



TERRA

Volumen 4

Enero - Junio 1986

DIVISION I

DIVISION II

DIVISION III

INDICE

Organo oficial de divulgación de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C.

EDITORIAL

1

Artículos Científicos

Determinación de la densidad aparente en suelos de ando.

C. HIDALGO M., J.D. ETCHEVERS B., Y B. MARTINEZ H.. 3

Criterios analíticos para la clasificación del nuevo orden de andisol.

J.D. ETCHEVERS B., L. CRUZ H. Y C. HIDALGO M. 10

Determinación de parámetros de fórmulas de infiltración a partir de ensayos de riego.

O. PALACIOS V., R. ACOSTA H., C. FUENTES R., P. RENDON M., y R. HERNANDEZ S. 16

Ecuaciones de infiltración y su aplicabilidad.

L. RENDON P., R. HAVERKAMP Y R. HERNANDEZ S. 25

Evaluación de portainjertos y cultivares de vid bajo condiciones de limitación de agua: relaciones hídricas internas.

C. GODOY A. E I. LOPEZ M. 34

Evaluación de portainjertos y cultivares de vid bajo condiciones de limitación de agua: eficiencia en el uso del agua (EUA).

C. GODOY A. E I. LOPEZ M. 38

El uso de modelos en irrigación y áreas afines.

O. L. PALACIOS V. 41

Biosíntesis de fertilizantes órgano-minerales.

R. NUÑEZ E. 50

El pasto salado en el ex-lago de Texcoco. I. Producción de semilla.

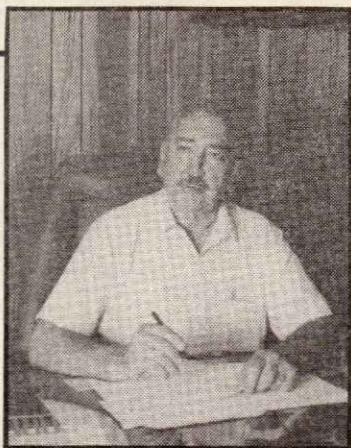
A. BECERRA M., B. NAVA M., A. VELAZQUEZ L. Y M. TARIN V. 55

El pasto salado en el ex-lago de Texcoco. II. Germinación y emergencia.

A. BECERRA M., J. OREA L., R. SERRANO P. Y A. VELAZQUEZ L. 62

Factores de suelo y planta que influyen sobre el escurrimiento superficial en áreas de pastoreo del cañón del Juchipila, Zacatecas.

M.A. VELAZQUEZ V. Y A SERNA P. 68



EXHORTACION

A través de esta exhortación, consideramos que una de las metas de toda Institución de Educación Agrícola Superior es precisamente coadyuvar en la mejora de nuestro ambiente, y parte del mismo es acertadamente el suelo y sus componentes.

Día con día se adquieren nuevos y factibles conocimientos de la Ciencia del Suelo, y la forma viable para entregar dichos conocimientos, es con loable labor, los congresos del ámbito nacional.

Exhortamos a todos los investigadores del ramo, a los técnicos, estudiosos y hombres representantes de las diversas instituciones, a permanecer alertas y otorgar su noble apoyo a eventos similares y congresos futuros.

Hoy la Escuela Superior de Agricultura "Hermanos Escobar" es la sede del "XXI Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo", Institución que con 82 años de vida continúa extensivamente la siembra de estudiantes en el medio agronómico, que en el devenir del país siguen en su desarrollo y productividad.

GRACIAS POR SU SENSIBLE APOYO.

ATENTAMENTE

LOS CODIRECTORES

AGR. MARIO DAVILA GONZALEZ

ING. MARCOS LOPEZ TORRES

MESA DIRECTIVA 1986-1988

DR. OCTAVIO PEREZ ZAMORA
Presidente
M.C. JAVIER Z. CASTELLANOS RAMOS
Vicepresidente
DR. ANDRES AGUILAR SANTELISES
Secretario General
M.C. JOSEFINA PAREDES GONZALEZ
Tesorero
DR. JORGE BAUS PICARD
Secretario Técnico
M.C. VALENTIN VAZQUEZ AGUILAR
Secretario de Relaciones Públicas
DR. JOSE I. CORTES FLORES
Secretario de Eventos Nacionales e Internacionales
M.C. CARLOS ORTIZ SOLORIO
Vocal
M.C. ENRIQUE SALAZAR SOSA
Vocal

COMISION EDITORA

DR. JORGE D. ETCHEVERS BARRA Editor
DR. ANDRES AGUILAR SANTELISES
M.C. JAVIER Z. CASTELLANOS RAMOS
SRA. CARELINA C. AALMERS DE AGUILAR

"TERRA", Registro en Trámite. Organó oficial de divulgación de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Volumen 4, número 1. Enero-junio 1986.

ISSN 0187-5779.

Los artículos publicados son responsabilidad absoluta de los autores. Se autoriza la reproducción parcial o total del contenido de esta revista, citándola como fuente de información.

Las contribuciones a esta revista deben enviarse, en original y dos copias, al Editor de la Revista TERRA, redactadas conforme las Normas para Publicación en la Revista TERRA, que se pueden solicitar a la SMCS.

Oficinas:
Edificio del Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México.
Domicilio postal:
Apartado Postal 45, 56230 Chapingo, Edo. de Méx.

Teléfono: (595) 4-22-00, ext. 5237.

I N D I C E

EDITORIAL

1

Artículos Científicos

DIVISION I

DETERMINACION DE LA DENSIDAD APARENTE EN SUELOS DE ANDO. C.Hidalgo M., J.D.Etchevers B. y B.Martínez H.	3
CRITERIOS ANALITICOS PARA LA CLASIFICACION DEL NUEVO ORDEN DE ANDISOL. J.D.Etchevers B., L.Cruz H. y C.Hidalgo M.	10
DETERMINACION DE PARAMETROS DE FORMULAS DE INFILTRACION A PARTIR DE ENSAYOS DE RIEGO. O.Palacios V., R.Acosta H., C.Fuentes R., P.Rendón M., y R.Hernández S.	16
ECUACIONES DE INFILTRACION Y SU APLICABILIDAD. L.Rendón P., R.Haverkamp y R.Hernández S.	25

DIVISION II

EVALUACION DE PORTAINJERTOS Y CULTIVARES DE VID BAJO CONDICIONES DE LIMITACION DE AGUA: RELACIONES HIDRICAS INTERNAS. C.Godoy A. e I.López M.	34
EVALUACION DE PORTAINJERTOS Y CULTIVARES DE VID BAJO CONDICIONES DE LIMITACION DE AGUA: EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA (EUA). C.Godoy A. e I.López M.	38
EL USO DE MODELOS EN IRRIGACION Y AREAS AFINES. O.L.Palacios V.	41
BIOSINTESIS DE FERTILIZANTES ORGANO-MINERALES. R.Núñez E.	50

DIVISION III

EL PASTO SALADO EN EL EX-LAGO DE TEXCOCO. I. PRODUCCION DE SEMILLA. A.Becerra M., B.Nava M., A.Velázquez L. y M.Tarín V.	55
EL PASTO SALADO EN EL EX-LAGO DE TEXCOCO. II. GERMINACION Y EMERGENCIA. A.Becerra M., J.Orea L., R.Serrano P. y A.Velázquez L.	62
FACTORES DE SUELO Y PLANTA QUE INFLUYEN SOBRE EL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL EN AREAS DE PASTOREO DEL CAÑON DEL JUCHIPILA, ZACATECAS. M.A.Velázquez V. y A.Serna P.	68
CONDICIONES ACTUALES DE SALINIDAD Y DRENAJE DE UNA ZONA REPRESENTATIVA DE LA SERIE CASETA DEL DISTRITO DE RIEGO 009, VALLE DE JUAREZ, CHIH. O.Rodríguez C.	73
EL MANEJO DE LA FERTILIZACION NITROGENADA Y SU EFECTO EN EL SUELO Y CULTIVO. R.Núñez E., J.D.Etchevers B., V.M.Cruz Z. y F.Gavi R.	79
PRODUCTIVIDAD DEL SUELO CON MAIZ Y LABRANZA MINIMA EN NAYARIT. M.Trejo S.	86
ESTUDIO EXPLORATORIO DE SEIS FACTORES DE LA PRODUCCION Y SU EFECTO EN EL CULTIVO DE LA PAPA DE RIEGO EN NOCHIXTLAN, OAXACA. E.Sandoval, F.García M. y A.Castañeda P.	90
EVALUACION ECONOMICA DE DOS ENFOQUES DE GENERACION DE TECNOLOGIAS DE PRODUCCION AGRICOLA, EN EL ESTADO DE TLAXCALA. F.Ornelas R., H.H.Rebolledo R. y V.Volke H.	96
RECOMENDACION DE DOSIS OPTIMAS ECONOMICAS DE N Y P PARA MAIZ DE TEMPORAL CON BASE EN ANALISIS DE SUELO Y OTRAS VARIABLES. H.H.Rebolledo R., V.Volke H. y J.D.Etchevers B.	103

DIVISION IV

FORMACION DE PROFESORES EN EDUCACION AGRICOLA, EL CASO DEL ITAO. H.R.Becerril T. y M.Contreras C.	109
---	-----

E D I T O R I A L

Entregamos a nuestros socios y público en general el número 1 del volumen 4 de la revista TERRA. Los problemas económicos y técnicos indicados en ediciones anteriores no han sido superados. Seguimos preocupados por la presentación de los trabajos que nos hacen llegar los asociados. Los instamos una vez más a seguir las normas editoriales propuestas. Si por algún motivo no han tenido acceso a ellas, los invitamos a solicitarlas a este Editor; también se encuentran publicados en el volumen 3, número 2. Esperamos que la práctica constante de la escritura científica redunde en una mayor calidad de los manuscritos que recibimos para publicación. TERRA está abierta a todas aquellas personas, socia o no de nuestra institución, que deseen dar a conocer los resultados de sus trabajos de investigación científica y otras modalidades señaladas en las normas editoriales.

Al concluir la preparación de este número, están pendientes de publicación el número 2 del volumen 4 correspondiente a 1986 y el volumen 5 correspondiente a 1987. Para ello se encuentran en proceso de revisión y corrección por los autores un buen número de trabajos. Instamos a los autores que han recibido artículos de vuelta, con observaciones para su corrección, a realizar esta ta

rea a la brevedad posible, para no interrumpir el flujo de la publicación. En estos momentos contamos con los recursos humanos y materiales mínimos necesarios para asegurar la preparación e impresión de los números futuros de la revista. Reiteramos nuestro llamado a todos los revisores y autores de trabajos para que realicen la labor que les corresponde y contribuyan a la consolidación de TERRA.

Es comprensible que después de esperar tanto tiempo para ver a sus artículos publicados, los autores estén enviando menos material. Sin embargo, contamos con textos de las conferencias y simposia celebrados durante el XX congreso en Zacatecas, como reserva, y procederemos a incluirlos en la revista en caso de no recibir los artículos requeridos para los números siguientes.

La impresión de este número de TERRA se hace realidad gracias al apoyo de la Escuela Superior de Agricultura "Hermanos Escobar", Ciudad Juárez, representada, en este caso, por el Presidente del Comité Organizador del XXI Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, Ing. Octavio Rodríguez Curiel, a quien manifestamos nuestro reconocimiento.

DETERMINACION DE LA DENSIDAD APARENTE EN SUELOS DE ANDO +

Hidalgo M., C. *
Etchevers Barra, J.D. **
Martínez H., B. ***

RESUMEN

La caracterización de un Andisol requiere determinar la densidad aparente, que se supone es una propiedad relativamente constante del suelo. Sin embargo, la estimación de ésta pudiera verse afectada por problemas de orden analítico y por los cambios irreversibles de volumen que presentan estos suelos. Los objetivos de este trabajo fueron: (a) comparar los procedimientos rutinarios (cilindro y terrón) de campo y laboratorio para determinar la densidad aparente, (b) comparar las densidades aparentes obtenidas con terrones con distintos niveles iniciales de humedad y (c) observar la influencia de la época de obtención de la muestra sobre la densidad aparente en Andisoles de la Sierra Nevada de México.

