 0.10. This ratio indicates a high proportion of crystalline iron oxides, being even greater in the horizons of the upper part of the pedon (Table 3). Moreover, the clay/ Fe_d ratio increases with depth suggesting co-migration of clay and iron oxides within the pedon (Table 3).

Table 1. General properties of the soils used in this study (Campos y Dubroeuq, 1992).

Horizon	pH		Clay	Silt	Sand	C	Ca	Mg	Na	K	Exch. Al	ECEC
	H ₂ O	KCl										
			%			Exchangeable bases (cmol _c kg ⁻¹)			cmol _c kg ⁻¹			
Ombroaquic Kandihumult												
A	5.2	4.3	30.5	41.5	28.0	6.7	3.2	1.9	0.12	0.18	0.58	6.0
B1	5.1	4.1	48.0	31.0	21.0	3.2	1.2	0.5	0.14	0.06	-	-
Btc21	5.3	4.1	61.0	17.0	22.0	0.4	0.6	0.2	0.14	0.02	0.52	1.5
Btc22	5.6	4.1	66.5	16.5	17.0	0.1	0.8	0.3	0.14	0.05	1.18	2.5
Acrudoxic Kandiuult												
Oe	4.3	3.6	-	-	-	10.4	5.7	1.5	0.24	0.41	-	-
B1	4.9	4.2	42.0	26.5	31.5	1.8	0.8	0.5	0.17	0.06	2.17	3.8
B21	5.1	4.0	52.5	21.5	26.0	0.7	0.9	0.3	0.14	0.04	2.6	4.4
Bt22	5.1	3.9	70.0	16.0	14.0	0.4	0.7	0.2	0.12	0.07	3.3	4.8
Typic Paleudult												
Ap	5.8	4.9	56.0	25.0	19.0	1.9	10	2.7	0.12	0.28	0.10	13.3
Bt21	5.3	4.4	83.5	8.0	8.5	0.7	6.7	2.1	0.17	0.19	0.21	9.5
Bto22	5.2	4.0	91.2	4.8	4.0	0.2	3.7	1.3	0.14	0.19	3.2	8.7
Bto23	5.3	3.9	93.7	1.2	5.0	0.1	3.2	1.5	0.14	0.19	2.3	7.8

Table 2. Total, DCB-extractable and oxalate-extractable Fe, Al and Si in < 2mm soil.

Horizon	Depth cm	Color	Oxalate			DCB			Total		
			Fe	Al	Si	Fe	Al	Si	Fe	Al	Si
			%			%			%		
Ombroaquic Kandihumult											
A	0-30	10YR 2/2	0.14	0.32	0.05	3.52	1.00	0.17	4.17	8.28	21.1
B1	30-44	7.5YR 3/4	0.26	0.34	0.05	3.79	0.86	0.18	4.49	9.09	23.4
Btc2	44-77	5YR 3/4	0.40	0.37	0.05	4.06	0.73	0.19	5.77	6.45	21.4
Btc22	77-170	10R 3/4	0.40	0.39	0.05	4.08	0.80	0.15	5.87	15.6	20.0
Acrudoxic Kandiuult											
Oe	0-14	10YR 2/1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B1	14-45	10YR 3/6	0.54	0.54	0.02	4.35	1.05	0.14	6.75	10.2	21.8
B21	45-100	10YR 6/8	0.15	0.35	0.03	4.64	0.84	0.19	6.27	13.2	21.1
Bt22	100-170	10YR 6/8	0.54	0.88	0.05	5.19	0.95	0.17	8.21	14.4	18.2
Typic Paleudult											
Ap	0-18	7.5YR 3/4	0.45	0.46	0.03	4.94	0.93	0.12	8.38	14.1	21.8
Bt21	18-42	7.5YR 3/4	0.19	0.34	0.06	4.92	0.94	0.18	7.32	15.9	16.1
Bto22	42-100	7.5YR 4/6	0.15	0.36	0.05	4.26	0.69	0.18	7.28	16.0	16.5
Bto23	100-170	7.5YR 6/6	0.15	0.38	0.09	4.64	0.93	0.35	7.25	16.1	16.9

The pedon of the soil situated in the upper topographic level (Figure 1) and classified as Acrudoxic Kandiuult (Soil Survey Staff, 1992) has 0.54 % Fe_o in the B1 and Bt22 horizons and 0.15 % Fe_o in the B21 horizon. In this soil, Fe_d also shows a slight increase with increasing depth. The amounts range from 4.35 % Fe_d in the B1 horizon to 4.64 % Fe_d in the B21 horizon and to 5.19 % Fe_d in the Bt22 horizon. Similarly, total iron changes from 6.75 % in the B1 horizon to 6.27 % in the B21 horizon and then to 8.21 % in the Bt22 horizon (Table 2).

In this soil, Fe_o was low in the B1 and Bt22 horizons and very low in the B21 horizon. Therefore,

only 12.4, 3.2, and 10.4 % of the iron extracted with dithionite is amorphous in the B1, B21, and Bt22 horizons, respectively. Also, according to Parfitt and Childs (1988), the amount of ferrihydrite in the pedon is 0.25 % and 0.95 %, and the B1 and Bt22 horizons have the greatest proportions of this mineral (Table 3).

In the Acrudoxic Kandiuult, the iron obtained by dithionite also showed predominance of crystalline iron oxides (goethite and hematite). The quantities of these oxides are relatively high, and the highest amount appears in the Bt22 horizon (Table 2). The amounts of Fe in goethite and hematite in this soil, calculated from

Table 3. Genetic evaluation of profile distribution of iron oxide in the study soils.

Horizon	Depth cm	Ferrihydrite [†]	Fe _d -Fe _o	Fe _e -Fe _d	Fe _o /Fe _d	Fe _d /Fe _t	Clay/Fe _d
		----- % -----					
Ombroaquic Kandihumult							
A	0-30	0.24	3.38	0.65	0.04	0.84	8.66
B1	30-44	0.44	3.53	0.70	0.07	0.84	12.66
Btc21	44-77	0.68	3.66	1.71	0.10	0.70	15.02
Btc22	44-170	0.68	3.68	1.79	0.10	0.69	16.30
Acridoxic Kandiuult							
B1	14-45	0.92	3.81	2.4	0.12	0.64	9.65
B21	45-100	0.25	4.49	1.63	0.03	0.74	11.31
Bt22	100-170	0.92	4.65	3.02	0.10	0.63	13.48
Typic Paleudult							
Ap	0-18	0.76	4.49	3.44	0.09	0.59	11.33
Bt21	18-42	0.32	4.73	2.4	0.04	0.67	16.97
Bto22	42-100	0.25	4.11	3.02	0.03	0.58	21.41
Bto23	100-170	0.25	4.49	2.61	0.03	0.64	20.10

[†]Estimated using Fe_o x 1.7 (Parfitt and Childs, 1988).

the difference of Fe_d and Fe_o, are 3.8, 4.5 and 4.6 % in the B1, B21, and Bt22 horizons, respectively. This constitutes 56.4, 71.6, and 56.6 % of the total iron in these horizons, revealing the presence of a substantial amount of iron in the form of crystalline oxides, principally in the B21 horizon. This indicates that of the total iron, only 35.5 % in the B1 horizon, 26 % in the B21 horizon and 36.8 % in the Bt22 horizon appear as a structural component of the silicates or ironmenite.

In this soil, the Fe_o/Fe_d ratio is also very low, varying from 0.03 to 0.12; with the lowest ratio for the B21 horizon. These values show a high degree of crystallinity of iron oxides, especially in the B21 horizon (Table 3). Furthermore, the clay/Fe_d ratio increases with soil depth, which, according to Juo *et al.* (1974), is evidence that the clay migrates along with the iron oxides (Table 3).

The pedon of the soil classified as Typic Paleudult (Soil Survey Staff, 1992), situated in the lower topographical level (Figure 1), exhibits a decrease in the amount of iron extracted by oxalate. The Ap horizon has 0.45 % Fe_o and the Bt21 horizon 0.19 %, while the Bto horizons have 0.15 % Fe_o. However, the iron extracted with dithionite remains relatively constant with depth: the values range from 4.9 % Fe_d in the Ap and Bt21 horizons to 4.2 % Fe_d in the Bto22 horizon, and then to 4.6 % Fe_d in the Bto23 horizon. Total iron in this soil is found in a proportion slightly larger than that of the other soils; furthermore, the total iron in this pedon shows a slight decrease with the increasing depth. The values range from 8.4 to 7.3 % Fe_t in the Ap, Bt21 and Bto22 horizons, then changing to 7.25 % Fe_t in the Bto23 horizon.

The amounts of iron extracted with oxalate are very low indicating relatively low content of amorphous iron. Only 9.1 % of the total free iron extracted with dithionite is in a non-crystalline form in the Ap horizon; in the other horizons, these forms are found in a proportion which varies between 3.2 and 3.8 %. The amount of ferrihydrite decreases with depth. The Ap horizon has 0.76 % ferrihydrite, the Bt21 horizon 0.32 % and the Bto22 and Bto23 horizons 0.25%.

In the Typic Paleudult, the proportion of iron oxides extracted with dithionite is very high. The amount estimated from the difference of Fe_d and Fe_o indicates that the soil has 4.5 % crystalline iron oxides in the Ap and Bto23 horizons and 4.7 and 4.1 % in the Bt21 and Bto22 horizons, respectively. This means that of the total iron, 53.5, 61.9, 64.6 and 56.4 %, occurs as crystalline oxides (goethite and hematite) in the Ap, Bto23, Bt21, and Bto22 horizons. This shows that a little less than half the total iron still remains in the structure of the silicates.

In this soil, the active iron ratio Fe_o/Fe_d is also very low with few changes in the horizons of the pedon. The values obtained vary from 0.03 to 0.09 (Table 3); this result might be related to highly crystalline oxide forms. As illustrated in Table 3, the clay/Fe_d ratio in the Typic Paleudult reveals an increase with depth.

As seen in Table 2, the soils studied have similar amounts of aluminum when obtained by total and partial dissolution. In extraction with dithionite, substantial amounts of aluminum are present suggesting much of this aluminum comes from the iron oxides and from the solubility of hydroxy-aluminum interlayers. The iron oxides, goethite and hematite, contain

substantial proportions of structural aluminum (Bigham *et al.*, 1978a; McKeague *et al.*, 1971). Furthermore, the amounts of aluminum obtained with oxalate are similar in the three soils studied, probably because this reagent dissolves very small proportions of gibbsite (Bigham *et al.*, 1978b; Parfitt and Childs, 1988).

The amounts of silicon obtained by partial dissolution are similar for the three soils studied (Table 2). Also, similar amounts of silicon were obtained by total dissolution. Si₀ occurred in extremely low amounts, revealing that the oxalate does not dissolve the aluminosilicates and suggests allophane is not present (Lee *et al.*, 1989; Parfitt and Childs, 1988).

CONCLUSION

The results presented here show that the soils contain important amounts of iron oxides. The amounts of iron extracted with dithionite are very high, while the amounts obtained with oxalate are quite low (Figure 3). This demonstrates that for the most part, iron oxides exist in soil in a crystalline state; only a small portion is present in a noncrystalline state. In fact, the study shows that no more than 12 % of the free (DCB extractable) iron in these soils occurs in a noncrystalline state. This suggests the presence of hematite and goethite. The Fe_d/Fe_t ratio shows that Ombroaquic Kandihumult soil undergoes the greatest weathering; it is followed by Acrudoxic Kandiuult and then Typic Paleudult. The study showed that in these soils, more than 60% of the

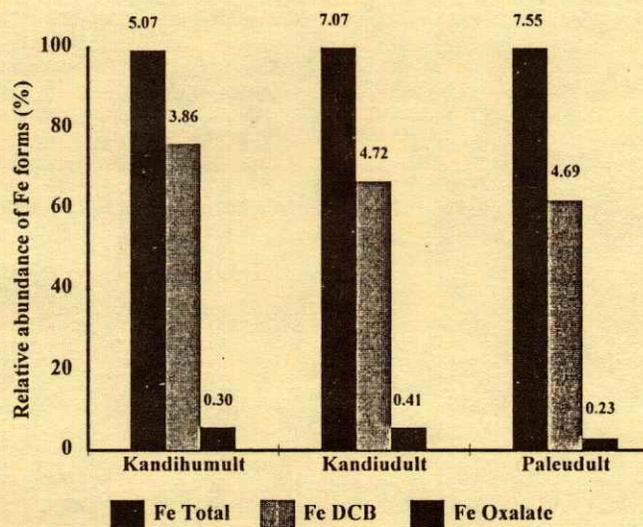


Figure 3. The average percentage of relative abundance of the forms of Fe in the soil samples.

total iron turned into iron oxide. The clay/Fe_d ratio also suggests that iron oxides migrate with the clay.

The substantial quantities of aluminum obtained with dithionite probably come from the structural aluminum present in goethite and hematite. The amounts of silicon extracted with oxalate are also very low, showing that this reagent does not dissolve aluminosilicates (Parfitt and Childs, 1988).

The results suggest an advanced stage of alteration in the soils studied and also show that mineralogical evolution tends toward desilication and iron oxides formation. The poor fertility of the soils for crop growth is due usually to a combination of aluminum toxicity, high proportion of crystalline iron oxides, calcium and magnesium deficiency. Thus, the natural vegetation growing on these soils has an invaluable role in ecological stability and maintenance of biodiversity.

REFERENCES

- Bernas, B. 1968. A new method for decomposition and comprehensive analysis of silicates by atomic absorption spectrometry. *Anal. Chem.* 40: 1682-1686.
- Bigham, J.M., D.C. Golden, L.H. Bowen, S.W. Buol, and S.B. Weed. 1978a. Iron oxide mineralogy of well-drained Ultisols and Oxisols: I. Characterization of iron oxide in soil clays by Mössbauer spectroscopy, x-ray diffractometry and selected chemical techniques. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42: 816-825.
- Bigham, J.M., D.C. Golden, S.W. Buol, S.B. Weed, and L.H. Bowen. 1978b. Iron oxide mineralogy of well-drained Ultisols and Oxisols: II. Influence on color, surface area and phosphate retention. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42: 825-830.
- Black, C. A. (Ed.) 1967. *Methods of Soil Analysis*, ASA Monograph, Madison, Wisc.
- Blakemore, L.C., P.L. Searle, and B.K. Daly. 1987. *Methods for chemical analysis of soils*. New Zealand Soil Bureau Scientific Report 80.
- Blume, H.P. and U. Schwertmann. 1969. Genetic evaluation of profile distribution of aluminum, iron and manganese oxides. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 33: 438-444.
- Boul, S.W. and P.A. Sánchez. 1986. Red soils in the Americas: Morphology, classification and management. *In: Institute of Soil Science, Academia Sinica (ed.)*. Proceeding of the International Symposium. Science Press, Beijing, China.
- Campos, A. 1995. Physical and mechanical properties of three tropical forest soils on limestone in Chiapas, Mexico. (submitted to *Catena*).
- Campos, A. y D. Dubroeuq. 1992. Características químicas de tres suelos tropicales sobre caliza bajo selva en Chiapas, México. *Turrialba* Vol. 42(2): 169-177.
- Chao, T.T. and Liyi Zhou. 1983. Extraction techniques for selective dissolution of amorphous iron oxides from soils and sediments. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47: 225-232.
- Childs, C.W. 1985. Towards understanding soil mineralogy. II. Notes on ferrihydrite. N. Z. Soil Bureau Laboratory Report CM7, DSIR, New Zealand.

- Day, P. R. 1965. Particle fractionation and particle-size analysis. pp. 545-567. In: C. A. Black *et al.* (eds). Methods of soil analysis, Part 1. Agronomy 9. Madison, WI.
- Fey, M.V. 1983. Hypothesis for the pedogenic yellowing of red soil materials. Techn. Commun., Dept. Agric. Fisheries, Dep. South Africa 18: 130-136.
- Juo, A.S.R., F.R. Moormann, and H.O. Maduakor. 1974. Forms and pedogenetic distribution of extractable iron and aluminum in selected soils of Nigeria. *Geoderma* 11: 167-179.
- Kunze, G.W. and J.B. Dixon. 1986. Pretreatment for mineralogical analysis. pp. 91-100. In: A. Klute (ed.). Methods of soil analysis. Part 1. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Lal, R. 1989. Agroforestry systems and soil surface management of a tropical Alfisol: IV. Effects on soil physical and mechanical properties. *Agroforestry Systems* 8: 197-215.
- Lee, R., M.D. Taylor, B.K. Daly, and J. Reynolds. 1989. The extraction of Al, Fe and Si from a range of New Zealand soils by hydroxylamine and ammonium oxalate solutions. *Aust. J. Soil Res.* 27: 377-388.
- Lindsay, W.L. 1991. Iron oxide solubilization by organic matter and its effect on iron availability. *Plant Soil* 130: 27-34.
- McKeague, J.A. and J.H. Day. 1966. Dithionite and oxalate extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. *Can. J. Soil Sc.* 46: 13-22.
- McKeague, J.A., J.E. Brydon, and N.M. Miles. 1971. Differentiation of forms of extractable iron and aluminum in soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 35: 33-38.
- Mehra, O.P. and M.L. Jackson. 1960. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays Clay Miner.* 5: 317-327.
- Page, A. L. (Ed.). 1982. Methods of soil analysis: chemical and microbiological properties. Part 2. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Parfitt, R.L. and C.W. Childs. 1988. Estimation of forms of Fe and Al: A review and analysis of contrasting soils by dissolution and mössbauer methods. *Aust. J. Soil Res.* 26: 121-144.
- Sanchez, P.A. 1976. Properties and management of soils in the tropics. Wiley, New York.
- Sanchez, P.A. and J.G. Salinas. 1981. Low-input technology for managing Oxisols and Ultisols in tropical America. *Adv. Agronomy* 34: 279-406.
- Schwertmann, U. 1964. The differentiation of iron oxide in soils by a photochemical extraction with acid ammonium oxalate. *Z. Pflanzenemähr., Dung., Bodenkd.* 105: 194-202 (in German).
- Schwertmann, U. 1990. Pedogenic significance of iron oxide minerals in highly weathered tropical soils. 14th International Congress of Soil Science. Kyoto, Japan. VII-3: 88-93.
- Schwertmann, U. 1991. Solubility and dissolution of iron oxides. *Plant Soil* 130: 1-25.
- Soil Survey Staff. 1992. Key to soil taxonomy, Sixth edition, 1994. USDA, Washington, D. C.
- Stucki, J.W. (ed.). 1985. Iron in soils and clay minerals. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland.
- Uehara, G. and G. Gillman. 1981. The mineralogy, chemistry, and physics of tropical soils with variable charge clays. Westview Press/Boulder, Colorado.
- Vodyanitskiy, YU.N. 1992. Parallel and consecutive chemical extractions for analysis of forms of iron in soils. *Eurasian Soil Science* 24(3): 119-129.
- Walker, Ann L. 1983. The effects of magnetite on oxalate and dithionite extractable iron. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47: 1022-1026.
- Whitton, J.S. and G.J. Churchman. 1987. Standard methods for mineral analysis of soil survey samples for characterization and classification in N. Z. Soil Bureau. N. Z. Soil Bur. Sci. Rep. 79.

VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA HUMEDAD EN UN RHODIC FERRASOL REGADO POR ASPERSIÓN

Spatial Variability of the Moisture in a Rhodic Ferrasol under Sprinkler Irrigation

Hanoi Medina¹, Angel Utset¹, Teresa López², Reynaldo Rey²

RESUMEN

Se emplearon técnicas geoestadísticas y neutrónicas para el análisis de la variabilidad espacial de la humedad en un Rhodic Ferrasol antes y después de un riego por aspersión. La humedad se midió utilizando una sonda de neutrones y a las profundidades de 0 a 20, 20 a 40, 40 a 60 y 60 a 80 cm, a partir de muestras tomadas en cuadrículas y bajo un marco de plantación determinado. La pluviometría se midió al lado de cada tubo de acceso. No se encontró relación entre la variabilidad espacial de la pluviometría y la de la humedad a las catorce horas del riego. La variabilidad espacial de la humedad antes y pasadas la catorce horas de la irrigación para cada uno de los horizontes resultó muy similar, lo que indica una rápida redistribución de la lámina de riego.

SUMMARY

Geo-statistical techniques were used for the soil-moisture spatial variability analysis in a Rhodic Ferrasol before and after sprinkler irrigation. The soil moisture was measured through a neutron gauge at 0 to 20, 20 to 40, 40 to 60 y 60 to 80 cm depth. The depth of irrigation water was measured close to each access tube. There was not found any relation between the irrigation water spatial variability and that of soil moisture, fourteen hours after irrigation. The moisture spatial variability before and after irrigation was quite similar, which means that a fast soil redistribution took place.

INTRODUCCION

Una característica importante del riego por aspersión es la distribución uniforme del agua aplicada. Sin embargo, la caracterización de la

uniformidad de un sistema debe comprender de igual modo la variabilidad espacial de la humedad después del riego, ya que el suelo contribuye a la homogeneización de la distribución. Es lógico pensar que las mediciones de la lámina de riego y de la humedad están sujetas generalmente a variaciones espacialmente correlacionadas (Warrick *et al.*, 1986). La aproximación clásica asume que tales variaciones son aleatorias, sin embargo, el riego impone una determinada estructura a esta variabilidad, por lo que no tiene en cuenta tales interdependencias. Es por ello que un enfoque más adecuado sería considerar la pluviometría y la humedad como variables regionalizadas y emplear métodos geoestadísticos (Journel y Huijbregts, 1978; Warrick *et al.*, 1986) para caracterizar su variabilidad espacial.

Teniendo en cuenta esos elementos se trazaron los siguientes objetivos:

1. Caracterizar la variabilidad espacial de la lámina de riego de un aspersor, así como la de la humedad a diferentes profundidades, en un Rhodic Ferrasol, empleando técnicas geoestadísticas.
2. Comparar la variabilidad espacial de la lámina de riego con la de la humedad.

MATERIALES Y METODOS

El campo experimental (2500 m²) está ubicado en la Estación Experimental del Instituto de Investigaciones del Riego y Drenaje en Alquizar, provincia de La Habana, a una altitud de 5 m y pendiente cercana a cero. El suelo del área experimental está clasificado como Rhodic Ferrasol (FAO, 1980). Las investigaciones fueron ejecutadas en una plantación de banano, clon "Gran Enano" de dos años de edad, con marco de plantación en triángulo equilátero de altura 2.20 m y lado 2.55 metros.

El sistema de riego utilizado contó con miniaspersores MAMKAD 2255. El marco de puesta de la instalación de riego fue en triángulo equilátero con separación entre laterales de 6.60 m y entre miniaspersores de 7.0 metros. La zona de evaluaciones fue el área efectiva de un miniaspersor en el centro del

¹Instituto Superior de Ciencias Agropecuarias de la Habana (ISCAH).

²Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje (IIRD).

campo experimental (46,2 m²). En este lugar se colocó una red de 56 pluviómetros de diámetro interior de 93.5 mm y área de captación de 6866 mm². Al lado de cada pluviómetro se instaló un tubo de acceso de aluminio. El esquema del área experimental se representa en la Figura 1.

El riego durante la investigación fue ejecutado a 200 KPa de carga en el miniaspersor, con viento cero. El tiempo de riego fue de dos horas.

Antes y a las catorce horas del riego fue medida la humedad del suelo en los 56 puntos de medición, en cuatro horizontes de 20 cm de profundidad. Las determinaciones de la humedad se realizaron empleando una sonda de neutrones Nucletronics, modelo IPE 111, con fuente de Am²⁴¹ - Be de 30 mCi y una salida de 9.2 x 10⁴ n/s, previamente calibrada en el mismo campo experimental en que se llevaron a cabo las mediciones (López *et al.*, 1993).

Elementos de Geoestadística

La herramienta fundamental de la geoestadística es la función semivarianza, la cual según Journel y Huijbregts (1978) puede estimarse de:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [z(x_{i+h}) - z(x_i)]^2$$

donde z (x_i) es la medición tomada en un punto i, z (x_{i+h}) es la medición tomada en un punto a una distancia h del anterior y n (h) es el número de pares de puntos separados a la misma distancia h.

Al dibujar la semivarianza calculada contra la distancia de separación se obtiene el semivariograma. Los parámetros fundamentales del mismo son : (1) la "pepita" o residuo (*nugget*), considerada como la semivarianza para una distancia de separación h igual a cero. (2) La meseta o *sill*, valor asintótico que alcanza el semivariograma y el alcance o *range*, distancia para la cual se alcanza la meseta y que se considera como la separación máxima hasta la cual las mediciones se encuentran correlacionadas. (Journel y Huijbregts, 1978; Warrick *et al.*, 1986).

En todos los cálculos geoestadísticos realizados se utilizó el programa GEOESTAD (Díaz *et al.*, 1984).

RESULTADOS Y DISCUSION

En la Figuras 2 y 3 se muestran los histogramas de las humedades de 0 a 20 y de 60 a 80 cm, antes y

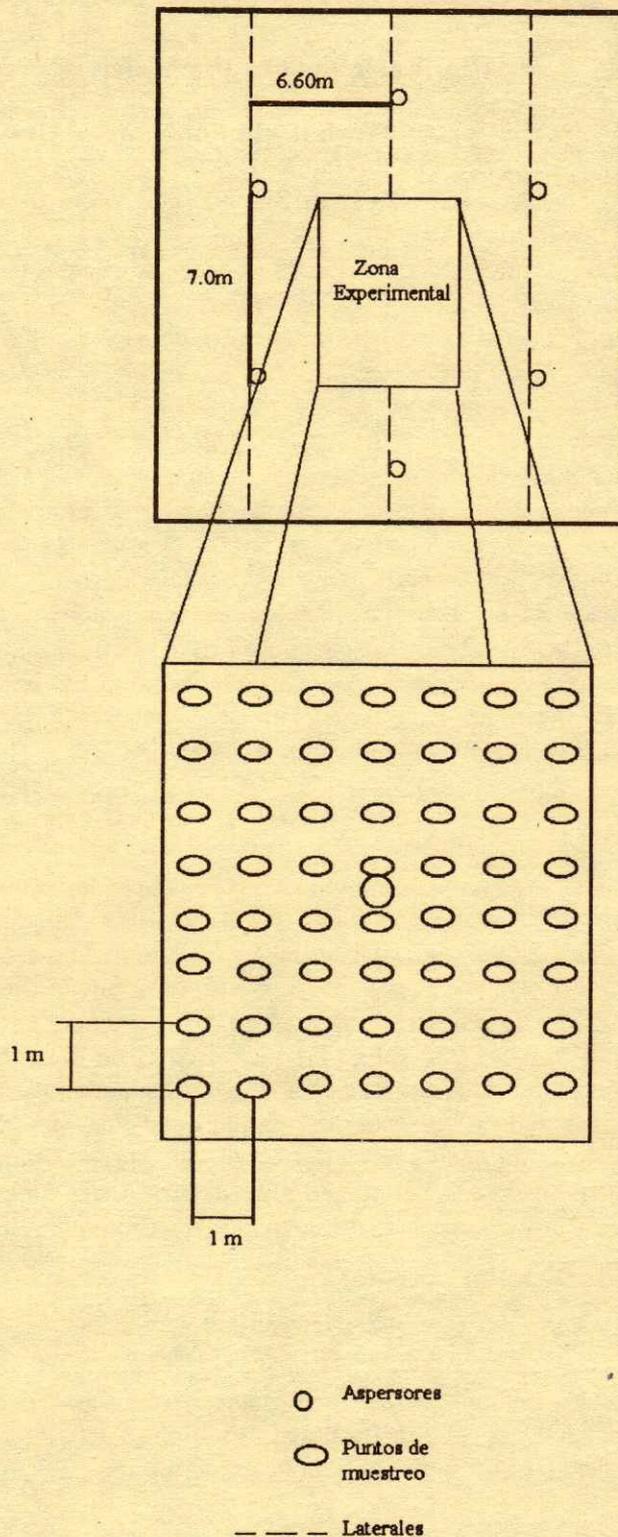


Figura 1. Esquema del área experimental.

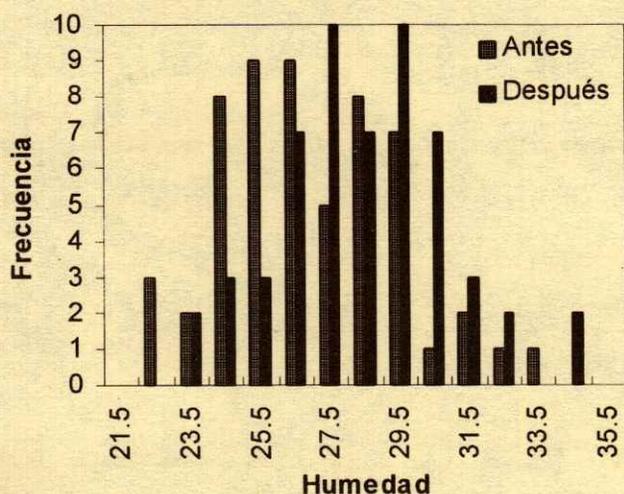


Figura 2. Histogramas de la humedad ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) de 0 a 20 cm antes y después del riego.

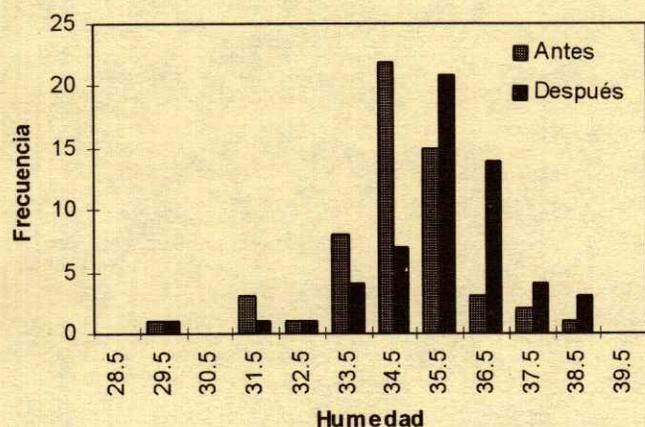


Figura 3. Histogramas de la humedad ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) de 60 a 80 cm antes y después del riego.

después del riego, los cuales son representativos del grado de homogeneidad en la distribución de la variable en los horizontes comprendidos hasta los 40 cm y de 40 a 80 cm, respectivamente. Los resultados coinciden con los obtenidos por Kutilek y Nielsen (1994), Vauclin (1982), Warrick y Nielsen (1980), según los cuales esta propiedad se distribuye normalmente. Los histogramas reflejan el incremento de la humedad después del riego.

En el Cuadro 1 se presentan los valores de algunos de los parámetros estadísticos que caracterizan la variabilidad espacial de la pluviometría, evidenciándose la pobre uniformidad del riego debido al aspersor y al apantallamiento producido por los plantones, mientras que en el Cuadro 2 se puede apreciar el incremento de la humedad para cada uno de

Cuadro 1. Parámetros de la lámina de riego.

Media	Desviación típica	Coef. de Uniformidad de Christiansen	Máximo	Mínimo
mm			mm	mm
4.327	2.65	0.47	12.5	0.1

Cuadro 2. Valores medios de la humedad y su incremento por horizontes.

Profundidad cm	Humedad antes del riego	Humedad después del riego	Incremento de la humedad
		cm^3/cm^3	
20	0.270	0.285	0.015
40	0.268	0.285	0.018
60	0.343	0.353	0.013
80	0.346	0.356	0.011

los horizontes estudiados. Si tenemos en cuenta que las mediciones de la humedad después de regar se hicieron en horas tempranas del día, lo que hace suponer que no hubo considerables pérdidas por evapotranspiración, que el suelo está reportado como de elevada conductividad hidráulica (Ruiz y Utset, 1988), y que el manto se encuentra a una gran profundidad, no cabe dudas de que ha habido un incremento de la humedad producto del riego. Por otro lado, la relativa similitud entre los incrementos para cada una de los horizontes hace suponer que ha habido una cierta redistribución, a pesar de la heterogeneidad de la lámina de riego.

Para el análisis de la variabilidad espacial de la pluviometría y de la humedad antes y después del riego a diferentes profundidades se obtuvieron los semivariogramas de cada una de las series de datos (Figuras 4, 5 y 6), así como los planos de isolíneas de

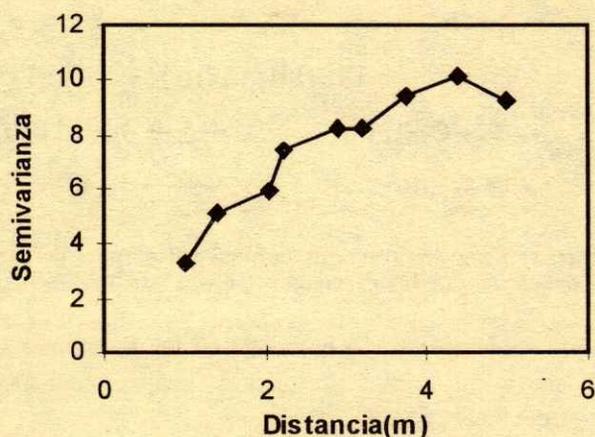


Figura 4. Semivariograma de la pluviometría (la semivarianza está expresada en mm^2).

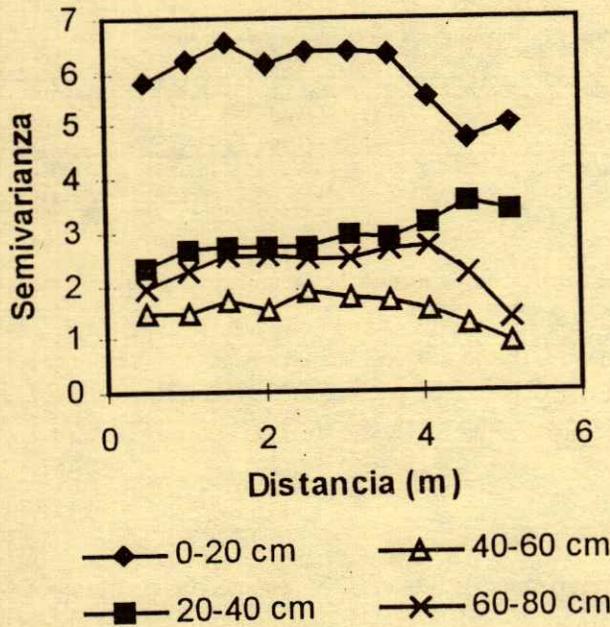


Figura 5. Semivariograma de la humedad antes del riego (la semivarianza está expresada en $10^{-4} \text{ cm}^6 \text{ cm}^{-6}$).

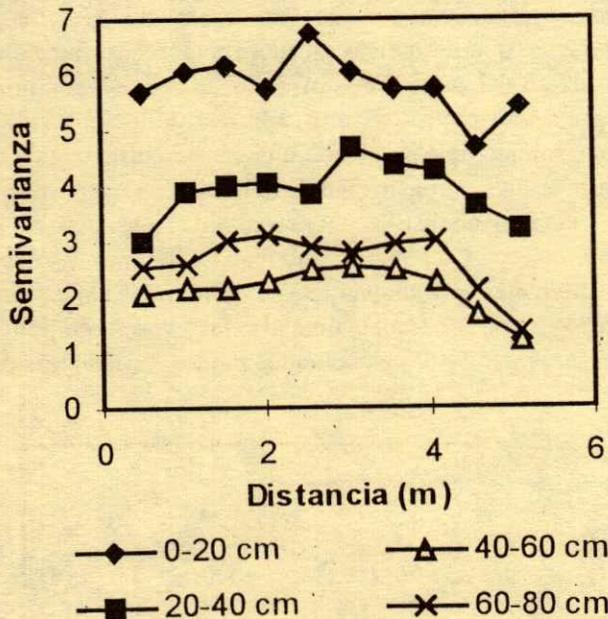


Figura 6. Semivariograma de la humedad después del riego (la semivarianza está expresada en $10^{-4} \text{ cm}^6 \text{ cm}^{-6}$).

la pluviometría y de la humedad en los horizontes 0 a 20 cm y 60 a 80 cm antes y después del riego (Figuras 7 a 11).

El semivariograma de la pluviometría (Figura 4) fue ajustado a un modelo esférico (Journel y Huijbregts, 1978)

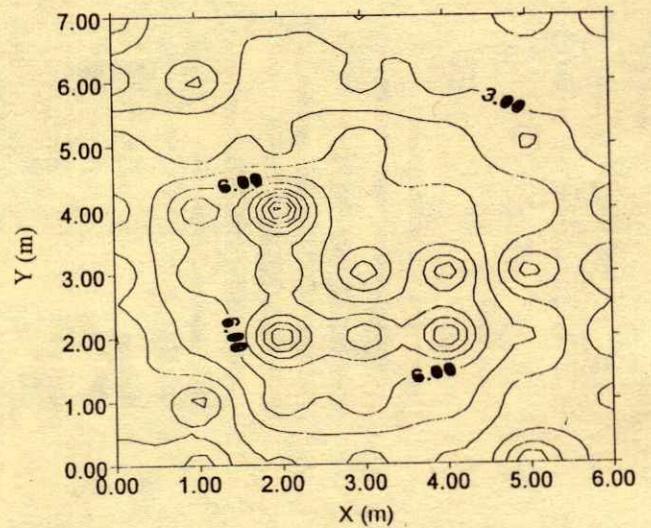


Figura 7. Plano de isocías de la pluviometría (mm).

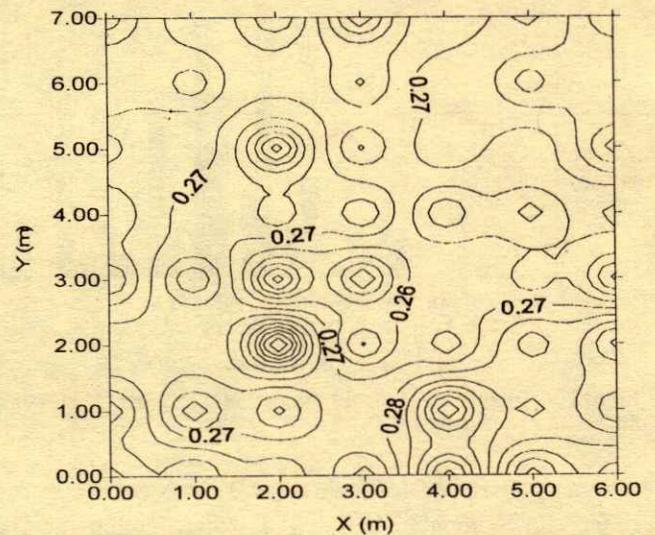


Figura 8. Plano de isocías de la humedad ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) de 0 a 20 cm antes del riego.

con los siguientes valores de residuo, meseta y alcance: 0.5 cm^2 , 9.3 cm^2 y 4 metros. La diferencia entre la meseta y el residuo es considerablemente alta. Conforme a lo explicado, ello indica que hay estructura espacial en la pluviometría, y que, por lo tanto, las variaciones están correlacionadas. Si se observa la Figura 7, se comprueba que existe una marcada relación entre el valor de la pluviometría y la posición respecto al aspersor.

El valor del alcance, que es alto, está influenciado por la manera en que se hizo el muestreo. Hasta esa distancia se puede decir que hay correlación, en

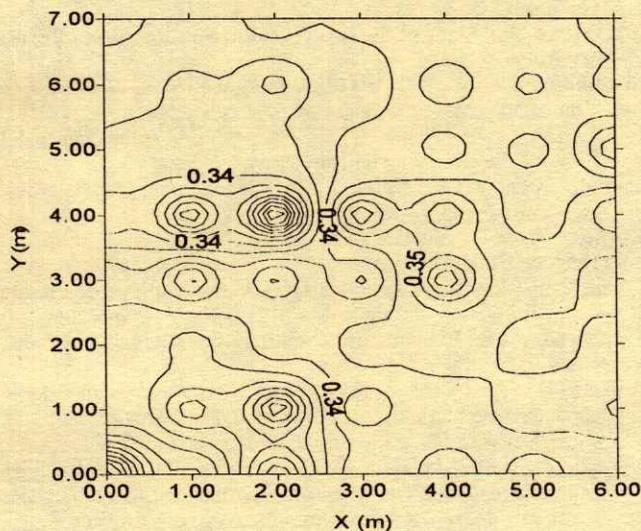


Figura 9. Plano de isoclinas de la humedad ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) de 60 a 80 cm antes del riego.

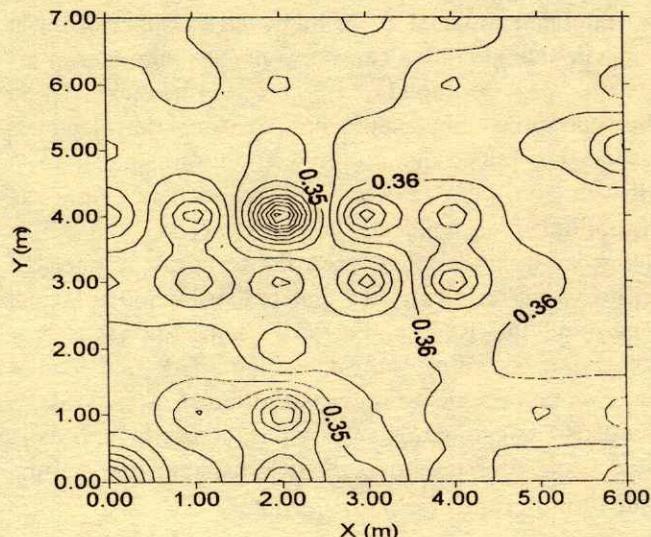


Figura 11. Plano de isoclinas de la humedad ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) de 60 a 80 cm después del riego.

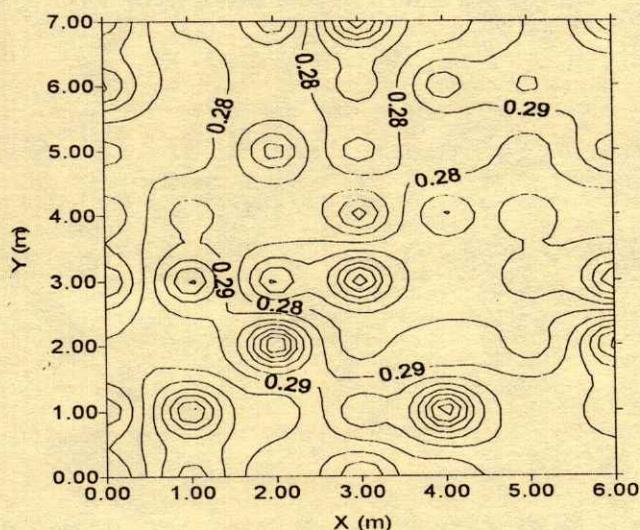


Figura 10. Plano de isoclinas de la humedad ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) de 0 a 20 cm después del riego.

cambio aquellas más distantes son independientes (Warrick *et al.*, 1986).

De estos resultados se obtiene que para estudios futuros el número de muestreos se puede racionalizar, teniendo en cuenta las características descritas.

En las Figuras 5 y 6 se aprecia lo que se conoce con el nombre de efecto residual puro que de acuerdo con Warrick *et al.* (1986) es un indicador de que, en la distribución de la humedad antes del riego no hay estructura espacial para ninguna de las profundidades, ni siquiera después del riego. En cambio, se observa una gran variabilidad en los horizontes superiores

y sobre todo en 0 a 20 cm, que debe estar relacionada con la mayor actividad biológica en esa zona. En los mapas de isoclinas se comprueba que para el horizonte más profundo (Figuras 9 y 11) la distribución de humedad es muy homogénea, en tanto que, para 0 a 20 cm (Figuras 8 y 10) hay mayores variaciones que, en cambio, no reflejan dependencia alguna con respecto al aspersor.

Comparando la Figura 6 así como las Figuras 10 y 11, con sus análogas de la pluviometría y la humedad antes del riego se puede deducir que a las catorce horas del riego la variabilidad espacial de la humedad no está relacionada con la de la pluviometría; pasado ese tiempo, la variabilidad de la distribución de la humedad en cada perfil es similar a la que había antes de la irrigación y, por lo tanto, ya el agua se ha distribuido totalmente y ha alcanzado niveles estables. El suelo, como se puede ver, ha favorecido el proceso de homogeneización y por consiguiente ha contribuido a la uniformidad del riego. Según Israelsen y Hansen (1965) la redistribución del agua después del riego debe durar alrededor de veinticuatro horas en un suelo típico. En el caso del Rhodic Ferrasol reportado como de alta conductividad hidráulica (Instituto de Suelos, 1980), este tiempo resulta menor.

CONCLUSIONES

La distribución de la lámina de riego está sujeta a una gran estructura espacial, expresada en fuertes

correlaciones en las variaciones de la pluviometría. La variabilidad espacial de la humedad es superior en la capa de 0 a 20 cm y alcanza sus niveles mínimos en las capas más profundas. En las variaciones de la humedad en el suelo no existen correlaciones espaciales, por lo que no hay estructura espacial en la distribución. No existe correspondencia entre la variabilidad espacial de la pluviometría y la de la humedad después del riego. A las 14 horas después del riego ya se ha alcanzado una redistribución total del agua en un Rhodic Ferrasol bajo un riego por aspersión con alto grado de variabilidad. Los índices en el comportamiento de la variabilidad espacial de la humedad son similares antes y pasado ese tiempo de la irrigación. En ese sentido, el suelo ha contribuido a una mayor uniformidad de la irrigación.

LITERATURA CITADA

- Díaz, M., R. Barandela, A. Utset y C. Fernández. 1994. GEOESTAD: Un sistema de computación para aplicaciones geoestadísticas. *In: Memorias de GEOINFO. 2^{do} Taller Iberoamericano de Informática en las Geociencias. La Habana, Cuba.*
- FAO. 1980. Soil maps of the world. World Soil Resources Report 60. Roma, Italia.
- Instituto de Suelos. 1980. Clasificación genética de los suelos de Cuba. Academia de Ciencias. Cuba.
- Israelsen, G. y F. Hansen. 1965. Principios y aplicaciones del Riego. Editorial Reverté, Barcelona.
- Journel, A.G. y Ch. Huijbregts. 1978. Mining geostatistics. Academic Press, Londres.
- Kutílek, M. y D. Nielsen. 1994. Soil Hydrology. Cremlingen-Destedt: Catena Verlag.
- López, T., R. Rey y F. González. 1993. Calibración de una sonda de neutrones en un suelo Ferralítico Rojo compactado. *In: Memorias de X Seminario Científico del INCA, La Habana, Cuba.*
- Ruiz, M.E. y A. Utset. 1988. Métodos para el estudio de la conductividad hidráulica y el flujo de agua a través del perfil del suelo. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias 1: 73-75.*
- Vauclin, M. 1982. Méthodes d'étude de la variabilité spatiale des propriétés d'un sol. *In: Memorias de Variabilité spatiale des processus de transfert dans les sols. Avignon, Francia.*
- Warrick, A.W. y D.R. Nielsen. 1980. Spatial variability of soil physical properties in the field. *In: D. Hillel (ed.). Applications of soil physics. Academic Press, New York.*
- Warrick, A.W., D.E. Myers y D.R. Nielsen. 1986. Geostatistical methods applied to soil science. SSSA, Agronomy Monograph no. 9.

ESTIMACION DE UN COMPONENTE DEL BALANCE DE HUMEDAD MEDIANTE REFLECTOMETRIA DE DOMINIO DEL TIEMPO

Estimation of a Component of Water Balance using Time-Domain Reflectometry

José Dimas López Martínez¹, Juan Francisco Pissani Zuñiga¹, David García Arellano²

RESUMEN

La estimación de un componente del balance de humedad permite obtener el contenido de agua del suelo, considerándose que la técnica del reflectómetro de dominio del tiempo puede ser una buena alternativa para medir el contenido de agua en el suelo *in situ*. Durante el ciclo agrícola (otoño-invierno) 1993-1994 se desarrolló un trabajo en un suelo migajón-arcilloso de la Comarca Lagunera con los objetivos de conocer el manejo del equipo TDR y evaluar la necesidad de calibración. Los resultados indican que la estimación de la humedad del suelo mediante esta técnica da mayor seguridad y rapidez que otros métodos, pero se hace necesaria la calibración del equipo (Sentry 200-Ap) en suelos migajón-arcillosos. Se concluye que la técnica del reflectómetro de dominio del tiempo puede ser un método confiable y preciso para estimar la humedad del suelo como un componente del balance de humedad.

Palabras clave: Estimación de humedad, balance del agua, reflectómetro de dominio del tiempo (TDR).

SUMMARY

The estimation of a component of water balance allows to obtain the soil water content. The technique time-domain reflectometry can be used to measure soil moisture *in situ*. Therefore, during the agricultural cycle (autumn-winter) 1993-1994 one experiment was conducted in a loamy-clay soil in the Comarca Lagunera. The objectives were to know the time-domain reflectometry equipment and to evaluate the necessity of calibration of TDR equipment. The results indicated that the estimation of soil moisture by using the TDR

equipment is more precise and time saving in regard to other methods. However, an adequate calibration of the TDR (Sentry 200-Ap) is required when used in loamy-clay soils. In conclusion, the time-domain reflectometry can be used as a reliable method to estimate soil moisture as a component of water balance.

Index words: Moisture estimation, water balance, time-domain reflectometry (TDR).

INTRODUCCION

Una herramienta útil en el cálculo de la humedad del suelo es el balance de humedad, mediante su estimación es posible resolver problemas tales como: control en el intervalo de riego, planeación de recursos de agua, pronóstico de rendimiento, clasificaciones climáticas, flujo de corriente, fluctuaciones del nivel del mar (Van Hylckama, 1956), y predicciones de incendio en el bosque (Nelson, 1959).

Se considera que la importancia del agua en el crecimiento y desarrollo de las plantas es ampliamente reconocido, asumiéndose que las estimaciones de rendimiento están basadas en la correlación entre agua almacenada en el suelo y rendimiento (Chopart y Vauclin, 1990). Es por esto, y considerando las limitaciones prácticas de los métodos de medición de humedad del suelo, que se hace necesario utilizar un método sencillo pero a la vez confiable y preciso para operaciones rutinarias de campo donde el contenido de agua debe ser medido *in situ*. La técnica TDR puede ser un método adecuado y confiable para hacer la estimación de contenidos volumétricos de agua en el suelo (Toop *et al.*, 1980), exhibiendo altos niveles de seguridad y precisión, excelente resolución espacial y temporal (Baker y Lascano, 1989; Wraith y Baker, 1991), es adaptable para un manejo automatizado (Baker y Allmaras, 1990), y generalmente no requiere calibración (Toop *et al.*, 1980). Sin embargo, Heimovaara (1993) menciona que las curvas de calibración son requeridas para hacer estimaciones de contenidos volumétricos de humedad usando TDR. Recientes estudios (Herkelrath *et al.*, 1991; Roth *et al.*,

¹Facultad de Agronomía, Colegio de Graduados, Universidad Autónoma de Nuevo León, Apartado Postal 358, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México. Tel. y Fax: (824) 8-01-01.

²Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relaciones Agua-Suelo-Planta-Atmósfera, Apartado Postal 41, 35150 Lerdo, Durango, México. Tel. y Fax: (17) 14-72-95, 14-71-90.

1992) han presentado curvas de calibración de TDR diferentes a la curva general presentada por Toop *et al.* (1980). Herkelrath *et al.* (1991) atribuyen las diferencias que ellos midieron a los altos contenidos de materia orgánica del suelo, Roth *et al.* (1992) mencionan un posible efecto de la densidad aparente el cual también fue notado por Rajkai y Rydén (1992). Teniendo esta técnica también muchas aplicaciones en campos como la ingeniería geotécnica, ciencia del suelo, procesamiento de materiales (Selker *et al.*, 1993). Pudiendo usarse adicionalmente para monitorear el contenido de agua en diversos materiales, tales como carbón, cereales, madera, concreto, lana, minería, y minerales. Considerando lo anterior, los objetivos del presente trabajo fueron: a) Dar a conocer la técnica de TDR para estimar las variaciones en el contenido de agua del suelo, como un componente del balance de humedad y b) Evaluar la necesidad de calibración del Sentry 200-Ap en un suelo de la Comarca Lagunera.

MATERIALES Y METODOS

El trabajo se efectuó en las instalaciones del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relaciones Agua-Suelo-Planta-Atmósfera, ubicado en el km 3.5 margen derecho del canal Sacramento en Gómez Palacio, Durango. El sitio tiene una localización geográfica de 26° 53" latitud norte, y 104° 40" longitud oeste. En un suelo caracterizado como migajón-arcilloso (30.3 % arena; 34 % limo y 35.7 % arcilla), respectivamente. Se tomaron muestras de humedad en cuatro sitios a las profundidades de 15, 45, 75 y 105 cm con cuatro repeticiones, desde el día 5 de octubre de 1993 hasta el 7 de febrero de 1994. Usando para la estimación de humedad el Sentry 200-Ap (Figura 1) mediante el cual se recolectó información de los parámetros M (cambio en la frecuencia de resonancia de la constante dieléctrica del suelo) y D (contenido volumétrico de humedad para cada profundidad considerada), evaluando adicionalmente la humedad del suelo gravimétricamente (θ) y comparándola con la obtenida por TDR para ver la necesidad de efectuar calibración.

RESULTADOS Y DISCUSION

En el Cuadro 1 se presenta la información resumida de humedad por TDR (D), el cambio en la frecuencia de resonancia (M), y el contenido de agua en el suelo

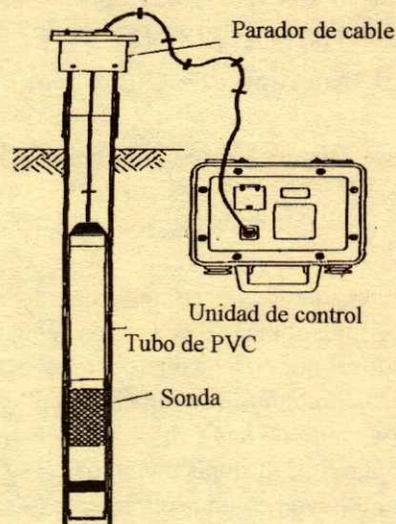


Figura 1. Accesorios del Sentry 200-Ap.

obtenida gravimétricamente (θ) durante el tiempo de evaluación.

En dicho cuadro se observa que hay una diferencia marcada entre los valores de humedad recolectados por TDR y gravimetría (Figura 2), por lo cual es necesario obtener los nuevos coeficientes de regresión para obtener la curva de calibración.

Los resultados anteriores coinciden con lo reportado por Heimovaara, 1993; Herkelrath, 1991; Roth *et al.*, 1992; y Rajkai y Rydén, 1992, quienes mencionan que en suelos arcillosos nuevas curvas de calibración son requeridas para la estimación de lecturas de humedad.

Para ajustar los datos de humedad recolectados, se procedió a utilizar un programa de regresión múltiple denominado REGRE.UANL, que analizó las variables: Y=contenido de humedad gravimétrico(θ), X1 (cambio en la frecuencia de resonancia M) y X2 el contenido de humedad obtenido por TDR (D). Se usó para encontrar la relación entre las variables referenciadas anteriormente, un modelo lineal de primer orden con dos variables independientes que se enuncia como:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \epsilon_i$$

La información de los Cuadros 2 y 3 muestra el ANDEVA, los intervalos de confianza al 99 % y los coeficientes de regresión que se estimaron para la nueva calibración del equipo.

Se observa en el Cuadro 2 que en el análisis de varianza realizado se detecta diferencia altamente significativa entre las variables involucradas en el

Cuadro 1. Lecturas de humedad % (D), cambio en la frecuencia de resonancia (M) y contenido de agua en el suelo % (θ). CENID-RASPA. 1994.

M	D	θ
3770	18.0	26.50
3317	7.4	23.07
3234	5.8	24.06
3236	5.9	23.57
3740	17.2	25.57
3297	7.0	24.51
3229	5.7	27.27
3228	5.7	23.89
3460	10.3	26.39
3229	5.7	22.71
3156	4.0	24.18
3157	4.5	21.69
3372	8.5	27.69
3195	5.1	27.55
3152	4.4	31.15
3457	10.2	31.29
3163	4.6	28.06
3183	4.9	31.49
3371	8.4	27.69
3952	23.9	37.84
3998	25.7	30.57
3972	24.7	29.11
3943	23.6	26.06
3434	9.7	29.82
3158	4.5	25.21
3193	5.1	27.91
3417	9.4	28.51
3188	5.0	25.56
3220	5.6	26.23
3310	7.2	27.76
3744	17.3	29.38
3675	15.4	12.50
3689	15.8	16.57
3624	14.1	17.96
3714	16.5	13.58
4065	28.4	38.01
4024	26.7	43.69
4043	27.5	39.03

modelo, es decir, hay una relación funcional, donde el valor de R^2 (54 %) es el porcentaje de variación que es explicada por el modelo. Los coeficientes de regresión que se presentan en el Cuadro 3 son los nuevos factores de calibración para el equipo. Se logra la calibración al insertar en la memoria del equipo TDR los coeficientes de regresión, el cual automáticamente ajustara la nueva curva de calibración. El modelo de regresión múltiple generado en este trabajo se presenta a continuación:

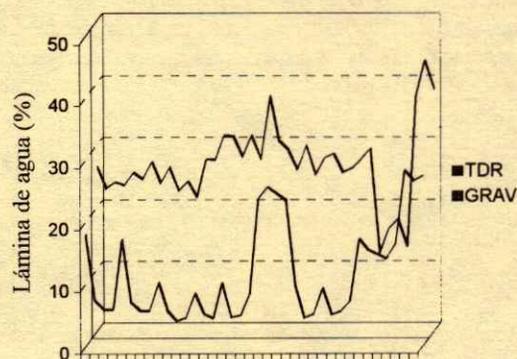
Cuadro 2. Análisis de varianza en regresión múltiple. CENID-RASPA. 1994.

FV	gl	SC	CM	Fc	P>F
Regresión	2	54.4289	477.2145	22.2874	0.00
Error	37	792.2380	21.4118		
Total	39	1746.6670			

$R^2 = .54$

Cuadro 3. Intervalos de confianza al 99 %. CENID-RASPA. 1994.

	Coefficiente de regresión	Límite inferior	Límite superior
β_0	351.100	188.885	513.314
β_1	-0.108	-0.162	-0.055
β_2	4.631	2.516629	6.745

**Figura 2. Valores de humedad obtenidos por TDR (D) y gravimétricos (θ). CENID-RASPA. 1994.**

$$Y = 351.100 - 0.108X_1 + 4.631X_2$$

donde:

- Y = Contenido de humedad gravimétrico (θ)
- X₁ = Cambio en frecuencia de resonancia (M)
- X₂ = Contenido de humedad por TDR (D)

CONCLUSIONES

1. Se sugiere seguir realizando estudios similares, ya que este trabajo ha mostrado que la técnica TDR puede ser una herramienta adecuada para realizar estimaciones del contenido de agua en el suelo en estimaciones periódicas, de acuerdo con los valores del coeficiente de determinación (R^2) de 0.54.
2. Se ha verificado que en suelos donde su composición granulométrica tenga predominancia en el contenido de

arcilla, es necesario obtener la curva de calibración, ya no es suficiente con funciones de compensación. Los coeficientes de regresión del modelo estimado $Y = 351.100 - 0.108X_1 + 4.631X_2$ son necesarios para obtener la calibración.

LITERATURA CITADA

- Baker, J.M. y R.R. Allmaras. 1990. System for automating and multiplexing soil moisture measurement by time-domain reflectometry. *Soil Science Soc. Am. J.* 54: 1-6.
- Baker, J.M. y R.J. Lascano. 1989. The spatial sensitivity of time-domain reflectometry. *Soil Science Soc. Am.* 147: 378-384.
- Chopart, J.L. y M. Vauclin. 1990. Water balance estimation model: field test and sensitivity analysis. *Soil Science Soc. Am. J.* 54: 1377-1384.
- Friedman, J. 1976. Dielectric constant measuring apparatus. US patent 3 965 416. Date issues: 22 June 1976.
- Heimovaara, T.J. 1993. Design of triple wire time-domain reflectometry probes in practice and theory. *Soil Science Soc. Am. J.* 57: 1410-1417.
- Herkelrath, W.N., S.P. Hamburg y F. Murphy. 1991. Automatic real-time monitoring of soil moisture in a remote field area with time domain reflectometry. *Water Resources Res.* 27: 857-864.
- Nelson, R.M. 1959. Drought estimation in southern forest fire control. US Forest Service Southeast, Forest Experiment Station. Paper 99.
- Rajkai, K. y B.E. Rydén. 1992. Measuring areal soil moisture distribution with the TDR method. *Geoderma* 52: 73-85.
- Roth, C.H., M.A. Malicki y R. Plagge. 1992. Empirical evaluation of relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibration soil moisture measurements by TDR. *Soil Science Soc. Am. J.* 43: 1-13.
- Toop, G.C., J.L. Davis y A.P. Annan. 1980. No-invasive time domain reflectometry moisture measurement probe. *Soil Science Soc. Am. J.* 57: 934 - 936.
- Selker, J.S., L. Graaf y T. Steenhuis. 1993. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Res.* 16: 574-582.
- Van Hylckama, T.E.A. 1956. The water balance of the earth. Laboratory of climatology publication 9(2): 57-117.
- Wraith, J.M. y J.M. Baker. 1991. High resolution measurement of root water uptake using automated time-domain reflectometry. *Water Resources Res.* 25: 2367-2376.

COEFICIENTES DE CALIBRACION DEL REFLECTOMETRO DE DOMINIO DEL TIEMPO EN SUELOS DE LA COMARCA LAGUNERA

Calibration Coefficients of Time Domain Reflectometry in Soils of the Comarca Lagunera

José Dimas López-Martínez¹ y Juan F. Pissani-Zuñiga²

RESUMEN

Considerando las limitaciones prácticas de los métodos de medición de agua en el suelo, es necesario utilizar un método sencillo pero confiable y preciso para operaciones rutinarias de campo donde la humedad deba ser medida *in situ*. La técnica TDR puede ser un método adecuado para este fin. El objetivo del trabajo fue evaluar la necesidad de calibración del Sentry 200-Ap. El estudio se efectuó en el ciclo agrícola (otoño-invierno) 1995-1996. En el laboratorio de suelos se colocaron en columnas cuatro suelos caracterizados como: arena, franco (Pancho Villa), migajón-arcilloso (CENID-RASPA) y migajón-arcilloso (Venecia). En cada columna la humedad del suelo fue estimada durante tres meses. Se calibró el TDR para cada suelo usando los valores de humedad obtenidos por gravimetría. Los resultados para el suelo arena muestran valores de R^2 de 0.42 que hacen necesario la calibración. El modelo cuadrático es el que mejor ajustó esta relación ($R^2=0.80$), para el suelo franco y los suelos migajón-arcilloso (Venecia y CENID-RASPA). Se concluyó que se necesita obtener factores de calibración para los diferentes tipos de suelo.

Palabras clave: Reflectómetro de dominio del tiempo (TDR), calibración, humedad del suelo.

SUMMARY

The limitations of the methods for soil moisture estimation make it necessary a single, and precise method for *in situ* measurements. The TDR technique may be an adequate method for this purpose. Therefore, the objective of this work was to calibrate the

Sentry 200-Ap. This study was performed from October 1995 to January 1996. Soil samples named sand, silt (Pancho Villa), silty-clay (Cenid-Raspa), and silty-clay (Venecia), were placed in columns. In each column soil moisture was estimated during three months. The TDR was calibrated for each soil texture using the soil moisture evaluations with the TDR and soil moisture, determined by gravimetry. The results for the sandy texture showed values of R^2 (0.42), thus the calibration of the probe for sandy soil is necessary. The silty soil data had a better fit with a quadratic model R^2 0.80. In the other soils silty-clay (Venecia and CENID-RASPA) the results were similar. The main conclusion of this study is that it is necessary to find a calibration factor for different types of soils.

Index words: Time domain reflectometry, calibration, soil moisture.

INTRODUCCION

Para medir el contenido de agua *in situ*, existe una variedad de métodos disponibles: tensiómetros, bloques de resistencia, dispersor de neutrones, capacitómetros y reflectómetros de dominio del tiempo (TDR) entre lo más usuales. Típicamente se requieren algunas calibraciones de los métodos o instrumentos utilizados. Sin embargo, no todas las técnicas son iguales, ni aplicables a todas las situaciones, por lo tanto, es importante seleccionar un método viable para obtener datos reales y reproducibles. La técnica TDR puede ser un método adecuado y confiable (Toop *et al.*, 1980), exhibiendo alto niveles de seguridad y precisión, excelente resolución espacial y temporal (Baker y Allmaras, 1990), y generalmente no requiere calibración (Toop *et al.*, 1980). Sin embargo, Heimovaara (1993) menciona que se requieren curvas de calibración para hacer estimaciones de contenidos volumétricos de humedad usando TDR. Recientes estudios (Roth *et al.*, 1992) han presentado curvas de calibración de TDR diferentes a la curva general presentada por (Toop *et al.*, 1980), atribuyendo las diferencias que ellos midieron al alto contenido de materia orgánica del

¹ Facultad de Agricultura y Zootecnia, Universidad Juárez del Estado de Durango, Apartado Postal 1-142, Gómez Palacio, Durango, México.

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

suelo y mencionan el posible efecto de la densidad aparente, el cual también fue notado por Rajkai y Ryden (1992). Esta técnica tiene aplicaciones en campos como la ingeniería geotécnica, ciencia del suelo, procesamiento de materiales (Selker *et al.*, 1993) y se puede usar para monitorear contenidos de agua en diversos materiales, tales como carbón, cereales, madera, concreto, lana y minerales.

El principio básico de funcionamiento del TDR, mostrado en la Figura 1, estriba en medir la función de respuesta del complejo dieléctrico (suelo-agua) utilizando señales de entrada de frecuencia de microondas mediante electrodos separados por un anillo aislante; estos electrodos responden a un comportamiento capacitivo, la relación entre la capacitancia con un dieléctrico y la capacitancia al vacío recibe el nombre de constante dieléctrica. El aparato cuenta con un oscilador de frecuencias de resonancia preestablecida como referencia. Calcula la diferencia entre la frecuencia de resonancia obtenida con la muestra y la frecuencia obtenida al calibrar el medidor y relaciona el porcentaje de humedad en volumen con esta diferencia mediante la siguiente fórmula:

$$D = F_0 \exp (F_1 M) + F_2 \quad (1)$$

donde:
 F_0 , F_1 y F_2 son los coeficientes de calibración obtenidos por el fabricante.

M representa la humedad (% en volumen) y

D representa la diferencia en la frecuencia medida por la unidad de control (López y Pissani, 1994).

El objetivo de este trabajo fue evaluar la necesidad de calibración del dispositivo Sentry 200-Ap en cuatro suelos de la Comarca Lagunera.

MATERIALES Y METODOS

El trabajo se efectuó en el Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relaciones Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (CENID-RASPA) ubicado en el km 3.5 margen derecho del canal Sacramento en Gómez Palacio, Durango, con una localización geográfica 26° 53' norte y 104° 40' oeste.

Se emplearon muestras de suelo que fueron recolectadas de cuatro sitios diferentes, que se caracterizaron con los nombres de arena (cauce del río), franco (Pancho Villa), migajón-arcilloso (CENID-RASPA), migajón-arcilloso (Venecia); estos fueron enviados al laboratorio de la Facultad de Agricultura y

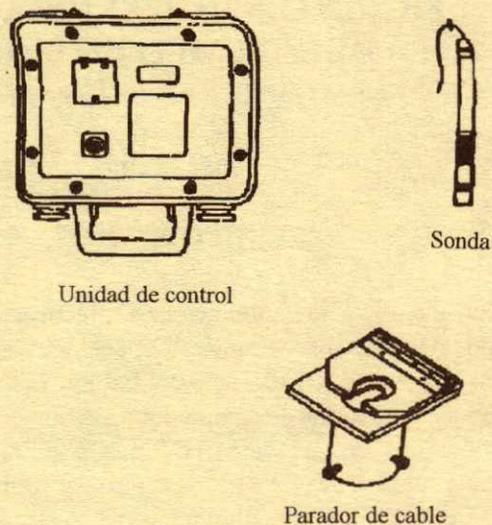


Figura 1. Accesorios del Sentry 200-Ap.

Zootecnia de la Universidad Juárez del Estado de Durango para su análisis físico.

Cada suelo se colocó en columnas de 20 cm de diámetro por 50 cm de altura, relleno hasta una altura de 40 centímetros. En el estudio se procesaron tres repeticiones por suelo, y un total de doce unidades experimentales.

Las columnas con suelo se regaron a saturación cada tres semanas para el caso de los suelos de textura franca (Pancho Villa), migajón-arcilloso (CENID-RASPA), y migajón-arcilloso (Venecia), y cada 15 días para arena. Se registraron lecturas de humedad en intervalos de cuatro días durante el primer mes y semanalmente en los meses restantes. El trabajo duró de octubre de 1995 a enero de 1996.

Las variables evaluadas fueron:

1. Humedad cada cuatro días por gravimetría y con TDR, en cada repetición.
2. Composición textural, capacidad de campo, porcentaje de marchitamiento permanente, y porcentaje de saturación.

Se efectuó una regresión simple ($\check{Y} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \epsilon y$) y una múltiple ($\check{Y} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X^2 + \epsilon y$) para cada textura, usando como variable dependiente el contenido de humedad volumétrico obtenido por gravimetría, y como independientes, la humedad volumétrica por TDR para la regresión simple y como variable X^2 la humedad volumétrica por TDR elevada al cuadrado para la regresión múltiple.

El valor del coeficiente de determinación (R^2) fue el parámetro que se usó para marcar la relación entre las variables, considerando que un valor mayor que 0.70 en la regresión lineal indica de que TDR no requiere calibración (Gallegos, 1995). De no ser así, se obtienen los coeficientes de regresión por la ecuación cuadrática para ajustar la información obtenida; con éstos, cargar la sonda y efectuar la toma de nuevas lecturas en el suelo.

RESULTADOS Y DISCUSION

Durante el desarrollo del trabajo se tomaron 42 datos de humedad para cada suelo, esto es, 168 datos en total de lecturas gravimétricas y 168 con TDR. Se usó el Sentry 200-Ap para las lecturas TDR y la barrena California para las gravimétricas. En la Figura 2 se observan las grandes diferencias de humedad en los suelos estudiados, debidos a su composición granulométrica (Cuadro 1). Estos valores de humedad son los promedios quincenales para cada textura de suelo.

Los resultados de los análisis físicos de suelo efectuados a las muestras se presentan en los Cuadros 1 y 2.

Los resultados del análisis de regresión para los diferentes suelos muestran que para la arena debe efectuarse una calibración, esto se corrobora con el valor del coeficiente de determinación de

Cuadro 1. Composición textural de los suelos en estudio. Comarca Lagunera. 1995-1996.

Lugar	Textura	Arena	Limo	Arcilla
		----- % -----		
Cauce de río	Arena	94.3	3.0	2.7
Pancho Villa	Franco	36.3	44.0	19.7
CENID-RASPA	Mig-Arc	30.3	34.0	35.7
Venecia	Mig-Arc	22.3	42.0	35.7

Mig-Arc = migajón-arcilloso.

Cuadro 2. Características físicas de los suelos en estudio. Comarca Lagunera. 1995-1996.

Suelo	CC	PMP	HA	Saturación
		----- % -----		
Arenoso	13.8	7.2	6.6	36.2
Franco	32.4	15.2	17.2	39.8
Mig-Arc	31.6	14.7	15.9	45.2
Mig-Arc	35.0	16.4	18.6	54.3

CC= capacidad de campo. Mig-Arc=migajón-arcilloso.

PMP= porcentaje de marchitez permanente.

HA= humedad aprovechable.

0.46 (Cuadro 3), que indica que las lecturas con TDR explican el cuarenta y seis por ciento de la variación en las lecturas gravimétricas.

Este valor probablemente se debe al alto porcentaje de arena que tiene este suelo que impide la retención de humedad y su conservación por períodos de tiempo prolongados, por lo cual las evaluaciones de humedad fueron bajas, a pesar de su buena capacidad de retención de humedad a saturación. Para el caso de los suelos franco (Pancho Villa), migajón-arcilloso (CENID-RASPA) y migajón-arcilloso (Venecia) se tiene también una diferencia entre las lecturas, considerando que ésta excede en algunos casos a 10 %, sin embargo, en otros nó, coincidiendo por lo reportado por Toop *et al.* (1980) quienes mencionan que la sonda del TDR no requiere calibración en ningún tipo de suelo. Sin embargo, en este caso se considera conveniente efectuar un análisis de regresión para observar la relación entre las variables.

Los resultados que se presentan en el Cuadro 3 indican que el modelo cuadrático es el que mejor ajusta esta relación, considerándose que el suelo franco (Pancho Villa) es el que presenta el mejor ajuste dado por el valor de R^2 de 0.80.

En el Cuadro 3 se observa que a pesar de que hay diferencias en la composición textural, en los cuatro casos el mejor ajuste se tiene con un modelo cuadrático, siendo los valores de R^2 de 0.80, 0.74 y 0.70, para los suelos con separados mecánicos menores (Pancho Villa, CENID-RASPA, Venecia), respectivamente. Cabría esperar que para los suelos con separados mecánicos de mayor diámetro se tuviera mejor ajuste, debido a que el equipo fue calibrado bajo suelos arenosos. Sin embargo, el pobre ajuste puede deberse a las condiciones de porosidad, ya que al ser el espacio poroso más pequeño en volumen, pero más grande en tamaño de poros se pierda agua más abruptamente que en los suelos arcillosos y esto se ve reflejado en las lecturas de humedad, y por supuesto en los valores de R^2 . Siendo posible los anteriores resultados para texturas más finas, sin incluir a la arena por los niveles de humedad dados por la composición textural.

En el Cuadro 4 se presentan los coeficientes de calibración obtenidos para cada suelo, con la intención de que sean usados para efectuar la calibración de la sonda en cada caso particular, considerando que los resultados de humedad obtenidos mediante estos coeficientes serán más confiables, que estimaciones con sondas sin calibrar en cada suelo. Los

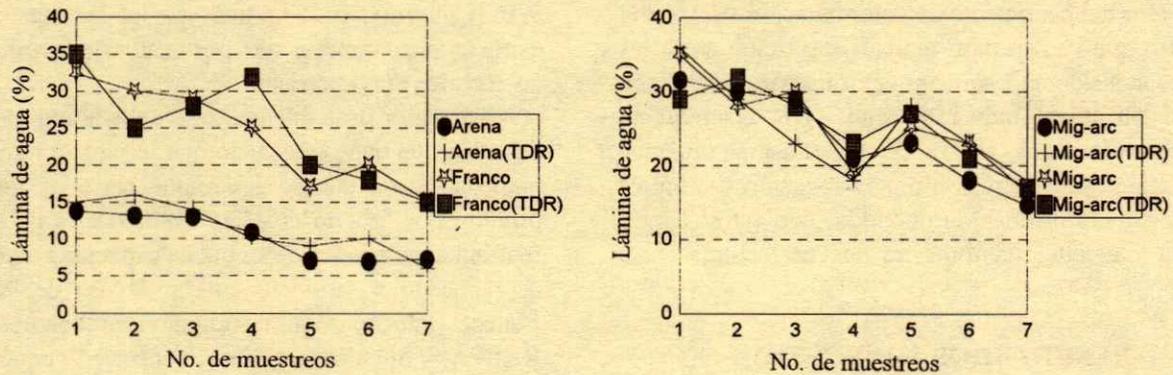


Figura 2. Contenido de humedad gravimétrico y por TDR en las textura de suelo en estudio. CENID-RASPA. 1995-1996.

Cuadro 3. Valores del coeficiente de variación y determinación para los suelos en estudio. Comarca Lagunera. 1995-1996.

Suelo	R ²	R ²	CV
	Ajuste lineal simple	Ajuste cuadrático	
Arena	0.46	0.48	32.15
Franco	0.64	0.80	17.17
Mig-Arc (CENID-RASPA)	0.57	0.74	17.74
Mig-Arc (Venecia)	0.39	0.70	16.22

CV= coeficiente de variación.
Mig-Arc = migajón-arcilloso.

Cuadro 4. Coeficientes de calibración obtenidos para los diferentes suelos por ajuste cuadrático. Comarca Lagunera. 1995-1996.

Suelo	β_0	β_1	β^2
Arenoso	0.907139	0.537774	-0.010011
Franco	9.61	-0.5961	0.04072
Mig-Arc (CENID-RASPA)	15.6161	-0.5301	0.0228
Mig-Arc (Venecia)	-21.8903	2.3619	-0.02288

Mig-Arc = migajón-arcilloso.

modelos obtenidos para cada textura de suelo mediante el ajuste cuadrático son:

Arenoso

$$\bar{Y} = 0.907139 + 0.537774X_1 - 0.010011X^2$$

Franco

$$\bar{Y} = 9.61 - 0.5961X_1 + 0.04072 X^2$$

Mig-Arc. (CENID-RASPA)

$$\bar{Y} = 15.6161 - 0.5301X_1 + 0.0228X^2$$

Mig-Arc. (Venecia)

$$\bar{Y} = -21.8903 + 2.3619X_1 - 0.02288X^2$$

CONCLUSIONES

1. Los coeficientes de calibración obtenidos en este trabajo para los suelos en estudio son confiables para los suelos de textura franca (Pancho Villa), migajón-arcilloso (CENID-RASPA) y migajón-arcilloso (Venecia), según los valores de R² 0.80, 0.74 y 0.70, respectivamente.
2. Los factores de calibración de fábrica que acompañan a la sonda pueden usarse para obtener lecturas volumétricas, usando funciones de compensación en el aparato, en suelos francos y migajón-arcillosos con R² menores que 0.70 y con reserva en suelos de textura arenosa.

LITERATURA CITADA

- Baker, J.M. y R.R. Allmaras. 1990. System for automating and multiplexing soil moisture measurement by time-domain reflectometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 1-6.
- Gallegos, E.S. 1995. El reflectómetro y el capacitómetro como sensores de humedad del suelo. Tesis de Maestría en Ciencias Agrícolas. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Monterrey, Nuevo León. pp. 1-135.
- Heimovaara, T.J. 1993. Design of triple wire time-domain reflectometry probes in practice and theory. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 1410-1417.
- López M., J. y J.F. Pissani. 1994. El reflectómetro de dominio del tiempo y su uso en la agricultura. Problema especial de investigación, Doctorado en Ciencias Agrícolas. Facultad de Agronomía. Universidad Autónoma de Nuevo León. Marín, N. L.
- Rajkai, K. y B.E. Ryden. 1992. Measuring method areal soil moisture distribution with the TDR method. *Geoderma* 52: 73-85.
- Roth, C.H., M.A. Malicki y R. Plagge. 1992. Empirical evaluation of relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibration soil moisture measurements by TDR. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43: 1-13.

Selker, J.S., L. Graaf y T. Steenhuis. 1993. No-invasive time domain reflectometry moisture measurements probe. Soil Sci. Soc. Am. J. 57: 934-936.

Toop, G.C., J.L. Davis y A.P. Annan. 1980. Electromagnet determination of soil water content: Measurements in coaxial transmissionlines. Water Resources Research 16: 574-582.

DESARROLLO DE VALORES DE REFERENCIA PARA Cd Y Pb EN SUELOS REGADOS CON AGUAS RESIDUALES

Development of Reference Values for Cd and Pb in Soils Irrigated with Untreated Sewage Effluents

Christina Siebe

RESUMEN

El uso de aguas residuales para fines agrícolas sin tratamiento previo presenta riesgos para la salud humana, entre los cuales figura la introducción de metales pesados a la cadena trófica. Es por eso que existe un gran interés por establecer límites permisibles para las concentraciones de metales en las aguas de riego y en los suelos. En México ya existe una norma oficial que establece concentraciones máximas permisibles de metales pesados en aguas de riego, pero aún no la hay para contenidos en suelos. En el presente trabajo se presenta una estrategia para elaborar valores de referencia para contenidos totales de Cd y Pb en suelos, mismos que sean congruentes con límites de tolerancia establecidos para alimentos y forrajes. El análisis se realiza con base en resultados obtenidos en un estudio de caso en el Distrito de Riego 03, Tula, en el cual se analizaron las tendencias de acumulación de dichos metales en los suelos a través del tiempo bajo riego, y su absorción por los principales cultivos de la zona (alfalfa y maíz). Se encontró que para poder cumplir con lo establecido en normas internacionales en relación con los contenidos tolerables de Cd y Pb en forrajes y grano de maíz, los contenidos totales de Cd y Pb en los suelos no deberán exceder los 0.5 g m^{-2} de Cd y los 19 g m^{-2} de Pb.

Palabras clave: Metales pesados, contaminación de suelos, irrigación, legislación.

SUMMARY

Land irrigation with untreated sewage effluents involves risks for human health, one of them being the introduction of heavy metals in the food chain. A

¹ Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, 04510 México, D.F.

Aceptado: Junio de 1997.

mayor interest exists on the establishment of permissible concentrations of heavy metals in irrigation water and in soils. In Mexico an official regulation containing maximum permissible concentrations of heavy metals in irrigation water has already been established, but a similar legislation for soils is still lacking. In this investigation a strategy for the establishment of soil reference values for total Cd and Pb, in agreement with those established for food and fodder crops is presented. The analysis is based on results obtained in a case study conducted at Irrigation District 03, Tula, in which the accumulation of these metals in soils as well as their absorption by the main crops of the area (alfalfa and maize) was analyzed as a function of time under irrigation. In order to accomplish international regulations on tolerable contents of Cd and Pb in either fodder crops or maize grains, the total Cd and Pb contents in soils of the study area should not exceed 0.5 g m^{-2} for Cd and 19 g m^{-2} for Pb.

Index words: Heavy metals, soil pollution, irrigation, legislation.