Las conclusiones de este trabajo fueron las siguientes: (a) la densidad aparente determinada por el método del cilindro fue, en general, menor que la obtenida con el método del terrón en suelos con humedad de campo; (b) la densidad aparente determinada por el método del terrón aumentó a medida que el contenido inicial de humedad del suelo era menor, observándose los valores máximos en los terrones secos al horno a 105°C; (c) la densidad aparente determinada en la estación seca fue, en general, mayor que la medida durante la estación de lluvia, aun cuando no fueron estadísticamente significativas las diferencias.

ABSTRACT

To characterize Andisols is necessary to measure bulk density, a property considered relatively constant in soils. However, bulk density measurement could be affected by the method of analysis and by irreversible changes in volume exhibited by this type of soil. The objectives of the present work were: (a) to compare bulk densities obtained by field and laboratory routine procedures (cylinder and clod); (b) to compare bulk density results obtained with clods with various initial moisture contents; and (c) to determine the influence time of sampling (wet and dry season) on bulk density; with Andisols samples from Sierra Nevada, Mexico.

Main conclusions from this work were: (a) bulk densities determined by the field (cylinder) method were, in general, lower than those obtained by the laboratory (clod) procedure; (b) bulk densities determined by the clod procedure increased as the initial moisture content of the sample decreased, highest values were observed for 105°C oven dried clods; and, (c) bulk densities determined during the dry season were, in general, higher than those measured during the wet season, however, the differences were not statistically significant.

INTRODUCCION

La clasificación correcta y oportuna de los suelos no requiere de mayor justificación. México, pese a que cuenta con superficie importante de suelos derivados de material volcánico (se estima aproximadamente en un 5% del territorio nacional), carece de una clasificación integral de éstos. Intentos aislados, para zonas específicas han sido realizadas por Aguilera (1961, 1963 y 1969); Arias (1944); Cervantes (1965); Cortez (1966); Guajardo (1967) y por instituciones del sector Anónimo (1971). Los sistemas empleados son varios, los populares, la Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff, 1975), el propuesto FAO/UNESCO (1974) y modificaciones de éstos. Las zonas que presentan suelos volcánicos que han recibido mayor atención son: la Sierra Tarasca, localizada en la Meseta del mismo nombre en el estado de Michoacán (Aguilera,

1961, 1963; Arias, 1944; Cervantes, 1965), la Sierra Nevada, ubicada entre los Estados de México y Puebla (Cortez, 1966; Miehlich, 1980; Mitsuko, 1971) y algunos sectores próximos al volcán de La Malinche en Tlaxcala (Aeppli y Schönhals, 1975; Werner, 1978), pero desgraciadamente estos trabajos no han sido correlacionados y existe cierta confusión respecto de la información existente.

El Comité Internacional sobre Clasificación de Andisoles (ICOMAND) es un órgano creado con la finalidad de formular criterios encaminados a la clasificación de los suelos volcánicos obedeciendo a las ideas de la Taxonomía de Suelos. Este Comité propuso la creación de un nuevo Orden dentro del Sistema anterior al cual denominó Andisoles.

+ Ponencia presentada en el XVIII Congreso Nacional de la S.M.C.S. Este trabajo se realizó con financiamiento propio.
* Investigador auxiliar en el Colegio de Postgraduados, Chapingo, Méx.
** Profesor Investigador en el Colegio de Postgraduados, Chapingo, Méx.
*** Profesor, Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Méx.

Uno de los varios criterios señalados en su propuesta para definir a un suelo como Andisol, es que su densidad aparente sea menor a 0.90 g/cc. En la práctica, los procedimientos tradicionales para la determinación de esta característica no parecieran ser los más adecuados. En el laboratorio la densidad aparente se determina comúnmente en terrones secos al aire y recubiertos con una sustancia impermeable al agua (parafina, Sarán, etc.) los terrones son pesados al aire para medir su masa y posteriormente se vuelven a pesar cuando son sumergidos en agua, para obtener su volumen (Soil Conservation Service, 1984).

Los principales inconvenientes de esta técnica son: en primer lugar que el secado al aire de los suelos volcánicos puede provocar cambios irreversibles en el volumen (Kubota, 1972) y, en segundo, que el agua no es un buen líquido de inmersión debido a que posee una densidad mayor que la de los terrones utilizados para esta determinación. Con el objeto de solucionar el primero de éstos se ha propuesto uniformizar las técnicas de determinación de densidad aparente por lo cual se trabaja con suelos con humedad de campo (Soil Conservation Service, 1984); pero como ésta puede variar mucho, Leamy, (1984), sugirió estandarizar la técnica empleando muestras con la humedad retenida por el suelo después de aplicar una presión diferencial de 1/3 de atmósfera al suelo saturado.

Recientemente especialistas estadounidenses determinaron la densidad aparente de suelos derivados de material volcánico por un método de campo en el que se utilizan cilindros rígidos y en las condiciones de humedad del suelo imperantes, lo cual simplifica enormemente el trabajo analítico (Baham y Simonson, 1985).

Los autores concluyeron que el método de campo puede ser empleado en evaluaciones preliminares de esta característica con propósitos de clasificación, por lo cual será ensayado en los suelos mexicanos. Los objetivos del presente trabajo fueron: (a) comparar los procedimientos de determinación de la densidad aparente; el terrón (laboratorio) y el cilindro (campo); (b) medir la influencia que tienen las distintas condiciones de humedad del suelo y diferentes procedimientos de secado de los terrones sobre la determinación de la densidad aparente; (c) determinar la influencia de las diferentes condiciones climáticas (lluvia y sequía) en la densidad aparente medida y (d) observar el efecto causado por los diferentes materiales de recubrimiento de los terrones. También se presentan comentarios respecto a los problemas habidos al utilizar diversos solventes como líquidos de inmersión para determinar el volumen del terrón y a las dificultades generadas por la fragilidad de los mismos.

MATERIALES Y METODOS

Las muestras de trabajo se obtuvieron de los horizontes de seis perfiles de suelo localizados en un transecto que comprende los Estados de Morelos, México y el Distrito Federal y que cruza el Eje Neovolcánico de Sur a Norte aproximadamente a la altura del meridiano 99° longitud oeste. Los sitios se denominaron en el mismo sentido anterior; Tlalnepantla, Felipe Neri, CICITEC, Km. 30 y Milpa Alta; la recopilación de los mismos se realizó entre el 27 de junio y el 8 de agosto de 1985, después que habían iniciado las lluvias de verano. El segundo muestreo correspondió al efectuado a fines del mes de abril de 1986 cuando estaba por terminar el período seco utilizando los métodos de campo y laboratorio. A pesar del período de sequía algunos de los horizontes inferiores presentaron humedad palpable.

El transecto edafológico está dominado en su parte alta por suelos derivados de material volcánico, cenizas provenientes de las erupciones de los volcanes Popocatepetl e Iztaccuhatl; estos materiales tienen un carácter básico (Martínez, s/f). Las geoformas del transecto pertenecen a lomeríos, pie de monte, cerros (conos cineríticos) y en menor grado a mesetas lávicas libres de cenizas volcánicas (malpaíses). El aspecto general del relieve es ondulado, con pendientes suaves y en menor grado abruptas o escarpadas.

El clima en la zona es templado subhúmedo y está definido como $C(W_2)(W)b(i^-)g$. La temperatura media anual es de 13.8°C y la precipitación media anual varía de 800 mm a 1000 mm entre las partes de menor a mayor altitud. En el sitio de observación más meridional perteneciente a Tlalnepantla, Mor., el clima es templado cálido y está representado por $(A)C(W''_2)a(i^-)g$, con una temperatura y precipitación anuales de 19.3°C y 867.3 mm, respectivamente.

La vegetación nativa que se desarrolla en la zona pertenece a bosques de juniperus, encino, encino-pino, pino-encino, pino-aile y pino-oyamel.

Antes de ejecutar las mediciones de densidad aparente, motivo de estudio, se determinaron algunas propiedades químicas seleccionadas por ICOMAND (Leamy, 1984) como características de los andisoles. Estas fueron: aluminio soluble en oxalato ácido y retención de fósforo a pH 4.6 (Blakemore et al, 1977).

Comparación de Métodos para la Determinación de Densidad Aparente.

Las muestras de suelos fueron extraídas de cada uno de los horizontes seleccionados para el efecto, de éstas se separaron terrones de aproximadamente 50-200 cc a los cuales se les recortaron suavemente las puntas que sobresalían, se desvastó el material desgarrado y se retiraron las raíces visibles conformándose así estructuras más o menos esféricas. Para evitar pérdidas de humedad las muestras de suelo se transportaron al laboratorio en bolsas de polietileno cerradas procurándose, además, que los terrones no se desmoronaran, rompieran o sufrieran cambios de volumen por presión.

Los métodos empleados en este estudio fueron el del terrón con humedad de campo recubierto con parafina (laboratorio) y el del cilindro (campo). Ambos procedimientos se describirán a continuación.

Método del Terrón (laboratorio). A los terrones preparados en forma recién indicada se les amarró un hilo que sirvió para su manipulación posterior, se les pesó en una balanza analítica y fueron sumergidos rápidamente y por completo en el seno de un recipiente que contenía parafina líquida (60-68°C) procurando que la capa formada sobre ella fuese delgada y continua. Cuando algunas porciones superficiales permanecieron sin ser recubiertas se adicionó cuidadosamente un poco más de este material; el terrón ya recubierto se pesó al aire nuevamente y el volumen del mismo se determinó haciendo uso del Principio de Arquímedes, esto es, sumergiendo el terrón completamente en un recipiente que contenía un líquido cuyas densidades eran menores a la del agua (1g/cc). Se trabajó con alcohol metílico ($d=0.7900g/cc$) y etílico ($d=0.88182g/cc$). Cuando se utilizó como recubrimiento una laca comercial, experimento que se describe más adelante, fue necesario utilizar tolueno ($d=0.8549g/cc$) como medio en el cual se sumergieron los terrones. Cuando se presentaron suelos con densidades aparentes menores a las del alcohol metílico se ató una pesa de cinco gramos

en la parte superior de los terrones, procurándose quedar lo más justo posible, y ambos se sumergieron para el cálculo del volumen del terrón, descontándose el correspondiente a la pesa (0.5900g/cc).

Los valores de densidad aparente se calcularon sobre la base de lo que se denomina tierra fina, por lo que fue necesario determinar la fracción mayor de dos milímetros presente en los terrones. Para el cálculo de la densidad aparente se hicieron correcciones debidas al peso y al volumen del recubrimiento empleado. No fue necesario corregir debido a partículas superiores a 2 mm ya que no se presentaron éstas. La fórmula empleada para los cálculos de densidad aparente fue la siguiente:

$$D_a = \frac{\text{Peso del terrón (seco al horno) - Peso del recubrimiento}}{\text{Volumen del terrón - Volumen del recubrimiento}}$$

El volumen del terrón se refiere al que éste tuvo en condiciones de humedad de campo.

Métodos de los Cilindros (campo). Cilindros de cobre de aproximadamente siete centímetros de diámetro y cinco de altura, abiertos en una cara y con una rejilla en el extremo opuesto, se introdujeron en forma normal al corte vertical hecho para exponer cada uno de los horizontes del perfil. Se presionaron firmemente contra el suelo hasta que estuvieron completamente enterrados. En algunos suelos fue necesario recurrir al golpeteo cuidadoso de los cilindros utilizando un mazo y una placa de madera, la que se colocó en la parte externa para amortiguar el golpe, debido a la resistencia que éstos oponían a la penetración. Se evitó golpear o empujar bruscamente, ya que ello podría haber ocasionado desmoronamiento o modificación de la estructura por compresión de la misma.