INTRODUCCION

La utilización de aguas residuales en el riego agrícola, se practica en muchos países desde mediados del siglo pasado (Mara y Cairncross, 1989). Su uso para riego significa un aporte importante de agua, principalmente en zonas áridas y semiáridas. Además, la introducción simultánea de nutrientes a los suelos permite mejorar el estado nutricional de los cultivos o, en su caso, proporciona un ahorro significativo de fertilizantes. Al mismo tiempo, esta práctica representa una solución económica al problema de la deposición de desechos y es una opción al desalojo directo en los cuerpos naturales de agua, reduciendo el riesgo de contaminación de estos últimos. Otros aspectos de interés son la recarga de los acuíferos y la estabilización del paisaje por medio de la creación de

áreas siempre verdes (Feigin *et al.*, 1991; Loehr, 1977).

La utilidad, a largo plazo, de las aguas residuales para riego agrícola, depende de la calidad del agua, siendo las limitativas principales su contenido de organismos patógenos y la cantidad de contaminantes orgánicos e inorgánicos, al igual que las concentraciones de sales y boro (Shuval, 1977). Estas sustancias significan ya sea un riesgo directo a la salud humana, cuando existe un contacto inmediato (trabajadores agrícolas), o indirecto cuando son absorbidas por los cultivos y se introducen, de esta manera, en la cadena trófica (consumidores).

En la mayoría de los países industrializados el agua residual recibe un tratamiento secundario (Europa), o por lo menos primario (Estados Unidos), antes de su utilización en el riego agrícola, para, de esta manera, minimizar los riesgos a la salud humana y conservar el potencial agrícola de los suelos (Mara y Cairncross, 1989). En cambio, en México, de las 31 ciudades que practican el uso del agua residual sólo cuatro dan un tratamiento previo a las aguas (Colima, La Paz, Monclova y Reynosa) (Arango, 1990). Las ciudades restantes desalojan sus aguas residuales sin darles un tratamiento previo. Los mayores volúmenes de agua residual son desalojados de la zona metropolitana de la ciudad de México hacia el Valle del Mezquital (980 millones de m³ anuales; Arango, 1990), donde se riegan hoy en día, aproximadamente 85 000 ha ubicadas dentro de los Distritos de Riego 03 (Tula) y 100 (Alfajayucan). Esta zona representa, mundialmente, el área conjunta de mayor tamaño bajo riego con agua residual (Mara y Cairncross, 1989).

En diversos países se han desarrollado lineamientos que establecen las concentraciones tolerables de contaminantes y patógenos en aguas, suelos y productos agrícolas (Blume, 1990; Feigin *et al.*, 1991; OMS, 1989; Page y Chang, 1985). Sin embargo, el establecimiento de límites de tolerancia para suelos, aguas para riego y cultivos no se ha realizado en forma integral, por lo que, en último tiempo, han aumentado los reportes de contradicciones entre los límites establecidos. Por ejemplo, para el caso de metales pesados, varios autores han reportado recientemente que los límites máximos permisibles en suelos implican que se sobrepasen los contenidos tolerables en cultivos (Birke, 1991; Hornburg, 1991; Siebe, 1994a). Igualmente, las normas establecidas para agua de riego por SEDUE (NOM, 1993), implican, a mediano y largo

plazo, que los límites tolerables para cultivos establecidos en diferentes países sean sobrepasados (Siebe, 1994b). Esto pone en evidencia la necesidad de revisar, primeramente, las normas y lineamientos establecidos en torno al riesgo a la salud humana y, posteriormente, revisar que los lineamientos establecidos para niveles críticos en suelos y aguas estén en acuerdo con los de salud.

En México, ya existen límites de tolerancia para las concentraciones de diversas sustancias en las aguas de riego, pero no se han desarrollado normas para establecer los límites máximos permisibles en suelos. Ya que algunos contaminantes, como los metales pesados, se acumulan en los suelos, es necesario crear reglamentos o propuestas al respecto para evitar percances en el futuro. Tampoco existen en México límites de tolerancia para los contenidos de metales en los diversos cultivos.

En el presente trabajo se presenta una estrategia para elaborar valores de referencia para contenidos totales de Cd y Pb en suelos, mismos que sean congruentes con límites de tolerancia para cultivos. El análisis está basado en los resultados obtenidos en un estudio de caso en el Distrito de Riego 03 (Siebe, 1994a,b; Siebe y Cifuentes, 1995), en el cual se analizaron las tendencias de acumulación de dichos metales en los suelos en función del tiempo bajo riego y de la absorción de los mismos por los principales cultivos de la zona (alfalfa y maíz).

MATERIALES Y METODOS

Las características de la zona de estudio han sido documentadas detalladamente en trabajos previos (Gutiérrez *et al.*, 1996; Siebe, 1994a; Siebe y Cifuentes, 1995). La toma de muestras y los análisis de laboratorio efectuados se encuentran reportados en Siebe (1994a,b).

Se utilizó el análisis de regresión simple para probar: a) si existe una relación lineal positiva de la concentración de Cd y Pb en los suelos en función del tiempo bajo riego, y b) si existe una relación lineal positiva de la concentración de Cd y Pb tanto en alfalfa como en maíz, en función del tiempo bajo riego. Para lograr una distribución normal, algunos datos fueron transformados a sus logaritmos. Los niveles de significancia de los coeficientes de determinación se probaron con una prueba F y el del coeficiente de regresión con la prueba de t.

RESULTADOS Y DISCUSION

En las muestras de agua de pozo las concentraciones de ambos metales se encontraron por debajo de los respectivos límites de detección ($<0.005 \text{ mg L}^{-1}$ para Cd y $<0.02 \text{ mg L}^{-1}$ para Pb). En las aguas residuales las concentraciones promedio de Cd son de 0.005 mg L^{-1} y las de Pb se encuentran entre 0.08 y 0.10 mg L^{-1} . Estas concentraciones son muy inferiores a aquéllas establecidas en México como límites de tolerancia para aguas residuales destinadas al riego agrícola, cuyos valores admitidos son de 0.01 mg L^{-1} para Cd y 5.0 mg L^{-1} para Pb (NOM, 1993). El aporte anual de Cd y Pb a través de las aguas de riego

(calculado para una lámina promedio de 1883 mm/a) es de 0.16 g m^{-2} de Pb y 0.009 g m^{-2} de Cd.

Para las cantidades de Cd y Pb extractables con agua regia presentes en la capa arable de los suelos se observan tendencias al aumento para ambos metales en función del incremento del tiempo bajo riego (Figura 1). Después de 80 años de riego con agua residual las cantidades de ambos metales se encuentran en órdenes de tres a seis veces mayores que en suelos regados con agua de pozo o cultivo de temporal, y se incrementan en el caso del Cd de 0.05 a 0.10 g m^{-2} en suelos de las zonas testigo hasta de 0.25 a 0.50 g m^{-2} en suelos regados durante 80 años con agua residual.

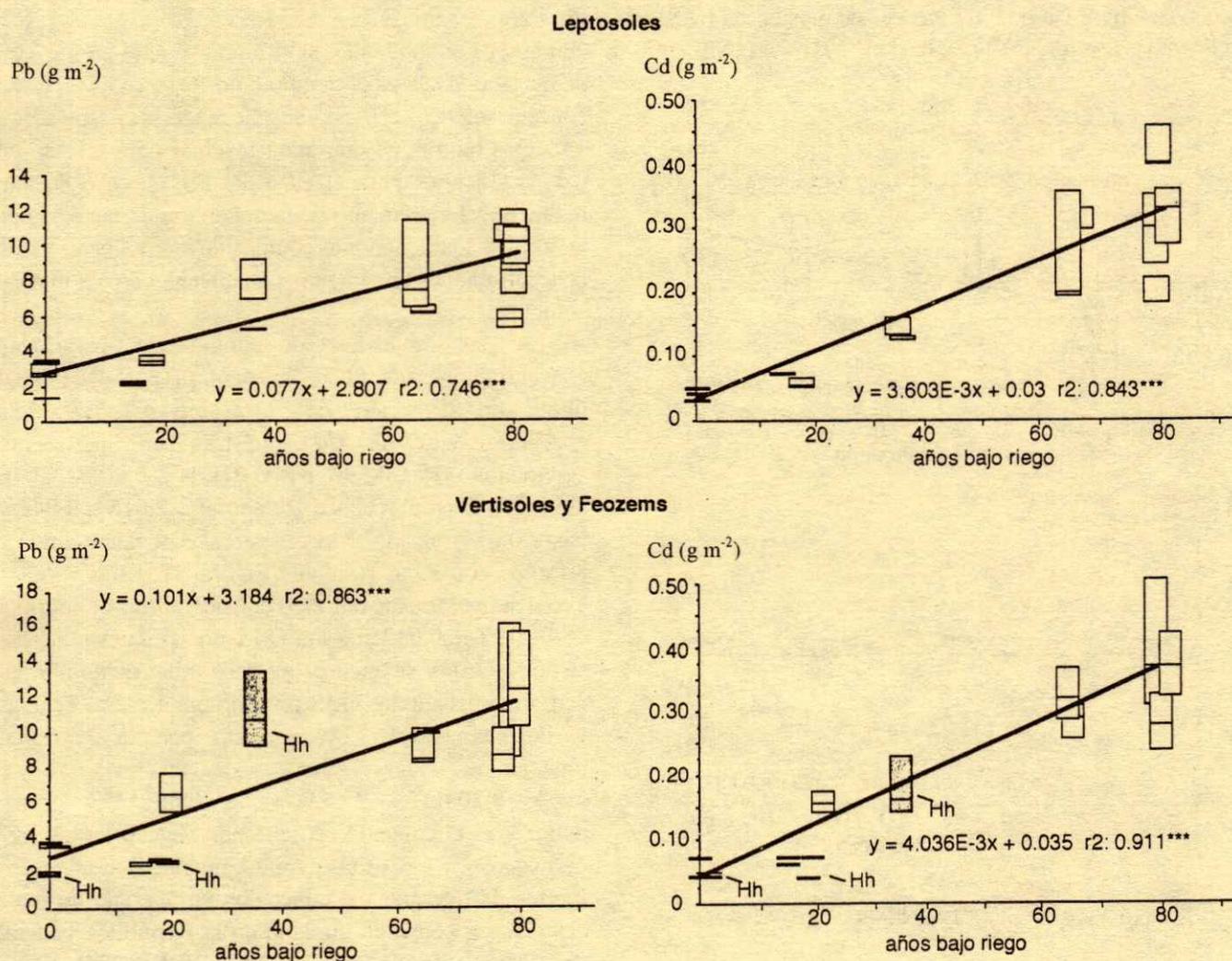


Figura 1. Contenidos de Pb y Cd totales en Leptosoles, Feozems (Hh) y Vertisoles en función del tiempo bajo riego en el Distrito de Riego 03, Hidalgo.

En el caso del Pb el incremento es de 1.5 a 4 g m⁻² hasta de 5.5 a 16 g m⁻². Los coeficientes de determinación para las regresiones calculadas fueron de 0.84 y 0.91 para Cd, y 0.75 y 0.86 para Pb y los niveles de significancia fueron <0.01:

Leptosoles:

$$\text{Cd: } y = 3.603\text{E-}3x + 0.03 \quad r^2 = 0.843^{***}$$

$$\text{Pb: } y = 0.077x + 2.807 \quad r^2 = 0.746^{***}$$

Vertisoles

$$\text{Cd: } y = 4.036\text{E-}3x + 0.035 \quad r^2 = 0.911^{***}$$

$$\text{Pb: } y = 0.101x + 3.184 \quad r^2 = 0.863^{***}$$

donde y es el contenido en el suelo en g m⁻² y x es el tiempo bajo riego en años.

En las muestras de alfalfa se determinó un incremento en las concentraciones de Cd y Pb conforme aumenta el tiempo bajo riego (Figura 2), siendo éste para Cd de 0.02 mg kg⁻¹ de masa seca (MS) en la zona testigo a 0.12 y hasta 0.19 mg kg⁻¹ MS en

parcelas regadas durante 80 años con agua residual, y para Pb de 0.10 a 0.22 mg kg⁻¹ MS en la zona testigo a 0.17 a 0.42 mg kg⁻¹ MS en la zona regada con agua residual. Los coeficientes de determinación de las regresiones lineales calculadas son de 0.73 en el caso del Cd y de 0.43 en el caso del Pb, y los niveles de significancia son de 0.01 y 0.05, respectivamente. Las concentraciones de ambos metales están por debajo del rango considerado como normal en un estudio estadístico realizado por Dokumentationsstelle (1976) en sitios no contaminados. Schaller y Dietz (1991) reportan concentraciones críticas para el consumo animal en forrajes de 0.5 a 1.0 mg kg⁻¹ MS de Cd y 1 mg kg⁻¹ MS de Pb. Según las regresiones obtenidas para Cd y Pb de

$$\text{Cd: } \log y = 7.841\text{E-}3x - 1.463 \quad r^2 = 0.732^{***}$$

$$\text{Pb: } \log y = 3.965\text{E-}3x - 0.851 \quad r^2 = 0.428^{**}$$

donde y es el contenido en el tejido vegetal en mg kg⁻¹ de masa seca y x es el tiempo bajo riego en años, estas concentraciones críticas se alcanzarían después de 148 años bajo riego con agua residual para el caso de Cd, y 215 años para el caso del Pb, en caso de que realmente el incremento de la absorción de metales por la alfalfa mantenga un comportamiento lineal y las concentraciones en el agua se mantengan en los niveles actuales.

En las muestras de grano de maíz las concentraciones de Pb se encuentran por debajo del límite de detección de 0.02 mg kg⁻¹ MS. Las concentraciones de Cd muestran un incremento significativo ($r^2 = 0.596$, $p < 0.01$) de <0.003 a 0.016 mg kg⁻¹ MS en parcelas de temporal a 0.018 a 0.043 y hasta 0.070 mg kg⁻¹ MS en parcelas regadas durante 80 años con agua residual (Figura 3). Estas últimas exceden ligeramente el rango considerado como normal de 0.0197 ± 0.013 mg kg⁻¹ MS por Dokumentationsstelle (1976), y se encuentran debajo del rango normal de 0.06 a 0.1 mg kg⁻¹ MS referido por Kabata-Pendias y Pendias (1984). De acuerdo con la regresión obtenida de

$$\log y = 8.204\text{E-}3x - 2.132 \quad r^2 = 0.596^{***}$$

donde y es el contenido en el tejido vegetal en mg kg⁻¹ de masa seca y x es el tiempo bajo riego en años, los límites de tolerancia establecidos para grano de maíz destinado a consumo humano en la República Federal de Alemania de 0.12 mg kg⁻¹ MS (BGA, 1986), serían alcanzados después de 148 años de riego con agua residual.

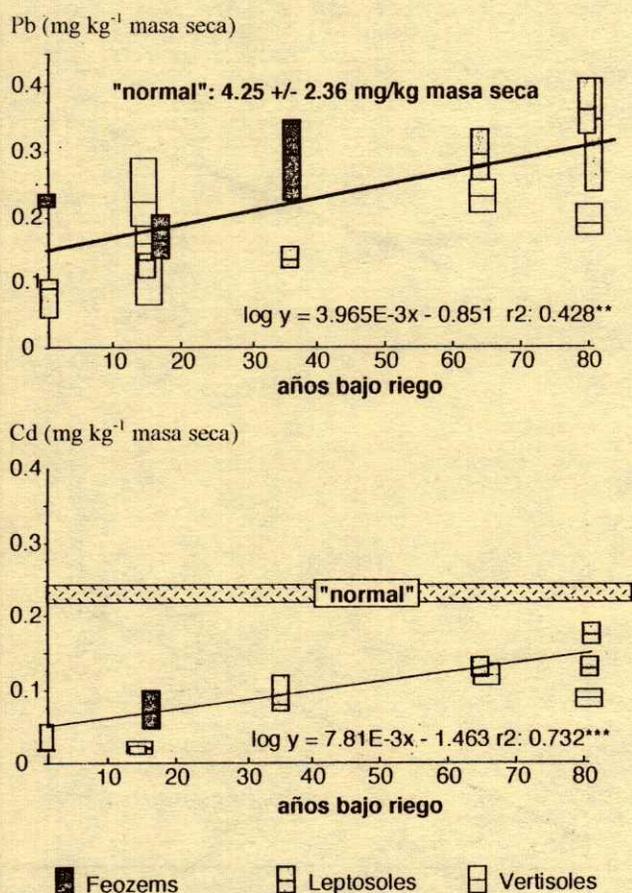


Figura 2. Contenidos de Pb y Cd en muestras de alfalfa en función del tiempo bajo riego en el Distrito de Riego 03, Hidalgo.

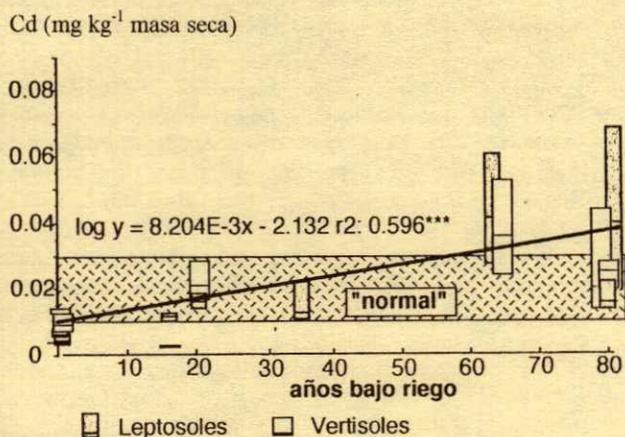


Figura 3. Contenidos de Cd en muestras de grano de maíz en función del tiempo bajo riego en el Distrito de Riego 03, Hidalgo.

Page y Chang (1985) calcularon límites tolerables para cantidades de Pb y Cd aportados a través de la disposición de lodos residuales en suelos de capacidades de intercambio mayores a 150 meq kg^{-1} de 2 g m^{-2} para Cd y 200 g m^{-2} para Pb, los cuales se alcanzarían después de 400 (Cd) y 4000 (Pb) años, en caso de que los aportes medios anuales fueran de 0.005 g m^{-2} (Cd) y 0.05 g m^{-2} (Pb).

De acuerdo con las regresiones lineales obtenidas en el presente trabajo, las cantidades de Cd en los suelos alcanzarán, después de 148 años bajo riego con aguas residuales, (y en caso de mantenerse constantes los aportes a través del agua) niveles de 0.53 g m^{-2} para Leptosoles y 0.63 g m^{-2} para Vertisoles. Las cantidades de Pb llegarían, después de 215 años bajo riego, a niveles de 19.4 g m^{-2} en Leptosoles y 24.9 g m^{-2} en Vertisoles. De estos resultados se puede derivar que los límites de tolerancia no deben sobrepasar los 0.5 g m^{-2} de Cd y los 19 g m^{-2} de Pb en los suelos, si se pretende cumplir con los límites de Cd y Pb establecidos para forrajes y los de Cd establecidos para grano de maíz. Estos valores corresponden a una concentración en la capa arable (de 0 a 30 cm) de 1.5 mg kg^{-1} de Cd y 58 mg kg^{-1} de Pb (asumiendo una densidad aparente de 1.1 g cm^{-3}). Estas cantidades se encuentran por debajo de los valores considerados como tolerables por otros autores.

Lo anterior pone en evidencia la necesidad de corroborar los límites considerados como tolerables para suelos con aquellos ya establecidos para forrajes

y productos destinados para el consumo humano, ya que no es congruente autorizar el uso agrícola de los suelos, si en los productos cultivados se van a exceder los contenidos permisibles de metales. Los experimentos a largo plazo, como el que de manera casual se estableció en el Distrito de Riego 03 al abrirse continuamente nuevas áreas al riego, son de gran utilidad para estudiar la acumulación de contaminantes en el tiempo y relacionarla con la absorción por los cultivos. Una vez decidido el nivel máximo permisible en los cultivos, permiten derivar cuáles serían los contenidos correspondientes en los suelos, como se demuestra en este trabajo.

CONCLUSIONES

Las concentraciones de Cd y Pb en las aguas de riego se encuentran muy por debajo de los límites permisibles establecidos para aguas de riego en México. Sin embargo, el Cd y Pb introducidos a los suelos a través de éstas tienden a acumularse significativamente en los suelos conforme aumenta el tiempo bajo riego. La absorción por los principales cultivos de la zona (alfalfa y maíz) también se incrementa con el tiempo, aunque en la actualidad (después de 80 años bajo riego) todavía no se sobrepasan los contenidos considerados como tolerables en diversos países del mundo para forrajes y grano de maíz para consumo humano. De acuerdo con los modelos de regresión lineal obtenidos en el presente estudio de caso estos contenidos se alcanzarán después de 148 años (Cd) y 215 años (Pb) de riego con agua residual, respectivamente. Los contenidos totales de Cd y Pb en los suelos corresponderán a 0.5 g m^{-2} de Cd y a 19 g m^{-2} de Pb, equivalentes a una concentración en la capa arable de 1.5 mg kg^{-1} de Cd y 58 mg kg^{-1} de Pb, mismos que se proponen como valores de referencia. Es necesario realizar una revisión de los límites de tolerancia para cultivos basada en efectos ecotoxicológicos probados. Los experimentos a largo plazo, como el que de manera casual se estableció en el Distrito de Riego 03 al abrirse continuamente nuevas áreas al riego, son de gran utilidad para estudiar la acumulación de contaminantes en el tiempo y relacionarla con la absorción por los cultivos. Este tipo de investigaciones permiten establecer valores de referencia congruentes para suelos y cultivos.

LITERATURA CITADA

- Arango, J.M. 1990. Panorama general sobre la reutilización del agua en el riego agrícola en México. Taller Internacional Reuso del Agua en la Agricultura, Experiencia México-Israel. CNA/IMTA, Los Berros, Edo. de Méx.
- BGA. 1986. Richtwerte 1986. Zentrale Erfassungs- und Bewertungsstelle für Umweltchemikalien im Umweltbundesamt. Bundesgesundheitsblatt 29, Nr.1 vom 1.1.1986, pp. 22-23.
- Birke, C. 1991. Der Schwermetalltransfer aus langjährig mit Siedlungsabfällen gedüngten Böden in Kulturpflanzen und dessen Prognose durch chemische Extraktionsverfahren. Dissertation Rheinische-Friedrichs-Wilhelms-Universität Bonn.
- Blume, H.P. 1990. Schutz vor Metallen und deren Folgen. pp. 563-566. *In*: Handbuch des Bodenschutzes. ecomed Verlagsgesellschaft GmbH, Landsberg.
- Dokumentationsstelle. 1976. Spurenelemente mit toxischer Wirkung, -Tabellen über Gehalte in Futtermitteln-. Daten und Dokumente zum Umweltschutz Nr. 11. Ed. Dokumentationsstelle der Universität Hohenheim, Stuttgart.
- Feigin, A., I. Ravina y J. Shalhevet. 1991. Irrigation with treated sewage effluent. Management for environmental protection. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Gutiérrez, M.E., Ch. Siebe e I. Sommer. 1996. Effects of land application of untreated sewage effluent on heavy metal accumulation and soil fertility in Central Mexico: A bibliographical review. *Env. Rew.* (en prensa).
- Hornburg, V. 1991. Untersuchungen zur Mobilität und Verfügbarkeit von Cadmium, Zink, Mangan, Blei und Kupfer in Böden. Bonner Bodenkundliche Abhandlungen. Bd. 2. Institut für Bodenkunde. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn.
- Kabata-Pendias, A. y H. Pendias. 1984. Trace elements in soils and plants. CRC Press, Inc., 5a. ed. 1989. Florida, USA.
- Loehr, R.C. 1977. Pollution control for agriculture. Academic Press Inc., New York.
- Mara, D. y S. Cairncross. 1989. Guidelines for the safe use of wastewater and excreta in agriculture and aquaculture. World Health Organization, Geneva.
- NOM 1993. Norma Oficial Mexicana NOM-CCA-032-ECOL/1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las aguas residuales de origen urbano o municipal para su disposición mediante riego agrícola. Diario Oficial de la Federación, 18.10.1993, México, D.F., pp. 120-128.
- OMS. 1989. Directrices sanitarias sobre el uso de aguas residuales en agricultura y acuicultura. Organización Mundial de la Salud (World Health Association). Serie de Informes Técnicos 778, Ginebra.
- Page, A.L y A.C. Chang. 1985. Fate of wastewater constituents in soil and groundwater: Trace elements. pp. 13.1-13.16. *In*: Pettygrove, G.S y T. Asano (ed.). Irrigation with reclaimed municipal wastewater- a guidance manual. Lewis, Chelsea.
- Schaller, A. y TH. Dietz. 1991. Pflanzenspezifische Aspekte des Schwermetallaufnahme und Vergleich mit den Richt- und Grenzwerten für Lebens- und Futtermitteln. pp. 92-125. *In*: Sauerbeck, D. y S. Lübben. Auswirkungen von Siedlungsabfällen auf Böden, Bodenorganismen und Pflanzen. Berichte aus der ökologischen Forschung, Bd. 6. Forschungszentrum Jülich, GmbH, Jülich.
- Shuval, H.E. (ed.). 1977. Water renovation and reuse. Academic Press, Inc. New York.
- Siebe, Ch. 1994a. Akkumulation, Mobilität und Verfügbarkeit von Schwermetallen in langjährig mit städtischen Abwässern bewässerten Böden in Zentralmexiko. Hohenheimer Bodenkundliche Hefte, 17, Institut für Bodenkunde und Standortslehre der Universität Hohenheim.
- Siebe, Ch. 1994b. Acumulación y disponibilidad de metales pesados en suelos regados con aguas residuales en el Distrito de Riego 03, Tula, Hidalgo. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 10: 15-21.
- Siebe, Ch. y E. Cifuentes. 1995. Environmental impact of wastewater irrigation in Central Mexico.- An overview. *Int. J. Environmental Health Res.* Vol. 5: 161-173.

ESTADOS NUTRIMENTALES DEL AGUACATERO EN UN SUELO DE ANDO FERTILIZADO CON N, P Y K DURANTE SEIS AÑOS CONSECUTIVOS

Nutritional Status of Avocado in an Ando Soil Fertilized with N, P and K along Six Consecutive Years

Gustavo A. Baca Castillo¹, Juan José Aguilar Melchor², Alfredo López Jiménez¹,
Angel Martínez Garza¹ y Fernando García C.³

RESUMEN

Durante seis años consecutivos un huerto de aguacatero en producción plena del cv. Fuerte/Criollo de semilla, localizado en un suelo de Ando de Coatepec Harinas, Estado de México fue sometido a 12 tratamientos de fertilización con la estructura del diseño San Cristóbal, los cuales abarcan (en kg ha⁻¹) desde 0 a 300 de N, de 0 a 180 de P₂O₅ y de 0 a 150 de K₂O. A partir del segundo año de las fertilizaciones se realizaron análisis foliares de N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu y Na de las unidades experimentales. Hasta el tercer año se obtuvieron algunos modelos de respuesta, primeramente de las concentraciones foliares Ca, Fe, Zn y Na constituidos por los efectos simples, cuadráticos y las interacciones de primer orden debidos a las aplicaciones de N, P y K. En los años subsecuentes aumentó el número de modelos hasta que en el último año se obtuvieron modelos de respuesta para todos los elementos analizados con excepción de N y del Mn, de este último se obtuvo respuesta en el penúltimo año. Se discuten las causas probables que dieron origen a los modelos de respuesta encontrados.

Palabras clave: *Análisis foliar, macronutrientes, micronutrientes.*

SUMMARY

During six consecutive years an avocado orchard in full production of cv. Fuerte/Criollo rootstocks, located on an Ando soil at Coatepec Harinas, Mexico

¹Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados, 56230 Montecillo, Edo. de México. ²Fundación Salvador Sánchez Colín CICTAMEX, A.C.

³Universidad Autónoma Chapingo, 56230 Chapingo, Edo. de México.

Aceptado: Noviembre de 1997.

State, was subjected to 12 fertilizer treatments using the "San Cristobal" design, which includes (kg ha⁻¹) from 0 to 300 N, from 0 to 180 P₂O₅, and from 0 to 180 K₂O. Starting from the second year of fertilization a foliar analysis of N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, and Na was made at the experimental units. Only until the third year some response models were found. The first of foliar concentrations of Ca, Fe, Zn, and Na, constituted by simple and quadratic effects and their interactions caused by N, P, and K applications. During the subsequent years the number of models increased until, in the last year, response models for all the analyzed elements were found except N and Mn, of which response was found in the fifth year. The probable causes that originated the response models found are discussed.

Index words: *Foliar analysis, macronutrients, micronutrients.*

INTRODUCCION

La determinación del estado nutricional de un árbol y su relación con la fertilización, particularmente cuando ésta cubre un intervalo de respuesta específico, permiten establecer el comportamiento de la absorción nutricional del árbol y los fenómenos asociados con la misma, los cuales no siempre pueden ser explicados mediante el rendimiento. Si la fertilización comprende la aplicación de más de un nutriente, dicha relación adquiere mayor relevancia con respecto a las inferencias a partir del rendimiento.

La tasa de crecimiento de un árbol y, por lo tanto, su producción se deben a diversos factores: las condiciones climáticas, la disponibilidad de nutrientes en el suelo, la distribución de las raíces y su actividad, la capacidad productiva del cultivo y la irrigación. El árbol integra todos los factores y la

composición de la hoja refleja dicha integración (Uriu, 1981).

La aplicación de fertilizantes al suelo modifica la disponibilidad de nutrimentos y el estado nutrimental del árbol, dicho estado nutrimental puede variar de un año a otro. Sumner (1986), en un estudio de comparación de métodos de diagnóstico del estado nutrimental de árboles frutales, demuestra que las aplicaciones de fertilizantes a base de N, P, K o Mg afectan además de la producción y la concentración foliar del nutrimento aplicado, la concentración de otros elementos en las hojas, ya sea porque son aplicados en forma secundaria con relación al elemento principal o porque se afecta indirectamente el balance nutrimental del árbol. Indica además que los estados nutrimentales del árbol pueden cambiar de año a año y que pueden ser relacionados con las prácticas de fertilización cuando éstas se establecen mediante diseños experimentales específicos.

Marschner (1986) indica varias relaciones entre las tasas de crecimiento de una planta y el contenido de nutrimentos minerales, las cuales deben ser consideradas en el diagnóstico de un estado nutrimental determinado a partir del análisis químico de la misma:

- 1) Debe tomarse en cuenta que se presentan diferentes grados de correlación entre el contenido nutrimental y los intervalos de clasificación: deficiencia, adecuado, excesivo o toxicidad.
- 2) Pueden producirse efectos de concentración y dilución de nutrimentos minerales debidos a antagonismos o sinergismos entre iones durante la absorción.
- 3) En el establecimiento de un cierto intervalo a partir del contenido de un nutrimento mineral intervienen consideraciones probabilísticas, otras relacionadas con el análisis en conjunto de todos los nutrimentos y el manejo en general de la planta.
- 4) La conveniencia de establecer el órgano de la planta que refleja más fielmente el estado nutrimental de la planta o el propósito específico del estudio.

El diseño San Cristóbal (utilizado en este estudio) permite estudiar la respuesta en rendimiento de una planta (o de otra variable) por efecto de la aplicación de tres factores desglosándola en sus efectos lineares, cuadráticos y en sus interacciones simples (Rojas, 1979). Dadas las condiciones de este estudio, fue factible establecer la concentración foliar de un elemento en un año determinado en términos básicamente de respuesta a la fertilización al suelo con fertilizantes que contienen N, P y K en la forma desglosada antes indicada.

Un experimento de fertilización con N, P y K de un huerto de aguacate establecido en un suelo de Ando en Coatepec Harinas, Estado de México, en el cual la respuesta a la fertilización continua durante seis años no puede ser explicada mediante los rendimientos obtenidos (Aguilar y López, 1987, 1988; Aguilar *et al.*, 1989, 1990, 1991, 1992). Sin embargo, puesto que se dispone del conocimiento del estado nutrimental del árbol año a año, evaluado mediante el análisis foliar, se estimó que su análisis estadístico e interpretación permitiría establecer los fenómenos nutrimentales que tuvieron lugar y que la información generada sería importante principalmente en la orientación de la investigación sobre la fertilización de frutales en suelos de Ando.

MATERIALES Y METODOS

El estudio se realizó en un huerto de la Fundación Salvador Sánchez Colín localizado en Coatepec Harinas, estado de México a 99°45' de latitud norte y 18°55' de longitud oeste y una altitud de 2300 m (CETENAL, 1976), con clima templado subhúmedo, temperatura media anual de 17.5 a 12.1 °C y precipitación pluvial de 1150 a 1240 mm distribuida de mayo a octubre (Cuanalo *et al.*, 1989). De acuerdo con CETENAL (1976), aproximadamente a 4 km de dicho terreno se efectuó el perfil 20 con descripción y análisis detallado y se determinó que el suelo predominante corresponde a la unidad Andol húmico (Th) y el suelo secundario a Cambisol húmico (Bh). FAO-UNESCO-ISRIC (1990) denomina dichas unidades Andosol úmbrico (ANu) y Cambisol húmico (CMu), respectivamente. De acuerdo con Cuanalo *et al.* (1989), el sitio se ubica dentro de la Subregión Cuesta Ixtapan de la Sal donde predominan los suelos de Ando (suelos formados sobre materiales ricos en vidrio volcánico y comúnmente con horizontes superficiales oscuros) y el tipo de vegetación primaria de bosque de pinoencino.

En árboles de aguacate del cv. Fuerte/Criollo de semilla de 18 años de edad se aplicaron, a partir de 1986 y durante seis años consecutivos, 12 tratamientos de fertilización al suelo con la estructura propia del diseño experimental San Cristóbal con cuatro repeticiones. Dichos tratamientos abarcan una superficie de respuesta (kg ha^{-1}) en el caso del nitrógeno de 0 a 300, de fósforo de 0 a 180 y de potasio de 0 a 150, a base de urea (46 % de N), de

superfosfato simple (19.5 % de P_2O_5) y cloruro de potasio (60 % de K_2O), respectivamente.

Se realizaron muestreos foliares año con año en el mes de agosto, se tomaron 30 hojas de los árboles localizados en las parcelas experimentales provenientes del tercio medio del árbol, del tercio medio de ramas del año y alrededor de toda la copa, éstas se lavaron con agua corriente, enseguida con una solución de ácido clorhídrico al 1 % y finalmente con agua destilada, se secaron en una estufa con circulación de aire a 65 °C durante 48 h, finalmente se molieron y se tamizaron con malla 40.

Para determinar los elementos P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu y Na, se efectuó una digestión húmeda con una mezcla de ácido nítrico, perclórico y sulfúrico. La determinación de nitrógeno total se hizo mediante el procedimiento de microkjeldahl (Chapman y Pratt, 1981; AOAC, 1980). La cuantificación de P se hizo por colorimetría mediante el método de Vanadato-molibdato amarillo (Chapman y Pratt, 1981; AOAC, 1980); las cuantificaciones de K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu y Na se realizaron por absorción atómica (Allan, 1971). El análisis de las muestras foliares se realizó en el Laboratorio de Nutrición de Frutales del Departamento de Fitotecnia de la Universidad Autónoma Chapingo.

Los muestreos de suelos se realizaron en el año de 1991. Se integraron muestras compuestas de suelos de las parcelas de cada uno de los tratamientos y de sus correspondientes repeticiones, y se consideraron en

cada caso tres profundidades: 0 a 30, de 60 a 90 y de 90 a 120 cm. Las muestras se tomaron en la zona de goteo de los árboles en sitios no fertilizados previamente. Los suelos fueron caracterizados química y físicamente mediante métodos convencionales (Aguilar *et al.*, 1987), en el mismo laboratorio antes citado.

La información generada de los análisis foliares fue analizada estadísticamente mediante métodos computacionales de acuerdo con la metodología establecida por Rojas (1979).

RESULTADOS

Se realizaron los análisis de variación de las concentraciones de N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu y Na en las hojas de cada tratamiento de fertilización con sus repeticiones correspondientes, las cuales fueron colectadas durante los años de 1988, 1989, 1990 y 1991; en el Cuadro 1 se presentan los efectos significativos para tratamientos en las concentraciones de dichos elementos en los años indicados. En el año de 1988, después de dos años de la aplicación de los tratamientos de fertilización, aún no se encontraron diferencias significativas por efecto de los tratamientos para ninguna de las concentraciones, en 1989 ya se observaron algunas diferencias y progresivamente en los años subsecuentes aumentó el número de elementos que mostraron diferencias significativas.

Cuadro 1. Resultados de los análisis de variación de las concentraciones foliares de los elementos. Valores de la F calculada de tratamientos.

Año	N	P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Mn	Zn	Cu
1988	0.57	1.04	0.57	0.52	0.74	0.53	1.29	0.66	0.88	1.15
	ns									
CV	18.9	87.9	46.1	27.2	19.0	53.1	40.0	28.3	56.0	43.4
1989	0.93	2.54	1.45	2.08	0.47	1.97	2.90	0.80	6.32	1.10
	ns	ns	ns	*	ns	ns	**	ns	**	ns
CV	13.5	20.8	26.3	14.7	19.5	26.3	17.3	38.2	19.2	72.4
1990	0.98	3.21	1.29	6.56	3.93	4.16	1.09	3.12	6.48	1.18
	ns	**	ns	**	**	**	ns	**	**	ns
CV	10.1	25.0	25.5	19.5	15.0	30.4	36.0	33.8	37.8	81.5
1991	0.78	2.03	2.44	5.53	4.93	4.32	2.34	1.06	3.16	4.46
	ns	*	*	**	**	**	*	ns	**	**
CV	11.3	19.4	26.7	23.0	17.3	22.4	19.2	42.6	29.9	27.5

* = significativa al 5 %. ** = significativa al 1 %. ns = no significativa. CV = coeficiente de variación.

Cuadro 2. Efectos lineares, cuadráticos y de interacciones significativos de las concentraciones de los elementos debidos a las aplicaciones de N, P y K.

Efecto	1989					1990				
	Ca	Na	Fe	Zn	P	Ca	Mg	Na	Mn	Zn
N	-	4.99 *	-	37.20 **	22.22 **	15.06 **	11.71 **	18.73 **	13.79 **	12.88 **
P	-	-	8.81 **	6.17 *	-	10.17 **	9.48 **	-	10.78 **	15.58 **
K	-	-	5.90 **	-	4.10 *	14.47 **	10.09 **	5.17 *	17.60 **	4.63 *
N ²	-	4.03 *	-	23.10 **	-	8.78 **	11.08 **	-	13.40 **	6.40 *
P ²	-	-	5.70 *	5.08 *	9.24 **	14.05 **	10.11 **	-	11.09 **	8.89 **
K ²	-	-	-	-	-	12.43 **	13.16 **	-	19.80 **	6.34 *
NP	5.37 *	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NK	-	-	8.75 **	-	-	-	-	-	-	-
PK	-	-	-	-	5.56 *	-	-	-	-	-

Efecto	1991							
	P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Zn	Cu
N	13.18 **	4.87 *	6.33 *	6.07 *	-	15.44 **	-	11.74 **
P	3.71 *	-	5.61 *	10.87 **	27.94 **	-	15.87 **	11.55 **
K	-	4.21 *	12.05 **	5.24 *	4.85 *	-	-	5.71 *
N ²	-	-	4.80 *	-	-	-	6.34 *	7.67 *
P ²	-	-	-	-	-	-	-	-
K ²	-	-	8.39 **	8.62 **	8.47 **	13.92 **	-	-
NP	-	-	7.82 **	-	-	-	20.14 **	-
NK	-	-	-	-	4.97 *	12.26 **	-	-
PK	-	-	3.67 *	-	-	-	-	-

* = significativo al 5 %. ** = significativo al 1 %.

A continuación con aquellos elementos que resultaron significativos por el efecto de los tratamientos, se procedió de acuerdo con la metodología de análisis estadístico del diseño San Cristóbal, a la determinación mediante el análisis de variación correspondiente, de los efectos lineares, cuadráticos y las interacciones de N, P y K significativos.