El cilindro lleno se retiró del perfil, se eliminaron con un cuchillo las porciones de suelo adheridas a su parte externa y se emparejó la parte superior. Las muestras se colocaron en bolsas de polietileno, debidamente identificadas, para conservar la humedad de campo.

Antes de pesar los cilindros en el laboratorio se limpian nuevamente en su parte externa con un paño o papel desechable y se controló que la cara lisa no presentara una altura mayor a la del borde superior. Los cilindros ya pesados se colocaron sobre vidrios de reloj para evitar pérdidas y se introdujeron a un horno regulado aproximadamente a 105°C durante cuarenta y ocho horas. Transcurrido este tiempo los cilindros se dejaron enfriar y se les determinó el peso del suelo seco y la humedad inicial de éste.

La densidad aparente se determinó empleando la siguiente fórmula:

$$D_a = \frac{\text{Peso del suelo seco}}{\text{Volumen del cilindro}}$$

Efecto del Contenido de Humedad

La densidad aparente determinada en terrones con humedad de campo empleando el procedimiento de laboratorio descrito en la sección anterior, se comparó con las medidas de densidad obtenida para terrones con diferentes contenidos iniciales de humedad. Los tratamientos fueron los siguientes: terrones con humedad de campo, terrones con la humedad resultante del sometimiento del suelo saturado a una presión diferencial de 1/3 atm, terrones secos al aire, terrones secos al horno (105°C) y terrones secos al aire rehumedecidos y sometidos a una presión diferencial de 1/3 atm. Este último tratamiento sólo se apli-

có en los perfiles identificados como Mirador, Km. 30 y Milpa Alta.

Los terrones seleccionados para este estudio se conservaron dentro de bolsas de polietileno en el refrigerador o en algún lugar fresco. Las determinaciones del tratamiento con terrones con humedad de campo se realizaron aproximadamente 18 horas después del muestreo, habiéndose conservado las muestras en el refrigerador durante toda la noche. Antes de equilibrarse las muestras a 1/3 de atm los terrones se colocaron en platos porosos por 24 horas y se saturaron completamente, después se sometieron a una presión diferencial de 1/3 de atm por 48 horas tiempo en el que alcanzaron el equilibrio. Al retirarse de la olla de presión se guardaron en frascos de vidrio y se taparon muy bien para evitar pérdidas de humedad antes de pesarse y recubrirse con parafina. El secado al aire de los terrones del tratamiento respectivo se realizó por más de 48 horas a la sombra.

Los terrones secados al horno se mantuvieron a una temperatura aproximada de 105°C por espacio de 48 horas. El quinto tratamiento fue una combinación de secado-rehumedecimiento en el cual se impuso a los terrones iniciales secos al aire por espacio de 48 horas, a saturación por un lapso igual y se mantuvieron en una olla de presión hasta alcanzar el equilibrio a 1/3 de atm.

En todos los casos anteriores se determinó independientemente el porcentaje de humedad en los terrones sometidos a los diferentes tratamientos con el objeto de poder calcular el peso seco a 105°C, necesario para cuantificar la densidad aparente.

Influencia de las Condiciones Climatológicas

La influencia de la estación (verano-invierno) en la determinación de la densidad aparente se evaluó comparando los valores para esta característica en la época de lluvia y en la de seca, empleando los métodos de campo y el laboratorio ya descritos y terrones de muestras de suelo colectadas en la época de seca de los perfiles: Tlalnepantla, Felipe Neri, CICITEC, Mirador y Km 30.

El muestreo y transporte de las muestras se realizó como ya se ha indicado y las determinaciones se llevaron a cabo inmediatamente en el caso de los cilindros y un día después en el del laboratorio.

El análisis estadístico de los datos se hizo empleando un modelo totalmente al azar. Se utilizó un análisis de varianzas para evaluar el efecto de los distintos tratamientos de secado, contenido de humedad e influencia de la lluvia sobre la determinación de la densidad aparente. Las interpretaciones fueron realizadas utilizando la prueba de Rango Múltiple de Duncan e interacción con las medias (Duncan, 1955).

Tipos de Recubrimiento

En este experimento se trabajaron cuatro materiales de recubrimiento parafina, laca comercial transparente 74902 resina HU-543 y Saran. La parafina se aplicó sobre los terrones en forma líquida, para ello se mantuvo a una temperatura de 60-68°C. La resina y laca se emplearon en la condición física determinada por la temperatura ambiente, mientras que el saran se mantuvo a una temperatura aproximada de 70°C. El recubrimiento se llevó a cabo con las sustancias antes mencionadas.

RESULTADOS Y DISCUSION

Comparación de Métodos para Determinar la Densidad Aparente

En el Cuadro 1 se presentan las densidades aparentes de suelos con humedad de campo determinadas por los métodos del terrón y del cilindro en la época de lluvia. Se incluyen además los resultados de las determinaciones de aluminio soluble en oxalato ácido y del porcentaje de fijación de fósforo, realizados para establecer el carácter ándico de los suelos (Leamy, 1984). Las características ándicas, es decir, aluminio soluble en oxalato ácido mayor a 1%; fósforo fijado mayor de 60% y densidad aparente menor a 0.90 g/cc se manifiestan claramente en los perfiles denominados Felipe Neri, CICITEC, los primeros 80 cm del Mirador y bajo los 55 cm en el caso de Km 30. Los perfiles Tlalnepantla y Milpa Alta definitivamente no son Andisoles.

El método del cilindro produjo en general valores de densidad aparente inferiores o muy similares a los determi-

Cuadro 1. Densidad Aparente del suelo con humedad de campo determinada por los métodos del terrón y cilindro y algunas Características Andicas de los perfiles de un transecto Tlalnepantla-Milpa Alta en los Estados de México, Morelos y Distrito Federal.

Profundidad cm	Dens. Apar. ¹ (Terrón) g/cc	Dens. Apar. (Cilindro) g/cc	Al oxalato ácido %	P fijado %
Tlalnepantla				
0 - 40	0.85	0.72	1.03	79
40 - 110	0.90	0.90	0.82	62
110 - 200	0.90	0.84	0.62	68
Felipe Neri				
0 - 50	0.85	0.78	1.70	83
50 - 135	0.78	0.61	1.25	80
> 135	0.53	0.49	3.50	96
CICITEC				
0 - 30	0.57	0.53	1.70	85
30 - 75	0.60	0.61	2.32	84
75 - 100	0.73	0.66	1.25	79
100 - 125	0.84	0.82	4.00	95
125 - 190	0.90	0.82	4.50	95
Mirador				
0 - 45	0.74	0.82	2.30	87
45 - 80	0.83	0.78	2.12	92
80 - 105	1.04	0.88	0.62	59
> 105	1.22	1.14	0.00	15
Km 30				
0 - 20	0.91	0.86	1.02	56
20 - 55	1.08	1.09	0.82	50
55 - 120	0.87	0.92	1.70	71
120 - 170	0.67	0.67	2.32	78
> 170	0.74	0.76	1.90	74
Milpa Alta				
0 - 30	1.08	1.16	0.40	32
30 - 60	1.15	1.06	0.40	36
> 60	1.10	1.15	0.40	37

¹ Terrones con humedad de campo

nados por el método del terrón, para aproximadamente el 75% de los suelos con características ándicas. Los resultados de ambos métodos se correlacionaron lineal y significativamente ($r = 0.9382$) (Figura 1).

Las desviaciones estándar de los perfiles seleccionados (Cuadro 2), variaron desde 0.056 a 0.183 para el método de los cilindros y de 0.021 a 0.212 para el de los terrones recubiertos con parafina. Nosotros suponemos que los bajos valores de Densidad Aparente obtenidos por el Método del Cilindro son el resultado de la acción de varios factores: (a) la alteración de la estructura del suelo causada por la resistencia a la penetración de los cilindros cuando éstos se introducen en el perfil del suelo; el empleo del golpeteo para lograr una incursión completa seguramente provocó alteración de la estructura, aumento de volumen y disminución de los valores de Densidad Aparente, (b) la impregnación de la superficie externa del terrón con parafina cuya densidad es mayor a la presentada por los suelos de ando, provoca un aumento no real en los valores obtenidos para los terrones. Es esta vez una de las razones para proponer el uso de resinas de menor peso, como saran, para el recubrimiento de los mismos, (c) el contenido de agua quizá debería tomarse en cuenta ya que la pérdida de humedad en los terrones ocurre con mayor rapidez que en los cilindros; lo que es debido tanto al uso de terrones pequeños como a la exposición total del área de los mismos. Los bajos porcentajes de humedad de los terrones indican una disminución de la cantidad de los macroporos presentes y un aumento de la Densidad Aparente.

Aun cuando existen otros procedimientos para evaluar la Densidad Aparente como son: el Método de la Probeta, el Método del Hoyo o de la Bolsa y la Técnica por Transmisión de Radiación Gamma, éstos no fueron ensayados. En el primero de ellos se tienen modificaciones en el volumen de suelo considerado y los valores obtenidos son aproximados. El Método del Hoyo propuesto por Israelson (1918), Frear y Erb (1920), pese a que ofrece algunas ventajas, es difícil emplearlo para realizar evaluaciones en los horizontes inferiores, y la última técnica citada, requiere de una instrumentación adecuada con la que no se cuenta.

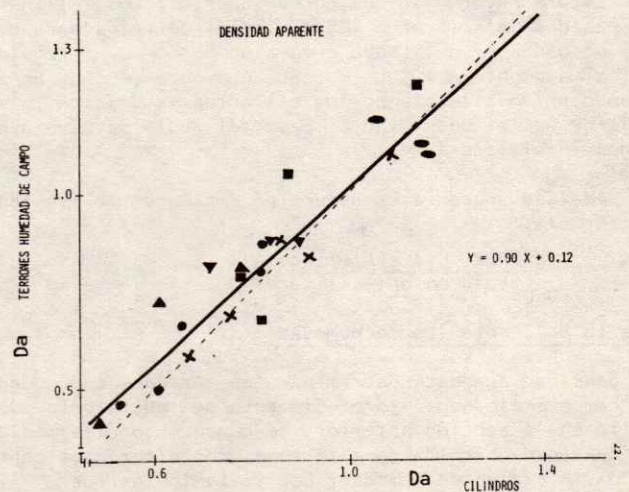


Figura 1. Relación entre la densidad aparente (D_a) determinada por el método del cilindro (campo) y por el método de los terrones recubiertos con parafina (laboratorio).

Cuadro 2. Valores Medio y Desviación Estándar

Perfil	MÉTODOS			
	Cilindro		Terrón	
	Media ¹	Des.Est.	Media ¹	Des.Est.
Tlalnepantla	0.82a ²	0.91	0.89a	0.021
Felipe Neri	0.63b	0.14	0.72a	0.165
CICITEC	0.69b	0.13	0.73a	0.146
Mirador	0.89b	0.18	0.96a	0.212
Km 30	0.86a	0.16	0.85a	0.160
Milpa Alta	1.12a	0.06	1.11a	0.037

¹ Media de tres valores

² Las medias con la misma letra en una línea no son significativamente diferentes ($P < 0.05$)

Cuadro 3. Efecto de la humedad y secado en la determinación de la Densidad Aparente.