Una vez realizados dichos análisis de variación, se procedió a continuación a probar, en cada caso, diferentes modelos comprendidos dentro del modelo general del diseño San Cristóbal, hasta encontrar aquél

que siendo estadísticamente significativo incluyera el mayor número de efectos lineares, cuadráticos y de las interacciones de N, P y K significativos. Los resultados obtenidos al respecto se presentan en el Cuadro 2 y corresponden a los modelos estadísticos indicados a continuación

Para el año de 1989 se obtuvieron los siguientes modelos:

$$Ca = 0.688,9 + 0.000,004NP.$$

$$Na = 61.625 - 0.164,9N + 0.000,525N^2.$$

$$Fe = 86.537,5 - 0.328,3P - 0.342,75K + 0.001,41NK + 0.001,758P^2.$$

$$Zn = 39.562,5 + 0.274,6N - 0.0008,3N^2 + 0.099,4P - 0.001,08P^2.$$

Para el año de 1990 se obtuvieron los siguientes modelos:

$$P = 0.105,269 + 0.0001,87N - 0.000,279K - 0.000,001,7P^2 + 0.000,004,1PK.$$

$$Ca = 0.681,250 + 0.001,881,25N + 0.004,781,25P + 0.005,062,5K - 0.000,012,03N^2 - 0.000,042,27P^2 - 0.000,057,25K^2.$$

$$Mg = 0.363,75 + 0.001,743,7N + 0.002,614,5P + 0.003,237,5K - 0.000,007,65N^2 - 0.000,020,31P^2 - 0.000,033,37K^2.$$

$$Na = 71.653,225 + 0.150,954N - 0.161,424K.$$

$$Mn = 43.062,50 - 0.443,12N - 0.653,12N - 0.653,12P - 1.001,250K + 0.001,97 + 0.004,98P^2 + 0.009,58K^2.$$

$$Zn = 24.875 - 0.435,62N - 0.930,2P - 1.041,25K + 0.002,7N^2 + 0.009,04PZ + 0.011K^2.$$

Para el año de 1991 se obtuvieron los siguientes modelos:

$$P = 0.091,875 + 0.000,23N + 0.000,339P.$$

$$K = 0.797,65 + 0.002,122N - 0.001,317K.$$

$$Ca = 0.514,142 - 0.000,926N - 0.001,037,5P + 0.000,002,7N^2 - 0.000,023,8K^2 + 0.000,009,2NP + 0.003,946,8K - 0.000,012,708,3PK.$$

$$Mg = 0.356,915 - 0.000,189N - 0.0004,35P + 0.001,085,8K - 0.000,0,10,54K^2.$$

$$Na = 77.632,626 - 0.201,148P + 0.318,161K - 0.002,992K^2 + 0.000,436NK.$$

$$Fe = 101.916,92 - 0.147,312N - 0.001,988K^2 + 0.001,901NK.$$

$$Zn = 105.397,873 + 0.001,089N^2 - 0.0053NP + 0.603,772P.$$

$$Cu = 6.537,528,2 - 0.037,625,5N + 0.020,779,6P + 0.017,004,5K + 0.000,115,16N^2.$$

El modelo estadístico del diseño San Cristóbal, permite determinar el máximo (o el mínimo en su caso) de la variable evaluada, en este caso la concentración de cada elemento por efecto de los tratamientos aplicados preferentemente en el hiperespacio que dichos tratamientos abarcan, pues extrapolaciones fuera de dicho hiperespacio no resultan confiables en términos estadísticos. Cuando algunos efectos resultaron no significativos, en ocasiones fue necesario recurrir a cálculos matemáticos asignando los valores correspondientes a los efectos significativos del modelo para su representación gráfica posterior.

De los 18 modelos de concentración elemento/año, con 12 fue posible determinar la fórmula de fertilizantes (N, P₂O₅ y K₂O) en kilogramos por hectárea que hizo máxima (o que en su caso, hizo mínima) la concentración del elemento correspondiente mediante cálculos aritméticos simples. Con los restantes seis modelos siguientes hubo necesidad de determinar gráficamente el comportamiento de dichos modelos: P/90, Ca/91, Zn/91, Fe/89, Fe/91 y Na/91 (Figuras 1 a 6). En el Cuadro 3 se presentan para cada elemento/año, la fórmula de fertilización que hizo máxima la concentración del elemento dentro del

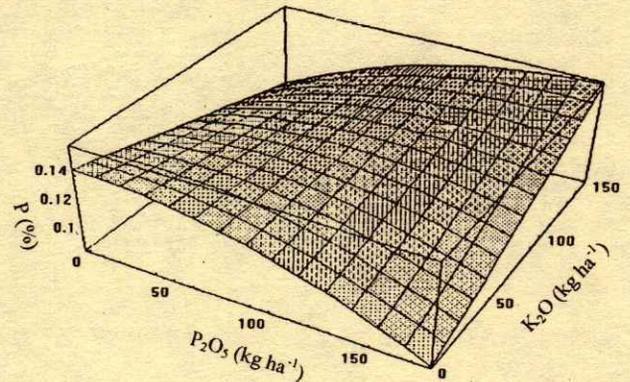


Figura 1. Concentración de fósforo foliar en el año de 1990, en función de las aplicaciones de N, P y K, cuando N = 300 kg ha⁻¹.

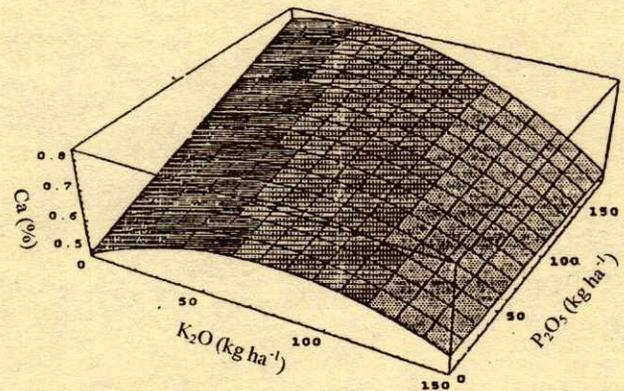


Figura 2. Concentración de calcio foliar en el año de 1991, en función de las aplicaciones de N, P y K, cuando N = 300 kg ha⁻¹.

hiperespacio explorado por los tratamientos. En dicho Cuadro 3 se indican en varios casos las cantidades de N, P₂O₅ o K₂O que provocan una concentración mínima inicial, la cual posteriormente sube; también se indica cuando dos fórmulas de fertilización propician concentraciones máximas similares; se indica además la concentración teórica del elemento alcanzado con la fórmula de fertilizante correspondiente y se señalan los niveles óptimos de concentración para el elemento correspondiente de acuerdo con Goodall *et al.*, citados por Martin-Prevel *et al.* (1987) y con Reuter y Robinson (1986).

Cabe destacar que de acuerdo con los resultados obtenidos y presentados en el Cuadro 3, que con la mayoría de los modelos se obtuvieron respuestas a la fertilización con N, P y K fuera del hiperespacio

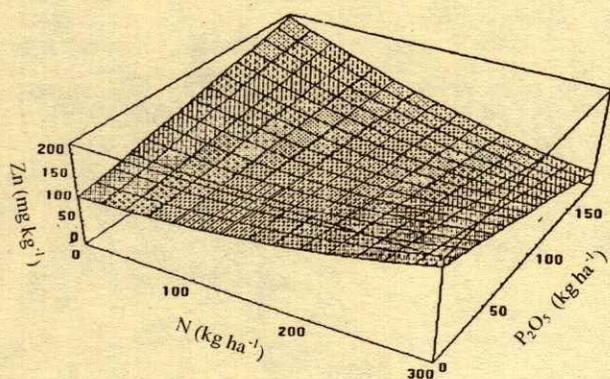


Figura 3. Concentración de zinc foliar en el año de 1991, en función de las aplicaciones de N y P.

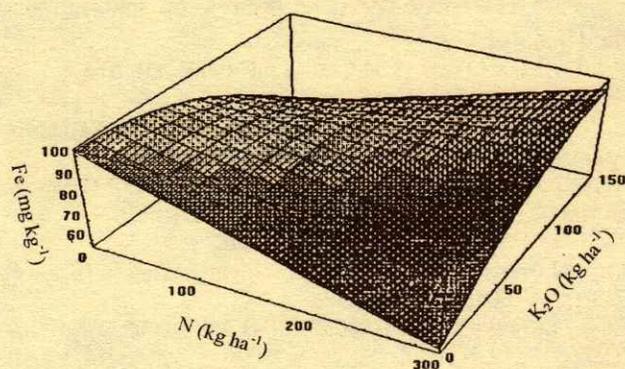


Figura 5. Concentración de hierro foliar en el año de 1991, en función de las aplicaciones de N y K.

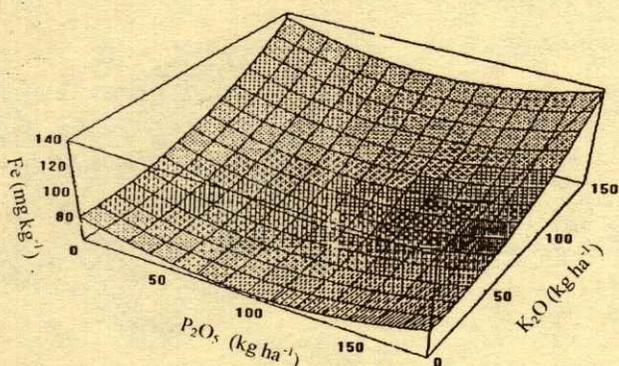


Figura 4. Concentración de hierro foliar en el año de 1989, en función de las aplicaciones de N, P y K, cuando N = 300 kg ha⁻¹.

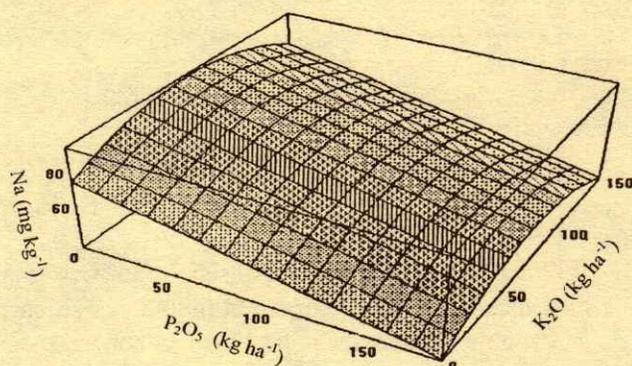


Figura 6. Concentración de sodio foliar en el año de 1991, en función de las aplicaciones de N, P y K, cuando N = 300 kg ha⁻¹.

explorado, por lo mismo el cálculo de concentración máxima alcanzada de cada elemento/año se circunscribió solamente al hiperespacio explorado.

DISCUSION

Con el propósito de tratar de explicar los resultados encontrados de la concentración teórica alcanzada de cada elemento/año presentados en el Cuadro 3, a partir de los modelos matemáticos antes indicados, se consideró conveniente analizar primeramente en forma general los 18 modelos significativos encontrados y en segundo lugar los casos particulares, para esto, dicho análisis se subdividió en las respuestas positivas o negativas a las fertilizaciones con N, P o K determinadas mediante los efectos principales en los modelos correspondientes y en su caso las

modificaciones de dichos efectos debidas a las interacciones de dichos nutrientes.

Previo a dicho análisis cabe destacar que las concentraciones teóricas alcanzadas de todos los elementos/año, con las fórmulas de fertilización correspondientes, indicadas ambas en el Cuadro 3, en la mayoría de los casos corresponden a una condición óptima de concentración y en ningún caso a un nivel de toxicidad, con excepción del Zn/90, puesto que el nivel de toxicidad para Zn corresponde a concentraciones mayores que 300 ppm (según lo indican los autores antes mencionados), este caso particular se discute posteriormente. De acuerdo con lo anterior, no se observaron situaciones de concentraciones de elementos/años explicables por condiciones de niveles de toxicidad a los árboles.

Cuadro 3. Concentraciones de elementos en los diferentes años las cuales se hacen máximas debido a las aplicaciones de N, P₂O₅ y K₂O, indicadas en kg ha⁻¹.

Elemento/Año	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Concentración alcanzada	Condición óptima †
P/90	300	180	150	0.17 %	0.08-0.25 %
P/91	300	180	0	0.22 %	0.08-0.25 %
K/91	300	0	0	1.43 %	0.75-2.0 %
Ca/89	300	180	0	0.9 %	1.0-3.0 %
Ca/90	78	57	44	1.0 %	1.0-3.0 %
Ca/91	300	180	35	0.8 %	1.0-3.0 %
Mg/90	114	64	49	0.6 %	0.25-0.8 %
Mg/91	0	0	52	0.38 %	0.25-0.8 %
Mn/90	300	180	150	197 ppm	30-500 ppm
(mínimo	112	66	52)	-	
Zn/89	166	46	0	89 ppm	30-150 ppm
Zn/90	300	180	150	354 ppm	30-150 ppm
(mínimo	81	51	47)	-	
Zn/91	0	180	0	215 ppm	30-150 ppm
También	300	0	0	203 ppm	
Fe/89	300	180	150	109 ppm	50-200 ppm
También	300	0	150	111 ppm	
Fe/91	0	0	0	102 ppm	50-200 ppm
También	300	0	150	99 ppm	
Na/89	300	0	0	109 ppm	
(mínimo	157)			48 ppm	
Na/90	300	0	0	117 ppm	
Na/91	300	0	75	94 ppm	
Cu/91	300	180	150	12 ppm	5-15 ppm
(mínimo	163)			4 ppm	

† Goodall *et al.*, citados por Martin-Prevel *et al.* (1987) y Reuter y Robinson (1986).

Respuesta Positiva a N

De los 18 modelos significativos presentados en el Cuadro 3, prácticamente en 17 hubo respuesta positiva a N y de éstos en 14, la respuesta que hizo máxima la concentración del elemento/año correspondiente fue a una aplicación mayor que 300 kg de N ha⁻¹, inclusive con dos de los modelos restantes, correspondientes al año de 1990, también hubo respuesta a N, pero a una cantidad menor a dichos 300 kg, situación explicable en función de una prolongada sequía durante el mes de agosto, época en la cual se tomaron las muestras vegetales, causante de una marcada disminución de los procesos metabólicos del árbol; al respecto la precipitación pluvial en la región durante el mes de agosto en los años de 1989, 1990 y 1991 fue de 160.3, 150.5 y 6.5 mm, respectivamente; este tipo de respuesta también mostró tendencias similares para varios elementos del año de 1990 a las fertilizaciones fosfórica y potásica (Cuadro 3).

En forma complementaria cabe indicar que a partir del análisis químico del suelo en cuanto a su contenido

de materia orgánica (MO) 3.46% en promedio en el estrato de 0 a 30 cm y la interpretación del mismo con base en la tabla preparada por Etchevers (1988) dicho contenido corresponde a clase muy baja. Ese autor indica que contenidos de MO menores que 4 % en suelos derivados de cenizas volcánicas (Andosoles húmicos en su mayoría) quedan comprendidos en dicha clase, debido a que, aunque dichos suelos acumulan una gran cantidad de MO, ésta en general presenta una tasa de mineralización menor que la del resto de los suelos y porque la MO que poseen es altamente estabilizada.

Los argumentos indicados permiten afirmar que el contenido de N de suelo es muy bajo y por otra parte que el nivel máximo aplicado de 300 kg de N ha⁻¹ resultó insuficiente para cubrir la demanda del árbol para condiciones óptimas de producción.

Por otra parte, con los modelos correspondientes a Ca/91, Mn/90, Zn/90, Na/89 y Cu/91 la respuesta a N fue función de los efectos lineal negativo y el cuadrático positivo, indicativos de un decaimiento inicial de la concentración del elemento

correspondiente, seguido de un aumento subsecuente de dicha concentración debido a aplicaciones crecientes de N. La explicación probable es que la demanda principal de N del árbol se localiza en las hojas, cuando ésta es satisfecha, la proporción de biomasa de las hojas es mayor con relación a la cantidad del elemento correspondiente presente en la misma, este fenómeno se conoce con el nombre de "efecto de dilución". Si la cantidad de N aplicado es aún mayor se satisface la demanda de las raíces y se produce un mayor crecimiento de las mismas y consecuentemente se obtienen mayores tasas de absorción y de transporte de nutrimentos a las hojas, efecto conocido con el nombre de "absorción por intercepción de la raíz". Este último efecto también explica el hecho de que la fertilización nitrogenada aumentó la concentración en las hojas de los diversos nutrimentos indicados en el Cuadro 3.

Dos casos de respuestas particulares y favorables a la fertilización nitrogenada lo constituyen el de Na/90 y el de Na/91, pues en ambos aún con 300 kg de N ha⁻¹, se obtienen concentraciones de Na (Cuadro 3) muy lejanas a un nivel de toxicidad por ese elemento, el cual se tendría a concentraciones mayores que 2500 ppm (Reuter y Robinson, 1986).

Respuesta Negativa a N

En el Cuadro 3 se tienen los casos particulares siguientes de respuesta negativa a las aplicaciones de N al suelo: Mg/91, Zn/91 y Fe/91; por otra parte de acuerdo con los modelos correspondientes, con Mg/91 y Fe/91, dicha respuesta fue en función principalmente del efecto lineal negativo del N y en el de Zn/91 de la interacción negativa NP.

La explicación probable de la respuesta del árbol en cuanto a la concentración foliar de Mg (Mg/91) en función de la fertilización nitrogenada, es que se trata de un efecto de dilución, pues aumenta proporcionalmente más la biomasa de las hojas, con relación a la absorción de Mg ante aplicaciones crecientes de N al suelo, dicha absorción limitada de Mg se debe a la disponibilidad insuficiente de Mg en el suelo, al respecto cabe indicar que el análisis químico del suelo en cuanto a su contenido de Mg y la interpretación del mismo con base en la tabla preparada por Etchevers (1988) indica que dicho contenido: 1.41 meq/100 g de suelo corresponde a clase media en el estrato de suelo de 0 a 30 cm y a clase baja: 1.15 y 0.99 meq/100 g de

suelo en los estratos de suelo de 30 a 60 cm y de 60 a 90 cm, respectivamente.

La respuesta negativa aparente de la concentración foliar de Zn por efecto de la fertilización nitrogenada se debe a la interacción negativa NP, en este caso dicha interacción indica un efecto substitutivo con dos manifestaciones diferentes (Cuadro 3; Figura 3); en la primera manifestación aumenta la concentración foliar de Zn en función a las aplicaciones de superfosfato simple, debido a que este fertilizante comúnmente contiene Zn y en la segunda manifestación dicho aumento se debe al nitrógeno aplicado, por intercepción de raíces. En la primera manifestación el aumento de la concentración de Zn tiene lugar si no hay incremento de la biomasa de las hojas debido a aplicaciones de nitrógeno, o sea si no ocurre dilución. Por otra parte en ambas manifestaciones resulta obvio que la demanda potencial de Zn del árbol no alcanzó a ser cubierta debido básicamente a que la disponibilidad de Zn del suelo es probablemente insuficiente. Se considera conveniente señalar en esta parte, que con Zn/90 se obtuvieron respuestas similares a Zn/91, en el sentido de que la concentración de Zn aumentó en forma individual por las aplicaciones al suelo de N, de P, o de K, como lo indican los efectos lineales y cuadráticos significativos de N, de P y de K. La respuesta a las aplicaciones de N ya se analizó anteriormente, más adelante se discuten las respuestas a P y a K.

También como con Mg/91 la respuesta de Fe/91 a la fertilización con N, de acuerdo con el modelo respectivo, resultó significativo y negativo el efecto lineal del N, sin embargo en el modelo de Fe/91 resultó también significativa y con signo positivo la interacción NK, misma que también como con Zn/91 implica un efecto substitutivo (Cuadro 3; Figura 4), pues en una primera manifestación indica que se obtiene la concentración máxima de Fe cuando no se aplica ningún fertilizante, la explicación probable a este efecto es que la aplicación de N al suelo provoca un efecto de dilución debido a que la absorción de Fe es limitada por la baja disponibilidad de éste en el suelo. En una segunda manifestación se obtiene que tiende a hacerse máxima la concentración de Fe cuando se aplican al suelo las cantidades máximas probadas de N y de K, pues mientras el primero promueve mayor absorción de Fe por intercepción de raíces, el K desplaza iones de Fe de los sitios de intercambio catiónico del suelo, bajo esta situación de

fertilización alta la interacción NK implica acciones complementarias del N y del K.

Respuesta Positiva a P

En el Cuadro 3 se observa respuesta positiva a las aplicaciones de superfosfato simple en 12 de los 18 casos de concentración de los elemento/año. Por otra parte en los casos de K/91, Fe/91, Na/89 y Na/90 de acuerdo con los efectos significativos integrantes de los modelos respectivos, no hubo respuesta a dichos fertilizante. En el caso de Na/91 hubo efecto lineal negativo de P, esta última respuesta debe considerarse benéfica para el árbol pues implica una absorción menor de un elemento tóxico, la explicación a esta respuesta es que la absorción del Ca por la raíz contenido en el superfosfato simple, aumentó su selectividad en la absorción de iones, disminuyendo la de dicho elemento tóxico.

El hecho de que las aplicaciones al suelo de superfosfato simple aumentaron las concentraciones en las hojas de: Ca, Zn, Mn y Cu, implica que dicho fertilizante los contiene, al respecto FAO (1986) indica los siguientes contenidos máximos de dicho fertilizante: Zn 160 ppm, Mn 270 ppm y Cu 26 ppm.

Cabe señalar que entre los 12 casos antes indicados se incluyeron a P/90 y a Ca/91 a pesar de que en el primero el efecto cuadrático de P es negativo y en el segundo el efecto lineal de P es negativo, sin embargo, en ambos casos está presente la interacción PK significativa y con signo positivo, ésta finalmente determina una respuesta positiva a las aplicaciones de P. Por otra parte, la explicación a estas respuestas es que la interacción PK implica un efecto complementario, por una parte la aplicación del fertilizante fosfórico, aportó en el caso de P/90, Zn, nutriente necesario para el crecimiento de la raíz (el análisis de correlación entre las concentraciones foliares de P y de Zn correspondiente al año de 1991 indicó un coeficiente positivo de 0.95). En el caso de Ca/91, el fertilizante fosfórico aportó Ca y la acción del fertilizante potásico en el caso anterior y en éste, fue probablemente la de impedir la fijación del Zn o del Ca en los sitios de intercambio presentes en el suelo.

Respuesta Negativa P

Solamente se observó un caso: Mg/91, la explicación a esta respuesta es similar a la antes

indicada para la aplicación de N al suelo, en el sentido de que debido a la disponibilidad baja de Mg en el suelo, el Ca aportado por el superfosfato simple limita aún más la absorción de Mg y, por lo mismo, el aumento de su concentración en las hojas.

Respuesta Positiva a K

En los casos siguientes hubo respuesta positiva a las fertilizaciones potásicas: P/90, Ca/90, Ca/91, Mg/90, Mg/91, Mn/90, Zn/90, Fe/89, Fe/91, Cu/91 y Na/91. En todos, con excepción de P en el año de 1990, estuvieron involucrados elementos que son absorbidos por las plantas en forma de cationes, lo cual permite afirmar que en dichas respuestas intervinieron procesos de intercambio catiónico, donde el papel de potasio consistió en desplazar de los sitios de intercambio catiónico del suelo a los elementos Ca, Mg, Fe, Mn, Zn y Cu y/o en impedir que los cationes Ca, Mn, Zn y Cu aportados por el superfosfato simple fueran "fijados" en dichos sitios. Por otra parte, de acuerdo con las respuestas a K indicadas en el Cuadro 3, se tienen respuestas relativamente bajas a Ca y Mg y relativamente altas a Fe, Mn, Zn y Cu.

Carlson (1981) indica que los cationes siguientes se encuentran en la solución del suelo en forma de cationes divalentes: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} y Cu^{2+} . Ortega (1981) señala que los cationes son retenidos en los sitios de intercambio catiónico inorgánico del suelo con una intensidad inversamente proporcional al radio iónico hidratado en grupos de elementos con la misma valencia, además dicho radio es menor conforme el tamaño del ion es mayor. En Weast *et al.* (1989-1990) se indican los radios iónicos siguientes (en Angstrom): Ca^{2+} 0.909, Cu^{2+} 0.72, Mg^{2+} 0.66, Mn^{2+} 0.80, Zn^{2+} 0.74 y Fe^{2+} 0.74. Por otra parte, Northmore, citado por Mortvedt *et al.* (1972), indica que "de los seis elementos micronutrientes (incluye al B y al Mo), el Cu es probablemente el que es adsorbido con más fuerza por las superficies disponibles en el suelo, una característica que puede correlacionarse con la tendencia de los átomos de Cu a formar enlaces covalentes de gran fuerza". Estos argumentos explican razonablemente porqué hubo incremento en la concentración de Ca y Mg cuando se aplicaron cantidades relativamente bajas de K y de Fe, Mn, Zn y Cu cuando se aplicaron cantidades altas de K.

Respuesta Negativa a K

Se tienen dos casos en los cuales de acuerdo con los modelos correspondientes, el efecto lineal del potasio es negativo: P/90 y Fe/89, sin embargo, en el primer caso la interacción PK positiva y en el segundo la interacción NK positiva, transforman finalmente la respuesta a K en positiva, estos casos ya se discutieron anteriormente.

Un caso verdaderamente importante es el de K/91, de acuerdo con el modelo correspondiente el efecto lineal a K es negativo y no lo modifica ninguna interacción, esta respuesta implica que el abastecimiento de K del suelo es suficiente para cubrir las necesidades del árbol y por lo tanto la fertilización potásica le causa al árbol efectos tóxicos. Al respecto, a partir del análisis químico del suelo en cuanto a su contenido de K y la interpretación del mismo con base en la tabla preparada por Etchevers (1988), se tiene clase alta para K en los tres promedios generales: 0.87, 1.00 y 0.69 meq/100 g de suelo en los niveles de suelos muestreados: 0 a 30, 30 a 60 y 60 a 90 cm, respectivamente; cabe señalar que dicha clasificación solamente debe considerarse meramente orientativa por las razones indicadas por Etchevers. Por otra parte, el efecto tóxico a los árboles por aplicaciones de K al suelo se manifestó en una disminución de la concentración de Mg lo cual se infiere por una parte de los efectos lineal positivo y cuadrático negativo del K en el modelo de Mg/91 (con 52 kg de K_2O ha^{-1} se obtiene un valor máximo de concentración de Mg, sin embargo, con 180 kg de K_2O ha^{-1} se abate considerablemente dicha concentración). Y por otra parte el análisis de correlación entre las concentraciones foliares de K y de Mg y en el año de 1991 indicó un coeficiente positivo con un valor de 0.68. Al respecto, Epstein (1972) indica que una concentración excesiva de K en el suelo puede producir "consumo de lujo" de K, el cual causa o agrava la deficiencia de Mg, dicho autor señala que el K en cantidades excesivas provoca en general restricciones en la absorción y más específicamente en el transporte de otros cationes y destaca en forma particular la deficiencia de Mg.

CONCLUSIONES

- Las aplicaciones de N, P y K al suelo modificaron las concentraciones foliares de algunos nutrimentos

analizados hasta el tercer año consecutivo de efectuar dichas aplicaciones, sucesivamente el número de nutrimentos modificados aumentó, hasta la obtención de respuesta a todos los elementos analizados con excepción del N.

- Se obtuvo respuesta positiva a las aplicaciones de N en la concentración foliar de todos los elementos analizados, con excepción del propio N. Dicha respuesta normalmente alcanzó un máximo teórico con cantidades mayores a las aplicadas: 300 kg de N ha^{-1} .

- Se obtuvo respuesta positiva a las aplicaciones de P en las concentraciones foliares de P, Ca, Mg, Mn, Zn, Fe y Cu; en los casos de Mg y Fe dicha respuesta no fue consistente. La respuesta teórica máxima más frecuente se alcanzó con cantidades mayores a las aplicadas: 180 kg de P_2O_5 ha^{-1} .

- Se obtuvo respuesta positiva a las aplicaciones de K en la concentración foliar de Ca, Mg, Mn, Zn y Cu. Las cantidades de K aplicadas al suelo que hicieron máximas dichas concentraciones fue variable.

- Por otra parte, las aplicaciones de K abatieron la concentración foliar de K.

- Por último, se obtuvieron evidencias de que los nutrimentos siguientes: N, P, Ca, Mg, Mn, Zn y Cu normalmente no estuvieron disponibles en el suelo en cantidades suficientes para cubrir las necesidades de los árboles bajo las condiciones de este estudio.

LITERATURA CITADA

- AOAC. 1980. Official methods of analysis of Association of Official Analytical Chemistry, 12th ed. Washington, DC.
- Aguilar M., J.J. y A. López J. 1987. Reporte de avances del Area de Edafología. pp. 13-18. *In*: Memoria 1986-1987 de CICTAMEX. Coatepec Harinas, México.
- Aguilar M., J.J. y A. López J. 1988. Avances en la determinación de la fórmula de fertilización más adecuada para el cultivo de aguacate en la región de Coatepec Harinas, Méx. pp. 15-17. *In*: Memoria del CIC-FRUTICOLA-CICTAMEX. Coatepec Harinas, México.
- Aguilar M., J.J., A. López J., G.A. Baca C., A. Martínez G. y A. Valencia H. 1989. Determinación de la fórmula de fertilización más adecuada para el cultivo del aguacate en la región de Coatepec Harinas, Méx. pp. 17-23. *In*: Memoria del CIC-FRUTICOLA-CICTAMEX. Coatepec Harinas, México.
- Aguilar M., J.J., A. López J., G.A. Baca C. y A. Martínez G. 1990. Avances en la determinación de la fórmula de fertilización más adecuada para el cultivo de aguacate en la región de Coatepec Harinas, Méx. pp. 19-22. *In*: Memoria del CIC-FRUTICOLA-CICTAMEX. Coatepec Harinas, México.

- Aguilar M. J. J., A. López J., G. A. Baca C. y A. Martínez G. 1991. Avances en la determinación de la fórmula de fertilización más adecuada para el cultivo del aguacate en la región Coatepec Harinas, México. pp. 19-22. *In: Memoria Fundación Salvador Sánchez Colín-CICTAMEX. México.*
- Aguilar M. J. J., A. López J., G. A. Baca C., A. Martínez G. y F. García C. 1992. Avances en la determinación de una fórmula de fertilización para el cultivo del aguacate en la región Coatepec Harinas, México. pp. 29-38. *In: Memoria Fundación Salvador Sánchez Colín-CICTAMEX. México.*
- Aguilar S., A., J.D. Etchevers B. y J.Z. Castellanos. 1987. Análisis químico para evaluar la fertilidad del suelo. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Publicación especial No. 1.
- Allan, J.E. 1971. The preparation of agricultural samples by atomic absorption spectroscopy. Varian Techtron. Walnut Creek, Cal. U.S.A.
- Carlson, R.M. 1981. Mineral nutrient availability. pp. 84-89. *In: D.E. Ramos (ed.) Prune orchard management. Special publication 3269. Division of Agricultural Sciences. Univ. of California, Berkeley, USA.*
- CETENAL. 1976. Carta edafológica. Ixtapan de la Sal. E-14-A-57. Esc. 1:50 000.
- Cuanalo de la C., H., E. Ojeda T., A. Santos O. y C.A. Ortiz S. 1989. Provincias, regiones y subregiones terrestres de México. Colegio de Postgraduados. Centro de Edafología. Chapingo, México.
- Chapman, H.D. y P.F. Pratt. 1981. Métodos de análisis para suelos, plantas y aguas. Editorial Trillas, México.
- Epstein, E. 1972. Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives. Wiley International Edition.
- Etchevers, J.D., 1988. Análisis químico de suelos y plantas. pp. 355-371. *In: Notas de clase. Centro de Edafología. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.*
- FAO. 1986. Guía de fertilizantes y nutrición vegetal. Boletín FAO. Fertilizantes y nutrición vegetal 9. FAO Roma.
- FAO-UNESCO-ISRIC. 1990. FAO-UNESCO mapa mundial de suelos. Leyenda revisada. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos 60. Roma.
- Marschner, H. 1986. Mineral nutrition of higher plants. Institute of Plant Nutrition. University of Hohenheim. Federal Republic of Germany. Academic press.
- Martin-Prevel, P., J. Gagnard y P. Gautier (eds). 1987. (Trad. francés). Plant analysis. As a guide to the nutrient requirements of temperate and tropical crops. Lavoisier Publishing Inc. Paris, France.
- Mortvedt, J.J., P.M. Giordano y W.L. Lindsay (eds). 1972. Micronutrients in agriculture. Soil Science Society of America. Inc. Madison, Wisconsin, USA.
- Ortega T., E. 1981. Química de suelos. Editorial Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México.
- Reuter, D.J. y J.B. Robinson (eds). 1986. Plant analysis. An interpretation manual. Inkata Press. Melbourne. Sydney.
- Rojas, B.A. 1979. Análisis estadístico del diseño San Cristóbal con tres factores. Temas didácticos No. 7. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México.
- Sumner, M.E. 1986. The diagnosis and recommendation integrated system (DRIS) as a guide to orchard fertilization. Food and Fertilizer Technology Center. Extension bull No. 231.
- Uriu, K. 1981. Soil and plant analysis and symptomology for diagnosis of mineral deficiencies and toxicities. pp. 89-97. *In: D.E. Ramos (ed.) Prune orchard management. Special Publication 3269. Division of Agricultural Sciences. Univ. of California, Berkeley, USA.*
- Weast, R.C., D.R. Lide, M.J. Astle y W.H. Beyer (eds). 1989-1990. CRC Handbook of Chemistry and Physics. CRC PRESS: p. F.187.

PSEUDOMONAS FLUORESCENTES COMO AGENTES DE CONTROL DE BACTERIAS PATOGENAS DE PLANTAS:

I. SELECCION DE CEPAS DE PSEUDOMONAS PRODUCTORAS DE SIDEROFOROS

Fluorescent *Pseudomonas* as Control Agents on Plant Pathogen Bacteria:

I. Selection of Siderophore-producing *Pseudomonas* strains

R. Farías-Rodríguez^{1,2}, R. Godínez², E. Zamora² y J. J. Peña-Cabriales³

RESUMEN

A partir de la rizósfera de cultivos de papa se aislaron poblaciones bacterianas fluorescentes del género *Pseudomonas*, que mostraron la capacidad de sintetizar sideróforos en medios de cultivo con bajas concentraciones de hierro. La síntesis de los compuestos se observó desde las 4 h de su crecimiento y fue más evidente en la fase exponencial. Diversos ensayos permitieron observar que los sideróforos presentes en los sobrenadantes de cultivos de las cepas fluorescentes inhibieron, en cultivos líquidos, el crecimiento de los fitopatógenos *Pseudomonas solanacearum* y *Erwinia carotovora*. Al adicionar los sideróforos producidos por las cepas ZUM 80 y ZUM 93, el porcentaje de inhibición para *P. solanacearum* fue superior a 80 %. El efecto inhibitorio pudo ser atribuido a compuestos tipo sideróforo ya que este no se observó cuando se inhibió su síntesis.

Palabras clave: Control biológico, *Erwinia sp.*, *Pseudomonas solanacearum*, hierro, rizobacterias, sideróforos.

SUMMARY

The production of siderophores by rhizosphere bacterial populations of potato plants grown in the field was evaluated under lab conditions. Twelve isolates out of 66 of fluorescent *Pseudomonas* were able to produce siderophores *in vitro* conditions. This value represent 20 % of the total number of isolates tested. The

siderophores present in the supernatant of the bacterial cultures were able to inhibit the growth of two plant pathogens (*Erwinia carotovora* and *Pseudomonas solanacearum*).

Index words: Biological control, *Erwinia sp.*, iron, *Pseudomonas solanacearum*, rhizobacteria, siderophores.

INTRODUCCION

En la rizósfera la disponibilidad de hierro es uno de los factores limitativos para el crecimiento de los microorganismos (O'Sullivan y O'Gara, 1992). El hierro es un elemento importante porque es parte de enzimas que intervienen en reacciones de óxido-reducción y de proteínas que unen oxígeno reversiblemente. A pesar de que el hierro es uno de los elementos más abundantes en la naturaleza, no se encuentra disponible para su asimilación biológica debido a su estado fisico-químico, de manera que los organismos han desarrollado mecanismos eficientes para obtener el metal (Neilands, 1981). Dicho mecanismo de asimilación se basa en la síntesis de sideróforos, descritos como compuestos de bajo peso molecular con una alta afinidad por el ion férrico (Fe^{3+}). Por lo tanto, en esos ambientes las bacterias productoras de sideróforos pueden desplazar a la microflora que compite por el hierro (Leong, 1986). El grupo fluorescente del género *Pseudomonas*, común en el suelo y en mayor número en la rizósfera, se caracteriza también por producir compuestos de este tipo (Dowling y O'Gara, 1994). En ese sentido, se ha reportado que a través de los sideróforos se puede inhibir el crecimiento de fitopatógenos pertenecientes a los géneros *Fusarium*, *Verticillium*, *Rhizoctonia*, *Colletotrichum*, *Phytophthora* y *Erwinia*, entre otros (Elad y Baker, 1985; Kloepper *et al.*, 1980; Savithiry y Gnanamanickam, 1987). Sin embargo, para garantizar una respuesta positiva en los ensayos de biocontrol, se debe realizar una apropiada selección de microorganismos que muestren la capacidad

¹ CINVESTAV-IPN Departamento de Biotecnología y Bioingeniería, México D.F.

² Instituto de Investigaciones Químico-Biológicas, UMSNH, Morelia, Mich., México.

³ CINVESTAV-IPN Unidad Irapuato, Departamento de Biotecnología y Bioquímica, Apartado Postal 629, 36500 Irapuato, Gto. México.

de sintetizar sideróforos, cuya actividad incida, además, sobre el crecimiento de diversos fitopatógenos (Geels y Schippers, 1983; Loper y Buyer, 1991).

El objetivo de este trabajo fue seleccionar, a partir de la rizósfera de papa (*Solanum tuberosum* L.), cepas de *Pseudomonas* del grupo fluorescente productoras de sideróforos y medir *in vitro* su actividad inhibitoria contra los fitopatógenos *Pseudomonas solanacearum* y *Erwinia carotovora* pv. *carotovora*.

MATERIAL Y METODOS

Cuantificación de la Población Total y de Rizobacterias Fluorescentes en Suelo y en Rizósfera

Inicialmente, se determinó la densidad poblacional bacteriana a partir de un cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) cv. Alfa, localizado en la región de Zamora, Estado de Michoacán, en la parte occidental de México. La cuantificación se realizó en la rizósfera y en el suelo alejado de la influencia de la raíz por el método de cuenta viable en placa. En el primer caso, el suelo se separó cuidadosamente de la raíz de tres plantas utilizando espátulas estériles. En el segundo caso se tomaron muestras de suelo alejado 30 cm de la planta (zona de la adafósfera). En ambos casos, se transfirieron 10 g de suelo a frascos de dilución que contenían 95 mL de solución reguladora de fosfatos (pH 7.0) y se agitaron (100 rpm) durante 30 min a 30 °C. Diluciones adecuadas se distribuyeron por triplicado sobre cajas de petri con el medio de cultivo correspondiente y las cajas se incubaron a 30 °C por 48 horas. Posteriormente, se contaron las colonias bacterianas y se reportaron como unidades formadoras de colonias (UFC)/g de suelo seco.

La población aerobia total se cuantificó en un medio de cultivo cuya composición fue (g L⁻¹): peptona de caseína 1.0, extracto de levadura (Bioxon) 1.0, K₂HPO₄ 0.4, (NH₄)₂HPO₄ 0.5, MgSO₄·7H₂O 0.05, FeCl₃·6H₂O 0.01, CaCl₂ 0.1, agar 15; los componentes se disolvieron en una solución preparada con 250 mL de solución de extracto de suelo en 750 mL de agua destilada. La solución de extracto de suelo se preparó sometiendo a ebullición durante 30 min 1 kg de suelo en 1 L de agua destilada y posteriormente filtrando la suspensión en filtro de papel (Whatman No. 1). Para la cuantificación de las rizobacterias fluorescentes se utilizó un medio de cultivo selectivo para el género *Pseudomonas* denominado S1 (Gould *et al.*, 1985).

Aislamiento e Identificación de Colonias Fluorescentes del Género *Pseudomonas*

Posteriormente, se procedió al aislamiento de colonias fluorescentes que crecieron en el medio S1. Para corroborar que los aislados correspondían a *Pseudomonas*, se les realizó la tinción de Gram y las pruebas bioquímicas de la oxidasa, gelatinasa, arginina-hidrolasa, utilización de arabinosa, trehalosa y manitol, de acuerdo con los métodos propuestos por Doudoroff y Palleroni (1974). La caracterización a nivel de cepa se realizó con base en el patrón de resistencia/susceptibilidad a 12 antibióticos.

Selección Primaria de *Pseudomonas* Antagónicas

Los aislados seleccionados se sometieron a pruebas de antibiosis de acuerdo con el método de Geels y Schippers (1983) contra *P. solanacearum* (cepa donada por el Dr. Leopoldo Fucikovsky del Colegio de Postgraduados) y *E. carotovora* pv. *carotovora* (cepa donada por el Dr. Everardo López del IIBE, Universidad de Guanajuato). El ensayo de antibiosis se realizó en cajas con el medio B de King (King *et al.*, 1954) y se seleccionaron los aislamientos fluorescentes de *Pseudomonas* que inhibieron a los patógenos.

Selección de Cepas de *Pseudomonas* Productoras de Sideróforos

Los aislados se ensayaron nuevamente para la prueba de antibiosis pero al medio B de King se le adicionaron 200 mM de FeCl₃, para inhibir la síntesis de sideróforos (Elad y Baker, 1985), y se seleccionaron aquellos que inhibieron a los patógenos en los medios donde no se adicionó hierro.

Detección de Sideróforos en Cultivos Líquidos

El proceso se realizó con base en una técnica ya descrita (Elad y Baker, 1985) que consistió en cultivar los aislamientos en 25 mL del medio SM (30 °C; 100 rpm), compuesto de (g L⁻¹): sacarosa 20, L-asparagina 2.0, K₂HPO₄ 1.0, MgSO₄·7H₂O 0.5, pH 7.0. Después de 24 h, los cultivos se centrifugaron a 5000 rpm por 10 min y los sobrenadantes se filtraron a través de membranas Millipore (0.45 mm). En otros ensayos, las bacterias se cultivaron bajo las condiciones descritas pero al medio

SM se le adicionaron 200 mM de FeCl_3 . Los filtrados se ajustaron a un pH de 5.5. El espectro de absorción de los filtrados se determinó en el intervalo de 360-500 nm (espectrofotómetro Perkin Elmer mod. 200). Adicionalmente, para corroborar la presencia de sideróforos en los filtrados se observó el cambio de coloración del medio de cultivo al adicionar hierro, la fluorescencia bajo luz ultravioleta y su respuesta a la prueba universal para la detección de sideróforos propuesta por Schwyn y Neilands (1987).

La concentración de los sideróforos se determinó empleando los valores de absorbancia y el coeficiente de extinción molar (Meyer y Abdallah, 1978). Las soluciones de sideróforos se prepararon concentrando 10 veces el volumen de los filtrados en un rotavapor mantenido a 35 °C.

Evaluación del Efecto de Sideróforos sobre el Desarrollo de *P. solanacearum* y *E. carotovora*

P. solanacearum y *E. carotovora* se cultivaron en el medio SM al que se le adicionó una concentración de 20 mM de sideróforos presentes en los sobrenadantes de las cepas ZUM 6, ZUM 14, ZUM 52, ZUM 80 y ZUM 93. Como controles se utilizaron medios de cultivo sin sideróforo. Los cultivos se incubaron a 30 °C con agitación y el crecimiento de los patógenos se determinó a las 24 h utilizando los valores de densidad óptica (DO) a 590 nm. Para el análisis estadístico se utilizó un diseño completamente aleatorio con tres repeticiones.

Adicionalmente, se comparó el efecto de los sideróforos de ZUM 80 con el del quelante sintético bupiridina (2,2', dipiridyl, Sigma) en el crecimiento de *P. solanacearum*. Uno de los tratamientos consistió en cultivar a *P. solanacearum* en el medio SM con agitación (100 rpm) a 30 °C y luego adicionarle 20 mM de sideróforo. En otro tratamiento, el patógeno se cultivó en el medio SM con 160 mM de bupiridina, bajo las mismas condiciones. Como controles se utilizaron medios de cultivo sin sideróforo y sin bupiridina. El crecimiento del patógeno se determinó a las 5, 10 y 24 h tomando los valores de DO a 590 nm. Para el análisis estadístico se utilizó un diseño completamente aleatorio con tres repeticiones.

RESULTADOS Y DISCUSION

Densidad Poblacional

El análisis poblacional de las bacterias mostró que la densidad rizosférica fue superior a la encontrada en el suelo no rizosférico (Cuadro 1). Los datos también indicaron que la población de *Pseudomonas* ocupa un lugar importante en la rizósfera, ya que se obtuvieron valores de 7.3×10^5 (UFC g^{-1} de suelo seco) en esta zona, en comparación a los de 3.0×10^4 detectados en el suelo no rizosférico. Esta diferencia se observó también en el grupo fluorescente de *Pseudomonas*: la densidad de este grupo en la rizósfera fue en promedio de 1.2×10^3 mientras que en el suelo fue de 4.4×10^2 . Lo anterior apoya las observaciones sobre la gran capacidad que tienen ciertos grupos bacterianos, como *Pseudomonas*, para colonizar y permanecer en la rizósfera (James *et al.*, 1985; Loper *et al.*, 1985). Se ha propuesto que los exudados radiculares son de los factores más importantes para estimular una mayor densidad poblacional microbiana en este habitat (Bazin *et al.*, 1990). Sin embargo, no todos los compuestos liberados pueden ser utilizados por los microorganismos para crecer, ya que algunos de estos compuestos resultan tóxicos para determinados grupos microbianos y por lo tanto tienen un efecto selectivo. Por lo anterior, se ha reportado que las plantas participan en la selección de las poblaciones microbianas que habitan en la rizósfera (Whipps, 1990).

La presencia y actividad de algunos microorganismos en la rizósfera pueden ser de beneficio para el desarrollo vegetal, ya que intervienen en procesos tales como la fijación biológica de nitrógeno o la solubilización de elementos inorgánicos de difícil adquisición. El género

Cuadro 1. Densidad poblacional bacteriana del suelo y rizósfera de cultivos de papa (*Solanum tuberosum* L.).

	Población bacteriana total	<i>Pseudomonas</i> población total	<i>Pseudomonas</i> grupo fluorescente
Suelo (edafosfera)	2.1×10^6	3.0×10^4	4.4×10^2
Rizosfera	2.4×10^7	7.3×10^5	1.2×10^3

Los valores son expresados en unidades formadoras de colonias (UFC) g^{-1} de suelo seco y representan el promedio de tres repeticiones.

Pseudomonas del grupo fluorescente ha recibido mucha atención en este aspecto porque se ha observado que sintetiza compuestos tales como reguladores de crecimiento, antibióticos, ácidos orgánicos y sideróforos, entre los más importantes, los que pueden incidir directamente en el metabolismo vegetal (Fariás-Rodríguez *et al.*, 1990).

Aislamiento de *Pseudomonas* y Selección de Cepas Productoras de Sideróforos

Se aislaron 116 colonias bacterianas las cuales tuvieron capacidad para crecer en el medio selectivo S1, indicando con esto pertenecer al género *Pseudomonas* (Gould, *et al.*, 1985). De estos aislados, 66 produjeron inhibición del crecimiento de *P. solanacearum* y *E. carotovora*. Sin embargo, cuando al medio de cultivo se le adicionó hierro se observó que el efecto inhibitorio de los patógenos estaba relacionado con dicho metal sólo en 12 de ellos (ZUM 6, ZUM 14, ZUM 36, ZUM 52, ZUM 63, ZUM 65, ZUM 80, ZUM 93, ZUM 106, ZUM 109, ZUM 113 y ZUM 116), sugiriendo por lo anterior el involucramiento de sideróforos (Geels y Schippers, 1983). Este método es rápido, sencillo y permite seleccionar bacterias productoras de sideróforos a bajo costo (O'Sullivan y O'Gara, 1992).

Los 12 aislados fueron sometidos a pruebas bioquímicas adicionales para reafirmar que pertenecían al grupo fluorescente del género *Pseudomonas*. Los aislados fueron Gram negativos, oxidasa positivos, degradaron la gelatina, arginina-hidrolasa negativos y no crecieron en arabinosa, trehalosa o manitol, como única fuente de carbono. Adicionalmente, su patrón de resistencia/susceptibilidad a antibióticos permitió separar a los aislados a nivel de cepa (datos no mostrados).

El efecto inhibitorio observado fue cualitativamente más evidente con las cepas ZUM 6, ZUM 14, ZUM 52, ZUM 80 y ZUM 93. En los 54 aislamientos en los que la inhibición se presentó, aun en presencia de hierro, el efecto probablemente se debió a compuestos de tipo antibiótico, ya que se ha demostrado que *Pseudomonas* también puede sintetizarlos (Bangera y Thomashow, 1996; Dowling y O'Gara, 1994; Leisinger y Margraff, 1979; Thomashow *et al.*, 1990).

Detección de Sideróforos

Los espectros de absorción de los sobrenadantes obtenidos de cultivos de las 12 cepas seleccionadas presentaron picos máximos en el intervalo de 400-410 nm,

como se muestra para ZUM 80 y ZUM 93 (Figura 1). En estas condiciones el pico fue mayor para ZUM 80. En los sobrenadantes de cultivos a los que se agregó hierro no se detectaron picos de absorbancia en esas longitudes de onda. Lo anterior apoya las observaciones que señalan que el hierro es el factor más importante que regula la síntesis de sideróforos en *Pseudomonas* y que la presencia de una alta concentración de este elemento bloquea la síntesis de esos compuestos (Meyer y Abdallah, 1978). Por otro lado, en ambientes donde existen bajas concentraciones de hierro se induce el sistema para la captación del elemento (Neilands, 1981).

El viraje del color azul-verde, del medio de cultivo, a café cuando se agrega hierro, la fluorescencia bajo luz ultravioleta y la máxima absorbancia entre las longitudes de onda de 400-410 nm son características distintivas de los sideróforos de *Pseudomonas* (Meyer y Abdallah, 1978; Neilands, 1981). No obstante, la presencia de sideróforos se detectó también utilizando el método propuesto por Schwyn y Neilands (1987) y en todos los sobrenadantes analizados los resultados fueron positivos, ya que los medios de color azul cambiaron a la típica coloración naranja cuando se permitió la síntesis de tales compuestos.

Para observar la cinética de síntesis de los sideróforos se utilizaron las cepas ZUM 80 y ZUM 93. En ambos casos se pudo observar que las bacterias comenzaron

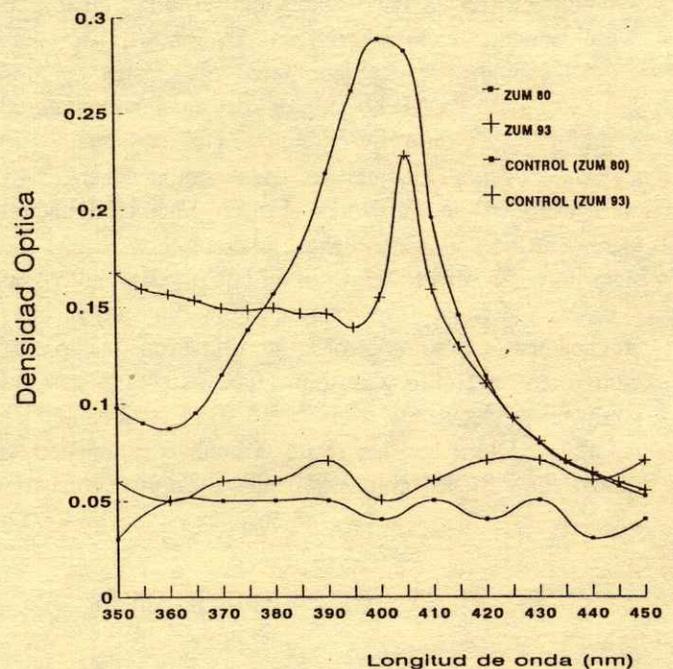


Figura 1. Espectros de absorción en sobrenadantes de bacterias fluorescentes.

a sintetizar los compuestos desde las 4 h de crecimiento, alcanzando una concentración máxima con ZUM 80 (19 μM) a las 12 h y para ZUM 93 (18 μM) a las 8 h (Figura 2). Al comparar con la curva de crecimiento de ambas cepas fue evidente que en uno y otro caso la síntesis de sideróforos inició en la fase de crecimiento exponencial y se estabilizó durante la fase estacionaria. Durante la fase exponencial la población bacteriana necesita proveerse de nutrimentos para crecer, por lo que la síntesis de sideróforos en esta etapa puede ser de vital importancia.

Actividad Antagónica de los Sideróforos

En estos ensayos y de acuerdo con el análisis de varianza se observaron diferencias significativas que permitieron inferir que desde las 5 h de crecimiento los sideróforos inhibieron el crecimiento de *P. solanacearum*.

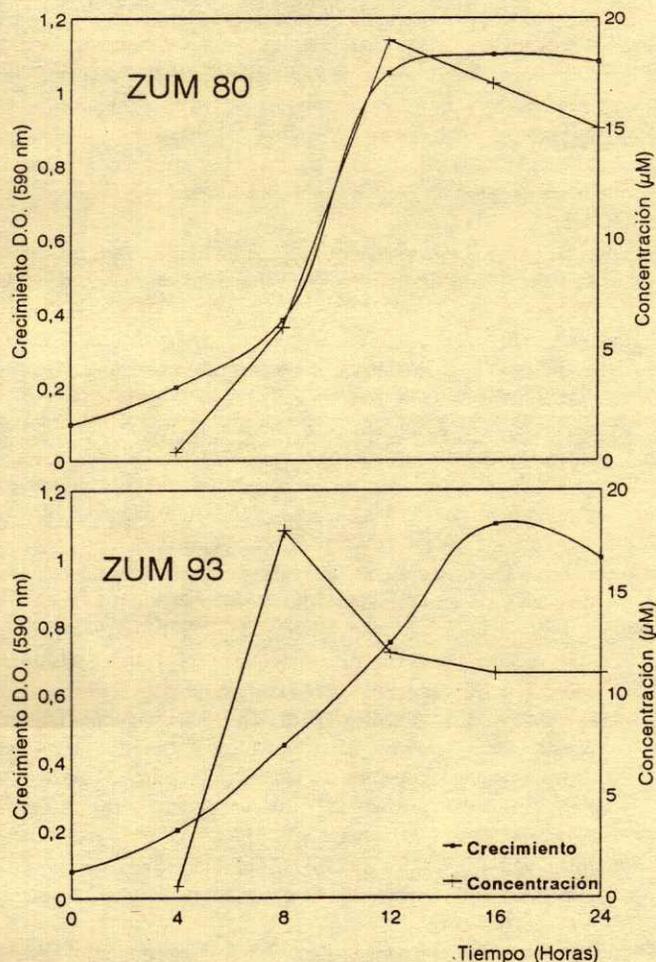


Figura 2. Relación entre síntesis de sideróforos y crecimiento bacteriano.

en la misma magnitud que lo hizo el quelante sintético denominado biperidina (Cuadro 2). A las 24 h los cultivos en presencia de sideróforos disminuyeron considerablemente su crecimiento con respecto a los tratamientos sin sideróforos. Es importante mencionar que al adicionar hierro a los medios de cultivo, la inhibición no se presentó en ninguno de los tratamientos.

En ensayos subsecuentes, los sideróforos provenientes de ZUM 6, ZUM 14, ZUM 52, ZUM 80, y ZUM 93 suprimieron el crecimiento tanto de *P. solanacearum* como de *E. carotovora* (Cuadro 3). En todos los casos el porcentaje de inhibición fue mayor que 50 %, con respecto al control. Fue interesante observar que a pesar de que *P. solanacearum* pertenece al mismo género de las poblaciones fluorescentes, se inhibió con los sideróforos de estas bacterias.

Nuestros resultados apoyan los estudios que proponen que los sideróforos sintetizados por ciertos grupos bacterianos pueden inhibir el crecimiento de microorganismos perjudiciales a las plantas (Leong, 1986; Loper y Buyer, 1991). Los sideróforos de *Pseudomonas* denominados pioverdinas o pseudobactinas, poseen como ligantes a grupos de hidroxamato y a un cromóforo fluorescente los cuales están unidos por cadenas de aminoácidos. Estos sideróforos poseen constantes de estabilidad elevadas (10^{32}) lo cual les permite tener una mayor afinidad por el ion férrico que los de otros microorganismos (Loper y Buyer, 1991). En la rizósfera, la síntesis de sideróforos por *Pseudomonas* puede ser un factor de beneficio para el desarrollo vegetal porque al atrapar el hierro por este mecanismo, suprime a la microflora perjudicial. Asimismo, la inhibición de patógenos en los denominados suelos supresivos se debe en gran parte a la alta densidad poblacional de *Pseudomonas* que sintetizan sideróforos (Kloepper *et al.*, 1980; Schroth y Hancock, 1982). En algunos casos se ha analizado el efecto benéfico de las cepas productoras de

Cuadro 2. Efecto de la adición de quelantes en el crecimiento de *Pseudomonas solanacearum*.

Tratamiento	Periodo de incubación		
	5 horas	10 horas	24 horas
	DO (590 nm)		
Control	0.23 a	0.70 a	1.10 a
Sideróforo	0.05 b	0.20 b	0.61 b
Biperidina	0.11 b	0.12 b	0.12 c

El ensayo se realizó en el medio SM. La concentración de sideróforo fue de 20 mM y de biperidina de 160 mM. Como controles se utilizaron medios de cultivo sin sideróforo y sin biperidina. Los valores con diferente letra son diferentes significativamente ($p=0.05$), de acuerdo con la prueba de Tukey. DO = densidad óptica.

Cuadro 3. Efecto de la adición de sideróforos sobre el crecimiento de bacterias fitopatógenas.

Fuente del sideróforo	<i>Pseudomonas solanacearum</i> DO (590 nm)	<i>Erwinia carotovora</i> DO (590 nm)
ZUM 6	0.32 b	0.24 b
ZUM 14	0.51 b	0.20 b
ZUM 52	0.43 b	0.27 b
ZUM 80	0.16 b	0.45 b
ZUM 93	0.14 b	0.25 b
Control	1.16 a	1.23 a

Los patógenos fueron cultivados en el medio SM con 20 mM del sideróforo del aislado indicado y se incubó a 30 °C por 24 h. Los valores representan la densidad óptica (590 nm). Letras diferentes indican diferencia significativa ($p=0.05$). La separación de medias se realizó por la prueba Tukey.

DO = densidad óptica.

sideróforos en la protección y en la promoción del crecimiento de cultivos en el campo con resultados positivos (Colyer y Mount, 1984; Savithiry y Gnanamanickam, 1987; Sivamani y Gnanamanickam, 1988).

En virtud de la importancia que tienen los sideróforos, se deben incrementar los estudios relacionados con la ecología de las bacterias que sintetizan este tipo de compuestos, así como con los principales factores bióticos y abióticos que afectan la síntesis y la actividad de los sideróforos en ambientes naturales (Bossier *et al.*, 1988). Asimismo, es importante conocer la capacidad de colonización de la raíz que tienen las bacterias benéficas introducidas al suelo (Davison, 1988; Kloepper y Beauchamp, 1992). Por lo tanto, es necesario diseñar métodos que permitan realizar estudios en microambientes tan importantes y tan complejos como la rizósfera. Lo anterior facilitará la utilización eficiente de los microorganismos productores de sideróforos como agentes para el control biológico.

LITERATURA CITADA

- Bangera, M.G. y L.S. Thomashow. 1996. Characterization of a genomic locus required for synthesis of the antibiotic 2,4-diacetylphloroglucinol by the biological control agent *Pseudomonas fluorescens* Q2-87. *Mol. Plant-Microbe Interact.* 9: 83-90.
- Bazin, M.J., P. Markam, E.M. Scott y J.M. Lynch. 1990. Population dynamics and rhizosphere interaction. pp. 99-127. *In:* J.M. Lynch (ed.). *The rhizosphere*. Wiley and Sons, Nueva York.
- Bossier, P., M. Hofte y W. Verstraete. 1988. Ecological significance of siderophores in soil. *Adv. Microbiol. Ecol.* 10: 385-414.
- Colyer, P.D. y M.S. Mount. 1984. Bacterization of potatoes with *Pseudomonas putida* and its influence on postharvest soft rot diseases. *Plant Disease* 68: 703-706.
- Davison, J. 1988. Plant beneficial bacteria. *Bio/Technology* 6: 282-286.
- Doudoroff, M. y N.J. Palleroni. 1974. *Pseudomonas*. pp. 217-243. *In:* R.E. Buchanan y N.E. Gibbons (eds). *Bergey's manual of determinative bacteriology*, 8th edition. The Williams & Wilkins Co., Baltimore.
- Dowling, N. y F. O'Gara. 1994. Metabolites of *Pseudomonas* involved in the control of plant disease. *Trends Biotechnol.* 12: 133-141.
- Elad, Y. y R. Baker. 1985. Influence of trace amounts of cations and siderophore-producing pseudomonads on chlamyospore germination of *Fusarium oxysporum*. *Phytopathology* 75: 1047-1052.
- Farias-Rodríguez, R., E. Soriano y C. Cervantes. 1990. Los sideróforos microbianos y su influencia en el desarrollo vegetal. *Rev. Lat-amer. Microbiol.* 32: 221-227.
- Geels, F.P. y B. Schippers. 1983. Selection of antagonistic fluorescent *Pseudomonas* spp. and their root colonization and persistence following treatment of seed potatoes. *Phytopathol. Z.* 108: 193-206.
- Gould, W.D., C. Hagedorn, T.R. Bardinelli y R.M. Zablatowicz. 1985. New selective media for enumeration and recovery of fluorescent pseudomonads from various habitat. *Appl. Environ. Microbiol.* 49: 28-32.
- James, D.W., T.V. Suslow y K.E. Steinback. 1985. Relationships between rapid, firm adhesion and long-term colonization of roots by bacteria. *Appl. Environ. Microbiol.* 50: 392-397.
- King, E.D., M.K. Ward y D.D. Raney. 1954. Two simple media for the demonstration of pyocyanin and fluorescein. *J. Lab. Clin. Med.* 44: 301-307.
- Kloepper, J.W. y C.J. Beauchamp. 1992. A review of issues related to measuring colonization of plant roots by bacteria. *Can. J. Microbiol.* 38: 1219-1232.
- Kloepper, J.K., J. Leong, M. Teintze y M.N. Schroth. 1980. *Pseudomonas* siderophores: a mechanism explaining disease-suppressive soils. *Curr. Microbiol.* 4: 317-320.
- Leisinger, T. y R. Margraff. 1979. Secondary metabolites of the fluorescent pseudomonads. *Microbiol. Rev.* 43: 422-442.
- Leong, J. 1986. Siderophores: their biochemistry and possible role in the biocontrol of plant pathogens. *Annu. Rev. Phytopathol.* 24: 187-209.
- Loper, J.E. y J.S. Buyer. 1991. Siderophores in microbial interactions on plant surfaces. *Mol. Plant-Microbe Interact.* 4: 5-13.
- Loper, J.E., C. Haack y M.N. Schroth. 1985. Population dynamics of soil pseudomonads in the rhizosphere of potato. (*Solanum tuberosum* L.). *Appl. Environ. Microbiol.* 49: 416-422.
- Meyer, J.M. y M.A. Abdallah. 1978. The fluorescent pigment of *Pseudomonas fluorescens*: biosynthesis, purification and physicochemical properties. *J. Gen. Microbiol.* 107: 319-328.
- Neilands, J.B. 1981. Microbial iron compounds. *Annu. Rev. Biochem.* 50: 715-731.
- O'Sullivan, D.J. y F. O'Gara. 1992. Traits of fluorescent *Pseudomonas* spp. involved in suppression of plant root pathogens. *Microbiol. Rev.* 56: 662-676.
- Savithiry, S. y S.S. Gnanamanickam. 1987. Bacterization of peanut with *Pseudomonas fluorescens* for biological control of *Rhizoctonia solani* and for enhanced yield. *Plant Soil* 102: 11-15.

- Schroth, M. y J.G. Hancock. 1982. Disease-suppressive soil and root-colonizing bacteria. *Science* 216: 1376-1381.
- Schwyn, B. y J.B. Neilands. 1987. Universal chemical assay for the detection and determination of siderophores. *Anal. Biochem.* 160: 47-56.
- Sivamani, E. y S.S. Gnanamanickam. 1988. Biological control of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* in banana by inoculation with *Pseudomonas fluorescens*. *Plant Soil* 107: 3-9.
- Thomashow, L.S., D.M. Weller, R.F. Bonsall y L.S. Pierson. 1990. Production of the antibiotic phenazine-1-carboxylic acid by fluorescent *Pseudomonas* species in the rhizosphere of wheat. *Appl. Environ. Microbiol.* 56: 908-912.
- Whipps, J.M. 1990. Carbon economy. pp. 59-97. *In:* J.M. Lynch (ed). *The Rhizosphere*. Wiley and Sons, Nueva York.

PSEUDOMONAS FLUORESCENTES COMO AGENTES DE CONTROL DE BACTERIAS PATOGENAS DE PLANTAS:

II. INOCULACION EN PLANTA

Fluorescent *Pseudomonas* as Control Agents on Plant Pathogen Bacteria: II. Plant Inoculation

R. Farías-Rodríguez^{1,2}, E. Zamora² y J. J. Peña-Cabriales³

RESUMEN

La inoculación de tubérculos de papa (*Solanum tuberosum* L.) con cepas fluorescentes del género *Pseudomonas*, previamente seleccionadas con base en su producción de sideróforos *in vitro*, protegió a las plantas de la marchitez provocada por *Pseudomonas solanacearum*. En algunos casos, incluso se lograron aumentos en el crecimiento vegetal (30 % con la cepa ZUM 93) y en el desarrollo radicular (50 % con la cepa ZUM 93 y 30 % con la cepa ZUM 80). La protección vegetal al mencionado patógeno fue consistente, ya que se observaron resultados muy similares en los dos ensayos realizados. Este es el primer informe en México donde se utilizan cepas fluorescentes para el control de uno de los patógenos más destructivos a nivel mundial y representa un acercamiento para poder realizar dicho biocontrol a nivel de campo.

Palabras clave: Control biológico, rizobacterias, sideróforos, *Solanum tuberosum*.

SUMMARY

The performance of two fluorescent *Pseudomonas* strains as control agents of wilt, caused by *Pseudomonas solanacearum* in potato plants, was evaluated under greenhouse conditions. The results showed a significant protection of the plant by the inoculation of the two strains studied. Even more, values of vegetative growth and root system development were statistically higher in those treatments inoculated with the fluorescent *Pseudomonas* as compared to the uninoculated controls.

¹ CINVESTAV-IPN Departamento de Biotecnología y Bioingeniería, México D. F.

² Instituto de Investigaciones Químico-Biológicas, UMSNH, Morelia, Mich., México.

³ CINVESTAV-IPN, Unidad Irapuato, Apartado Postal 629, 36500 Irapuato, Gto. México.

Aceptado: Septiembre de 1997.

Index words: Biological control, rhizobacteria, siderophores, *Solanum tuberosum*.

INTRODUCCION

En el suelo se desarrollan comunidades microbianas muy diversas que responden al estímulo de las raíces vegetales (Burr y Caesar, 1984). Estos organismos, en conjunto con factores abióticos, dan origen a un microambiente único denominado rizósfera. En ese sentido, la rizósfera representa una zona de importancia biológica, en donde las bacterias constituyen los microorganismos predominantes y los que a través de su actividad pueden ocasionar beneficio o perjuicio en el desarrollo de las plantas. En este hábitat, predominan bacterias del género *Pseudomonas* del grupo fluorescente, que se distinguen además por sintetizar antibióticos y sideróforos (O'Sullivan y O'Gara, 1992). La producción de dichos compuestos ha sido relacionada con la capacidad de *Pseudomonas* para estimular el desarrollo vegetal, fenómeno en el cual está implicada la supresión de microorganismos fitopatógenos (Burkhead *et al.*, 1995; Dowling y O'Gara, 1994; Gardner *et al.*, 1984; Kloepper *et al.*, 1980; Leong, 1986; Rosales *et al.*, 1995). Se ha logrado obtener un aumento significativo en el crecimiento y la producción de papa (*Solanum tuberosum* L.) al tratar previamente los tubérculos con bacterias fluorescentes del género *Pseudomonas* (Burr *et al.*, 1978). Asimismo, en otros estudios se logró incrementar significativamente el desarrollo radicular al inocular plántulas de papa con cepas de *P. fluorescens* y *P. putida* y la actividad se relacionó con la síntesis bacteriana de sideróforos ya que las cepas mutantes (sideróforo negativas) no promovieron dicho crecimiento (Bakker *et al.*, 1987). Se sabe que los sideróforos forman parte de un mecanismo para la absorción de hierro. Este metal, a pesar de ser abundante en la naturaleza, en ambientes aeróbicos es poco disponible para su asimilación biológica (Neilands, 1981a,b). Los sideróforos tienen una alta afinidad por el ion férrico y se sintetizan en respuesta a bajas concentraciones del metal. Así, los microorganismos que

sintetizan sideróforos con mayor afinidad por el hierro pueden desplazar a la microbiota que compite por dicho metal (Jurkevich *et al.*, 1992; Kloepper *et al.*, 1980).

Desde hace tiempo se han realizado, principalmente bajo condiciones controladas, ensayos de biocontrol utilizando bacterias productoras de sideróforos (Bakker *et al.*, 1987). En el campo, sin embargo, los resultados han sido poco alentadores, debido quizás al desconocimiento de aspectos ecológicos de la interacción planta-bacteria (Burr y Caesar, 1984). En este trabajo se reportan los resultados del potencial que tienen ciertos aislamientos fluorescentes del género *Pseudomonas* en la protección de cultivos de papa contra el ataque del patógeno *P. solanacearum*, considerado como uno de los fitopatógenos más destructivos en el mundo. Esta especie causa marchitamiento en aproximadamente 30 familias de vegetales, incluyendo la Solanacea (Gross y Cody, 1985).

MATERIALES Y METODOS

Las cepas fluorescentes ZUM 80 y ZUM 93 del género *Pseudomonas* fueron aisladas de la rizósfera de papa, éstas mostraron marcada actividad inhibitoria contra *P. solanacearum* (datos no publicados). La cepa de *P. solanacearum* fue donada por el Dr. Leopoldo Fucikovsky del Colegio de Postgraduados. Los tubérculos de papa (*Solanum tuberosum* L.) cultivar Alfa fueron proporcionados por el Ing. Ramiro Rocha del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias, Celaya, Guanajuato.

Ensayos de Biocontrol

Las cepas fluorescentes y las bacterias patógenas, se cultivaron previamente en 250 mL de caldo nutritivo con glicerol (1%), durante 48 h a 30 °C y en agitación a 100 rpm. Posteriormente, tubérculos de papa divididos en porciones con un brote fueron sumergidos, durante 30 min, en una suspensión de las cepas fluorescentes (10^9 UFC mL⁻¹). Las porciones de papa ya bacterizadas se sembraron, a 5 cm de profundidad, en macetas que contenían 1 kg de una mezcla de suelo orgánico y arena (3:1), no estéril. Previamente, el suelo de cada maceta había sido inoculado con 20 mL de una solución con *P. solanacearum* (10^9 UFC mL⁻¹). Como controles se utilizaron brotes tratados sólo con agua destilada y sembrados en suelo con o sin *P. solanacearum*. Las plantas se cultivaron en el invernadero durante 21 días a 30 °C con un régimen de 12 h de luz y 12 h de oscuridad. En esta etapa, el índice de protección se determinó a

través del peso seco del follaje y de la raíz. Para el análisis se utilizó un diseño estadístico de bloques al azar con cinco repeticiones y la separación de los promedios se realizó por la prueba de Tukey. El arreglo en bloques permitió disminuir los riesgos de contaminación entre los tratamientos. El potencial benéfico de las cepas fluorescentes fue nuevamente probado en un segundo ensayo que se realizó 90 días después del primer ensayo, bajo las condiciones anteriormente descritas.

RESULTADOS Y DISCUSION

En el presente estudio el análisis de varianza permitió establecer diferencias significativas entre los tratamientos en relación al peso del follaje (Figura 1). En los tratamientos inoculados con la cepa ZUM 80 se observó que las plantas de papa fueron protegidas de la enfermedad y el desarrollo del follaje fue similar al control. Aun cuando la cepa ZUM 93 protegió al cultivo de papa del marchitamiento, su eficiencia fue inferior a la de la cepa ZUM 80. Adicionalmente, se observó que en el suelo no infectado con *P. solanacearum* la inoculación previa con la cepa ZUM 80 permitió un mayor crecimiento de las plantas. En este sentido, es importante destacar que algunas especies del grupo fluorescente del género *Pseudomonas* han despertado mucho interés porque bajo ciertas circunstancias incrementan el desarrollo de las plantas por mecanismos tales como la supresión de patógenos que se da a través de la síntesis de sideróforos y antibióticos (Henry *et al.*, 1991; Leeman *et al.*, 1995; Lindow *et al.*, 1996; Raaijmakers *et al.*, 1995; Savithiry y Gnanamanickam, 1987; Van Peer y Schippers, 1989; Wei *et al.*, 1996).

En el presente estudio, aunque no conocemos con certeza el mecanismo, probablemente la producción de sideróforos contribuyó en la protección observada ya que las cepas ZUM 80 y ZUM 93 han mostrado inhibir *in vitro* a *P. solanacearum* y se ha demostrado que los sideróforos sintetizados por dichas cepas son los responsables de la inhibición (Fariás-Rodríguez *et al.*, 1997). En el caso de la promoción en el crecimiento vegetal, se debe de considerar también el papel de los reguladores de crecimiento que rizobacterias como *Pseudomonas* pueden sintetizar (Burr y Caesar, 1984; Fariás-Rodríguez, 1989).

Resultados similares de protección al patógeno se observaron en el segundo ensayo (Figura 2). En las plantas de papa cultivadas en suelo infectado, y que previamente fueron bacterizadas con las cepas ZUM 80 y

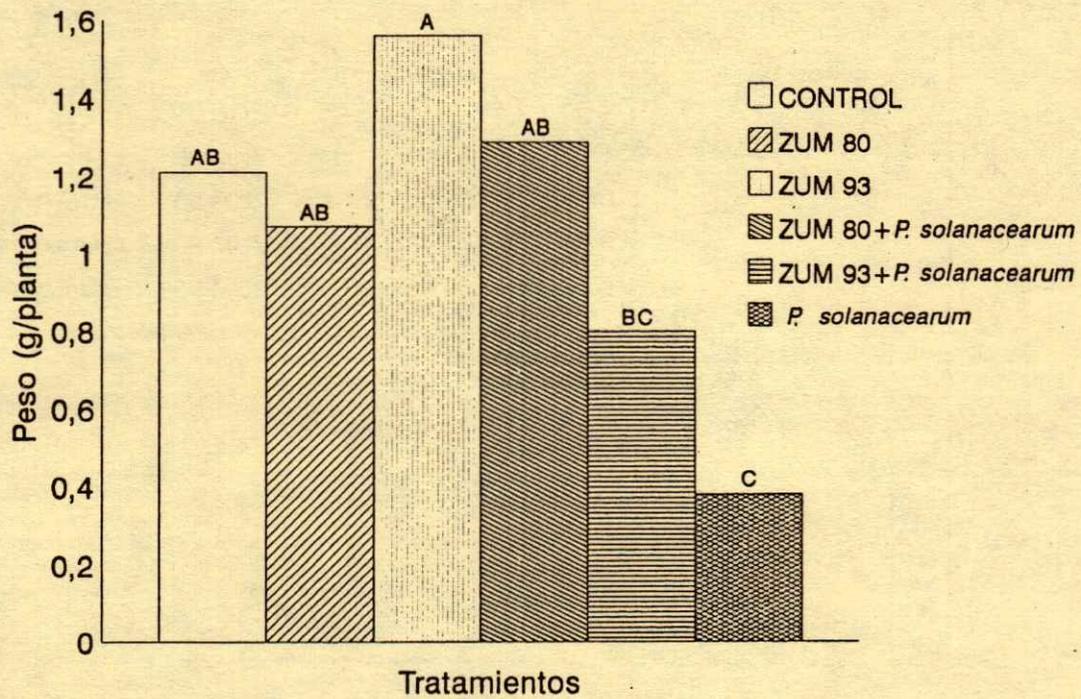


Figura 1. Efecto de la inoculación de aislamientos fluorescentes del género *Pseudomonas* en el peso seco del follaje de cultivos de papa (Ensayo I).

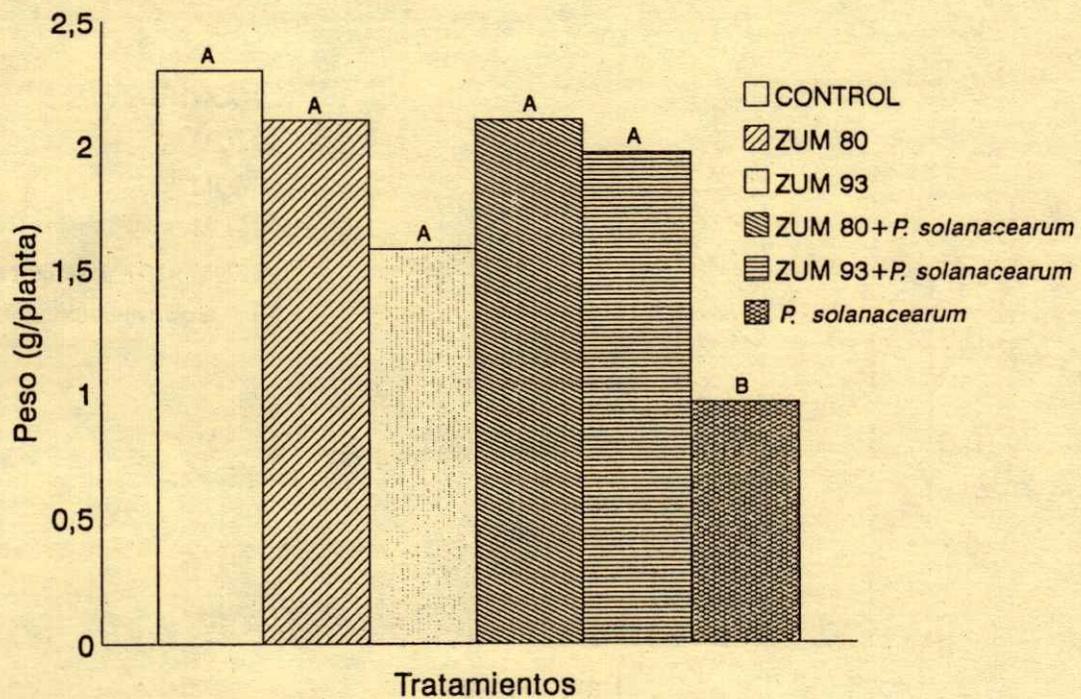


Figura 2. Efecto de la inoculación de aislamientos fluorescentes del género *Pseudomonas* en el peso seco del follaje de cultivos de papa (Ensayo II).

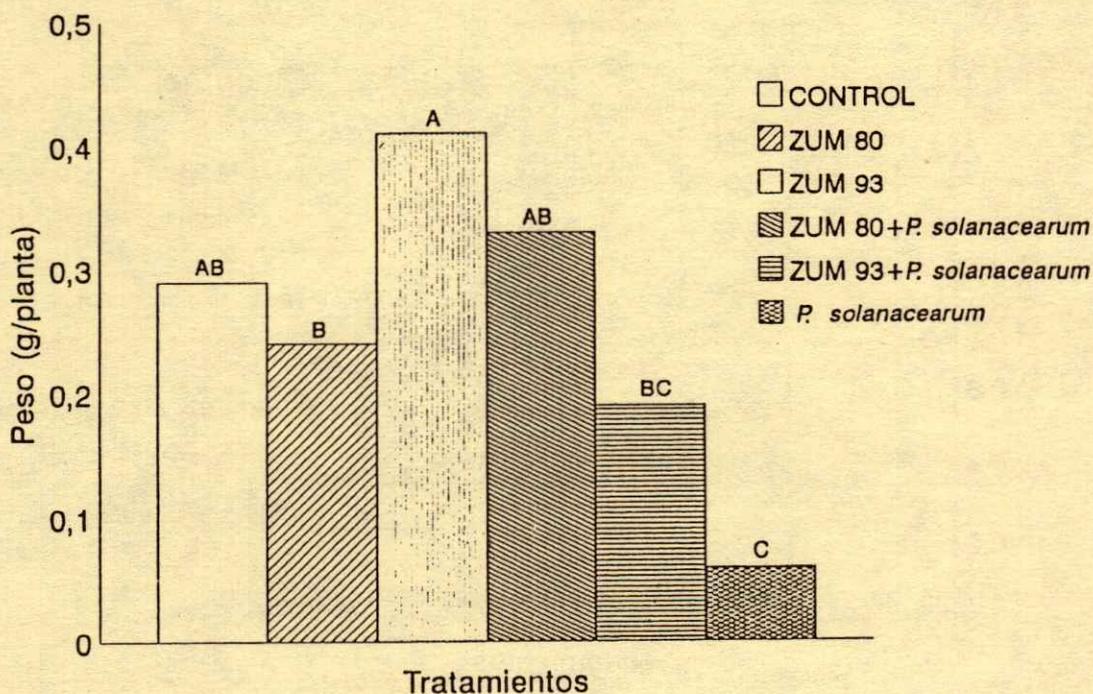


Figura 3. Efecto de la inoculación de aislamientos fluorescentes del género *Pseudomonas* en el peso seco de raíz de cultivos de papa (Ensayo I).

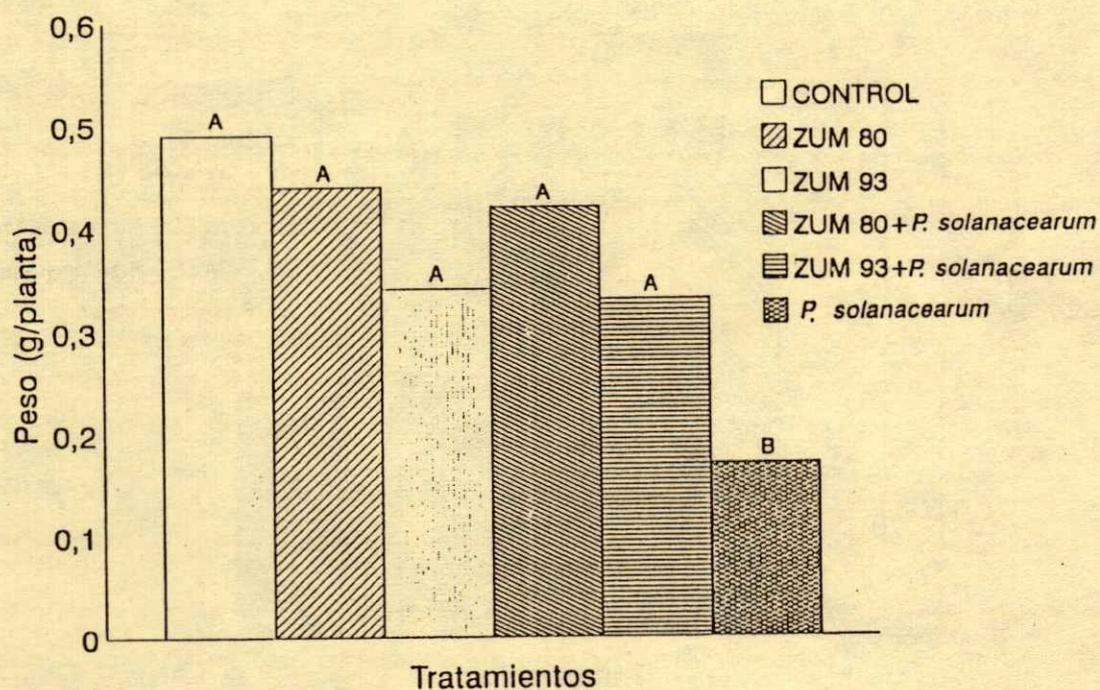


Figura 4. Efecto de la inoculación de aislamientos fluorescentes del género *Pseudomonas* en el peso seco de raíz de cultivos de papa (Ensayo II).