Profundidad	Terrones secos		Terrones húmedos		Terrones secos y rehumedecidos a 1/3 atm.
	Aire	Horno	humedad de campo	1/3 atm.	
cm	--- g/cc ---				
	Tlalnepantla				
0 - 40	0.86	0.87	0.85	0.81	-
40 - 110	0.92	0.98	0.92	0.97	-
110 - 200	1.04	1.07	0.90	0.99 ¹	-
Media ¹	0.94 ^{ab}	0.97 ^a	0.89 ^b	0.92 ^{ab}	
	Felipe Neri				
0 - 50	0.99	1.04	0.85	0.93	-
50 - 135	0.89	1.01	0.76	0.66	-
> 135	0.73	0.91	0.53	0.55	-
Media	0.87 ^b	0.98 ^a	0.72 ^c	0.71 ^c	
	CICITEC				
0 - 30	0.60	0.77	0.57	0.56	-
30 - 75	0.70	0.63	0.60	0.71	-
75 - 100	0.85	0.89	0.73	0.76	-
100 - 125	0.91	0.95	0.84	0.70	-
125 - 190	0.96	1.02	0.90	0.86	-
Media	0.80 ^b	0.85 ^a	0.73 ^c	0.72 ^c	
	Mirador				
0 - 45	1.01	0.89	0.74	0.77	0.74
45 - 80	0.73	0.95	0.83	0.77	0.93
80 - 105	1.21	1.29	1.04	0.98	1.10
> 105	1.25	1.24	1.22	1.24	1.31
Media	1.05 ^{ab}	1.09 ^a	0.96 ^c	0.96 ^c	1.02 ^b
	Km 30				
0 - 20	1.06	1.08	0.91	1.05	0.99
20 - 55	1.16	1.20	1.08	1.12	0.99
55 - 120	0.96	1.00	0.87	0.95	0.77
120 - 170	0.75	0.90	0.67	0.70	0.70
> 170	0.78	0.94	0.74	0.72	0.70
Media	0.93 ^b	1.02 ^a	0.85 ^d	0.89 ^c	0.83 ^d
	Milpa Alta				
0 - 30	1.15	1.16	1.08	1.11	1.11
30 - 60	1.15	1.18	1.15	1.13	1.06
> 60	1.13	1.22	1.10	1.12	1.12
Media	1.14 ^b	1.19 ^a	1.11 ^{bc}	1.12 ^{bc}	1.10 ^c

¹ Las medias con la misma letra en una línea no son significativamente diferentes ($P < 0.05$)

Efecto de la Humedad y Secado

Los tratamientos de secado (al aire y al horno) produjeron los valores de densidad aparente más elevados, con incrementos de 0.2 a 0.3 unidades para los suelos ándicos y de 0.07 para los restantes; resultado de la contracción en el volumen presentada después del secado, siendo mayor ésta para el tratamiento de secado al horno.

Un comportamiento semejante es presentado también por algunos Alfisoles, Entisoles, Histosoles y Mollisoles de los Estados Unidos (Anderson y Beverly, 1985).

De acuerdo a la Prueba de Rango Múltiple de Duncan, el tipo de secado provoca, en general, variaciones en los resultados obtenidos de densidad aparente, corroborando con ello las observaciones realizadas por Schalscha et al. (1965) en suelos derivados de ceniza volcánica de Chile. Es importante señalar que el tipo de secado puede ocasionar, de igual forma, una reducción en la porosidad y capacidad de almacenamiento de agua, secado irreversible (Anderson y Beverly, 1985), disminución o aumento en el pH y CIC (Schalscha et al., 1965), experiencias que valdría la pena comprobar en el caso de suelos mexicanos.

Los tratamientos en los que se mantuvo el suelo con cierto grado de humedad (humedad de campo, 1/3 atm) proporcionaron los más bajos valores de densidad aparente; la aplicación a los terrones de una presión diferencial de 1/3 de atm no hizo variar significativamente los valores reportados para los terrones con humedad de campo. Las Densidades Aparentes bajas obtenidas para estos casos nos hacen suponer que la humedad presente, ocasiona la hidratación de los compuestos de Al y Si presentes en el suelo, lo que conduce a un aumento en el volumen y disminución de la densidad aparente.

El tratamiento de secado-rehumedecido practicado en los perfiles Km 30 y Milpa Alta, condujo a resultados semejantes a los reportados en los terrones con humedad de campo.

Los resultados del experimento diseñado para evaluar el efecto de la humedad y del secado en la determinación de la densidad aparente se presentan en el Cuadro 3.

Influencia de la Estación Verano-Invierno

Como indican los resultados reportados en el Cuadro 4, en general, los valores de densidad aparente obtenidos con el método del terrón en la estación seca son mayores a los reportados para la estación de lluvia; sin embargo,

al ser utilizado el método del cilindro sólo un 50% de los suelos con características ándicas y otros que no las presentaron, se comportaron de igual forma, esto como resultado de la contracción en el volumen principalmente y por la pérdida de humedad. Al igual que en la estación de lluvia, la densidad aparente por el Método del Terrón resultó mayor a la obtenida por el Método del Cilindro.

La prueba de Rango Múltiple de Duncan indica que las comparaciones: (a) Método del Cilindro - Método del Terrón en la estación seca y (b) Método del Terrón (estación lluvia) - Método del Terrón (estación seca), para todos los perfiles a excepción del Km 30 resultaron significativamente diferentes.

Cuadro 4. Influencia de la estación verano-invierno en la determinación de la densidad aparente.

Profundidad cm	Método del Cilindro		Método del Terrón	
	Estación de lluvia	Estación seca	Estación de lluvia	Estación seca
---- g/cc ----				
Tlalnepantla				
0 - 40	0.72	0.63	0.85	0.88
40 - 110	0.90	0.73	0.90	0.96
110 - 200	0.84	0.70	0.90	1.05
Media ^{1,2}	0.82a	0.69B	0.89ab	0.96Aa
Felipe Neri				
0 - 50	0.78	0.81	0.85	0.90
50 - 135	0.61	0.53	0.78	0.80
> 135	0.49	0.78	0.53	0.71
Media	0.63b	0.71B	0.72ab	0.80Aa
CICITEC				
0 - 30	0.53	0.58	0.57	0.73
30 - 75	0.61	0.62	0.60	0.67
75 - 100	0.66	0.59	0.73	0.78
100 - 125	0.82	0.85	0.84	0.88
125 - 190	0.82	0.88	0.90	0.93
Media	0.69b	0.70B	0.73ab	0.80Aa
Mirador				
0 - 45	0.82	0.73	0.75	0.92
45 - 80	0.78	0.84	0.83	0.94
80 - 105	0.88	1.05	1.04	1.09
> 105	1.14	1.10	1.22	1.22
Media	0.89b	0.93B	0.96ab	1.04Aa
Km 30				
0 - 20	0.86	0.93	0.91	0.94
20 - 55	1.09	1.14	1.08	1.08
55 - 120	0.92	0.85	0.87	0.86
120 - 170	0.67	0.65	0.67	0.67
> 170	0.76	0.65	0.74	0.72
Media	0.86a	0.84A	0.85 a _a	0.85Aa

1 Las medias con la misma letra minúscula de igual tipo en una línea no son significativamente diferentes ($P < 0.05$).

2 Las medias con la misma letra mayúscula en una línea no son significativamente diferentes ($P < 0.05$).

En base a un análisis apareado el valor medio de la densidad aparente obtenida por el Método del Cilindro (estación seca) es mayor a la obtenida con el mismo método pero en la época húmeda.

Efectos del Material de Recubrimiento

La baja densidad aparente presentada por estos suelos, conduce a problemas tanto en el recubrimiento del terrón como en la determinación del volumen.

El uso de la parafina u otras resinas como material de recubrimiento con una densidad mayor o igual a 1 g/cc., conduce a la necesidad de aplicar una mayor fuerza para introducir los terrones al seno del líquido, lo que provoca en muchas ocasiones pequeñas pérdidas del material ya pesado y con ello medidas de densidad aparente poco precisas.

El recubrimiento de los terrones con laca, resina y sara no fueron satisfactorios ya que la capa de recubrimien-

to formada no resultó uniforme lo que provocó la penetración del líquido de inmersión hacia el interior de los terrones en la mayoría de los casos, no pudiéndose determinar la densidad aparente.

Cuando el recubrimiento resultó adecuado con laca, resina y sara los valores de densidad aparente resultaron, en general, mayores a los obtenidos con terrones emparafinados en las mismas condiciones de secado.

El uso de éteres, cetonas y aldehídos como solventes de las resinas y lacas, es un inconveniente ya que debido a su elevada volatilidad ocasionan saturación del ambiente de trabajo.

Inconvenientes que se presentan en la determinación de la densidad aparente. Los mayores inconvenientes presentados en la determinación de la densidad aparente por el método del terrón, fueron: la fragilidad y la baja densidad de los mismos. La fragilidad ocasiona un manejo lento, pérdidas de material e imprecisiones en la medida.

El trabajo con terrones secos (al aire, al horno), requiere de un mayor cuidado ya que en estas condiciones los granos de suelo se encuentran muy sueltos y por lo tanto más susceptibles de desprenderse. Con el objeto de disminuir al mínimo las pérdidas, se recomienda colocar el hilo a los terrones antes de someterlos a alguno de los tratamientos de secado o rehumedecimiento.

La flotación de los terrones en el agua ocasiona problemas en la determinación del volumen de los mismos. Para paliar esta dificultad se utilizaron alcoholes comerciales como metanol y etanol obteniéndose buenos resultados; en el caso de los terrones cubiertos con laca se recurrió al uso del tolueno para determinar su volumen, ya que el alcohol reacciona con el recubrimiento provocando la disolución de la laca.

CONCLUSIONES

El Método del Terrón rindió, en general, valores más altos de densidad aparente que el Método de los Cilindros, independientemente de la estación de muestreo.

Los valores obtenidos por los tratamientos que emplearon terrones húmedos fueron los más pequeños; mientras que los correspondientes a los tratamientos con secado fueron los más altos, siendo independientes estos valores del tipo de secado y grado de humedad contenidos.

La densidad aparente en la estación seca resultó en general mayor o igual a la determinada en la estación de lluvia.

Los Métodos del Terrón y del Cilindro así como los Métodos del Cilindro y del Terrón en las estaciones de lluvia y seca resultaron significativamente diferentes para todos los perfiles a excepción del Km 30.

La parafina proporcionó los mejores resultados en el recubrimiento de los terrones durante la determinación de la densidad aparente.

El volumen de los terrones impermeabilizados con parafina se determinó utilizando en la mayoría de los casos alcohol metílico o etílico como líquido de inmersión y en caso del recubrimiento con laca se utilizó tolueno.