ZUM 93, no se observó desarrollo de la enfermedad, manifestándose en un desarrollo del follaje similar al control. Sin embargo, en este caso no se observó promoción del crecimiento vegetal como en el primer ensayo. Se ha mencionado antes que el comportamiento y la influencia de las rizobacterias sobre el crecimiento vegetal dependen de múltiples factores como lo son el tipo de suelo, la temperatura, el potencial de agua, la disponibilidad de sustratos orgánicos y la competencia con otros microorganismos (Dowling y O'Gara, 1994). Quizás lo anterior explique los resultados observados en nuestro estudio ya que muchos de estos factores interactúan constantemente y por lo tanto son difíciles de controlar.

En relación al desarrollo de la raíz, fue evidente que el tratamiento con la cepa ZUM 80, en suelo infectado, previno la enfermedad en mayor grado que la cepa ZUM 93 (Figura 3). No obstante, en el suelo no infectado la cepa ZUM 93 promovió un mayor desarrollo radicular, como ya había sido observado con el desarrollo del follaje. Fue evidente que en las plantas cultivadas en suelo infectado, y no bacterizadas con las cepas fluorescentes, se presentó la marchitez y el desarrollo de la raíz fue considerablemente menor, con respecto al control.

En el segundo experimento, las dos cepas protegieron a la raíz del ataque del patógeno, manifestándose en los valores de peso seco, similares estadísticamente al control (Figura 4). Se observó también la ausencia de promoción en el desarrollo de la raíz. Los resultados de protección radicular observados aquí son alentadores debido a que son pocos los éxitos alcanzados en el control de patógenos que atacan la raíz (Campbell, 1989). Hasta el momento no se dispone de un método de control efectivo contra microorganismos patógenos de la raíz y las pérdidas en la producción agrícola han llevado a un incremento en la búsqueda de métodos de control (químicos y/o biológicos) (O'Sullivan y O'Gara, 1992).

Estudios de este tipo pueden contribuir con el control integrado de fitopatógenos difíciles de combatir. Adicionalmente, se espera que con este tipo de biocontrol se pueda reducir la contaminación ambiental producida por los compuestos químicos. Sin embargo, para poder explotar el potencial que representan las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal, es necesario analizar su comportamiento a nivel agrícola, considerando los factores bióticos y abióticos que afectan su actividad.

LITERATURA CITADA

- Bakker, P.A. H.M., A.W. Bakker, J.D. Marugg, P.J. Weisbeek y B. Schippers. 1987. Bioassay for studying the role of siderophores in potato growth stimulation by *Pseudomonas* spp. *Soil Biol. Biochem.* 19: 443-449.
- Burr, T.J., M.N. Schroth y T.V. Suslow. 1978. Increased potato yields by treatment of seed pieces with specific strains of *Pseudomonas fluorescens* and *P. putida*. *Phytopathology* 68: 1377-1383.
- Burr, T.J. y A. Caesar. 1984. Beneficial plant bacteria. *Crit. Rev. Plant Sci.* 2: 1-20.
- Burkhead, K.D., D.A. Schisler y P.J. Slininger. 1995. Bioautography shows antibiotic production by soil bacterial isolates antagonistic to fungal dry rot of potatoes. *Soil Biol. Biochem.* 27: 1611-1616.
- Campbell, R. 1989. Biological control of microbial plant pathogens. Cambridge University Press, Great Britain.
- Dowling, D.N. y F. O'Gara. 1994. Metabolites of *Pseudomonas* involved in the biocontrol of plant disease. *Trends Biotechnol.* 12: 133-141.
- Farias-Rodríguez, R. 1989. Las poblaciones bacterianas de la rizósfera de papa (*Solanum tuberosum* L.). Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México. (Tesis de Maestría).
- Farias-Rodríguez, R., R. Godínez, E. Zamora y J.J. Peña-Cabriales. 1997. *Pseudomonas* fluorescentes como agentes de control de bacterias patógenas de plantas. I. Selección de cepas de *Pseudomonas* productoras de sideróforos. (En este volumen de Terra).
- Gardner, J.M., J.L. Chandler y A.W. Feldman. 1984. Growth promotion and inhibition by antibiotic-producing fluorescent pseudomonads on citrus roots. *Plant Soil* 77: 103-113.
- Gross, D.C. y S. Cody. 1985. Mechanisms of plant pathogenesis by *Pseudomonas* species. *Can J. Microbiol.* 31: 403-410.
- Henry, M.B., J.M. Lynch y T.R. Femor. 1991. Role of siderophores in the biocontrol of *Pseudomonas tolaasii* by fluorescent pseudomonas antagonist. *J. Appl. Bacteriol.* 70: 104-108.
- Jurkevich, E., Y. Hadar y Y. Chen. 1992. Differential siderophore utilization and iron uptake by soil and rhizosphere bacteria. *Appl. Environ. Microbiol.* 58: 119-124.
- Klopper, J., J. Leong, M. Teintze y M.N. Schroth. 1980. *Pseudomonas* siderophores: a mechanism explaining disease-suppressive soils. *Current Microbiol.* 4: 317-320.
- Leeman, M., J.A. Van Pelt, M.J. Hendrickx, R.J. Scheffer, P.A.H.M. Bakker y B. Schippers. 1995. Biocontrol of *Fusarium* wilt of radish in commercial greenhouse trials by seed treatment with *Pseudomonas fluorescens* WCS374. *Phytopathology* 85: 1301-1305.
- Leong, J. 1986. Siderophores: their biochemistry and possible role in the biocontrol of plant pathogens. *Annu. Rev. Phytopathol.* 24: 187-209.
- Lindow, S.E., G. McGourty y R. Elkins. 1996. Interactions of antibiotics with *Pseudomonas fluorescens* strains A506 in the control of fire blight and frost injury to pear. *Phytopathology* 86: 841-848.
- Neilands, J.B. 1981a. Iron absorption and transport in microorganisms. *Annu. Rev. Nutr.* 1: 27-46.
- Neilands, J.B. 1981b. Microbial iron compounds. *Annu. Rev. Biochem.* 50: 715-731.
- O'Sullivan, D.J. y F. O'Gara. 1992. Traits of fluorescent *Pseudomonas* spp. involved in suppression of plant root pathogens. *Microbiol. Rev.* 56: 662-676.

- Raaijmakers, J.M., M. Leeman, M.M.P. Van Oorschot, I. Van der Sluis, B. Schippers y P.A.H.M. Bakker. 1995. Dose-response relationship in biological control of *Fusarium* wilt of radish by *Pseudomonas* spp. *Phytopathology* 85: 1075-1081.
- Rosales, A.M., L. Thomashow, R.J. Cook y T.W. Mew. 1995. Isolation and identification of antifungal metabolites produced by rice-associated antagonistic *Pseudomonas* spp. *Phytopathology* 85: 1028-1032.
- Savithiry, S. y S.S. Gnanamanickam. 1987. Bacterization of peanut with *Pseudomonas fluorescens* for biological control of *Rhizoctonia solani* and for enhanced yield. *Plant Soil* 102: 11-15.
- Van Peer, R. y B. Schippers. 1989. Plant growth responses to bacterization with selected *Pseudomonas* spp. strains and rhizosphere microbial development in hydroponic cultures. *Can. J. Microbiol.* 35: 456-463.
- Wei, G., J.W. Kloepper y S. Tuzun. 1996. Induced systemic resistance to cucumber diseases and increased plant growth-promoting rhizobacteria under field conditions. *Phytopathology* 86: 221-224

EVALUACION EN CAMPO DE UNA RASTRA DE DISCOS EXCENTRICA

Field Evaluation of an Eccentric Disk Harrow

Noel Chávez A., Lidia Trejo Q., Moisés Torres L. y Ramón García A.

RESUMEN

En el presente trabajo se evaluó en campo una rastra de discos excéntrica en un suelo arcilloso. El diseño experimental fue un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. Los factores en estudio fueron dos tipos de cabezal de enganche y tres velocidades de avance. Las variables respuesta fueron: cubierta vegetal, índice de incorporación de residuos, densidad aparente, porosidad, relación de vacíos, coeficiente de expansión, resistencia al corte de la veleta, índice de distribución de agregados, profundidad y ancho de trabajo, área seccional de trabajo, fuerza de tiro horizontal demandada, fuerza de tiro horizontal específica demandada, eficiencia de la fuerza de tiro horizontal específica demandada y capacidad neta de trabajo. Los resultados muestran que la mejor calidad de trabajo y la fuerza de tiro horizontal demandada más baja se obtuvieron cuando la rastra trabajó con el cabezal de enganche de fierro rectangular. Para los dos tipos de cabezales de enganche la mejor calidad de trabajo se obtuvo en la velocidad de avance de 7 km h⁻¹, la fuerza de tiro horizontal específica demandada más baja y mayor eficiencia de la misma en la velocidad de 6 km h⁻¹, y la mayor capacidad neta de trabajo en la velocidad de 8 km h⁻¹.

Palabras clave: Implemento de labranza, calidad de trabajo, fuerza de tiro horizontal específica demandada.

SUMMARY

In this study, a field test was done on an eccentric disk harrow in a clay soil. The experimental design was a complete random blocks with three replications. The factors considered in the study were two types of coupling heads and three forward speeds. The response variables were: plant cover, index of residual

incorporation, bulk density, porosity, voids ratio, coefficient of expansion, vane shear strength, index of distribution of aggregate sizes, depth and width of work, sectional area of work, demanded draft force, specific demanded draft force, and net work capacity. The results show that the best work quality and the lowest demanded draft force were obtained when the disk harrow was used with a rectangular iron coupling head. For both types of coupling heads, the best work quality was obtained at a forward speed of 7 km h⁻¹, the lowest specific demanded draft force and greatest efficiency of the same were obtained at the speed of 6 km h⁻¹, and the greatest net work capacity was obtained at the speed of 8 km h⁻¹.

Index words: Tillage implement, work quality, specific demanded draft force.

INTRODUCCION

Rodríguez (1990) menciona que en México para 1987, se tenía un total de 11 400 000 hectáreas mecanizadas, es decir 60.8 % con respecto a la superficie sembrada. En esta superficie la labor de rastra es una de las operaciones de labranza que se realiza para la preparación de la cama de siembra, y cuya finalidad es proporcionar mejores condiciones físico-mecánicas del suelo para la producción de cultivos (Kepner *et al.*, 1978).

El propósito de una rastra de discos es cortar, levantar, pulverizar, invertir parcialmente y mover el suelo en direcciones opuestas mediante las dos secciones de discos. Al respecto, Mckyes (1985) menciona que cuando un suelo es disturbado de su estado natural por implementos de labranza incrementa su volumen en una cantidad conocida como coeficiente de expansión. Entre los factores que afectan el coeficiente de expansión se encuentran la densidad aparente, contenido de humedad, ángulo de enfrentamiento de los cuerpos cortantes con la superficie de corte, profundidad y ancho de trabajo. El coeficiente de expansión se calcula mediante la Ecuación 1.

$$CE = [(DAP_i - DAP_f)(DAP_f)^{-1}](100) \quad (1)$$

Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo, 56230 Chapingo, México. Tel: +52 (595) 42200, Ext: 5048.

Aceptado: Diciembre de 1997.

donde: CE coeficiente de expansión, %; DAPi densidad aparente antes de aplicar los tratamientos, g cm^{-3} ; DAPf densidad aparente después de aplicar los tratamientos g cm^{-3} .

Klenin *et al.* (1986) indican que las fuerzas actuando sobre una rastra de discos son: la reacción resultante del suelo sobre cada sección de discos, la fuerza de gravedad actuando sobre el implemento y alguna masa extra adicionada, y la fuerza de tiro generada por la fuente de potencia.

Mckyes (1985) menciona que la cantidad de energía requerida para producir un grado dado de pulverización depende principalmente de la resistencia del suelo y de la eficiencia de utilización de la energía por el implemento. Además, indica que la profundidad de corte, ancho de corte, forma y arreglo del implemento, y velocidad de avance son factores que pueden afectar la fuerza de tiro horizontal y la eficiencia de utilización de la energía para una condición específica del suelo.

Al aumentar la velocidad de avance se incrementa la fuerza de tiro horizontal demandada por la mayoría de los implementos, principalmente por la mayor rapidez con que el suelo es movido. En relación con ello la ASAE (1983) publicó modelos de predicción de fuerza de tiro horizontal demandada (FTHD) para rastras de discos, para lo cual consideró la FTHD en N, en función de la masa de la rastra M en kg, para una velocidad de avance típica en km h^{-1} . Algunos modelos son:

$$\text{Suelo arcilloso} \quad \text{FTHD} = 14.7(M) \quad (2)$$

$$\text{Suelo franco} \quad \text{FTHD} = 11.7(M) \quad (3)$$

Según Mckyes (1985), la fuerza de tiro horizontal específica demandada (FTHED) es el cociente que resulta de dividir la FTHD entre el área seccional de trabajo y la eficiencia de la FTHED como el inverso de la misma. Por lo tanto la eficiencia energética es el volumen de suelo cortado por unidad de energía usada, expresada en $\text{m}^3 \text{Mj}^{-1}$.

Srivastava *et al.* (1994) mencionan que la definición de calidad de trabajo depende del tipo de implemento de labranza utilizado. En este estudio se consideran algunas propiedades físico-mecánicas del suelo y algunos parámetros de la rastra.

Witney (1988) menciona que la evaluación de la capacidad de trabajo de una máquina se hace midiendo la cantidad de trabajo que ésta puede realizar con todo el ancho de trabajo constructivo sin sufrir pérdidas de ninguna naturaleza (capacidad teórica), considerando el trabajo realizado sin sufrir interrupciones y con el

ancho real de trabajo (capacidad neta de trabajo), y considerando la cantidad de trabajo real tomando en cuenta las pérdidas de cualquier naturaleza (capacidad efectiva).

Para que una rastra de discos mejore en la calidad de trabajo, y sea más eficiente en su capacidad de trabajo y consumo de energía, se debe mejorar su diseño (Mckyes, 1985).

Con base en las consideraciones anteriores, en este estudio se plantea evaluar el funcionamiento de una rastra de discos excéntrica modelo RL 20, con dos tipos de cabezales de enganche, para lo cual se plantearon los objetivos siguientes: 1) Evaluar la calidad de trabajo de la rastra con cada uno de los cabezales de enganche. 2) Determinar la fuerza de tiro horizontal demandada y la fuerza de tiro horizontal específica demandada por la rastra con cada uno de los cabezales de enganche. 3) Evaluar la eficiencia de la fuerza de tiro horizontal específica demandada y determinar la capacidad neta de trabajo de la rastra con cada cabezal de enganche.

La hipótesis planteada es la siguiente: La rastra funcionando con el cabezal de enganche de fierro rectangular produce mejor calidad de trabajo, es más eficiente en la utilización de la energía y tiene mayor capacidad neta de trabajo.

MATERIALES Y METODOS

Descripción de la Rastra

Es una rastra de discos en V o excéntrica, marca SWECOMEX, modelo RL 20, equipada con un cabezal de enganche de fierro tubular (con 640 kg de peso) y otro cabezal de enganche de fierro rectangular (con 665 kg de peso), el cual puede reemplazar al primero. La sección de discos delantera se compone de 10 discos de borde dentado, y la sección trasera de 10 discos de borde liso. Los discos de ambas secciones tienen un diámetro de 610 mm y un espaciamiento entre discos de 230 mm, el ángulo entre las dos secciones de discos es de 37° . El ancho constructivo de la rastra es de 2.29 m.

Ubicación del Sitio Experimental

El sitio experimental se ubicó en el Campo Agrícola Experimental "El Horno" del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) en Chapingo, Estado de México.

Diseño Experimental y Diseño de Tratamientos

El diseño experimental fue un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. El diseño de tratamientos corresponde a un factorial 2x3 donde el primer factor es tipo de cabezal de enganche (TCE); un cabezal de enganche de fierro tubular (CET) y otro de fierro rectangular (CER), y el segundo factor es velocidad de avance del sistema tractor-rastra (V) con niveles de 6, 7, y 8 km h⁻¹. La dimensión de la unidad experimental fue de 50 metros de largo por el ancho de trabajo de la rastra, el cual varió de acuerdo con el tipo de cabezal de enganche y la velocidad de avance del sistema tractor-rastra.

Determinación de las Condiciones del Sitio Experimental

Algunas propiedades físicas del sitio experimental. Antes de aplicar los tratamientos se determinaron algunas propiedades físicas de la parcela experimental, para lo cual en cada bloque se obtuvo una muestra compuesta de 0 a 30 cm de profundidad. Entre las propiedades determinadas se encuentran la densidad aparente (DAP) por el método del terrón cubierto con parafina, densidad real de partículas (Dr) por el método del picnómetro, porosidad (η) y relación de vacíos (e) por las ecuaciones $\eta = [1 - (DAP)(Dr)^{-1}](100)$ y $e = (\eta)(1 - \eta)^{-1}$ descritas por Barnes *et al.*, citados por Chávez (1991), capacidad de campo (CC) por el método de la olla de presión, punto de marchitamiento permanente (PMP) por el método de la membrana de presión, textura del suelo por el método del hidrómetro de Bouyoucos, humedad gravimétrica del suelo por el método de secado a la estufa a 110 °C. Con excepción de η y e los métodos empleados para determinar las otras propiedades son descritos por la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo (SMCS) (1988). Los resultados se muestran en el Cuadro 1.

Algunas condiciones superficiales. La pendiente del terreno se determinó con un clicímetro y dos estadales (Colegio de Postgraduados (CP), 1991). La cubierta vegetal se determinó con un marco de un metro cuadrado (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), 1990), se tomaron tres muestras por bloque. Los resultados se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Algunas propiedades físicas y condiciones de superficie de la parcela experimental.

Propiedad	Bloque		
	I	II	III
Densidad aparente (g cm ⁻³)	1.230	1.245	1.170
Densidad real de partículas (g cm ⁻³)	2.437	2.455	2.400
Porosidad (adim)	0.495	0.492	0.512
Relación de vacíos (adim)	0.980	1.021	1.053
Capacidad de campo (%)	32.89	33.69	36.85
Punto de marchitamiento permanente (%)	15.67	15.68	18.18
Arena (%)	39.52	38.16	29.16
Limo (%)	23.80	21.16	21.16
Arcilla (%)	36.68	40.68	49.68
Clasertextural	FA	A	A
Resistencia al corte de la veleta (kPa)	21.67	41.24	33.34
Humedad gravimétrica (%)	16.22	17.90	18.66
Cubierta vegetal (g m ⁻²)	109.67	43.23	124.00
Pendiente del terreno (%)	0.50	0.50	0.50

FA: Franco arcilloso; A: Arcilloso.

Indices de Calidad de Trabajo

Cobertura vegetal (CVe). Se determinó con un marco de un metro cuadrado (Comité Estatal de Normalización (CEN), 1987; INIFAP, 1990), se tomó una muestra por tratamiento y por bloque.

Índice de incorporación de residuos con base en peso seco (IIRS). Se determinó con la ecuación $IIRS = [(CVe_i - CVe_f)(CVe_i)^{-1}](100)$, donde: IIRS índice de incorporación de residuos con base en peso seco, CVe_i cubierta vegetal antes de aplicar los tratamientos, CVe_f cubierta vegetal después de aplicar los tratamientos (INIFAP, 1990; CEN, 1987).

Densidad aparente (DAP). Se determinó por el método del cilindro descrito por Head, citado por Chávez (1991). Se tomó una lectura por tratamiento y por bloque a la profundidad de 0 a 10 cm.

Porosidad (η) y relación de vacíos (e). Se obtuvieron mediante las ecuaciones descritas por Barnes *et al.*, citados por Chávez (1991).

Coefficiente de expansión (CE). Se determinó empleando la Ecuación 1 (Mckyes, 1985).

Resistencia al corte de la veleta (RCV). Se determinó antes y después de aplicar los tratamientos, utilizando una veleta de corte marca Pilcon. Antes de aplicar los tratamientos se tomaron lecturas en tres sitios por bloque, en cada sitio se registraron cinco lecturas a las profundidades de 0 a 5 cm y de 10 a 15 cm. Después de

aplicar los tratamientos se tomaron cinco lecturas en un sitio por tratamiento y por bloque, a la profundidad de 0 a 5 cm (Serota y Jangle, citados por Chávez, 1991).

Índice de distribución de agregados (DM). Se utilizó un procedimiento por tamizado de agregados en seco. Se pasó una muestra de 2 kg de suelo a través de un juego de tamices (16, 8, 2 y 1 mm de abertura de orificio de malla). El DM se determinó con la ecuación $DM = \sum (X_i)(W_i)$. Donde: DM diámetro medio de agregados con base en peso seco, X_i diámetro medio de un rango de tamaño particular de agregados separados por tamizado, y W_i peso de agregados en aquel rango de tamaño como una fracción del peso total seco de la muestra analizada (Hillel, 1980). Se determinó por tratamiento y por bloque.

Profundidad de trabajo (PT). Se tomaron treinta lecturas (CEN, 1987; INIFAP, 1990), por tratamiento y por bloque.

Ancho de trabajo (AT). Se tomaron 30 lecturas (CEN, 1987; INIFAP, 1990) por tratamiento y por bloque.

Fuerza de tiro horizontal demandada (FTHD). Se registró con un dinamógrafo, con el cual se obtuvo una gráfica en una distancia de 25 m por tratamiento y por bloque. La lectura media de la gráfica se analizó estadísticamente (CEN, 1987; INIFAP, 1990).

Fuerza de tiro horizontal específica demandada (FTHED) y eficiencia de la fuerza de tiro horizontal específica demandada (EFTHED). Se obtienen mediante el procedimiento descrito por Mckyes (1985). Se obtuvieron por tratamiento y por bloque.

Capacidad neta de trabajo (CNT). Se determinó mediante el procedimiento descrito por Witney (1988), para lo cual se emplearon las medias de la PT y AT por tratamiento y por bloque.

RESULTADOS Y DISCUSION

En el Cuadro 1 se observa que la humedad gravimétrica promedio del suelo, en la cual se llevó a cabo la evaluación de la rastra, fue de 17.59 %, ésta, de acuerdo con Klenin *et al.* (1986), es la adecuada para realizar las operaciones de labranza, ya que puede variar de 40 % a 60 % de la humedad a capacidad de campo.

En el Cuadro 2 se observa que con excepción de la resistencia al corte de la veleta, los valores de las otras variables respuesta no presentaron diferencia significativa debido a las fuentes de variación analizadas. En el Cuadro 3 se dan los resultados de la interacción V*TCE de algunas variables respuesta, y a continuación se exponen de acuerdo con la separación de medias de Tukey.

Cubierta Vegetal

Tuvo un valor promedio general de 22.62 g m⁻². Su valor fue mayor en 5.36 % cuando la rastra trabajó con el CET que cuando trabajó con el CER. Cuando la rastra trabajó con ambos tipos de cabezales, el valor de la CVe tiende a disminuir conforme se incrementa la velocidad de avance.

Índice de Incorporación de Residuos con Base en Peso Seco

Tuvo un valor promedio general de 75.49 %. Su valor fue mayor en 1.77 % cuando la rastra trabajó con el CER que cuando trabajó con el CET. Cuando la rastra trabajó con ambos tipos de cabezales el valor del IIRS tiende a aumentar conforme se incrementa la velocidad de avance.

Cuadro 2. ANVA y coeficiente de variación de las variables cubierta vegetal (CVe), índice de incorporación de residuos con base en peso seco (IIRS), densidad aparente (DAP), porosidad (η), relación de vacíos (e), coeficiente de expansión (CE), y resistencia al corte de la veleta (RCV).

Fuente de variación	GL	Valores de F						
		CVe	IIRS	DAP	η	e	CE	RCV
B	2	0.28ns	0.28ns	0.01ns	0.01ns	0.02ns	0.02ns	6.33***
V	2	1.76ns	1.76ns	4.15ns	4.15ns	3.51ns	3.51ns	2.65*
TC	2	0.11ns	0.11ns	0.28ns	0.28ns	0.36ns	0.36ns	7.30***
TC*V	2	1.71ns	1.71ns	3.13ns	3.13ns	3.13ns	3.13ns	4.34**
C.M.Error	10	1.09ns	1.09ns	2.12ns	2.12ns	1.95ns	1.95ns	4.95ns†
		Coeficiente de variación						
		35.20	10.12	9.39	5.80	18.28	77.53	31.49

† Los GL de los C.M.Error para la RCV son 82.

***, ** y *: Significativo al 1 %, 5 % y 10 %, respectivamente. ns: no significativo.

Cuadro 3. Valores de las variables cubierta vegetal (CVe), índice de incorporación de residuos con base en peso seco (IIRS), densidad aparente (DAP), porosidad (η), relación de vacíos (e), coeficiente de expansión (CE), y resistencia al corte de la veleta (RCV).

V	TCE	Variable respuesta						
		CVe	IIRS	DAP	η	e	CE	RCV
km h ⁻¹		g m ⁻²	%	g m ⁻³	%	adim	%	kPa
6	CET	32.20	65.00	0.777	68.01	2.17	39.93	3.22
	CER	21.56	76.64	0.928	61.78	1.62	15.80	2.43
7	CET	21.96	76.20	0.990	59.23	1.45	8.21	3.09
	CER	23.30	74.75	1.005	58.64	1.41	6.70	2.21
8	CET	15.46	83.24	0.982	59.57	1.47	9.26	2.22
	CER	21.13	77.10	0.882	63.70	1.80	20.18	2.47

Densidad Aparente

Tuvo un valor promedio general de 0.9276 g cm⁻³. Su valor fue mayor en 2.32 % cuando la rastra trabajó con el CER que cuando trabajó con el CET; este comportamiento se debe a que hay mayor pulverización del suelo debido a que el CER es más eficiente en la utilización de la energía tal como lo menciona Makyes (1985). Cuando la rastra trabajó con el CET, el valor de la DAP tiende a aumentar conforme se incrementa la velocidad de avance, pero ocurrió lo contrario cuando trabajó con el CER.

Porosidad y Relación de Vacíos

Presentaron valores promedio general de 61.82 % y 1.657, respectivamente. Ambas variables tuvieron su valor mayor cuando la rastra trabajó con el CET que cuando la rastra trabajó con el CER. Cuando la rastra trabajó con el CET el valor de ambas variables tiende a disminuir conforme se incrementa la velocidad de avance, pero ocurrió lo contrario cuando trabajó con el CER.

Coefficiente de Expansión

Tuvo un valor promedio general de 17.24 %. Su valor fue mayor en 19.78 % cuando la rastra trabajó con el CET que cuando trabajó con el CER, lo cual se debe a una menor pulverización del suelo disturbado con el CET, siendo similar a lo reportado por Makyes (1985). Cuando la rastra trabajó con el CET, el valor del CE tiende a disminuir conforme se incrementa la velocidad

de avance, pero ocurrió lo contrario cuando trabajó con el CER.

Resistencia al Corte de la Veleta

Tuvo un valor promedio general de 2.61 kPa. Su valor fue mayor en 16.45 % cuando la rastra trabajó con el CET que cuando trabajó con el CER. Cuando la rastra trabajó con el CET, el valor de la RCV tiende a disminuir conforme se incrementa la velocidad de avance, pero ocurrió lo contrario cuando trabajó con el CER.

En el Cuadro 4 se presentan los valores de las estadísticas de prueba para evaluar la funcionalidad de la rastra, y se observa que el ancho de trabajo y la fuerza de tiro horizontal demandada presentan diferencia significativa para todas las fuentes de variación.

En el Cuadro 5 se dan los valores de la interacción V*TCE de algunas variables respuesta y a continuación se expone de acuerdo con la separación de medias de Tukey.

Índice de Distribución de Agregados

Tuvo un valor promedio general de 10.92 mm. Fue mayor cuando se utilizó el CET en 7.19 % que cuando se utilizó el CER, lo cual indica una mayor pulverización del suelo disturbado por el CER, y por lo tanto se tiene una mayor eficiencia de utilización de la energía, similar a lo reportado por Makyes (1985). Cuando la rastra trabajó con el CET, el valor del DM tiende a disminuir conforme se incrementa la velocidad de avance, pero ocurrió lo contrario cuando se trabajó con el CER.

Cuadro 4. ANVA de las variables profundidad de trabajo (PT), ancho de trabajo (AT), área seccional de trabajo (AST), fuerza de tiro horizontal demandada (FTHD) y fuerza de tiro horizontal específica demandada (FTHED).

Fuente de variación	GL	Valores de F					
		DM	PT	AT	AST	FTHD	FTHED
B	2	1.41ns	0.56ns	111.76***	0.64ns	3.38*	0.50ns
V	2	2.17ns	0.75ns	56.15***	0.66ns	12.05***	14.95***
TCE	1	1.86ns	0.10ns	10.47***	0.82ns	6548.26***	0.36ns
V*TCE	2	0.61ns	1.31ns	12.77***	0.04ns	3.70*	0.07ns
C.M.Error	10	1.46ns	1.13ns†	53.12ns†	0.50ns	1874.68***	4.48**
		Coeficiente de variación					
		11.62	21.09	6.58	12.46	0.50	12.66

† Los grados de libertad del C.M.Error son 532.

Cuadro 5. Valores de las variables profundidad de trabajo (PT), ancho de trabajo (AT), índice de distribución de agregados (DM), fuerza de tiro horizontal demandada (FTHD) y fuerza de tiro horizontal específica demandada (FTHED).

V	TCE	Variable respuesta					
		DM	PT	AT	AST	FTHD	FTHED
		mm	cm	cm	cm ²	N	N cm ⁻²
6.0	CET	12.19	11.83	201.65	2390.28	6648.33	2.78
	CER	10.52	11.89	206.56	2461.81	6663.33	2.73
7.0	CET	10.39	11.54	206.77	2381.21	8454.16	3.58
	CER	9.68	11.72	217.04	2548.84	8501.83	3.35
8.0	CET	11.40	11.15	198.84	2206.86	9255.00	4.19
	CER	11.34	11.98	194.91	2348.30	9395.00	4.10

Profundidad de Trabajo

Tuvo un valor promedio general de 11.69 cm. Fue mayor cuando se utilizó el CER en 2.94 % que cuando se utilizó el CET, esto se debe al mayor peso de la rastra con el CER, es similar a lo mencionado por Klenin *et al.* (1986). Cuando la rastra trabajó con el CET el valor de la PT tiende a disminuir conforme se incrementa la velocidad de avance, pero ocurrió lo contrario cuando trabajó con el CER.

Ancho de Trabajo

Tuvo un valor promedio general de 204.30 cm. Fue mayor cuando se utilizó el CER en 1.82 % que cuando se utilizó el CET. Con ambos tipos de cabezales el valor del AT tiende a disminuir conforme se incrementa la velocidad de avance.

Area Seccional de Trabajo

Tuvo un valor promedio general de 2389.55 cm². Fue mayor cuando se utilizó el CER en 5.17 % que cuando se utilizó el CET. Con ambos tipos de cabezales

el valor de AST tiende a disminuir conforme aumenta la velocidad de avance..

Fuerza de Tiro Horizontal Demandada

Tuvo un valor promedio general de 8152.94 N. Fue mayor cuando se utilizó el CER en 0.82 % que cuando se utilizó el CET. Con ambos tipos de cabezales el valor de la FTHD tiende a aumentar conforme se incrementa la velocidad de avance.

Fuerza de Tiro Horizontal Específica Demandada

Tuvo un valor promedio general de 3.46 N cm⁻². Fue mayor cuando se utilizó el CET en 3.51 % que cuando se utilizó el CER. Con ambos tipos de cabezales el valor de la FTHED tiende a aumentar conforme se incrementa la velocidad de avance.

Las ecuaciones de predicción de la FTHED, presentadas en el Cuadro 6, se pueden emplear para predecir la FTHED y potencia demandada por rastras de discos integrales empleadas en la labor de rastreo y por lo tanto contribuir a la selección del tamaño de tractores

Cuadro 6. Ecuaciones de predicción de la fuerza de tiro horizontal específica demandada por la rastra (FTHED).

TCE	Ecuación de predicción	R ²	CV
CET	FTHED = 1.039 + 0.049(V ²)	0.8546	7.59
CER	FTHED = 0.985 + 0.048(V ²)	0.6270	14.30

Nota: FTHED en N cm⁻²; V en km h⁻¹.

cuando se planea mecanizar una superficie agrícola específica.

En el Cuadro 7 se observa que para la EFTHED la velocidad de avance es la única fuente de variación que induce diferencia significativa, pero para la CNT todas las fuentes de variación inducen diferencia significativa.

En el Cuadro 8 se dan los valores de la interacción V*TCE de algunas variables, y a continuación se expone de acuerdo con la separación de medias de Tukey.

Eficiencia de la Fuerza de Tiro Horizontal Demandada

Tuvo un valor promedio general de 29.97 m³ Mj⁻¹. Fue mayor cuando la rastra trabajó con el CER en 4.25 % que cuando trabajó con el CET. Cuando la rastra trabajó con ambos tipos de cabezales, la EFTHD

Cuadro 7. ANVA de las variables eficiencia de la fuerza de tiro horizontal específica demandada (EFTHED) y capacidad neta de trabajo (CNT).

Fuente de variación	GL	Valores de F	
		EFTHED	CNT
B	2	0.63ns	113.66***
TCE	1	0.61ns	8.09***
V	2	17.62***	656.86***
TEC*V	2	0.02ns	13.42***
C.M.Error	10	5.31	225.14†
		Coeficiente de variación	
		11.78	6.66

† Los GL para el C.M.Error son 532.

Cuadro 8. Eficiencia de la fuerza de tiro horizontal demandada (EFTHD) y capacidad neta de la rastra (CNT).

V	TCE	Variable respuesta		
		EFTHD	CNT	
km h ⁻¹		m ³ Mj ⁻¹	ha h ⁻¹	h ha ⁻¹
6	CET	35.94	0.84	1.18
	CER	36.91	0.86	1.16
7	CET	28.17	1.01	0.99
	CER	29.97	1.06	0.94
8	CET	23.84	1.11	0.90
	CER	24.99	1.09	0.92

tiende a disminuir conforme se incrementa la velocidad de avance.

Capacidad Neta de Trabajo en ha h⁻¹

Tuvo un valor promedio general de 0.99 ha h⁻¹. Fue mayor cuando la rastra trabajó con el CER en 1.61 % que cuando trabajó con el CET. Cuando la rastra trabajó con ambos tipos de cabezales, la CNT tiende a aumentar conforme se incrementa la velocidad de avance.

Capacidad Neta de Trabajo en h ha⁻¹

Tuvo un valor promedio general de 1.02 h ha⁻¹. Fue mayor cuando la rastra trabajó con el CET en 1.57 % que cuando trabajó con el CER. Cuando la rastra trabajó con ambos tipos de cabezales, el valor de la CNT tiende a disminuir conforme se incrementa la velocidad de avance.

CONCLUSIONES

Cuando la rastra trabajó con el cabezal de enganche de fierro rectangular se obtuvo mejor calidad de trabajo, demandó menor fuerza de tiro horizontal específica, presentó mayor eficiencia de la misma, y mayor capacidad neta de trabajo.

Para ambos tipos de cabezales de enganche evaluados la mejor calidad de trabajo se obtuvo cuando la rastra trabajó en la velocidad de avance de 7 km h⁻¹.

El valor más bajo de la fuerza de tiro horizontal específica demandada y mayor eficiencia de la misma se obtuvo cuando la rastra trabajó en la velocidad de 6 km h⁻¹, pero la mayor capacidad neta de trabajo se obtuvo cuando la rastra trabajó en la velocidad de 8 km h⁻¹.

RECOMENDACIONES

Se recomienda que el cabezal de enganche de fierro tubular de la rastra de discos excéntrica modelo R 20 sea reemplazado por el cabezal de enganche de fierro rectangular, y que la rastra sea operada a una velocidad de avance de 7 km h⁻¹.

LITERATURA CITADA

- American Society of Agricultural Engineers (ASAE). 1983. Agricultural machinery management data. ASAE D230 3: 200-207.

- Chávez A., N. 1991. Efecto de la aplicación de fuerzas externas al suelo sobre algunas de sus propiedades físicas y dinámicas. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillos, México.
- Colegio de Postgraduados (CP). 1991. Manual de conservación del suelo y del agua. Tercera Edición. Editorial CP-SARH. México.
- Comite Estatal de Normalización (CEN). 1988. Norma 34-47: Metodología para la determinación de las condiciones de prueba. Editorial Unidad Impresora CEN. La Habana, Cuba.
- Hillel, D. 1980. Fundamentals of soil physics. Editorial Academic Press. USA.
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). 1990. Manual de procedimientos de prueba y evaluación de implementos agrícolas. Editorial Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México.
- Mckyes, E. 1985. Soil cutting and tillage. Editorial Elsevier. USA.
- Kepner, R. A., R. Bayner y E. L. Barger. 1978. Principles of farm machinery. Editorial Avi. USA.
- Klenin, N. I., I. F. Popov y V. A. Sakun. 1986. Agricultural machines: Theory of operation, computation of controlling parameters and the conditions of operation. Editorial A.A. Balkema/Rotterdam. USSR.
- Rodríguez, V. J. 1990. México y su agricultura. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. 1988. Métodos de análisis de suelos. Editorial Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos México.
- Srivastava, A. K., C. E. Goering y R. P. Rohrbach. 1994. Engineering principles of agricultural machines. Editorial American Society of Agricultural Engineers.
- Witney, B. 1988. Choosing and using farm machines. Editorial Longman Scientific and Technical. USA.

FERTILIZACION NITROGENADA EN VID 'MALAGA ROJA' EN LA COMARCA LAGUNERA

Nitrogen Fertilization of Grapevines 'Red Malaga' in the Comarca Lagunera

Raúl Mancilla y D.I.¹ y Jesús Santamaría César

RESUMEN

De las 1661 ha con vid (*Vitis vinifera* L.) en la Comarca Lagunera, el cultivar Málaga Roja ocupa el primer lugar en superficie con 500 ha. La fertilización nitrogenada empírica es común en los viñedos de la región. El objetivo de este estudio fue determinar el efecto de la fertilización nitrogenada en la producción y calidad de la uva, crecimiento vegetativo de las parras, en la concentración de N-NO₃ de los pecíolos de Málaga Roja; y definir los niveles críticos de concentración de N-NO₃ para el manejo de la fertilización nitrogenada en viñedos de Málaga Roja. Un estudio de cinco años, de 1992 a 1996, se llevó a cabo en un viñedo comercial de Málaga Roja plantado en 1987, sobre un suelo franco arenoso que no había sido fertilizado. Los niveles de nitrógeno (N) aplicados fueron: 0, 40, 80 y 120 kg ha⁻¹ año⁻¹. El promedio de cinco ciclos de producción mostró que la fertilización con 80 kg N ha⁻¹ año⁻¹ superó al testigo sin fertilizar en producción de uva (68 %), número de racimos (32 %), peso de racimos (30 %), peso de bayas (5 %), producción de madera (10 %), peso de las cañas (100 %), retraso en maduración (7 %, 1.3 °Brix) y calidad de las uvas (16.6 % en producción de uva de primera en los últimos tres años). Con base en el comportamiento de la producción de uva y madera se establecieron como límites críticos para iniciar un programa de fertilización nitrogenada, concentraciones de 450 mg N-NO₃ kg⁻¹ en pecíolos del muestreo de floración y 850 mg N-NO₃ kg⁻¹ en el envero; además, la fertilización no deberá exceder 80 kg N ha⁻¹ año⁻¹ y la concentración de N-NO₃ en los pecíolos deberá mantenerse entre 450 y 850 mg kg⁻¹ en el muestreo de floración y entre 850 y 1200 mg kg⁻¹ en el de envero.

¹ Campo Experimental La Laguna, Apartado Postal 247, 27000 Torreón, Coah. México.

Fax: (176) 2-07-14.

E-mail: mancilla_raul@infosel.net.mx

Aceptado: Septiembre de 1997.

Palabras clave: *Vitis vinifera* L., N-NO₃ en pecíolos, calidad de la uva, producción de uva, producción de madera podada.

SUMMARY

Red Malaga cultivar is grown in 500 ha out of the 1661 ha planted with grapes (*Vitis vinifera* L.) in La Comarca Lagunera. Nitrogen (N) fertilization is common in this area, but producers apply N empirically. The objectives were to determine the effect of N fertilization on grape production and quality, grapevine vegetative growth, and petiole N-NO₃ concentration of Red Malaga; and to define critical ranges of N-NO₃ concentration for management of N fertilization in Red Malaga grapes. A five-year study, from 1992 to 1996, was carried out in a Red Malaga commercial vineyard planted in 1987 on a sandy loam soil without fertilization. Nitrogen levels evaluated were 0, 40, 80, and 120 kg ha⁻¹ yr⁻¹. The average of five production cycles showed that 80 kg ha⁻¹ yr⁻¹ was higher than the unfertilized control in grape yield (68 %), cluster number (32 %), cluster weight (30 %), berry weight (5 %), pruning wood weight (10 %), cane weight (100 %), maturity delay (7 %, 1.3 °Brix), and grape quality (16.6 % first class grapes in the last three years). Based on grape and pruning wood production, it was found that critical levels of N-NO₃, to justify the beginning of a N fertilization program, should be below 450 mg kg⁻¹ in petioles sampled at bloom, and 850 mg kg⁻¹ in petioles at veraison. In addition, fertilization should not be higher than 80 kg N ha⁻¹ yr⁻¹, and petiole N-NO₃ concentration should fall between 450 to 850 mg kg⁻¹ at the bloom stage, and between 850 to 1200 mg kg⁻¹ at the veraison stage.

Index words: *Vitis vinifera* L., NO₃-N, grape quality, grape yield, pruning weights yield.

INTRODUCCION

Hasta 1996, la superficie plantada con vid en la Comarca Lagunera asciende a 1661 ha, con un valor de la producción de 33 mil pesos por hectárea. Se estima que el cultivar Málaga Roja producido para consumo en fresco, ocupa el primer lugar en superficie con alrededor de 500 ha (Madero *et al.*, 1991).

El nitrógeno (N) es uno de los nutrimentos con mayor probabilidad de encontrarse deficiente en los viñedos. Sin embargo, a diferencia con otros cultivos hortícolas, la falta de N no se manifiesta con facilidad, además ocasiona una reducción en los rendimientos antes que los síntomas de deficiencia sean evidentes. En contraste, es común encontrar viñedos fertilizados con exceso de nitrógeno, lo cual reduce la producción y calidad de la uva debido a un cuajado (amarre) deficiente de las bayas y a la formación de un menor número de racimos (Christensen *et al.*, 1978; Winkler *et al.*, 1974).

Entre las estrategias para solucionar el problema de nutrición en la vid se cuentan: la determinación de los niveles críticos de los elementos esenciales en los tejidos de las parras (Atalay, 1978; Conradie, 1981b; Kliewer y Cook, 1974); las diferencias en concentración de los nutrimentos entre cultivares y la influencia de los portainjertos (Christensen, 1984; Cook y Lider, 1964); y la época de absorción, almacenamiento y utilización de los elementos que se encuentran en el suelo (Conradie, 1980; 1981a; 1986; Peacock *et al.*, 1989).

Christensen *et al.* (1978) establecen que el análisis de tejidos es más efectivo que el análisis de suelo para examinar las necesidades de fertilización de un viñedo. De los diferentes tejidos o partes de la planta estudiados en California, se ha encontrado que para dar un buen diagnóstico y evaluar el estado nutrimental de la vid, el peciolo de las hojas es casi ideal, que la mejor época de muestreo es en plena floración, y que los peciolos que se deben de seleccionar son los de aquellas hojas opuestas a los racimos (Christensen *et al.*, 1978; Cook y Wheeler, 1983).

Kliewer (1991) menciona que desde 1945 la determinación de NO_3 en los peciolos ha sido la herramienta utilizada casi exclusivamente por los laboratorios comerciales, ya que la concentración de NO_3 ha sido muy útil para determinar la situación del nitrógeno en los viñedos de California y otras zonas vitícolas del mundo.

La precisión de los rangos críticos de los nutrimentos puede variar para los diferentes cultivares, portainjertos, épocas de muestreo y a través de los años (Christensen, 1984; Cook y Lider, 1964). Kliewer (1991) reportó diferencias en la concentración de N-NO_3 de los peciolos entre cultivares, portainjertos, tipo de tejido, estados fisiológicos de desarrollo y condiciones climáticas. Señaló la necesidad de establecer los niveles o rangos críticos de deficiencia de nitrógeno para cada cultivar, para cada combinación cultivar/portainjerto, para una parte específica de la parra (peciolo, lámina, caña), estado fisiológico de desarrollo (floración, envero, maduración) y región climática.

Medina *et al.* (1993) encontraron en 52 lotes de vid de la Comarca Lagunera, que 14 % de los viñedos de la muestra eran deficientes en N-NO_3 y 60 % se encontraban en exceso, en comparación a los valores óptimos de nitrógeno en las zonas vitícolas de California (Christensen *et al.*, 1978). No encontraron ningún lote de 'Málaga Roja' con niveles de deficiencia, pero sí 26 % con exceso. Durante este estudio Cueto *et al.* (1991) determinaron que los suelos de los viñedos evaluados presentaron niveles muy bajos de nitrógeno.

Esta información confirma que la fertilización nitrogenada es una práctica común en los viñedos de la Comarca Lagunera, y que se lleva a cabo en forma empírica sin base en resultados de investigación, ya que en la región no existen trabajos sobre los requerimientos nutrimentales de los diferentes cultivares plantados, que proporcionen las bases para un adecuado manejo de la fertilización nitrogenada de los viñedos.

El objetivo de este estudio fue determinar, para el cultivar Málaga Roja, el efecto de la fertilización nitrogenada sobre la concentración de N-NO_3 en los peciolos, la producción y calidad de la uva y sobre el crecimiento vegetativo de las parras, y definir los rangos críticos de N-NO_3 que den la pauta para un manejo adecuado de la fertilización nitrogenada de Málaga Roja en la Comarca Lagunera.

MATERIALES Y METODOS

El estudio comenzó en el ciclo de producción de 1992 en un lote del cultivar Málaga Roja plantado en 1987, a una densidad de plantación de 1428 parras por ha (3.5 x 2.0 m) sobre un suelo franco arenoso (Cueto

et al., 1991), que no había sido fertilizado hasta ese ciclo.

El viñedo estaba formado en doble cordón bilateral con separación de 90 cm entre cordones y poda mixta, consistente en cuatro cordones cortos (2 a 3 pulgares por cordón) y cuatro cañas de 6 a 8 yemas, cada una colocada al extremo de cada cordón corto. El sistema de soporte para el follaje fue el de pérgola inclinada (Anónimo, 1988).

Para la colocación de los tratamientos se seleccionaron del viñedo 16 hileras contiguas, en las que se establecieron cuatro parcelas de cuatro hileras, a cada una de las cuales se aplicó un tratamiento de fertilización nitrogenada. En las dos hileras centrales de cada parcela, antes del inicio del trabajo, se seleccionaron plantas uniformes en vigor para todo el experimento, basado en el peso de la madera podada y que estuvieran en competencia completa, dando un número variable de parras seleccionadas por tratamiento. La fertilización nitrogenada se llevó a cabo la primera semana de marzo en 1992, 1994, 1995 y 1996, y se utilizó como fuente de nitrógeno sulfato de amonio (20.5 % N). En 1993 no se fertilizó por problemas de operación. Los niveles de nitrógeno estudiados fueron: 0, 40, 80 y 120 kg ha⁻¹.

La influencia del N sobre la concentración de N-NO₃ en los peciolo de las hojas opuestas a los racimos durante la floración y el envero se evaluó sobre una muestra por tratamiento. La muestra se componía de cuatro peciolo por planta de las seleccionadas en cada tratamiento. Se separaron los peciolo de la lámina y se secaron a 60 °C. La determinación de N-NO₃ se llevó a cabo siguiendo el proceso de nitratación del ácido salicílico (Robarge *et al.*, 1983).

La influencia de la fertilización nitrogenada sobre las características agronómicas de las parras fue evaluada sobre un número variable de parras seleccionadas desde el inicio del estudio, correspondiendo 28, 22, 16 y 23 parras para el tratamiento de 0, 40, 80 y 120 kg N ha⁻¹, respectivamente. Las variables estudiadas fueron: peso de uva por planta, número de racimos por planta, peso medio de los racimos, peso medio de las bayas, concentración de sólidos solubles (°Brix), g de madera podada por planta, y peso medio de las cañas. A excepción del peso medio de la baya y °Brix, las variables se analizaron con el modelo del diseño completamente al azar con número variable de repeticiones, siendo la

unidad experimental cada una de las plantas seleccionadas. El peso de las bayas y °Brix en 1992 y 1993 se determinó sobre una muestra global por tratamiento tomando seis bayas por planta seleccionada.

Para comparar el efecto de los niveles de fertilización nitrogenada y definir si el efecto era lineal y cuadrático se emplearon polinomios ortogonales.

En la determinación tanto de la producción de uva como de madera por planta, se utilizó una báscula colgante Torino modelo AP con capacidad de 10 kg. El peso de las bayas se obtuvo con una balanza electrónica Scout (Ohaus, Co.) de 0.1 g de precisión y para los °Brix un refractómetro de mano Atago modelo ATC-1 con escala de 0 a 32 % y compensación de temperatura automática.

La evaluación de la fertilización nitrogenada sobre la calidad de la uva se llevó a cabo sobre la producción de las plantas seleccionadas de los ciclos 1994 a 1996; la clasificación y empaque fueron realizados por el personal del viticultor.

RESULTADOS Y DISCUSION

El efecto de los diferentes niveles de nitrógeno sobre la producción de uva y madera a través de cinco ciclos de estudio se presenta en el Cuadro 1, donde se observa un efecto cuadrático ($p \leq 0.01$) a partir del tercer año de evaluación, para las variables producción de uva por planta, número de racimos por planta, peso medio de racimo, madera producida por planta y peso medio de caña, lo cual muestra una respuesta máxima a la fertilización con 80 kg N ha⁻¹.

Respuestas similares en producción de uva con la aplicación de N han sido reportadas para otras regiones vitícolas (Christensen *et al.*, 1992; Kliewer *et al.*, 1991; Spayd *et al.*, 1993).

Spayd *et al.* (1993), en los tres años de evaluar la fertilización nitrogenada del cultivar White Riesling, encontraron que las parras fertilizadas tuvieron más racimos de mayor tamaño con bayas más grandes que las parras no fertilizadas. Ewart y Kliewer (1977) observaron incrementos en el cuajado de bayas, fertilidad de los óvulos, número de semillas por baya y peso de la baya, al comparar parras que recibieron 0 g de N por maceta de 20 L, con las que se les aplicó 1.69 g.

La acumulación de sólidos solubles evaluada en °Brix fue afectada por los niveles de N y presentó un

Cuadro 1. Efecto de la fertilización nitrogenada y nivel de significancia para las comparaciones ortogonales en el comportamiento del cultivar Málaga Roja, 1992-1996.

Año	Variable	kg N ha ⁻¹				Comparaciones ortogonales	
		0	40	80	120	L _N	C _N
1992	Uva por planta (kg)	8.5	11.4	12.2	13.0	NS	NS
	Racimos por planta	20.8	25.4	20.1	27.3	NS	NS
	Peso medio de racimo (g)	434	450	609	482	NS	**
	Madera por planta (g)	2714	3557	4712	3365	NS	NS
	Peso medio de caña (g)	94	122	173	107	NS	NS
	Peso medio de baya [†]	6.2	5.6	5.3	6.1	-	-
	°Brix [†]	18.5	17.9	17.5	18.0	-	-
1993	Uva por planta (kg)	11.7	9.5	14.0	13.4	NS	*
	Racimos por planta	38.6	30.7	40.1	43.0	*	*
	Peso medio de racimo (g)	303	308	353	310	NS	NS
	Madera por planta (g)	1200	1919	2206	1581	*	NS
	Peso medio de caña (g)	42	67	74	53	*	NS
	Peso medio de baya [†]	3.7	4.5	4.8	4.7	-	-
	°Brix [†]	18.1	17.6	17.0	17.4	-	-
1994	Uva por planta (kg)	7.1	9.1	12.6	11.8	NS	**
	Racimos por planta	25.1	25.6	30.7	31.6	NS	**
	Peso medio de racimo (g)	264	349	403	360	**	**
	Madera por planta (g)	921	1931	2730	2178	**	**
	Peso medio de caña (g)	38	79	108	87	**	**
	Peso medio de baya (g)	4.0	4.1	4.4	4.6	NS	*
	°Brix	18.6	17.9	17.8	18.2	*	NS
1995	Uva por planta (kg)	7.5	7.6	13.6	12.0	NS	**
	Racimos por planta	21.9	20.4	31.4	31.0	NS	**
	Peso medio de racimo (g)	343	377	442	378	*	**
	Madera por planta (g)	813	1269	2144	1696	**	**
	Peso medio de caña (g)	31	47	70	58	**	**
	Peso medio de baya (g)	3.7	3.8	4.1	4.0	NS	**
	°Brix	19.0	17.8	17.5	18.1	**	**
1996	Uva por planta (kg)	5.9	8.1	15.4	11.4	*	**
	Racimos por planta	18.5	22.4	43.1	33.0	NS	**
	Peso medio de racimo (g)	317	349	353	346	NS	NS
	Madera por planta (g)	925	1489	2000	1426	**	**
	Peso medio de caña (g)	37	59	57	45	**	NS
	Peso medio de baya (g)	3.9	4.0	4.0	4.0	NS	NS
	°Brix	20.2	18.7	18.2	18.8	**	**

Comparaciones ortogonales para aplicaciones de N: L_N = Componente lineal, C_N = Componente cuadrática, NS = No significativa a $p \leq 0.05$, * = Significativo a $p \leq 0.05$ y 0.01, respectivamente.

[†]: Una sola observación por tratamiento.

efecto cuadrático ($p \leq 0.01$) siendo superiores en el testigo sin fertilizar durante todo el período de estudio (Cuadro 1), lo cual corrobora la influencia del N en el retraso de la maduración (Christensen *et al.*, 1992; Kliewer *et al.*, 1991). La acumulación de sólidos solubles es afectada por la cantidad de uva producida por las parras (Mancilla y Godoy, 1990; Reynolds *et*

al., 1986), lo que explica la tendencia del tratamiento de 80 kg de N a acumular menos azúcar.

La producción de madera y el peso medio de las cañas, una forma útil y práctica para medir la capacidad productiva de una parra (Byrne y Howell, 1978; Lider *et al.*, 1973), reflejaron el efecto positivo de la fertilización nitrogenada desde el primer ciclo de

evaluación sobre estas variables, lo cual sugiere que las mismas son más sensibles a la aplicación de N. Los valores obtenidos se incrementaron hasta el nivel de 80 kg N ha⁻¹, lo cual coincidió con reportes previos (Christensen *et al.*, 1992; Ewart y Kliewer, 1977; Kliewer *et al.*, 1991; Spayd *et al.*, 1993).

La concentración de N-NO₃ en los peciolo durante los cinco ciclos de evaluación se presenta en el Cuadro 2. Los valores obtenidos muestran que la fertilización nitrogenada influye en la concentración de N-NO₃ y que se presentan grandes variaciones entre ciclos, pero que, en general, en cada ciclo se mantiene el efecto de la cantidad de N aplicado, lo cual coincide con estudios anteriores (Christensen, 1984; Christensen *et al.*, 1978; Kliewer, 1991; Spayd *et al.*, 1993).

Las concentraciones de N-NO₃, obtenidas durante la floración en el tratamiento sin fertilizar, tienden a ser más altas que durante el envero, lo opuesto ocurre cuando se aplica N, observándose un incremento del N-NO₃ de floración al envero. Esta misma situación fue encontrada por Bell (1991), Mancilla (1991) y Spayd *et al.* (1993), pero contrario a lo registrado por Christensen (1984) para la mayoría de los 26 cultivares que estudió, entre los que se encuentra Málaga Roja. Este autor asentó que la concentración de N-NO₃ generalmente es más alta en floración y declina hacia el envero, coincidiendo con lo observado por Conradie (1980) y Kliewer *et al.* (1991).

La concentración de N-NO₃, obtenida los dos primeros años del estudio, refleja que el lote experimental mostraba deficiencia de N, aún cuando la producción de uva y madera no reflejara esta deficiencia. La concentración obtenida en el envero del primer ciclo de producción refleja el efecto de los niveles de N aplicados, manteniendo esa relación en el muestreo de floración del siguiente ciclo. Estas diferencias tendieron a desaparecer en el envero, ya que durante el segundo ciclo (1993) no se fertilizó. Sin embargo, la producción de uva se mantuvo a niveles similares y la producción de madera con las mismas tendencias pero en menor cantidad que durante el primer ciclo (Cuadro 1). Este comportamiento se explica con base en lo establecido por Conradie en 1986, quien determinó que las parras son capaces de absorber grandes cantidades de N desde la terminación de la floración hasta la cosecha y que en este período el N es progresivamente menos utilizado para el crecimiento vegetativo y más por la fruta.

A partir del tercer ciclo de producción en que se continuó con la fertilización anual, fue evidente la deficiencia de N en el tratamiento de 0 kg N ha⁻¹, las parras mostraron un color verde pálido uniforme de las hojas y poco crecimiento de los brotes, reduciendo en el número y peso medio de los racimos, consecuentemente, baja producción de uva. En el tratamiento de 40 kg N ha⁻¹ no fue tan claro el efecto de la deficiencia sobre la planta pero sí en la producción de uva (Cuadro 1).

Cuadro 2. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre la concentración N-NO₃ en peciolo del cultivar Málaga Roja.

kg N ha ⁻¹ †	1992	1993	1994	1995	1996	Media
Concentración de N-NO ₃ en peciolo-floración (mg kg ⁻¹)						
0	130	80	150	300	500	232
40	150	100	225	375	510	272
80	150	110	225	450	845	356
120	100	600	350	450	700	440
Concentración de N-NO ₃ en peciolo-envero (mg kg ⁻¹)						
0	80	150	100	275	290	179
40	250	90	275	525	390	306
80	450	100	325	850	1200	585
120	650	90	450	937	760	577

†: Aplicaciones: Mar. 1992, 1994, 1995 y 1996 con sulfato de amonio.

La concentración del N-NO₃ en los peciolos en floración y en el envero de los tratamientos de 0 y 40 kg N ha⁻¹ estuvo por abajo del rango de 350 a 500 mg kg⁻¹ establecido como cuestionables o deficientes para California (Christensen *et al.*, 1978; Cook y Wheeler, 1983). En los tratamientos de 80 y 120 kg N ha⁻¹, las concentraciones tendieron a incrementarse a partir del tercer ciclo, alcanzando hasta el último ciclo de evaluación los niveles de 600 a 1200 mg kg⁻¹, considerados como adecuados para California (Cook y Wheeler, 1983). Sin embargo, aun cuando el comportamiento de las parras fue satisfactorio con concentraciones más bajas en los primeros ciclos, se observaron un incremento en la producción de uva y estabilidad en la producción de madera al incrementar la concentración del N-NO₃ en los peciolos (Cuadro 1).

El comportamiento del cultivar Málaga Roja en la Comarca Lagunera indica la necesidad de llevar a cabo análisis de tejidos con regularidad, aun cuando la producción de uva y madera no refleje con claridad la deficiencia de N. Por lo tanto, se sugiere iniciar un programa de fertilización nitrogenada cuando la concentración de N-NO₃ en los peciolos de las hojas opuestas al racimo estén abajo de 450 mg kg⁻¹ en floración y 850 en el envero. Se sugiere como rango de suficiencia de 450 a 850 mg kg⁻¹ en floración y de 850 a 1200 durante el envero (Cuadro 2). Christensen

(1984), en California, indicó como media de tres años para el cultivar Málaga Roja, concentraciones de 967 y 517 mg de N-NO₃ kg⁻¹ para floración y envero, respectivamente.

La clasificación de la uva cosechada para evaluar el efecto de la fertilización nitrogenada sobre la calidad (Cuadro 3), muestra un efecto positivo del N al incrementar la fertilización nitrogenada. La calidad de la uva siguió las mismas tendencias que la producción de uva y de madera, destacando la fertilización de 80 kg N ha⁻¹, con 47.3 y 36.0 % de uva de primera y segunda, respectivamente. La fertilización con 120 kg N ha⁻¹ mostró tendencia a disminuir su calidad respecto a la de 80 kg N ha⁻¹, lo que coincide con la pérdida de calidad bajo niveles elevados de fertilización nitrogenada (Christensen *et al.*, 1992).

CONCLUSIONES

El nitrógeno tiene efecto positivo sobre la producción y calidad de la uva y en la capacidad productiva de las parras (producción de madera) del cultivar Málaga Roja en la Comarca Lagunera.

El promedio de cinco ciclos de evaluación indica que la fertilización con 80 kg N ha⁻¹ superó al testigo sin fertilización con 68 % en la producción de uva, 32 % en el número de racimos, 30 % en peso medio de racimos, 5 % en peso medio de bayas, 10 % en

Cuadro 3. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre la calidad de la uva del cultivar Málaga Roja.

Tratamiento	Ciclo	% Primera	% Segunda	% Tercera	% Desecho
0 kg N ha ⁻¹	1994	23	63	0	14
	1995	0	41	29	31
	1996	69	19	0	12
	Media	30.7	41.0	9.7	19.0
40 kg N ha ⁻¹	1994	43	54	0	3
	1995	0	38	34	28
	1996	78	17	0	5
	Media	40.3	36.3	11.3	12.0
80 kg N ha ⁻¹	1994	60	37	0	3
	1995	7	50	21	22
	1996	75	21	0	4
	Media	47.3	36.0	7.0	9.7
120 kg N ha ⁻¹	1994	57	42	0	1
	1995	3	50	26	22
	1996	70	23	0	7
	Media	43.3	38.3	8.7	10.0

producción de madera y 100 % en peso medio de cañas, sin embargo, retrasó la maduración en 7 %, evaluada en la acumulación de sólidos solubles (1.3 °Brix). En promedio de tres años de evaluación de calidad, este tratamiento superó al testigo con 16.6 % en producción de uva de primera.

La concentración de N-NO₃ en los tejidos de pecíolos de hojas opuestas al racimo mostró un incremento desde el muestreo de floración hasta el envero, que en promedio de cinco años fue de 13, 64 y 31 %, en las plantas fertilizadas con 40, 80 y 120 kg N ha⁻¹, respectivamente. En las parras sin fertilizar la concentración se redujo 23 %.

Para el cultivar Málaga Roja, en los suelos franco arenosos de la Comarca Lagunera, se sugiere como límite crítico para iniciar un programa de fertilización nitrogenada, 450 mg kg⁻¹ de N-NO₃ en pecíolos muestreados durante la floración y 850 en pecíolos del envero, aun cuando la producción de uva y madera sea adecuada. Con base en el comportamiento de la producción de uva y madera, la fertilización nitrogenada no deberá exceder 80 kg N ha⁻¹ por año en viñedos formados en doble cordón bilateral y con espaldera en pérgola inclinada. La concentración de N-NO₃ en los pecíolos deberá mantenerse entre 450 y 850 mg kg⁻¹ en el muestreo de floración y entre 850 y 1200 en el del envero.

LITERATURA CITADA

- Anónimo. 1988. Guía técnica del viticultor. SARH, INIFAP, CIAN, Campo Agrícola Experimental de la Laguna. México.
- Atalay, I.Z. 1978. The petiole and leaf blade relationships for the determination of phosphorus and zinc status of vineyards. *Vitis* 17: 147-151.
- Bell, S.-J. 1991. The effect of nitrogen fertilization on growth, yield, and juice composition of *Vitis vinifera* cv. Cabernet Sauvignon grapevines. pp. 206-210. In: J.M. Rantz. (ed.). International Symposium on Nitrogen in Grapes and Wine. Am. Soc. Enol. Vitic., Davis, Calif.
- Byrne, M.E. y G.S. Howell. 1978. Initial response of 'Baco noir' grapevines to pruning severity, sucker removal and weed control. *Am. J. Enol. Vitic.* 29: 192-198.
- Christensen, L.P. 1984. Nutrient level comparisons of leaf petioles and blades in twenty-six grape cultivars over three years (1979 through 1981). *Am. J. Enol. Vitic.* 35: 124-133.
- Christensen, L.P., M. Bianchi, W.L. Peacock y D. Hirschfeld. 1992. Nitrogen fertilizer rates, timing. *Grape Grower*. 24: 18-22.
- Christensen, L.P., A.N. Kasimatis y F.L. Jensen. 1978. Grapevine nutrition and fertilization in the San Joaquin Valley. *Div. of Agric. Sci. Univ. of Calif. Pub. N° 4087*.
- Conradie, W.J. 1980. Seasonal uptake of nutrients by Chenin blanc in sand culture. I. Nitrogen. *S. Afr. J. Enol. Vitic.* 1: 59-65.
- Conradie, W.J. 1981a. Seasonal uptake of nutrients by Chenin blanc in sand culture. II. Phosphorus, potassium, calcium and magnesium. *S. Afr. J. Enol. Vitic.* 2: 7-13.
- Conradie, W.J. 1981b. Nutrient consumption by Chenin blanc grown in sand culture and seasonal changes in the chemical composition of leaf blades and petioles. *S. Afr. J. Enol. Vitic.* 2: 15-18.
- Conradie, W.J. 1986. Utilization of nitrogen by the grapevine as affected by time of application and soil type. *S. Afr. J. Enol. Vitic.* 7: 76-83.
- Cook, J.A. y L.A. Lider. 1964. Mineral composition of bloomtime grape petiole in relation to rootstock and scion cultivar behavior. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.* 84: 243-254.
- Cook, J.A. y D.W. Wheeler. 1983. Use of tissue analysis in viticulture. pp. 18-19. In: H.M. Reisenauer (ed.). Soil and plant tissue testing in California. Div. of Agr. Sci., Univ. of Calif. Bull. 1879.
- Cueto W., J.A., E.E. Madero T. y M.C. Medina M. 1991. Estado nutrimental de los viñedos en la Región Lagunera. I. Características físico-químicas de los suelos. pp. 198-204. In: R. Anaya R. y H.J. Godina G. (eds). Memorias del I Seminario Internacional sobre Fertilización de la Vid. Casa Pedro Domecq. 5-7 de abril de 1990. Zacatecas, Zac., México.
- Ewart, A. y W.M. Kliewer. 1977. Effects of controlled day and night temperatures and nitrogen on fruit-set, ovule fertility, and fruit composition of several wine grape cultivars. *Am. J. Enol. Vitic.* 28: 88-95.
- Kliewer, W.M. 1991. Methods for determining the nitrogen status of vineyards. pp. 133-147. In: J.M. Rantz (ed.). International Symposium on Nitrogen in Grapes and Wine. Am. Soc. Enol. Vitic., Davis, Calif.
- Kliewer, W.M., C. Bogdanoff y M. Benz. 1991. Responses of Thompson Seedless grapevines trained to single and divided canopy trellis systems to nitrogen fertilization. pp. 282-189. In: J.M. Rantz (ed.). International Symposium on Nitrogen in Grapes and Wine. Am. Soc. Enol. Vitic., Davis, Calif.
- Kliewer, W.M. y J.A. Cook. 1974. Arginine levels in grape cane and fruits as indicators of nitrogen status of vineyards. *Am. J. Enol. Vitic.* 25: 111-118.
- Lider, L.A., A.N. Kasimatis y W.M. Kliewer. 1973. Effect of pruning severity and rootstock on growth and yield of two grafted, canepruned wine grape cultivars. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 98: 8-11.
- Madero T., E.E., J.A. Cueto W. y M.C. Medina M. 1991. Estado nutrimental de los viñedos en la Región Lagunera. II. Diagnostico foliar. pp. 205-220. In: R. Anaya R. y H.J. Godina G. (eds). Memorias del I Seminario Internacional sobre Fertilización de la Vid. Casa Pedro Domecq. 5-7 de abril de 1990. Zacatecas, Zac., México.
- Mancilla y D.I., R. 1991. Análisis foliar de seis cultivares de vid en la Comarca Lagunera. *Terra* 9: 122-128.
- Mancilla, R. y C. Godoy A. 1990. Niveles de poda, aclareo de racimos y desbrote con niveles de humedad en el suelo, como estrategia para recuperar viñedos de 'Carignan' en

- degradencia. Información Técnica Económica Agraria. 86V: 178-192.
- Medina M., M.C., J.A. Cueto W. y E. Madero T. 1993. Diagnóstico nutricional de la vid, con dos valores óptimos de nutrientes, en la Región Lagunera. Información Técnica Económica Agraria. 89V: 3-11.
- Peacock, W.L., L.P. Christensen y F.E. Broadbent. 1989. Uptake, storage, and utilization of soil-applied nitrogen by Thompson Seedless as affected by time of application. Am. J. Enol. Vitic. 40: 16-20.
- Reynolds, A.G., R.M. Pool y L.R. Mattick. 1986. Effect of shoot density and crop control on growth, yield, fruit composition and wine quality of 'Seyval blanc' grapes. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 111: 55-63.
- Robarge, W.P., A. Edwards y B. Johnson. 1983. Water and waste water analysis for nitrate via nitration of salicylic acid. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 14: 1207-1215.
- Spayd, S.E., R.L. Wample, R.G. Stevens, R.G. Evans y A.K. Kamakami. 1993. Nitrogen fertilization of White Riesling in Washington: effects on petiole nutrient concentration, yield components, and vegetative growth. Am. J. Enol. Vitic. 44: 378-386.
- Winkler, A.J., J.A. Cook, W.M. Kliewer y L.A. Lider. 1974. General viticulture. Univ. of Calif. Press. Berkeley and Los Angeles. U.S.A.

**PRODUCCION DE FORRAJE Y CONTENIDO DE PROTEINA EN
VARIETADES DE TRITICALE EN MONOCULTIVO Y MEZCLAS A
DIFERENTES DENSIDADES DE SIEMBRA EN LA COMARCA LAGUNERA**
**Herbage Production and Crude Protein Content of Triticale Varieties in Monoculture and
Mixtures Sown at Different Seeding Rates at Comarca Lagunera**

**Victor M. Escobedo Torres, Raúl Serrato Sánchez, Ricardo Aguilera Rangel
y Felipe del Río Olague**

RESUMEN

La región Lagunera es una de las regiones más importantes de México en producción de leche y carne de bovino, pero durante el invierno se requiere importar forraje, ya que el rendimiento del principal cultivo forrajero, la alfalfa, disminuye. Puesto que en investigaciones anteriores se ha señalado la necesidad de probar líneas avanzadas de especies forrajeras, los objetivos de este trabajo fueron: 1) Evaluar el contenido de proteína y la producción de materia seca en triticale (*X. Triticosecale* W.) sembrado en monocultivo y en mezclas. 2) Determinar la mejor densidad de siembra para el monocultivo y mezclas de variedades de triticale. 3) Detectar la interacción de la densidad de siembra con las variedades y mezclas de variedades de triticale. El estudio se llevó a cabo en el ciclo otoño-invierno 1995-1996 en el campo experimental de la Facultad de Agricultura y Zootecnia de la Universidad Juárez del Estado de Durango (UJED), ubicado en el ejido Venecia, municipio Gómez Palacio, Durango. El experimento consistió en sembrar, en una parcela útil de 5.4 m², las variedades de triticale: San Lucas, AN 34-87 y AN 31-87; y las mezclas de ellas a cuatro distintas densidades de siembra (80, 120, 160 y 200 kg ha⁻¹) para compararlas con el rye grass var. Oregon y con la avena var. Cuauhtémoc. Cada uno de los tratamientos tuvo tres repeticiones. La producción por cada uno de dos cortes y en total, así como el contenido de proteína al primer corte, se analizaron en un diseño de bloques al azar. En las variables en las cuales se encontró diferencia entre los tratamientos, se hizo la comparación de medias por

Tukey. Con el objeto de conocer el efecto de la densidad de siembra de triticale sobre el rendimiento y sobre el contenido de proteína se hizo un análisis bifactorial y se consideraron las variedades y mezclas como el factor A y las densidades de siembra como el factor B. El triticale, tanto en monocultivo como en mezcla, mostró producciones de materia seca por encima, estadísticamente diferentes ($p < .05$), de lo que produjeron avena y rye grass en los dos cortes. El contenido de proteína cruda entre los distintos tratamientos tuvo diferencia altamente significativa ($p < .01$), pero sólo tres variedades de triticale, AN 34-87, San Lucas y AN 31-87, sembrados a 200 kg ha⁻¹ los dos primeros y a 120 kg ha⁻¹ el tercero, fueron superiores al rye grass, todos ellos con más de 20 % de proteína cruda. La densidad de siembra no influyó en el contenido de proteína del triticale.

Palabras clave: Proteína cruda, materia seca, avena, rye grass, San Lucas, AN 34-87, AN 31-87.

SUMMARY

The Laguna Region is one of the most important regions of milk and meat production, but during winter forage is imported since the yield of alfalfa tends to diminish. The objectives of this investigation were: 1) To define the best triticale (*X. Triticosecale* W.) mixture of varieties for dry matter yield and crude protein content. 2) To determine the best seeding rate in both varieties and mixtures. 3) To detect interaction of the seeding rate of varieties and mixings. The study was carried out in the autumn-winter season of 1995-1996 in the experimental station of the Facultad de Agricultura y Zootecnia of the 'Facultad de Agricultura y Zootecnia de la Universidad Juárez del Estado de Durango (UJED)' located at the ejido Venecia, Durango. Two factors were studied in the experiment, the first one was the varieties with the

División de Estudios de Postgrado, Facultad de Agricultura y Zootecnia, Univ. Juárez del Estado de Durango. Venecia, Dgo. Apartado Postal 142, 35000 Gómez Palacio, Durango.

Aceptado: Diciembre de 1997.

levels of San Lucas, AN 34-87, and AN 31-87 and three mixings and the second one was the seeding rate with the levels 80, 120, 160 and 200 kg ha⁻¹. Two controls were established to compare all treatments, rye grass (Oregon variety) and oats (Cuauhtemoc variety). There were 26 treatments in total and they were planted in a complete randomized block design, with factorial arrangement, replicated three times. In the variables where difference was found among treatments, the stocking comparison by Tukey was done. The triticale, in monoculture and mixtures, showed statistical productions of higher dry matter ($p < .05$) with respect to oats and rye grass in both cuttings. The content of crude protein had high statistical significance ($p < .01$) but only the varieties AN 34-87 and San Lucas (planted at 200 kg ha⁻¹) and AN 31-87 (planted at 120 kg ha⁻¹), resulted with higher statistical yield than the rye grass, all of them with more than 20 % crude protein. The seeding rate did not have influence on the crude protein content of the triticale varieties.

Index words: Crude protein, dry mater, oats, rye grass, San Lucas, AN 34-87, AN 31-87.

INTRODUCCION

La Comarca Lagunera es una de las regiones más importantes a nivel nacional en producción de leche y carne, pero durante el invierno se requiere importar forraje de otras regiones, ya que el rendimiento del principal cultivo forrajero de ese lugar, la alfalfa, tiende a disminuir. Los centros de investigación regionales han investigado una amplia variedad de forrajes para remediar esta situación y propusieron con éxito el rye grass y la avena. Sin embargo, en los últimos años se han encontrado posibilidades de establecimiento exitoso del triticale (*X. Triticosecale* W.) para ofrecerlo como una alternativa más para los productores regionales (Quiroga, 1990).

En 1992 fueron nombradas y liberadas dos variedades de triticale, AN 31-87 y AN 34-87, las cuales actualmente son cultivadas a escala comercial por agricultores para la producción de forraje fresco y ensilaje (Lozano, 1994).

En este estudio se utilizaron tres variedades de triticale, AN 31-87, AN 34-87 y San Lucas, que se sembraron en monocultivo y en mezclas para comparar

su rendimiento en materia seca y su contenido proteico con la avena y el rye grass.

La densidad de siembra puede ser de 130 a 160 kg ha⁻¹ para el triticale cultivado bajo condiciones de temporal y para la producción de grano (Campo Agrícola Experimental del Valle de México, 1981). Sin embargo, en variedades destinadas a la producción de forraje no existe información para su siembra bajo condiciones de la Comarca Lagunera por lo que es importante, mediante estudios con esta especie, evaluar variedades y líneas avanzadas, así como definir la mejor densidad de siembra. Por lo tanto, los objetivos del presente trabajo fueron:

Evaluar la producción de materia seca y el contenido de proteína cruda al primer corte de triticale, sembrado en monocultivo y en mezclas.

Determinar la mejor densidad de siembra para el monocultivo y las mezclas de triticale.

Detectar la interacción de la densidad de siembra con las variedades y mezclas de triticale.

REVISION DE LITERATURA

Hernández (1990) evaluó el comportamiento forrajero del triticale, midió la producción de materia seca, realizó análisis bromatológicos y concluyó que la capacidad de recuperación de esa especie, después de cada corte, fue superior a la capacidad de recuperación del testigo comercial (variedad Eronga-83), y que la calidad es similar o incluso superior a otros cultivos de invierno.

Urquiza (1995) realizó un estudio para determinar la producción de forraje de seis variedades de triticale mezcladas con pasto rye grass encontrando que la combinación del triticale AN-20 con rye grass fue superior con 10.25 t ha⁻¹ en total con un promedio de 3.41 t ha⁻¹ por corte.

Quiroga (1990) les hizo un análisis de calidad a 17 variedades clasificadas como sobresalientes. Entre los resultados obtenidos destaca que el contenido de proteína fue de 20 % para el primer corte siendo superior al promedio de la alfalfa (19.6 %) y de la avena (9.3 %).

Quiroga y Farías (1990) evaluaron 21 líneas y 15 variedades de triticale y cuatro variedades de avena como testigos. De los 36 triticales, se encontraron cinco líneas con rendimientos superiores y cuatro más con rendimientos iguales al rendimiento de las avenas. En cuanto a la calidad, dichos investigadores no

encontraron diferencia entre los triticales y las avenas siendo el promedio de 88 % de "digestibilidad *in vitro*" y 22 % de proteína cruda.

Fariás y Faz (1990) evaluaron el potencial productivo de diferentes variedades de triticales sembrados a una densidad de 100 kg ha⁻¹ en la Comarca Lagunera; realizaron los cortes durante la etapa de embuche. Los rendimientos acumulados de forraje seco tuvieron fluctuaciones entre 5199 y 8156 kg ha⁻¹. Sin embargo, la producción de materia seca para el primer corte fue de 5626 a 3702 kg ha⁻¹ y para el segundo corte la producción más elevada fue de 3469 y la menor de 1713. En cuanto a la producción de proteína cruda se observó una fluctuación de 9.1 a 16.7 % para el primer corte y de 8.3 a 16.6 para el segundo corte, no se encontró una relación directa entre rendimiento y contenido de proteína cruda en el forraje. Las variedades de avena mostraron contenidos más bajos de proteína cruda con fluctuaciones entre ambos cortes de 9.0 a 13.2 %.

Quiroga (1988) evaluó tres densidades de siembra: 100, 150 y 200 kg ha⁻¹ en triticales Eronga-83 sin encontrar efecto en el rendimiento de materia seca.

MATERIALES Y METODOS

El estudio se llevó a cabo en el ciclo otoño-invierno 1995-1996 en el campo agrícola de la Facultad de Agricultura y Zootecnia de la Universidad Juárez del Estado de Durango en el ejido Venecia, Durango, México.

El clima del lugar es del tipo seco desértico. La precipitación media anual es de 242.8 mm y la temperatura media anual es de 20.9 °C (CETENAL-UNAM, 1970).

La unidad de suelo predominante es el Xerosol háplico, pobre en materia orgánica, alcalino con textura migajón arcilloso (Mr) predominante (INEGI-SPP, 1978).

El experimento consistió en sembrar las variedades de triticales: San Lucas, AN 34-87 y AN 31-87 en monocultivo y en mezclas a cuatro densidades de siembra (Cuadro 1) para compararlos con el pasto rye grass var. Oregon y con la avena var. Cuauhtémoc que fueron sembrados a una sola densidad de 40 y 120 kg ha⁻¹, respectivamente, para que funcionaran como testigos. Cada uno de los 26 tratamientos tuvo tres repeticiones.

Cuadro 1. Número de tratamientos, nombre de las líneas de triticales y densidad de siembra en el campo experimental de la Facultad de Agricultura y Zootecnia, Universidad Juárez del Estado de Durango. 1995-1996.