LITERATURA CITADA

- Aeppli, H. y E. Schönhalz. 1975. Los suelos de la cuenca de Puebla y Tlaxcala. Fundación Alemana para la Investigación Científica, México. (Comunicaciones Proyecto Puebla-Tlaxcala 8).
- Aguilera H., N. 1961. Génesis y clasificación de algunos suelos de la Meseta Tarasca, Mich., México. Escuela de Agricultura, Chapingo, México (Folleto Técnico 1).
- Aguilera H., N. 1963. Algunas consideraciones, características, génesis y clasificación de suelos de ando, pp. 233-247. Memorias del Primer Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo, Chapingo, Méx.
- Aguilera H., N. 1969. Distribución geográfica y características de los suelos derivados de cenizas volcánicas de México. Primer Panel sobre suelos derivados de cenizas volcánicas de América Latina. IICA. Turrialba, Costa Rica.
- Anderson, D. L. y R. B. Beverly. 1985. The effects of drying upon extractable phosphorus, potassium and bulk density of organic and minerals soils of the Everglades. *Soil Sci. Soc. Am. J.* Vol. 49.
- Anónimo. 1971. Dirección de Agrología. Informe de actividades de mayo 1967 a septiembre 1970. *Revista Ingeniería Hidráulica (México)*. 25:71-78.
- Arias, P. 1944. La región devastada por el volcán Parícutín. Escuela Nacional de Agricultura. Chapingo, Méx.
- Baham, J. y O.H. Simonson. 1985. Classification of soils with Andic properties from the Oregon coast. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:777-780.
- Blakemore, L. C., P. L. Searle, y B.K. Dally. 1977. *Soil Bureau Laboratory Methods: A Method for Chemical analysis of soils*. N.Z. Soil Bureau Sci. Rep.
- Cervantes R., L.G. 1965. Génesis y clasificación de algunos suelos de la Meseta Tarasca, Estado de Michoacán, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México. (Tesis de Maestría).
- Cortez L., A. 1966. Estudio pedológico de la zona oriente del Iztaccíhuatl, en suelos derivados de rocas y cenizas volcánicas andesíticas, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México (Tesis de Maestría).
- Duncan, D.B. 1955. Multiple range and multiple F tests. *Biometrics*. 11:1-42.
- FAO/UNESCO. 1974. *Soil of the World, 1:5.000.000, Vol. 1 Legend*. UNESCO, Paris.
- Frear, W., y E.S. Erb. 1920. Excavation method for determining the apparent specific gravity of soils. *J. Agric. Chem.* 4:103-105.
- Guajardo V., R. 1967. Caracterización de algunos suelos de Ando de la Sierra Tarasca. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México (Tesis de Maestría).
- Israelson, O. W. 1918. Studies on capacities of soils for irrigation water and on new method of determining volume weight. *J. Agric. Res.* 13:1-36.
- Kubota, T. 1972. Aggregate formation of allophanic soils: Effect of drying of the dispersion of the soils. *Soil Sci. and Plant Nutr. (Tokyo)* 18:79-87.
- Leamy, M.L. 1984. Circular letter No. 7. International Committee on the Classification of Andisols. New Zealand Soil Bureau-DSIR, Lower Hut, N.Z.
- Martínez H., B. (S/F) Comportamiento de algunos suelos derivados de cenizas volcánicas del transecto Milpa Alta D.F., Tlalnepantla, Morelos y México. Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, México.
- Miehlich, G. 1980. Los suelos de la Sierra Nevada de México. Fundación Alemana para la Investigación Científica, México. (Suplemento Comunicaciones Proyecto Puebla-Tlaxcala 7).
- Mitsuko, T., M. L. 1971. Estudio de suelos derivados de cenizas volcánicas del Nevado de Toluca, Estado de México. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, México, D.F.
- Schalscha, E. B., C. González, I. Vergara, G. Galindo, y A. Schatz. 1965. Effect of drying on volcanic ash soils in Chile. *Sci. Soc. of Am. Proc.* 29:481-482.
- Soil Conservation Service. 1984. Procedures for collecting soil samples and methods of analysis for soil survey. *Soil Survey Investigation Report No. 1*. USDA. Soil Conservation Service, Washington, D.C.
- Soil Survey Staff. 1975. *Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil survey*. USDA Agric. Handbook 436. US Govt. Printing Office, Washington, D.C.
- Werner, O. 1978. Los Suelos de la Cuenca Alta de Puebla-Tlaxcala. Función Alemana para la Investigación Científica, México. (Suplemento Comunicaciones Proyecto Puebla-Tlaxcala. No. 6).

CRITERIOS ANALITICOS PARA LA CLASIFICACION DEL NUEVO ORDEN DE ANDISOL +

Etchevers Barra, J.D. *
Cruz H., L. **
Hidalgo M., C. ***

RESUMEN

Los criterios analíticos propuestos por ICOMAND para la clasificación de suelos en el Orden Andisoles se aplicaron a muestras provenientes de dos transectos ubicados en zonas con régimen ústico en México Central; la Sierra Nevada (Estados de Morelos, México y Distrito Federal) y Sierra Tarasca (Estado de Michoacán).

La mayoría de los suelos de estos transectos, clasificados actualmente como Andosoles en el sistema FAO/UNESCO, tienen cabida dentro del Orden Andisoles, cuando se consideran los criterios establecidos para suelos con régimen de humedad ústico. La eliminación de este criterio dejaría fuera de dicho orden un porcentaje importante de los suelos estudiados.

SUMMARY

Classification criteria proposed by ICOMAND for Andisols were tested in soils from two transects located in ustic areas in Mexico: Sierra Nevada (Morelos and Mexico States, and Federal District and Sierra Tarasca (Michoacan State).

Most of these soils are presently classified as Andosols in the FAO-UNESCO nomenclature and can be classified as Andisols if the criteria proposed for soils with an ustic moisture regime is considered. Deleting such criteria from the present proposal will leave out of the Andisols order a large percentage of the studied soils.

INTRODUCCION

Los sistemas de clasificación de suelos deben poseer consistencia interna, la cual no siempre se alcanza en los primeros intentos de establecimiento. La revisión de las inconsistencias de las teorías en las cuales se basan los sistemas de clasificación, constituye un mecanismo para su mejor conocimiento. Este criterio ha imperado en el caso de la Taxonomía de Suelos, que es el sistema propuesto por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Soil Survey Staff, 1975), primero, mediante aproximaciones sucesivas y después a través del establecimiento de Comités Internacionales. Una situación similar ha ocurrido con el Sistema denominado FAO/UNESCO (FAO, 1985).

La Taxonomía de Suelos está basada fundamentalmente en conceptos de génesis de suelo, los cuales permiten desarrollar taxas de suelos relacionados genética y geográficamente y arreglarlos en una estructura lógica, que aumenta nuestra comprensión sobre sus relaciones. La Taxonomía de Suelos aspira a ser un sistema internacional y no constituye competencia para los sistemas nacionales, sino por el contrario debe ser construido y aumentado, basándose en los conceptos que han demostrado ser efectivos en estos últimos (Leamy 1984).

La principal desventaja de los sistemas nacionales es que sólo reflejan el universo restringido de los suelos de un país determinado. Por el contrario, los sistemas internacionales concebidos en la forma recién indicada, son amplios e incluyen todas las posibilidades de suelos lo cual, en teoría, permitiría transferir exitosamente experiencias acerca del uso efectivo de la tierra, que deberían traducirse en una mayor producción de alimentos.

La dinámica de renovación de la Taxonomía de Suelos hizo posible la formación del Comité Internacional de Clasificación de los Andisoles (ICOMAND), encargado de establecer normas para la clasificación de los suelos derivados de cenizas volcánicas.

Los suelos denominados volcánicos ocupan aproximadamente un 5% del territorio nacional (Ortiz, 1981) y, en general, se ubican en zonas consideradas como productivas. Aunado a lo anterior estos suelos exhiben propiedades físicas y químicas de interés científico. Las razones anteriores motivan a ocuparse de ellos.

+ Ponencia presentada en el XVIII Congreso Nacional de la S.M.C.S.

* Investigador en el Colegio de Postgraduados, Chapingo, Méx.

** Investigador auxiliar adjunto en el Colegio de Postgraduados, Chapingo, Méx.

*** Investigador auxiliar asistente en el Colegio de Postgraduados, Chapingo, Méx.

Los objetivos del presente trabajo fueron: dar a conocer las proposiciones hechas en foros internacionales, someter a prueba los criterios sugeridos por ICOMAND para clasificar los suelos volcánicos (hasta comienzos de 1985), y mantener actualizados los conocimientos sobre clasificación internacional.

ANTECEDENTES

Los Andosoles se definen en el sistema FAO-UNESCO (FAO, 1970) como suelos derivados de cenizas volcánicas recientes, muy ligeros, y con alta capacidad de retención de agua y nutrientes, que poseen alta susceptibilidad a la erosión y una fuerte fijación de P. Hasta hace poco se reconocieron en este sistema cuatro subunidades dentro de los Andosoles; ócrico, húmico, vítrico y mólico. En la revisión de la leyenda del mapa de suelos del mundo (FAO, 1985) se proponen cinco de estas subunidades: Andosoles háplicos, mólicos, úmbricos, vítricos y gélicos. En México estarían representadas las tres primeras subunidades de la proposición original, siendo más abundantes los Andosoles vítricos, según lo muestran los mapas elaborados por FAO (1974) y la Dirección de Agrología de la Secretaría de Recursos Hidráulicos. Sin embargo, su existencia no ha sido ratificada en el terreno (Ortiz, 1981).

En la Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff, 1975), los suelos derivados de cenizas volcánicas se ubican dentro del Orden Inceptisoles, Sub-órdenes Andept y Aquept. La principal característica para el diagnóstico de estos suelos es la presencia de horizontes dominados por componentes activos, consistentes de materiales amorfos. El término amorfo se emplea para indicar ausencia de materiales arcillosos que producen picos distintivos en la difracción con rayos X. Las propiedades químicas y físicas de estos suelos se encuentran dominadas por la presencia de estos materiales amorfos de alta reactividad.

Las propiedades de diagnóstico de los Andepts son las siguientes: presentan material amorfo dominante en el complejo de intercambio, densidad aparente de la tierra fina < 2 mm (medida con una humedad equivalente a la retenida a una tensión de 1/3 de bar) inferior a 0.85 g/cm³, un porcentaje de cenizas volcánicas vítricas, escorias u otros materiales piroclásticos igual o mayor al 60% (p/p).

Aun cuando el entendimiento de los procesos de génesis es la base de la Taxonomía de Suelos, la clasificación se apoya intensivamente en la medición de las propiedades físicas y químicas que exhiben los suelos. De ahí que la clasificación de campo, que se realiza basándose en observaciones puramente morfológicas, deba ser complementada con análisis de laboratorio.

En la práctica, se vio la necesidad de contar con un orden específico para los suelos derivados de cenizas volcánicas. Con el objeto de sugerir criterios de clasificación de estos suelos se creó el ICOMAND, que propuso el nombre de Andisoles para el Nuevo Orden (Leamy, 1983 y 1984).

Según ICOMAND (Leamy, 1983) los Andisoles son suelos minerales que no poseen un horizonte argílico, espódico u óxico, a menos que sea un horizonte genético enterrado con su límite superior a una profundidad de 50 cm o más, y que tienen propiedades ándicas a lo largo de un espesor continuo de 35 cm o más, empezando a menos de 25 cm de la superficie. Esta definición es tentativa y puede sufrir modificación en el futuro.

El concepto central de los Andisoles, es el de suelos desarrollados a partir de cenizas volcánicas, pumicita, escoria u otras materias volcánicas o materiales volcánoclasticos. Hay que hacer énfasis que para definir y clasificar a los Andisoles se han usado sus propiedades más no los materiales. Estas propiedades se denominan ándicas y se describen a continuación.

Para que un suelo se considere como Andisol, el material tiene que cumplir con todas las características de uno o más de los cuatro criterios siguientes.

Criterio 1

- El aluminio extractable en oxalato ácido debe ser de 2% o más, o el aluminio extractable con KOH 4 M de 1.5% o más.
- La densidad aparente de la tierra fina, medida en el estado de humedad de campo (sin secar), debe ser menor de 0.9 g/cm³.
- La retención de fosfatos debe ser mayor que 85%.

Criterio 2

- El aluminio extractable en oxalato ácido debe ser 0.4% o más, o el aluminio extractable con KOH 4 M 0.3% o más.
1. La fracción arenosa debe ser al menos de 30% de la tierra fina y poseer más del 30% en peso de vidrio volcánico (o cristales revestidos con vidrio). La determinación anterior se debe hacer en muestras con régimen de humedad de campo (sin secar) para que el criterio tenga validez; si esta condición no se cumple el suelo debe satisfacer la siguiente:
 - Más de un 60% en volumen total del suelo es material volcánoclastico más grueso que 2 mm.

Criterio 3

- El aluminio extractable con oxalato ácido debe encontrarse entre 0.4% y 2% o el aluminio extractable con KOH entre 0.3% y 1.5%.
- La fracción arenosa debe ser al menos de 30% de la tierra fina.
- Poseer suficiente vidrio volcánico en la fracción arenosa, para que el porcentaje de vidrio se ubique en un punto dentro del área sombreada de la Figura 1.

Criterio 4

En la Circular 7 de ICOMAND (Leamy, 1984), se incluye un cuarto criterio basado en las propiedades que presentan los Andisoles de Kenia, Hawaii y México, y que tiene un carácter tentativo pues precisa de mayor verificación.