Tratamiento	Monocultivo o mezcla	Densidad kg ha ⁻¹
1	San Lucas	80
2	San Lucas	120
3	San Lucas	160
4	San Lucas	200
5	AN 34-87	80
6	AN 34-87	120
7	AN 34-87	160
8	AN 34-87	200
9	AN 31-87	80
10	AN 31-87	120
11	AN 31-87	160
12	AN 31-87	200
13	San Lucas y AN 34-87	40 y 40
14	San Lucas y AN 34-87	60 y 60
15	San Lucas y AN 34-87	80 y 80
16	San Lucas y AN 34-87	100 y 100
17	San Lucas y AN 31-87	40 y 40
18	San Lucas y AN 31-87	60 y 60
19	San Lucas y AN 31-87	80 y 80
20	San Lucas y AN 31-87	100 y 100
21	AN 34-87 y AN 31-87	40 y 40
22	AN 34-87 y AN 31-87	60 y 60
23	AN 34-87 y AN 31-87	80 y 80
24	AN 34-87 y AN 31-87	100 y 100
25	Rye grass var. Oregon	40
26	Avena var. Cuauhtémoc	120

Las parcelas individuales de cada tratamiento tuvieron una superficie de 1.8 x 3 m, separadas unas de otras por 0.5 metros. En cada una de ellas se sembraron seis surcos con una distancia entre éstos de 0.3 metros. Del total de la parcela (5.4 m²) se tomó como parcela útil un metro de los dos surcos centrales sobre los que se tomaron las variables: producción de materia seca en dos cortes y contenido de proteína cruda al primer corte.

La preparación del terreno se realizó a finales de octubre; consistió en barbecho, rastreo, trazo de riego y borde. La siembra se hizo en forma mecánica el día 31 de octubre de 1995. Se aplicaron cinco riegos a los dos, 36, 69, 90 y 119 días de la siembra. Se fertilizó con 60 kg de fósforo y 90 kg de nitrógeno; esto se realizó al momento de la siembra. Una segunda aplicación de 60 kg de nitrógeno se realizó el día 27 de febrero de 1996 después del primer corte, el cual se realizó el día 20 de febrero en el estado fenológico de embuche; ya que, como lo mencionan Quiroga y Fariás

(1990), ese es el manejo normal que el agricultor proporciona a la avena y es cuando se esperan mayores volúmenes de producción sin detrimento de la calidad. Dicho corte se realizó a ras del suelo en dos de los surcos centrales en un metro lineal y se secó esa muestra del forraje por 24 h a temperatura de 60 °C. Mediante el método kjeldahl se determinó el contenido de proteína cruda.

La producción de materia seca en cada uno de los dos cortes y en el total, así como el contenido de proteína al primer corte, se analizaron utilizando un diseño de bloques al azar. En las variables donde se encontró diferencia entre los tratamientos se hizo la comparación de medias por Tukey (Loma, 1982).

Para evaluar el efecto de la densidad de siembra sobre el rendimiento o el contenido de proteína se hizo un análisis factorial considerando las variedades y mezclas como el factor A y las densidades de siembra como el factor B.

Ambos análisis se realizaron utilizando el paquete estadístico de diseños experimentales desarrollado por la Universidad de Nuevo León, México (Olivares, 1994).

RESULTADOS Y DISCUSION

Producción de Materia Seca al Primer y Segundo Corte

En el Cuadro 2 se presentan los promedios de producción de materia seca para el primer y segundo corte. Se encontró diferencia significativa entre los promedios de producción obtenidos en el primer corte por lo que se procedió a realizar la comparación de medias. Como se puede observar, sólo dos tratamientos fueron sobresalientes, 20 están sobre el promedio y los dos testigos se encuentran con las producciones más bajas. La mezcla San Lucas y AN 34-87 sembrada a una densidad de 80 kg ha⁻¹ y la variedad AN 34-87 sembrada a 160 kg ha⁻¹ fueron las que presentaron mayor producción de materia seca (8.25 y 7.83 t ha⁻¹, respectivamente).

Los testigos avena y rye grass tuvieron las producciones más bajas (1.65 y 1.48 t ha⁻¹, cada uno) con lo cual se acepta la opinión de Quiroga (1994) respecto a que los triticales representan una opción para la producción de forraje al inicio del invierno.

En el segundo corte no se encontró diferencia significativa entre tratamientos y testigos (Cuadro 2),

sin embargo, fue notoria la recuperación en la producción de la avena, pues la producción alcanzada tan sólo fue menor que 5 de los 24 tratamientos. Aunque el rye grass no alcanzó una producción tan fuerte, por lo menos se encontró dentro del promedio del resto de los tratamientos. Lo anterior contrasta con la no recuperación observada en los tratamientos 13 y 7 que en el primer corte habían sido superiores.

Producción de Materia Seca en Dos Cortes

El análisis de la variación para la producción total en dos cortes arrojó diferencia significativa entre tratamientos por lo que se procedió al análisis de comparación de medias, lo cual arrojó los resultados que se presentan en el Cuadro 3. Ahí se puede observar que a pesar que el triticales sembrado en monocultivo (variedad AN 34-87) a una densidad de 120 kg ha⁻¹ presentó la mayor producción de materia seca con una diferencia sobresaliente de los testigos, la segunda mejor producción se obtuvo con una mezcla de las variedades liberadas en 1992 por Lozano (1994) con lo que se resalta la no consistencia entre los monocultivos, mezclas y densidades de siembra, puesto que salvo la presencia de la densidad de 120 kg ha⁻¹ en los dos tratamientos con más alta producción, en los restantes 22 tratamientos de triticales los diferentes tratamientos de densidad se presentaron a lo largo de la curva de producción.

Todos los tratamientos de triticales fueron superiores estadísticamente a los testigos y entre éstos fue mejor la avena que el rye grass.

En sólo 12 de los 26 tratamientos se encontraron producciones más altas a las 10.25 t ha⁻¹ obtenidas por Urquiza (1995), pero la producción de todos los tratamientos en este estudio fue superior a los 3.4 t ha⁻¹ reportados por el CIAN (S/F) que también reporta rendimientos de 8.8 t ha⁻¹ para rye grass diploide y 10.6 t ha⁻¹ para rye grass tetraploide.

Los anteriores informes, al ser comparados con los resultados que se muestran en el Cuadro 3, se quedan por debajo de la producción de materia seca total del triticales y de avena. En lo que respecta a rye grass, las producciones encontradas en este estudio fueron muy bajas, quizás porque se dieron sólo dos cortes, reconociendo que esta especie puede alargar su producción a tres y hasta cuatro cortes.

Quiroga y Fariás (1981) realizaron un estudio en el que el triticales tuvo una producción de 4.63 t ha⁻¹ de

Cuadro 2. Promedios de producción de materia seca de variedades de triticale y testigos al primer y segundo corte. Venecia, Durango. 1995-1996.

Tratamiento	Monocultivo o mezcla	Densidad	Producción	
			Primer corte	Segundo corte
		kg ha ⁻¹	t ha ⁻¹	
13	San Lucas y AN 34-87	80	8.25 A*	2.75
7	AN 34-87	160	7.83 A	3.49
22	AN 34-87 y AN 31-87	120	6.96 AB	5.46
5	AN 34-87	80	6.95 AB	3.24
14	San Lucas y AN 34-87	120	6.94 AB	3.80
15	San Lucas y AN 34-87	160	6.86 AB	2.98
8	AN 34-87	200	6.78 AB	4.02
19	San Lucas y AN 31-87	160	6.60 AB	3.90
24	AN 34-87 y AN 31-87	200	6.56 AB	5.33
10	AN 31-87	120	6.46 AB	4.34
6	AN 34-87	120	6.23 AB	8.67
3	San Lucas	160	6.17 AB	3.58
16	San Lucas y AN 34-87	200	6.10 AB	3.54
21	AN 34-87 y AN 31-87	80	6.04 AB	3.59
12	AN 31-87	200	6.04 AB	3.58
4	San Lucas	200	6.04 AB	5.81
23	AN 34-87 y AN 31-87	160	5.97 AB	2.75
17	San Lucas y AN 31-87	80	5.74 AB	3.87
1	San Lucas	80	5.60 AB	2.47
2	San Lucas	120	5.59 AB	6.26
11	AN 31-87	160	5.18 AB	3.85
9	AN 31-87	80	4.69 AB	5.88
18	San Lucas y AN 31-87	120	4.69 AB	4.92
20	San Lucas y AN 31-87	200	4.65 AB	5.17
25	Rye grass	40	1.65 B	5.33
26	Avena	120	1.48 B	3.87

* Literales distintas indican diferencia estadística significativa 0.05 %.

forraje seco; mientras que el rye grass Oregon produjo 3.73 t ha⁻¹, pero su producción total en cuatro cortes fue de 16.87 t ha⁻¹. Bajo las condiciones en que se llevó a cabo ese trabajo, estos autores concluyen que los rye grass anuales fueron consistentes en su comportamiento e indican que siguen siendo la mejor opción para la producción de forraje invernal en la Comarca Lagunera; además, los cereales y las mezclas solo alcanzaron uno o dos cortes que aunque fueron altos en rendimiento no fue suficiente para competir con otros tratamientos que alcanzaron cuatro cortes.

Resultados en la Comarca Lagunera han demostrado que los rendimientos del triticale son similares a los de la avena (Quiroga y Fariás, 1994).

Quiroga (1994) afirma que el volumen y calidad del forraje de triticale está por abajo de lo conseguido con el rye grass. Sin embargo, los resultados encontrados en el presente trabajo demuestran que el triticale tuvo producciones de forraje seco por encima de lo que produjeron avena y rye grass en los dos cortes.

Para Quiroga (1994) la mejor opción para producir forraje en la época invernal sigue siendo el rye grass o rye grass anual, pero señala que existen las líneas avanzadas de triticale que presentan un mayor o igual potencial que la avena Chihuahua utilizada tradicionalmente como forraje en la región, pues en un estudio encontró que el rango de producción de estas líneas fue de 6.1 a 9.0 t ha⁻¹ de forraje seco. Con base en los resultados del presente trabajo que se muestran en el Cuadro 3 se puede afirmar que, efectivamente, existen líneas avanzadas de triticale con alta productividad que pueden ser superiores, tanto a la avena como al rye grass.

Interacción entre Variedades de Triticale con Densidad de Siembra

El análisis de varianza aplicado para conocer la existencia de interacción entre las variedades de triticale utilizadas y la densidad de siembra arrojó diferencia significativa tan sólo para las densidades

Cuadro 3. Promedios de producción de materia seca de variedades de triticale y testigos en dos cortes. Venecia, Durango. 1995-1996.

Tratamiento	Monocultivo o mezcla	Densidad	Producción t ha ⁻¹
6	AN 34-87	120	14.91 A
22	AN 34-87 y AN 31-87	120	12.42 AB
24	AN 34-87 y AN 31-87	200	11.88 ABC
2	San Lucas	120	11.85 ABC
4	San Lucas	200	11.85 ABC
7	AN 34-87	160	11.32 ABC
10	AN 31-87	120	10.80 ABC
8	AN 34-87	200	10.80 ABC
14	San Lucas y AN 34-87	120	10.74 ABCD
13	San Lucas y AN 34-87	80	10.73 ABCD
9	AN 31-87	80	10.58 ABCD
19	San Lucas y AN 31-87	160	10.51 ABCD
5	AN 34-87	80	10.18 ABCD
15	San Lucas y AN 34-87	160	10.18 ABCD
20	San Lucas y AN 31-87	200	9.80 ABCD
3	San Lucas	160	9.75 ABCD
16	San Lucas y AN 34-87	200	9.63 ABCD
21	AN 34-87 y AN 31-87	80	9.63 ABCD
12	AN 31-87	200	9.62 ABCD
17	San Lucas y AN 31-87	80	9.62 ABCD
18	San Lucas y AN 31-87	120	9.61 ABCD
11	AN 31-87	160	9.00 BCD
23	AN 34-87 y AN 31-87	160	8.72 BCD
1	San Lucas	80	8.07 BCD
26	Avena	40	6.98 CD
25	Rye grass	120	5.35 D

de siembra y se observó la mayor producción de 11.72 t ha⁻¹ cuando se utilizaron 120 kg ha⁻¹ de semilla y la menor producción, 9.8 t ha⁻¹, para la densidad de 80 kg ha⁻¹ (Cuadro 4), esto es superior a las 4.63 t ha⁻¹ con un corte y a una densidad de 100 kg ha⁻¹ obtenido por Farias y Faz (1990), pero es inferior a los resultados de Escápita y Valdés (1987) con la densidad de 140 kg ha⁻¹ cuya producción anduvo entre 12 y 14 t ha⁻¹.

Los resultados discutidos hasta el momento coinciden con las conclusiones de Quiroga (1988) respecto a que aumentar la densidad de siembra por arriba de los 100 kg ha⁻¹ en triticale no tiene ningún efecto significativo en los rendimientos del forraje.

Contenido de Proteína Cruda

El contenido de proteína cruda entre los distintos tratamientos se realizó mediante el análisis factorial detectando diferencia altamente significativa ($p < .01$)

entre monocultivos y mezclas de triticales y diferencia no significativa para densidades de siembra.

Los resultados de calidad obtenidos en este estudio se contraponen a lo expresado por Quiroga (1988) quien señaló que aumentar la densidad de siembra por arriba de 100 kg ha⁻¹ no tenía ningún efecto positivo en los rendimientos ni en la calidad del forraje, ya que aquí los porcentajes más altos de proteína se obtuvieron en las densidades de siembra más altas (Cuadro 5). Al hacer la comparación de medias, los tratamientos se jerarquizaron tal y como se muestra en

Cuadro 4. Promedios de producción de las distintas densidades de siembra utilizadas con monocultivo y mezclas de triticale. Venecia, Durango. 1995-1996.

Densidad de siembra kg ha ⁻¹	Producción media t ha ⁻¹
120	11.72
200	10.61
160	9.90
80	9.80

Cuadro 5. Contenido promedio de proteína cruda de variedades de triticale sembradas a distintas densidades, avena y rye grass. Venecia, Durango. 1995-1996.

Tratamiento	Monocultivo o mezcla	Densidad de siembra kg ha ⁻¹	Contenido promedio de proteína
8	AN 34-87	200	21.10 A
4	San Lucas	200	20.83 A
6	AN 34-87	120	20.55 AB
25	Rye grass	40	20.21 ABC
20	San Lucas y AN 31-87	200	19.53 ABCD
19	San Lucas y AN 31-87	160	19.20 ABCDE
9	AN 31-87	80	19.12 ABCDE
18	San Lucas y AN 31-87	120	19.01 ABCDE
22	AN 34-87 y AN 31-87	120	18.63 ABCDEF
17	San Lucas y AN 31-87	80	18.57 ABCDEF
5	AN 34-87	80	18.39 ABCDEF
7	AN 34-87	160	18.13 ABCDEF
16	San Lucas y AN 34-87	200	18.03 ABCDEF
2	San Lucas	120	18.02 ABCDEF
23	AN 34-87 y AN 31-87	160	17.96 ABCDEF
11	AN 31-87	160	17.72 ABCDEF
3	San Lucas	160	17.70 ABCDEF
21	AN 34-87 y AN 31-87	80	17.68 ABCDEF
24	AN 34-87 y AN 31-87	200	17.52 ABCDEF
14	San Lucas y AN 34-87	120	16.53 ABCDEF
1	San Lucas	80	15.17 BCDEF
15	San Lucas y AN 34-87	160	14.63 CDEF
10	AN 31-87	120	14.57 CDEF
12	AN 31-87	200	14.34 DEF
26	Avena	120	13.66 EF
13	San Lucas y AN 34-87	80	13.26 F

el Cuadro 5. Ahí se muestra que el tratamiento AN 34-87 200 kg fue el mejor seguido por San Lucas 200 kg, AN 34-87 120 kg y uno de los testigos, el rye grass; todos superiores a 20 % de proteína cruda. Se puede observar que la mejor de las líneas y mezclas es la AN 34-87 en este aspecto pues su rango es de 21.10 a 18.30.

La mezcla San Lucas y AN 34-87 tuvo un bajo contenido de proteína cruda con 13.26 siendo el más bajo de los 26 tratamientos. La avena sólo alcanzó 13.6 %, lo que es ligeramente más alto que el 13.2 % reportado por Fariás y Faz (1990).

La línea San Lucas tuvo una buena respuesta al ser sembrada a una densidad alta de 200 kg ha⁻¹, ya que fue estadísticamente diferente a San Lucas con 80 kg ha⁻¹; el rango de esta línea fue el más grande de las líneas y mezclas. La mezcla San Lucas y AN 34-87 tiene en promedio los más bajos contenidos de proteína cruda, ya que su rango va de 18.03 en la densidad de siembra de 200 kg ha⁻¹ a 13.26 en la densidad de 80 kg ha⁻¹.

Quiroga y Fariás (1994) encontraron que el contenido de proteína cruda del triticale es 3 % mayor que el obtenido en la avena. Fariás y Faz (1990) dicen que las líneas y variedades de triticale tienen contenidos de proteína cruda mayores que las variedades de avena usados como testigos en su estudio. Estos reportes se confirman en esta investigación, ya que 25 de los 26 tratamientos tuvieron mayor contenido proteico (21.10 a 14.34 %) que la avena (13.66), aunque el rye grass también tuvo un valor alto en este atributo (20.21 %) (Cuadro 2).

La densidad de siembra no influyó en el contenido de proteína presentado por los distintos genotipos ($p > .05$).

CONCLUSIONES

Las mezclas de triticale no muestran una superioridad en cantidad y calidad de forraje en comparación con las variedades sembradas solas, pero las variedades de triticale son superiores a los testigos

en producción de materia seca y contenido de proteína cruda; aunque es recomendable que estudios posteriores confirmen estos resultados.

La variedad AN 34-87 en monocultivo o en mezcla tuvo, en general, los mejores rendimientos, aunque la diferencia estadística se encontró solamente al compararla con los testigos.

En la interacción de la densidad de siembra con las variedades y mezclas, se encontró significancia sólo para las densidades de siembra, ordenándose, de mayor a menor, de acuerdo con sus rendimientos, como sigue: 120, 200, 160 y 80 kg ha⁻¹.

LITERATURA CITADA

- Campo Agrícola Experimental del Valle de México. 1981. Guía para cultivar triticale de temporal en México, Hidalgo, Tlaxcala y Puebla. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos-Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas. Folleto para productores No. 1, Chapingo, México.
- CETENAL-UNAM. 1970. Carta de clima "Durango". Escala 1:50 000. Clave 13RVIII.
- CIAN. Sin fecha. Cultivos forrajeros anuales de invierno. Circular.
- Escápita, S. J. y V. M. Valdés R. 1987. Prueba de tres variedades de triticale. Informe de Investigación Agrícola en Cereales. INIFAP-CIAN-CAELALA. Matamoros, Coah.
- Farías, F. J. M. y R. Faz C. 1990. Evaluación de variedades y variedades de triticale para producción de forraje. pp. 247-262. *In*: Informe de Investigación de Forrajes 1982-1983. CAELALA-CIAN-INIA-SARH. Matamoros, Coah.
- Hernández, G. H. 1990. Evaluación de compuestos forrajeros de triticale (*X. Triticosecale* Wittmack) en diferentes regiones del norte de México. Tesis de maestría. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Buenavista, Saltillo, Coahuila.
- INEGI-SPP. 1978. Carta topográfica "Bermejillo". Escala 1:50 000. Clave G13D15. México.
- Loma, J. L. De la. 1982. Experimentación agrícola. Ed. UTEHA, Segunda edición. México, D. F.
- Lozano, del R. A. J. 1994. Triticale in Northern Mexico: research, technology transference and use commercial perspectives. Proceedings of the III Symposium International of Triticale. Lisboa, Portugal.
- Olivares, S. E. 1994. Paquete de diseños experimentales FAUANL. Versión 2.5. Facultad de Agronomía, Marín, Nuevo León.
- Quiroga, G. M. 1988. Efecto del estado de madurez y la densidad de siembra sobre el rendimiento de forrajes y calidad del triticale Eronga-83. pp. 83-98. *In*: Informe de investigación en forrajes. IFAPRL-CAELALA. Matamoros, Coahuila.
- Quiroga, G. M. 1990. Jardín de introducción de triticale forrajero. Informe de Investigación en Forrajes 1980-81. 6: 47-59. CIFAPRL-CAELALA. Matamoros, Coahuila.
- Quiroga, G. M. 1994. Evaluación de variedades y variedades de triticale forrajero. Informe de investigación en forrajes 1990. 13: 127-132. CIFAPRL-CELALA. Matamoros, Coahuila.
- Quiroga, G. M. y M. Farías F. 1981. Jardín de introducción de triticale forrajero 1980-1981. Informe de Investigación (sin publicar). CIAN-CAE La Laguna. Matamoros, Coahuila.
- Quiroga, G. M. y J. M. Farías F. 1990. Jardín de introducción de triticale forrajero (II). Informe de Investigación en Forrajes 1980-1981. 6: 220-231. CIFAPRL-CAELALA. Matamoros, Coahuila.
- Quiroga, G. H. M. y J. M. Farías F. 1994. Cultivos forrajeros de invierno. Parcela de validación. *In*: Informe de Investigación en Forrajes 1987. CIAN-CELALA. 10: 9-14 Matamoros, Coahuila.
- Urquiza, S. J. E. 1995. Producción de forraje y valor nutritivo de la mezcla de rye grass (*Lolium multiflorum*) y triticale (*X. Triticosecale* Wittmack). Tesis profesional. SEP-SEIT-DGETA-ITA No. 10. Torreón, Coahuila.

INDICE DE AUTORES
AUTHORS INDEX

- Aalbers, Th. G. 171
Aguilar Melchor, J.J. 371
Aguilera Rangel, R. 413
Almaguer V., G. 211
Alvarez-Sánchez, E. 219
Amado Alvarez, J.P. 315, 321
Aulakh, M.S. 69
Baca Castillo, G.A. 371
Bunzl, K. 165
Cahill, M.J. 89
Campos Cascaredo, A. 267, 341
Carmona J., E. 145
Castellanos, J.Z. 57
Ceccanti, B. 147
Contreras A., M. 211
Cooper, J.E. 89
Cram, S. 179
Cruz Huerta, L. 267
Cruz Medina, R. 29
Cueto Wong, J.A. 229
Chávez A., N. 397
Dalal, R.C. 89
Deane, J. 157
De Wilde, P.G.M. 171
Del Río Olague, F. 413
Doran, J.W. 69
Escobedo Torres, V.M., 413
Etchevers B., J.D. 219
Farias Larios, J. 329
Fariás-Rodríguez, R. 383, 391
Ferrera-Cerrato, R. 7
Fischer, R.W. 179
Flores D., L. 145
Gaffney, J. 89
García, C. 147
García A., R. 397
García Arellano, D. 355
García C., F. 371
Gil-Sotres, F. 147
Godínez, R. 383
Godoy Avila, C. 1
González H., V.A. 7
González Mantilla, Y. 279
Gutiérrez R., M. 179
Guzmán González, S. 329
Hakamata, T. 39
Harrington, L.W. 121
Hernández Jiménez, A. 279
Herrera M., F. 211
Hirata, H. 39
Hons, F.M. 237
Jensen, E.S. 57
King, A.J. 89
Konno, T. 45
Lal, R. 109
Lehane, K.J. 89
Leirós, C. 147
López, T. 349
López Aguirre, J.G. 329
López Ch., J.C. 1
López Jiménez, A. 371
López López, M.A. 287
López Martínez, J.D. 355, 359
Luna Morales, C.del C. 247
Luzio, W. 15, 21
Maldonado T., R. 211
Mancilla y D.I., R. 405
Martínez Damián, M.A. 135
Martínez Garza, A. 135, 219, 371
Matocha, J.E. 237
Medina, H. 349
Meeussen, J.C.L. 171
Michel Rosales, A. 329
Molina Ochoa, J. 329
Morales Díaz, M. 279
Moreno Ramos, O.H. 29
Morrás, H.J.M. 255
Navarro, H. 295
Navia, M. 15, 21
Neck, S. 201
Núñez E., R. 219
Ortiz C., J. 219
Ortiz Franco, P. 315, 321
Otero Gómez, L.Ma. 279
Ozaki, Y. 45
Parada, A.M. 15, 21
Peña-Cabriales, J.J. 383, 391
Pérez, Ma. A. 295
Pérez-Zamora, O. 183, 193
Pino, I. 15, 21
Pissani Zuñiga, J.F. 355, 359
Plascencia E., F.O. 7
Pulido M., L. 201
Quiroga Garza, H.M. 229
Rey, R. 349
Rodríguez Zavaleta, C.† 201
Saá, A. 147
Salazar Gómez, M. 29
Salinas-García, J.R. 237
Santamaría César, J. 405
Schimmack, W. 165
Scopel, E. 99
Serrato Sánchez, R. 413
Shaner, D. 157
Siebe, C. 365
Sommer C., I. 145
Strong, W.M. 89
Swietlik, D. 337
Tasistro, A.S. 99
Thompson, R.L. 69
Thompson, S.N. 69
Tijerina Ch., L. 219
Tirado B., C. 211
Torres L., M. 397
Trasar-Cepeda, C. 147
Trejo Q., L. 397
Tuxhorn, G. 157
Utset, A. 349
Uwasawa, M. 45
Van Diest, A. 79
Van Riemsdijk, W.H. 171
Vantour Causse, A. 279
Vargas H., J.J. 7
Volke H., V. 219
Weston, E.J. 89
Wiegand, C.L. 201
Zamora, E. 383, 391
Zebrowski, C. 295

REVISORES QUE COLABORARON DURANTE 1997
REVIEWERS

Aguilar Noh Antonio,
Aguilar Sánchez Genaro
Aguilar Santelises Andrés
Alcántar González Gabriel
Alvarado López Jorge
Améndola Massiotti Ricardo
Anaya Garduño Manuel
Arévalo Galarza Gustavo
Arteaga Ramírez Ramón
Baca Castillo Gustavo
Barois Isabelle
Becerril Román Alberto E.
Cajuste Bontemps Lenom
Castellanos Ramos Javier Z.
Cortés Flores José I.
Cristóbal Acevedo David
Echegaray Alemán Alfredo
Enríquez Sánchez Miguel
Estrada Berg Juan W.
Etchevers Barra Jorge D.
Ferrera-Cerrato Ronald
Flores Román David
Flores Valdéz Claudio
Fragoso Carlos
González Eguiarte Diego R.
González Hernández Víctor
González Ríos Jesús M.
Gutiérrez Ruiz Margarita
Hidalgo Moreno Claudia
Lee Rodríguez Vicente

López Alcocer Eduardo
López Jiménez Alfredo
López Martínez José D.
Núñez Escobar Roberto
Olivares Rodríguez Felipe
Ordaz Chaparro Víctor M.
Ortiz Olguin Miguel
Palacios Vélez Enrique
Palacios Vélez Oscar L.
Palma López David J.
Pérez-Zamora Octavio
Queistsch K. Jürgen
Quintero Lizaola Roberto
Ramírez Gama Rosa María
Rebolledo Héctor Hugo
Rey Contreras Jaime A.
Sahagún Castellanos Jaime
Sánchez García Prometeo
Serrano Covarrubias Luis M.
Sommer Cervantes Irene
Tijerina Chávez Leonardo
Torres Carral Guillermo
Trinidad Santos Antonio
Valdéz María
Vargas Hernández Mateo
Vázquez Vázquez Cirilo
Velasco Molina Hugo A.
Velázquez Ramírez Luis
Vergara Sánchez Miguel A.
Volke Haller Víctor

NORMAS PARA PUBLICACION EN TERRA

TIPOS DE MANUSCRITOS PARA PUBLICACION

La Revista TERRA acepta trabajos en español, inglés, francés y portugués (los idiomas que se hablan en América), sobre temas relacionados con la ciencia del suelo y el agua. Estos pueden ser artículos científicos, notas de investigación, ensayos o revisiones de literatura, cartas al editor, y reseñas de libros.

Se entiende por artículo científico aquél basado en un trabajo de investigación en que se ha aplicado en forma rigurosa el método científico y se ha estudiado el efecto que tienen diferentes tratamientos sobre la respuesta medible de un sistema, como metodología para comprobar o rechazar una hipótesis claramente establecida como objetivo del trabajo.

Las notas de investigación son artículos basados en trabajos experimentales que presentan aspectos metodológicos novedosos, o resultados que el autor quisiera publicar antes que finalice su investigación.

Los ensayos o revisiones de literatura son artículos basados en una recopilación de artículos científicos o informes de investigación, en los que el autor aporta su opinión personal sobre el tema y establece conclusiones respecto al estado actual del conocimiento sobre el mismo.

TERRA publicará en la sección cartas al editor, aquellas que juzgue convenientes, las cuales deben contener opiniones o comentarios debidamente argumentados. Esta sección tiene por objeto fomentar la discusión sobre temas publicados en sus páginas o de interés para la comunidad científica nacional.

La reseña de libros es una sección destinada a dar a conocer la obra, particularmente de autores mexicanos e iberoamericanos, que sea de interés para los científicos del suelo.

La Revista TERRA únicamente acepta colaboraciones de los miembros de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Los trabajos que se envíen deberán ceñirse a estas normas para publicación y estarán sujetos a revisión por el Comité Editorial o por quien éste designe, antes de su publicación. No se aceptan trabajos ya publicados o que estén sometidos a la consideración de otras revistas.

CONTENIDO Y FORMATO DEL MANUSCRITO

Los artículos científicos y las notas científicas que se presenten deberán constar de las siguientes partes: 1) título, título en inglés; 2) autor(es); 3) institución(es) del trabajo y dirección de los autores; 4) resumen; 5) palabras clave; 6) summary; 7) index words; 8) introducción; 9) materiales y métodos; 10) resultados y discusión; 11) conclusiones y 12) literatura citada. El Comité Editorial podrá aceptar algunas modificaciones a esta estructura, cuando el tenor del texto así lo aconseje.

Los ensayos o revisiones de literatura deberán constar de las siguientes partes: 1) título, título en inglés; 2) autor(es); 3) institución donde se desarrolló el trabajo; 4) resumen; 5) palabras clave; 6) summary; 7) index words; 8) introducción; 9) desarrollo del tema, con los subtítulos que se estimen convenientes; 10) discusión, cuando proceda; 11) conclusiones y 12) literatura citada.

Las cartas al editor y las reseñas de libros no tienen un formato definido, pero no deberán exceder de dos cuartillas a máquina y a doble espacio.

Los trabajos deben enviarse con original y dos copias, mecanografiados en papel tamaño carta a doble espacio, dejando márgenes de 2.5 cm en los cuatro costados y con las líneas numeradas. Las páginas, incluyendo los cuadros y las figuras, se numerarán progresivamente. El texto no deberá exceder 20 páginas, aunque la extensión ideal es de 15 para un artículo científico y de ocho para una nota científica. Cada cuadro o figura se incluirá en una hoja aparte con su correspondiente número de identificación con lápiz de grafito suave en el reverso. Las leyendas correspondientes se mecanografiarán en una hoja aparte. Los cuadros y las figuras contendrán sólo la información esencial y en ningún caso repetirán los datos que se presenten en otra forma. Las unidades que se empleen serán las del Sistema Internacional de Unidades. Los manuscritos deberán entregarse también en un disquete de 3.5" en procesador Word para Windows de la versión más reciente.

FORMATO PARA PUBLICACION

En Terra, los trabajos se publican con el formato que se describe a continuación; sin embargo, los manuscritos deben ser preparados por los autores como se indicó en la sección anterior y tomando en cuenta, hasta donde sea posible, las instrucciones en esta sección. El personal editorial de Terra preparará la versión definitiva para su impresión en las páginas de la revista.

Título. El título se escribirá con mayúsculas, al inicio, centrado, con negritas y tipo de letra TIMES NEW ROMAN 14, se colocará su traducción al inglés debajo del título en español. El título en inglés se escribirá con minúsculas, excepto la primera letra de cada palabra, centrado, con negritas y tipo de letra TIMES NEW ROMAN 12.

Autores. Se incluirá el nombre del autor o autores en la manera en que éstos acostumbran escribirlo en sus publicaciones. No se usarán títulos ni grados. La primera letra del nombre y apellidos se escribirán con mayúsculas. Los nombres de los autores se separarán por comas, se centrarán, con negritas, tipo de letra TIMES NEW ROMAN 12, a un espacio después del título en inglés.

Institución(es) patrocinadora(s) y dirección de los autores. El objetivo de esta parte del artículo es dar el crédito respectivo a la institución que patrocinó el trabajo y que los lectores puedan contactar a los autores en caso necesario; la dirección postal debe quedar claramente especificada. Esta identificación se escribirá con minúsculas, excepto las siglas, debajo de los autores, centrado y con tipo de letra TIMES NEW ROMAN 11.

Notas al pie de página. Se podrán utilizar, cuando sea necesario para identificar información adicional; se numerarán progresivamente a través de todo el texto. Deberán emplearse sólo cuando sea imprescindible.

De la forma de titular. Los títulos tienen diversos órdenes y señalan automáticamente la posición de una parte del artículo dentro de éste.

Título de primer orden. Es el título principal del artículo.

Título de segundo orden. A este tipo corresponden las diferentes partes del artículo; Resumen, Summary, Introducción, etc. Se escriben con mayúsculas, centrados, con negritas, (TIMES NEW ROMAN 11).

Títulos de tercer orden. Se escriben al margen izquierdo, con minúsculas, excepto la primera letra de las palabras, en negritas, con espacios sencillos después del último texto escrito y del que continúa.

Títulos de cuarto orden. Se escriben al margen izquierdo, con negritas, con minúsculas excepto la primera letra, con punto, seguido de texto. Sin numeración.

Resumen. Esta sección debe sintetizar, en aproximadamente 300 palabras, los aspectos más importantes del trabajo, esto es, su justificación, importancia, método experimental (cuando corresponda) y las conclusiones más importantes.

Palabras clave. Estas palabras no deben incluir los mismos términos contenidos en el título. Se colocan a un espacio debajo del resumen al margen izquierdo. El término "palabras clave:" se escribe con letra TIMES NEW ROMAN 11, con cursivas, negritas y las palabras clave con el mismo tipo de letra, cursivas, sin negritas. Ejemplo:

Palabras clave: Rizósfera, agroquímicos.

Summary. Se siguen las mismas normas que para el resumen en español.

Index words. Se seguirán las instrucciones dadas para palabras clave.

Introducción. En esta sección se indica la motivación, la importancia y los objetivos del trabajo que llevan implícitas las hipótesis del mismo. Contiene, además, los aspectos más relevantes del tema tratados por otros autores e identificados en la revisión de literatura. La introducción no debe exceder tres cuartillas a doble espacio.

Materiales y Métodos. Esta sección debe describir las características relevantes de los materiales usados en el estudio y los métodos experimentales empleados. Se le debe dar particular importancia a la descripción del método experimental utilizado para lograr los objetivos planteados. Debe mostrar concordancia plena con las hipótesis.

Resultados y Discusión. Aquí se incluyen los resultados obtenidos en la investigación. Estos se presentarán en forma de texto, cuadros, o figuras, estos últimos no deberán duplicar la información presentada en el texto. La información presentada en cuadros y figuras tampoco deberá duplicarse, e incluirá resultados que puedan ser fácilmente calculables.

En la discusión se resaltarán los principios más importantes y las relaciones causa-efecto derivadas del

análisis de los resultados. Además, se deberá explicar, en función de las observaciones hechas, el porqué de lo observado. Los resultados obtenidos se compararán con los de otros investigadores y se señalarán las divergencias y las semejanzas.

Conclusiones. Las primeras conclusiones que se presenten deben ser aquellas correspondientes a los objetivos planteados. Se pueden incluir, además, otras conclusiones relevantes y recomendaciones que emanen del trabajo.

Citas en el texto. Las citas en el texto se harán de acuerdo con la forma en que participan éstas en la oración. Se seguirán las siguientes reglas: 1) se citará el apellido principal del(los) autor(es) y el año, cuando se trate de uno o dos autores, y el apellido principal del primer autor seguido de *et al.* y el año cuando se trate de tres o más autores; 2) las citas, cuando más de una, se colocarán en orden cronológico; 3) cuando el nombre del(los) autor(es) participa en la oración se colocará el apellido principal seguido del año entre paréntesis, ejemplo: Martínez (1982) observó que..., Carrasco (1983) y Merino (1984) encontraron gran diferencia...; 4) cuando la cita se agrega al final de la oración los nombres de los autores y el año se colocarán entre paréntesis separados por una coma, ejemplo: al final de la cosecha (Martínez, 1982) o (Carrasco, 1983; Merino, 1984) o (Bravo *et al.*, 1979); 5) cuando el autor tiene más de una publicación en un año se adiciona a este a, b, c, ejemplo: (Moreno, 1984a) o (Moreno, 1984b); 6) las comunicaciones personales se citarán sólo en el texto, ejemplo: (R. Nuñez E., 1984 Comunicación personal).

Literatura Citada. Para confeccionar la lista de citas de literatura se seguirán las normas que se detallan con ejemplos a continuación.

1. Caso de artículos en revistas seriadas, ejemplo:

Núñez E., R., A. Trinidad S. y J.J. Martínez H, 1984. Efecto del estiércol de vacuno en la producción de maíz. *Agropecuaria Técnica* 54: 385-388.

Obsérvese que la inicial del nombre propio se ha trasladado al final de los apellidos sólo para el caso del primer autor, y que se ha mantenido la inicial del segundo apellido y del nombre propio en el lugar que corresponde en el resto de los casos. Es común que los nombres ingleses se escriban con dos nombres personales y un apellido; ejemplo: L.J. Brown, el cual se citará en caso de ser primer autor como Brown, L.J. y como L.J. Brown en todos los demás.

2. Caso de artículos en una publicación colectiva no periódica con o sin editor, ejemplo:

a) con editor

Turrent F., A. 1984. Los agrosistemas del trópico. pp. 315-328. *In:* E. Hernández X. (Ed.). Los sistemas agrícolas de México, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.

b) sin editor

Cortés F., J. I. 1984. El manejo de los frutales en zonas frías. pp. 181-192. *In:* La fruta y su perspectiva en México. CONAFRUT. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México, D.F.

3. Caso de los boletines técnicos u otras publicaciones seriadas no periódicas, ejemplo:

Clement, H.F. 1952. Factors affecting the growth of sugarcane. Univ. Hawaii Agr. Exp. Sta. Tech. Bull. 18.

4. Caso de los libros, ejemplo:

Jackson, M.L. 1964. Análisis químico de los suelos. Traducción al español de J. Huerta. Editorial Omega, Barcelona, España.

Zamudio H., B. 1970. Las especies latifoliadas del Cono Sur. 2a. edición. Editorial Inca. Lima, Perú.

5. Otras publicaciones, ejemplo:

Cavazos L., A. 1971. Efecto de la pendiente en la pérdida de suelo por erosión hídrica. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.

La lista de citas se confeccionará en orden alfabético, con sangría francesa de 0.6 cm exceptuando el nombre del autor, con tipo de letra TIMES NEW ROMAN 9, sólo se incluirá en ella los trabajos citados en el texto.

Otros Aspectos del Manuscrito

A continuación se dan algunas indicaciones acerca de los cuidados y consideraciones que hay que tomar en cuenta para la elaboración de las figuras, cuadros, mapas, etc. Los cuadros y las figuras se emplean para reemplazar al texto, cuando el contenido de éstos no puede expresarse claramente con palabras o su uso contribuye a un ahorro importante de espacio. Los cuadros y las figuras deben ser claros, simples y concisos. Para ello es necesario seleccionar los datos de modo que se presenten sólo aquéllos que se emplearán para hacer énfasis en algún aspecto o que expliquen otros. Los datos deben ordenarse en una forma tal que sean fáciles de interpretar.

En el pie de cuadro se incluirán las llamadas que sean pertinentes. Los asteriscos se reservarán para indicar significación a 5% (*) y 1% (**), respectivamente. Otras notas serán señaladas con los siguientes símbolos en orden: †, ‡, §, ¶, #, ††, ‡‡, ..., †††.

Los cuadros deben tener tres líneas horizontales continuas: al inicio del cuadro, al inicio del campo del cuadro (no en el encabezamiento) y al final. El campo y el encabezamiento de las columnas se pueden dividir a conveniencia del autor. No se deben añadir líneas verticales. Los encabezamientos, de columnas y líneas, se describirán con minúsculas, excepto la primera letra de la oración. Las unidades se colocan debajo de la segunda línea horizontal. Se empleará sólo el número de cifras significativas necesarias para destacar el punto que se desee. Los cuadros no podrán ser mayores que una página tamaño carta, considerando los márgenes antes señalados.

Los mapas y las figuras deben dibujarse en tinta china sobre papel albanene o papel dibujo de buena calidad. No deben exceder las dimensiones de una página tamaño carta. La leyenda debe ser con letras y números lo suficientemente grande (con minúscula excepto la primera letra), como para que puedan leerse al ser reducidos, al igual que el grosor de los ejes y líneas interiores. En una figura lo que interesa destacar es el contenido y no los ejes. Consecuentemente, el grosor de estos últimos tiene que ser menor que el de

las líneas interiores. Los puntos experimentales deben marcarse visiblemente.

Para dividir los ejes se deben escoger intervalos constantes para cada uno.

Los mosaicos fotográficos deben entregarse montados en hojas de papel, totalmente terminados, con leyenda y numeración. El aumento de las microfotografías debe indicarse en la leyenda.

Agradecimientos. Podrán incluirse al final del texto, esto es, después de las conclusiones y antes de la literatura citada.

Información Adicional.

Para mayor información sobre la preparación de manuscritos se recomienda consultar las notas que nuestro editor de estilo publica periódicamente en la revista y el libro Alvarado López, J. 1995. Redacción y preparación del artículo científico. Publicación especial 2. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C. México.

Versión corregida en diciembre de 1997.