- El régimen de humedad del suelo debe ser ústico o seco.
- El aluminio extractable en oxalato ácido debe ser mayor del 1% o el aluminio extractable con KOH 4M de 0.75% o más.
- La densidad aparente de la tierra fina, medida en el estado de humedad de campo (sin secar) debe ser menor a 0.90/cm³.
- La retención de fosfatos debe ser mayor que 60%.

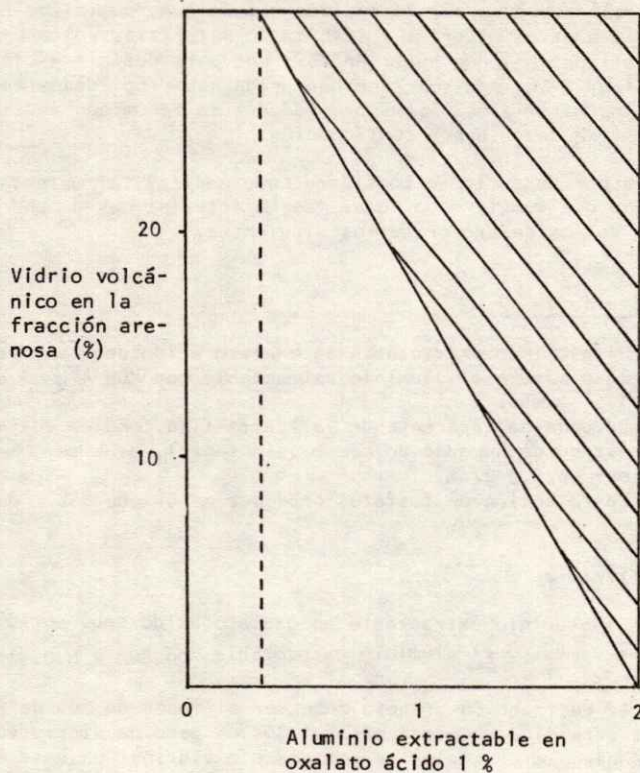


Figura 1. Relación entre el porcentaje de vidrio en la fracción arenosa y el porcentaje de aluminio extractable en oxalato ácido, empleada para definir el carácter ándico en Andisoles (Leamy, 1984).

En todos los criterios se denominó como tierra fina al material del suelo menor de 2 mm y para uniformizar el estado de humedad de campo se propuso trabajar con una humedad equivalente a la retenida a una presión diferencial de aproximadamente 1/3 de bar.

En el año 1986 los criterios anteriores han sufrido algunos ligeras modificaciones que se darán a conocer en los meses futuros. Sin embargo, la esencia de ellos se ha mantenido (M. Leamy, 1986. Comunicación personal).

MATERIALES Y METODOS

Los suelos estudiados en el presente trabajo provinieron de la Sierra Tarasca y de la Sierra Nevada.

La Sierra Tarasca se ubica en la parte central del estado de Michoacán. El muestreo se realizó en enero de 1983. Se seleccionaron 10 sitios representativos de un transecto de aproximadamente 80 km de longitud, que comprende altitudes desde los 2200 a 2700 msnm. Los sitios muestreados se situaron en las inmediaciones de las localidades denominadas Zacán, San Felipe, Pomacuarán, Quinceo, Arantepacua, Sevina, San Juan Tumbio, Lázaro Cárdenas, San Gregorio y Paso del Muerto. El orden señalado es en relación a su distancia creciente al volcán Parícutín. Se retiraron muestras de las profundidades 0 a 20 y 20 a 40 cm.

Las muestras seleccionadas en la Sierra Nevada se obtuvieron de seis perfiles distribuidos en los Estados de Morelos y México y el Distrito Federal. El primer muestreo se realizó entre el 27 de junio y el 8 de agosto de 1985 después de haberse iniciado la temporada de lluvias de verano. El segundo muestreo se verificó a finales del mes de abril de 1986, cuando estaba por terminar la estación seca.

Los sitios muestreados se denominaron Tlalnepantla, San Felipe Neri, CICITEC, Mirador, Km. 30 y Milpa Alta.

Caracterización del material volcánico

Para la caracterización química se emplearon suelos secos al aire y los procedimientos recomendados por ICOMAND es decir, Al extractable en oxalato ácido (Al_o) (Blakemore, et al., 1977), porcentaje de fijación de P (Blakemore, et al., 1977) y la densidad aparente (Soil Conservation Service, 1973) la cual se determinó empleando terrones con humedad de campo ya que se demostró que los resultados no diferían de aquellos obtenidos con suelos equilibrados a 1/3 atmósfera (Hidalgo, et al., 1986). Sin embargo, el contenido de humedad en los suelos de la Sierra Tarasca era muy cercano al observado en suelos secos al aire, debido a la época de muestreo. También se analizó el contenido de alofán determinado por disolución selectiva con ditionito-citrato-bicarbonato (alofán_{dcb}) (Aomine y Jackson, 1959), y alofán oxalato pirofosfato (alofán_{o-p}) determinado por el procedimiento recomendado por Russell, et al. (1981). Se efectuaron dos pruebas cuantitativas: pH en NaF (Fieldes y Perrots, 1966) y la del azul de toluidina (Wada y Kakuto, 1985).

RESULTADOS Y DISCUSION

En el Cuadro 1 y en el Cuadro 2 se presentan los resultados de las determinaciones de Al_o , fijación de P, densidad aparente, pH en Na y en agua, alofán_{dcb} y alofán_{o-p} y los de la prueba de toluidina, realizadas en los suelos de la Sierra Tarasca y de la Sierra Nevada, respectivamente.

Dado que el régimen de humedad de los suelos de la Sierra Tarasca y Nevada es ústico (Carlos Ortíz 1985. Comunicación personal), parece oportuno emplear el Criterio 4 para clasificar estos suelos, aun cuando también se usaron los otros criterios.

Los porcentajes de Al_o en los suelos de la Sierra Tarasca variaron de 1.05 a 8.4%. Para que un suelo presente características ándicas, esta fracción de Al debe ser mayor al 2% o al 1% según los criterios 1 y 4, respectivamente. De acuerdo al segundo de éstos, los diez sitios cumplieron con este requerimiento para las dos profundidades. En general, se observó que el porcentaje de Al fue mayor en los sitios más distantes del volcán Parícutín y menor en aquellos más cercanos. Esta distribución, sin duda, tiene que ver con la naturaleza de los materiales volcánicos depositados durante la erupción de 1943 y su evolución posterior.

Los suelos provenientes de la Sierra Nevada presentaron porcentajes de Al_o que variaron desde trazas hasta 4.5% en los estratos inferiores de los perfiles de Mirador y de CICITEC, respectivamente. Cinco de los seis suelos estudiados cumplieron con el requerimiento en al menos uno de los estratos. En general, se observó una tendencia a que el porcentaje Al_o aumentara con la profundidad del perfil.

Cuadro 1. Resultados de las pruebas para determinar el carácter ándico de los suelos de un transecto de la Sierra Tarasca, Mich., México.

Profundidad -----cm-----	Al		Densidad aparente	pH			Alofán		Prueba de toluidina ³
	Oxalato ácido	Fijado NZBS		H ₂ O 1:2	NaF 2'	NaF 60'	dc _b ¹	o-p ²	
	----- % -----			g/cm ³ -----			-----%-----		
					Zacán				
0 - 20	1.3	48	1.01	6.3	10.9	11.4	1.3	8.9	+/-
20 - 40	2.4	75	0.96	6.5	11.3	11.7	1.7	16.7	+/-
					San Felipe				
0 - 20	1.8	71	1.07	5.9	10.7	11.1	2.6	11.3	---
20 - 40	2.1	72	0.82	6.3	10.7	11.1	3.8	12.7	---
					Pomacuarán				
0 - 20	2.1	44	1.15	6.6	10.1	10.5	1.3	12.3	---
20 - 40	1.1	52	1.24	6.7	10.1	10.5	0.9	7.6	---
					Quinceo				
0 - 20	3.9	88	1.27	6.5	10.9	11.5	3.3	25.0	---
20 - 40	4.7	88	1.22	6.7	10.9	11.4	2.9	28.0	---
					Arantepacua				
0 - 20	2.6	73	1.21	5.7	10.9	11.1	2.4	14.2	---
20 - 40	2.6	71	1.08	6.3	10.4	11.0	3.5	14.3	---
					Sevina				
0 - 20	5.8	97	0.85	5.8	11.8	12.0	10.3	30.1	---
20 - 40	6.6	98	0.75	6.4	12.0	12.2	11.0	33.6	---
					San Juan Tumbío				
0 - 20	2.4	82	1.04	6.0	10.6	11.0	2.7	13.0	---
20 - 40	2.4	85	1.04	6.2	10.7	11.0	2.8	13.3	---
					Lázaro Cárdenas				
0 - 20	3.4	95	0.91	6.1	11.0	11.5	4.0	20.0	---
20 - 40	2.9	93	0.91	6.5	11.1	11.6	4.1	17.0	---
					San Gregorio				
0 - 20	6.6	98	0.80	5.8	12.1	12.3	15.6	33.5	+/-
20 - 40	6.6	99	0.77	6.3	12.1	12.3	16.7	37.8	+/-
					Paso del Muerto				
0 - 20	8.4	98	0.82	5.5	11.9	12.2	15.4	44.7	+/-
20 - 40	8.2	99	0.96	5.5	12.1	12.4	15.2	42.2	+/-

1. El alofán_{dc_b} se estimó calculando el porcentaje de SiO₂ y sumando el 21% de su valor, adicionándole los porcentajes de Al₂O₃ y de Fe₂O₃.
2. El alofán_{o-p} se obtuvo sumando al porcentaje de Al₂O₃ (donde el Al se obtuvo del % Al_o-%Al_p), el porcentaje de SiO₂ (% Si_o), más un 30% de agua.
3. El signo negativo indica que hubo metacromosis, lo que significa la ausencia de alofán eimogolita. El signo +/- indica que la prueba no fue conclusiva, que la intensidad del color del azul de toluidina disminuyó en gran medida.

Para que un suelo se considere con características ándicas debe poseer, además, un porcentaje de fijación de P mayor al 85% según el Criterio 1 o mayor al 60% según el Criterio 4. Seis de los diez sitios del transecto de la Sierra Tarasca presentaron valores mayores al límite del Criterio 1 en ambas profundidades y los cuatro suelos restantes presentaron valores más bajos de esta característica. Sin embargo, en ocho de los diez sitios se satisfizo el Criterio 4 en ambas profundidades y uno más lo hizo en una profundidad solamente. Sólo el sitio de Pomacuarán tuvo porcentajes de fijación inferiores al 60%.

De los sitios del transecto proveniente de la Sierra Nevada sólo se presentaron valores mayores o iguales al límite del Criterio 1, en el estrato > 135 cm de Felipe Neri, en varios horizontes del perfil de CICITEC y en los

dos primeros horizontes del sitio denominado Mirador. Sin embargo, cinco de los seis sitios, tuvieron porcentajes mayores al 60% de fijación del P (Criterio 4). Únicamente el sitio de Milpa Alta tuvo porcentajes de fijación menores al 60% en todos los horizontes.

El tercer criterio de clasificación es la densidad aparente, la cual debió medirse en los suelos equilibrados para retener una cierta humedad después de aplicarles una presión diferencial de 1/3 de bar (Leamy, 1984). La densidad aparente en estas condiciones debería ser menor de 0.9 g/cm³. Las muestras del transecto Sierra Tarasca fueron colectadas en invierno (sequía) y la humedad de campo era muy baja. Sólo cuatro sitios de este transecto (Paso del Muerto, Lázaro Cárdenas, Sevina y San Gregorio) presentaron densidades aparentes cercanas o menores a 0.9 g/cm³ en ambas profundidades, aún en las condiciones

Cuadro 2. Resultados de las pruebas para determinar el carácter ándico de los suelos de un transecto de la Sierra Nevada. (Estados de Morelos y México y el Distrito Federal), México.

Profundidad cm	Al	P	Densidad aparente	pH	pH NaF		Alofán		Prueba de toluidina ³
	Oxalato ácido	Fijado NZBS		H ₂ O 1:2	2'	60'	dc _b ¹	o-p ²	
Tlalnepantla									
0 - 40	1.03	79	0.85	5.6	9.8	10.6	8.76	-----	-
40 - 110	0.82	62	0.90	6.3	9.2	10.1	6.99	31.75	--
110 - 200	0.62	68	0.90	6.5	9.2	10.0	7.49	-----	-
San Felipe Neri									
0 - 50	1.70	83	0.85	6.4	10.3	11.3	8.44	34.76	+/-
50 - 135	1.25	80	0.78	6.6	9.6	10.5	9.25	34.25	+/-
> 135	3.50	96	0.53	6.1	11.0	11.8	7.94	39.26	+
CICITEC									
0 - 30	1.70	85	0.57	6.3	10.5	11.5	7.97	32.82	+
30 - 75	2.32	84	0.60	6.0	11.0	11.8	7.59	32.12	+/-
75 - 100	1.25	79	0.73	6.4	9.7	10.6	8.26	33.29	-
100 - 125	4.00	95	0.84	6.2	10.9	11.8	8.29	41.63	+/-
125 - 190	4.50	95	0.90	6.4	10.8	11.7	8.85	42.55	+/-
Mirador									
0 - 45	2.30	87	0.74	6.1	10.6	10.9	6.98	35.46	+/-
45 - 80	2.12	92	0.83	6.3	10.3	11.2	8.71	35.40	-
80 - 105	0.62	59	1.04	6.7	9.1	10.2	7.45	32.48	-
> 105	0.00	15	1.22	6.9	7.8	8.5	2.95	-----	-
KM 30									
0 - 20	1.02	56	0.91	6.3	9.9	10.8	6.05	33.62	+/-
20 - 55	0.82	50	1.08	6.5	9.7	10.7	6.41	33.58	+
55 - 120	1.70	71	0.87	6.4	10.2	11.1	6.56	35.52	+
120 - 170	2.32	78	0.67	6.5	10.2	11.2	6.98	37.65	+
> 170	1.90	74	0.74	6.6	10.0	10.8	7.62	36.44	+/-
Milpa Alta									
0 - 30	0.40	32	1.08	6.0	8.4	9.7	5.60	32.77	-
30 - 60	0.40	36	1.15	6.9	8.9	9.8	5.93	30.68	-
> 60	0.40	36	1.10	7.5	8.9	9.8	7.9	30.68	-

1. El alofán_{dc_b} se estimó calculando el porcentaje de SiO₂ y sumando el 21% de su valor, adicionándole los porcentajes de Al₂O₃ y de Fe₂O₃.
2. El alofán_{o-p} se obtuvo sumando al porcentaje de Al₂O₃ (donde el Al se obtuvo del % Al₂O₃Alp), el porcentaje de SiO₂ (% SiO₂), más un 30% de agua.
3. El signo negativo indica que hubo metacromosis lo que significa la ausencia de alofán eimogolita. El signo +/- indica que la prueba no fue conclusiva, que la intensidad del color del azul de toluidina disminuyó en gran medida.

experimentales descritas. En el resto de los sitios los valores fueron mayores, alcanzando hasta 1.25 g/cm³. No es arriesgado afirmar que los valores de esta característica habrían sido menores si se hubiesen determinado en las condiciones sugeridas por ICOMAND.

El aumento de la densidad aparente de los suelos volcánicos cuando es determinada en terrones secos (colectados durante el invierno) fue demostrado por Hidalgo, *et al.* (1986).

Los resultados de los experimentos realizados en las zonas aledañas a los volcanes Popocatepetl e Iztaccihuatl (Sierra Nevada), indican que los sitios de Tlalnepantla, Felipe Neri y CICITEC cumplieron con el requerimiento en todos los estratos del perfil, los otros tres no lo hicieron en algunos de ellos.

Con el objeto de determinar si estos suelos satisfacían las condiciones estipuladas en los criterios de ICOMAND, se intentó determinar el porcentaje de vidrios volcánicos en la fracción gruesa. Sin embargo, estas partículas presentaron una cobertura de material que resistió a los

tratamientos, impidiendo su determinación. Se trabaja actualmente en la búsqueda de métodos que permitan la remoción de estos elementos cementantes.

Los porcentajes de alofán_{dc_b} estimados en sitios del transecto de la Sierra Tarasca variaron en un rango de 0.88 a 16.7%, presentándose los más elevados en los sitios de San Gregorio, Paso del Muerto y Sevina. Las estimaciones de alofán_{o-p} fluctuaron entre 8.9 a 44.7%, los más altos se observaron en los mismos sitios que la determinación anterior. El alofán_{dc_b} se correlacionó significativamente con el alofán_{o-p} lo que hace suponer que ambos procedimientos extraían el mismo tipo de materiales pero en diferente proporción.

Los análisis químicos de alofán_{dc_b} y alofán_{o-p} realizados en los suelos Sierra Nevada, presentaron valores de 2.95 a 8.85% y de trazas a 42.55%, respectivamente. Los valores de esta característica entre los estratos de un perfil fueron constantes.

Con el fin de ratificar la presencia del alofán se llevaron a cabo pruebas cualitativas como son el pH en NaF y la del azul de la toluidina. La primera de ellas se basa en el hecho que el reactivo es capaz de provocar un aumento del pH sobre 9.4 cuando existen hidróxidos libres de aluminio. De este cambio se deduce que el complejo de intercambio está denominado por materiales amorfos (Soil Survey Staff, 1975). En todos los suelos de los dos transectos estudiados, el pH en NaF sobrepasó al pH 9.4. Este criterio, sin embargo, no ha sido considerado para establecer en forma definitiva la presencia de materiales amorfos por el ICOMAND, por lo cual su uso es restringido. Ello se debe a que la ferrihidrita da una reacción similar y no puede considerarse como material amorfo.

La prueba del azul de toluidina (Wada y Kakuto, 1985) se usa como indicador de la presencia de alofán e imogolita. Si el reactivo adicionado al suelo permanece azul se supone presencia de los minerales mencionados, pero si la solución sufre metacromosis, es decir vira a rosa-incoloro, señalaría la presencia de humus o aluminio-silicatos cargados negativamente.

La metacromosis se presentó claramente en siete de las 10 muestras de la Sierra Tarasca. En los tres sitios restantes (Zacán, Paso del Muerto y San Gregorio) la toluidina se decoloró parcialmente quedando ligeramente azul y el sobrenadante y el sedimento rojizo, lo que se considera como una respuesta dudosa.

En los suelos de la Sierra Nevada se presentaron los tres comportamientos; en los perfiles de Mirador, Tlalnepantla y Milpa Alta se observó claramente la metacromosis, sólo en Felipe Neri en el estrato >135 cm y en CICITEC (0-30 cm) la reacción se consideró positiva, pero en los sitios restantes fue dudosa.

CONCLUSIONES

- Nueve de los diez sitios estudiados del transecto de la Sierra Tarasca cumplen con las características requeridas (haciendo la salvedad de lo discutido respecto a la densidad aparente) para ser considerados como Andisoles. La excepción la constituye el sitio de Pomacuarán que también es atípico en cuanto a otras características ándicas.
- En la zona de influencia de los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl (Sierra Nevada), las características ándicas se manifiestan claramente en los perfiles denominados Felipe Neri, CICITEC, Mirador, en los primeros 40 cm de Tlalnepantla y por debajo de los 55 cm en el caso del perfil denominado Km 30. El suelo de Milpa Alta definitivamente no es Andisol.
- Los criterios, sugeridos por ICOMAND para suelos volcánicos mexicanos, funcionan en su mayoría y requieren pequeños ajustes.
- La definición de los Andisoles puede requerir de la observación de otros parámetros analíticos.

- La prueba de la toluidina presenta un comportamiento distinto que el observado en suelos de Ando de Ecuador y Chile.

LITERATURA CITADA

- Aomine, S., y M.L. Jackson. 1959. Allophanic determination in Ando soil by cation exchange capacity delta value. Soil Sci. Soc. Proc. 14:210-214.
- Blakemore, L.C., P.L. Searle, y B.K. Daly. 1977. Soil Bureau Laboratory Methods: A method for chemical analysis of soil. N.Z. Soil Bureau Sci. Rep.
- FAO. 1985. FAO/UNESCO Soil map of the world 1:5,000,000. Revised legend. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome.
- FAO/UNESCO. 1970. Clasificación de suelos. CETENAL (Comisión de Estudios del Territorio Nacional), México, D.F. (Folleto No. 4).
- Fieldes, M., y W. Perrots K. 1966. The nature of allophane in soils. III. Rapid test for laboratory and field for allophane. N.Z. Jour. Sci. 9:623-629.
- Hidalgo, M., J.D. Etchevers, B. Martínez H. 1986. Determinación de la densidad aparente en suelos de ando. Revista TERRA. pp 3-9 de este número.
- Leamy, M.L. 1983. ICOMAND. Circular letter No. 5. New Zealand Soil Bureau. DSIR.
- Leamy, M.L. 1984. ICOMAND. Circular letter No. 6. New Zealand Soil Bureau. DSIR.
- Ortiz, S.C. 1981. Evaluación de la aptitud de las tierras de México para la producción de maíz, frijol y sorgo bajo condiciones de temporal. Colegio de Postgraduados, Chapingo, Méx.
- Russell, M., R.L. Parfitt y G.G. Claridge. 1981. Estimation of allophanic and other materials in the clay fraction of an Egmont Loam profile and other volcanic ash soils. N.Z. J. Soil Res. 19:185-195.
- Soil Conservation Service, 1973. USDA. Investigación de Suelos; traducción al español. A. Contin. Edit. Tri llas, México, D.F.
- Soil Survey Staff. 1975. Soil taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. USDA. Agric. Handbook 436. U.S. Govt. Printing Office Washington, D.C.
- Wada, K., y Y. Kakuto. 1985. A spot test with toluidine blue for allophane and imogolite. Soil Sci. Soc. Amer. J. 49:276-278.

DETERMINACION DE PARAMETROS DE FORMULAS DE INFILTRACION A PARTIR DE ENSAYOS DE RIEGO +

Palacios Vélez, O. 1
Acosta Hernández, R. 2
Fuentes Ruíz, C. 1
Rendón Martínez, P. 1
Hernández Saucedo, R. 2

RESUMEN

La predicción de la lámina de agua que se infiltra en un tiempo dado es de importancia para el diseño del riego superficial y otros estudios. Puede realizarse mediante la solución numérica de la ecuación de Richards, lo cual requiere del conocimiento de las relaciones entre la succión, la conductividad hidráulica y la humedad del suelo, las cuales son difíciles de obtener en la práctica. Por esta razón siguen usándose fórmulas empíricas y semiempíricas, como las de Kostiaikov, Philip y Green y Ampt, de dos parámetros que deben ser determinados de pruebas de campo; frecuentemente con infiltrómetros de doble cilindro, que dan valores representativos de pequeñas áreas. Con este motivo se propone una metodología que a partir de ensayos de riego con melgas de hasta varios cientos de metros de longitud, permite obtener parámetros de las fórmulas de infiltración más representativos. Para esto se calculan por balance los volúmenes infiltrados a distintos tiempos, así como los llamados tiempos de oportunidad en diferentes puntos de la melga.

Los parámetros se calculan por un procedimiento de optimización; en forma directa para la fórmula de Philip y en forma iterativa para las de Kostiaikov y Green y Ampt. Se han desarrollado programas de cómputo que facilitan estas operaciones. Se ha concluido que las fórmulas de Green y Ampt y Philip describen mejor el fenómeno estudiado.

ABSTRACT

Prediction of the infiltrated water depth over a certain time interval, is essential when designing a surface irrigation, as well as in other kind of studies. The prediction can be made by means of the numeric solution of Richards' equation, which requires the knowledge of the relationships between the suction and hydraulic conductivity and the soil water content. Because these relationships are difficult to obtain, empirical and semi-empirical formulae, such as Kostiaikov's, Philip's and Green and Ampt's are widely used. The parameters of those formulae are usually determined by field tests with the double-cylinder infiltrometer, which gives representative values for small areas. A methodology to determine these parameters from border strip irrigation tests is presented. The values obtained in this way are representative of the whole field.

The data needed are: the infiltrated volumes at different times (calculated by balance) as well as the so-called "opportunity times" for different points along the border strip. The parameters are determined by an optimization procedure, by a direct way for the Philip and with an iterative procedure for the Kostiaikov and Green and Ampt formulae. Computer programs have been developed to facilitate calculations. The Green and Ampt, and the Philip formulae gave the least mean square error, which suggests that these formulae better represent the phenomenon.

INTRODUCCION

La infiltración del agua en el suelo puede ser definida como el proceso de penetración del agua a través de la superficie del suelo y es uno de los procesos más importantes del ciclo hidrológico. La infiltración en cuencas determina el volumen de escurrimiento que puede ser aprovechado con diferentes fines. Asimismo la infiltración en canales es uno de los factores más importantes que definen la eficiencia de conducción. Por otro lado, para el diseño del riego superficial, el conocimiento de la infiltración, de su variación en el tiempo, su dependencia de la humedad inicial, etc. es esencial.

En un suelo heterogéneo la infiltración es un fenómeno complejo de flujo bi- o tridimensional, porque el agua que se infiltra sigue los caminos de máximo gradiente y mayor conductividad hidráulica. Muchas veces y como una aproximación que puede ser cercana a la realidad, sobre todo en parcelas agrícolas bien niveladas, la infiltración es analizada como un fenómeno unidimensional y que ocurre estrictamente en un sentido vertical. El agua que penetra al suelo sigue teniendo un efecto muy notable sobre el proceso de infiltración y aunque puede seguir caminos muy tortuosos dentro del suelo, su movimiento generalmente se considera también unidimensional y vertical.

+ Ponencia presentada en el XVIII Congreso Nacional de la SMCS.

1 Centro de Hidrociencias, Colegio de Postgraduados, Chapingo, Méx.

2 Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Méx.

Existen muchos enfoques para describir el proceso de infiltración, que van desde simples fórmulas empíricas-con parámetros desprovistos de interpretación física - hasta soluciones complejas de ecuaciones diferenciales que describen el movimiento de uno o dos fluidos (agua y aire), con diferentes necesidades de información y de uso de computadoras electrónicas. Generalmente se considera que una buena descripción de este proceso puede ser alcanzado mediante la solución numérica de la llamada ecuación de Richards, que describe el movimiento del agua en el suelo sin tomar en cuenta la influencia del aire que se encuentra dentro. Este procedimiento se considera bastante bueno, porque permite tomar en consideración suelos estratificados así como una distribución no uniforme de la humedad inicial, situaciones que frecuentemente se observan en terrenos reales y que son ignorados o simplificados por otros procedimientos. Su principal inconveniente, además de requerir del uso de computadoras (aunque esta situación resulta cada vez menos restrictiva, por la aparición de microcomputadoras cada vez más pequeñas, menos costosas y más poderosas), es la necesidad de conocer las relaciones entre el potencial capilar y la conductividad hidráulica con la humedad del suelo. La determinación de estas relaciones es una actividad tardada, incierta y costosa, aunque están en desarrollo enfoques simplificados que habrán de facilitar un uso más general de las soluciones numéricas (Fuentes et al., 1986). Por este motivo siguen utilizándose fórmulas empíricas y semiempíricas, sobre todo aquellas que tienen no más de dos parámetros que deben ser determinados a partir de ciertas pruebas de campo. La determinación de tres parámetros es posible pero más complicada; por este motivo y siguiendo las recomendaciones de Rendón (1984), en este trabajo se ha utilizado la fórmula de Kostiaikov (1932), de naturaleza totalmente empírica pero muy simple y tal vez la más utilizada a nivel mundial; la fórmula de Green y Ampt (1911), muy antigua, pero que ha sido redescubierta y utilizada ampliamente en los últimos 20 años y la fórmula simplificada de Philip (1957), que al igual que la fórmula de Green y Ampt, cuenta con parámetros que tienen cierta interpretación física. (Para una discusión detallada y comparativa de estas fórmulas véase el trabajo de Rendón, 1984).

Para la determinación de los parámetros de estas fórmulas generalmente se utilizan datos de pruebas realizadas con infiltrómetros de doble cilindro, en las cuales para diferentes tiempos se mide la cantidad o lámina de agua infiltrada acumulada. Los parámetros se obtienen por regresión después de linearizar las ecuaciones tomando logaritmos en el caso de la fórmula de Kostiaikov, directamente o dividiendo entre \sqrt{T} en la fórmula de Philip y por un procedimiento iterativo para la fórmula de Green y Ampt. Generalmente cuando se repiten estas pruebas en diferentes puntos, por ejemplo a lo largo de un surco o melga, se obtienen diferentes parámetros, fenómeno que se manifiesta de una forma más notable en suelos heterogéneos. Debido a esta variabilidad surgen las preguntas de si existen ciertos parámetros representativos, por ejemplo para lo que podría ser una melga, y cómo podrían obtenerse tales parámetros en caso de existir. Se tienen diferentes enfoques para medir la variabilidad espacial (para una revisión de estos procedimientos véase el trabajo de Vauclin, 1983).

Un enfoque diferente que permite determinar lo que podrían denominarse valores integrales o globales de los parámetros, a partir de pruebas o ensayos de riego se presenta en este trabajo, que forma parte de un proyecto más amplio donde se pretenden desarrollar modelos del riego superficial.

METODOLOGIA

El método parte de la información obtenida en una prueba o ensayo de riego como el que se describe en la siguiente sección de este trabajo. La información la constituyen básicamente dos grupos de datos: los volúmenes infiltrados totales, a diferentes tiempos, calculados exclusivamente por balance (sin necesidad de muestreo de suelos) y una matriz de los llamados "tiempos de oportunidad", para diferentes sitios a lo largo de la melga y para los mismos tiempos que el vector de volúmenes infiltrados. Los tiempos de oportunidad se refieren a los tiempos que ha permanecido el agua sobre el terreno, a partir del momento en que el frente de avance llegó a un punto dado.

Por consideraciones de continuidad se tiene:

$$VI_j = \sum_{i=1}^{N_j} \Delta X_i I_{ij} = \sum_{i=1}^{N_j} \Delta X_i I(\tau_{ij}, \alpha, \beta) \quad (1)$$

donde:

VI_j = Volumen infiltrado al tiempo j , (L^3)

ΔX_i = Incremento de distancia, (L)

$I(\tau_{ij}, \alpha, \beta)$ = Infiltración acumulada, calculada por cualquier modelo, (L)

τ_{ij} = Tiempo de oportunidad al tiempo j y a la distancia i , (T)

α, β = Parámetros del modelo a determinar

$i = 1, 2, \dots, NX$

NX = Número de puntos de control

$j = 1, 2, \dots, NX, \dots, NT$

NT = Número de tiempos de observación

$N_j = \text{Min}(j, NX)$

El procedimiento de optimización consiste en minimizar la función:

$$F = \sum_{j=1}^{NT} \left[VI_j - \sum_{i=1}^{N_j} \Delta X_i I(\tau_{ij}, \alpha, \beta) \right]^2 \quad (2)$$

Los valores de los parámetros α, β que optimizan la fórmula (2) se obtienen del sistema de ecuaciones resultantes de igualar a cero las derivadas de F respecto de α y β . Esto se ilustra para cada una de las fórmulas de infiltración por separado.

Determinación de parámetros para la fórmula de Kostiaikov

En este caso se tiene:

$$I = \alpha t^\beta \quad (3)$$

Substituyendo esta ecuación en la expresión (2), derivando respectivamente de α igualando a cero y simplificando, se obtiene:

$$\alpha = \frac{\sum_{j=1}^{NT} VI_j T_j^*}{\sum_{j=1}^{NT} T_j^{*2}} \quad (4)$$

haciendo lo mismo con respecto a β , se obtiene:

$$\alpha = \frac{\sum_{j=1}^{NT} V I_j T_j^{**}}{\sum_{j=1}^{NT} T_j^* T_j^{**}} \quad (5)$$

donde:

$$T_j^* = \sum_{i=1}^{NT} \Delta X_i \tau_{ij}^\beta \quad (6)$$

$$T_j^{**} = \sum_{i=1}^{NT} \Delta X_i \tau_{ij}^\beta \ln \tau_{ij} \quad (7)$$

Los valores de α y β se obtienen por prueba y error, por ejemplo: suponiendo un valor de β y calculando las expresiones (4) y (5). Si los valores resultantes de " α " son significativamente diferentes, se cambia el valor supuesto y se continúa este proceso hasta que los valores calculados por ambas fórmulas sean apreciablemente iguales.

Determinación de parámetros para la fórmula de Philip

En este caso se tiene:

$$I = \alpha t^{1/2} + \beta t \quad (8)$$

Substituyendo la expresión (8) en (2), derivando con respecto de β , igualando ambas expresiones a cero y resolviendo el sistema de ecuaciones simultáneas, se obtienen las siguientes expresiones directas de α y β .

$$\alpha = \frac{\sum_{j=1}^{NT} V I_j T_j^{**} \sum_{j=1}^{NT} T_j^{*2} - \sum_{j=1}^{NT} V I_j T_j^* \sum_{j=1}^{NT} T_j^* T_j^{**}}{\sum_{j=1}^{NT} T_j^{*2} \sum_{j=1}^{NT} T_j^{**2} - \left[\sum_{j=1}^{NT} T_j^* T_j^{**} \right]^2} \quad (9)$$

$$\beta = \frac{\sum_{j=1}^{NT} V I_j T_j^* \sum_{j=1}^{NT} T_j^{**2} - \sum_{j=1}^{NT} V I_j T_j^{**} \sum_{j=1}^{NT} T_j^* T_j^{**}}{\sum_{j=1}^{NT} T_j^{*2} \sum_{j=1}^{NT} T_j^{**2} - \left[\sum_{j=1}^{NT} T_j^* T_j^{**} \right]^2} \quad (10)$$

donde:

$$T_j^* = \sum_{i=1}^{N_j} \Delta X_i \tau_{ij}^{1/2} \quad (11)$$

$$T_j^{**} = \sum_{i=1}^{N_j} \Delta X_i \tau_{ij} \quad (12)$$

Determinación de parámetros para la fórmula de Green y Ampt

En este caso se tiene:

$$I = \alpha \tau + \beta \ln \left(1 + \frac{I}{\beta} \right) \quad (13)$$

En esta fórmula, la infiltración no se puede expresar explícitamente en función del tiempo de oportunidad y de los parámetros, debido a que aparece también dentro de la expresión logarítmica del segundo miembro. Esta situación habrá de reflejarse en el proceso de cálculo de los valores de α y β , como se mostrará más adelante.

Debe indicarse que en este caso el parámetro " α " corresponde aproximadamente a la conductividad hidráulica a saturación del suelo, mientras que el parámetro " β " tiene la siguiente expresión:

$$\beta = (\theta_s - \theta_0) (h_1 - h_2) \quad (14)$$

donde:

θ_s = Humedad volumétrica de saturación

θ_0 = Humedad volumétrica inicial en el perfil del suelo

h_1 = Espesor de la lámina de agua en la superficie del suelo

h_2 = Potencial del agua en el frente de humedecimiento

Como puede verse, el parámetro β involucra a cuatro parámetros o a tres, si el primer factor de la expresión (14) se maneja en forma unitaria. Esto ha dado lugar a que en ocasiones se diga que la fórmula de Green y Ampt tiene más de dos parámetros, los que, como se indica en la fórmula (13), pueden ser manejados como si fueran nada más dos. Esto también significa que si se conoce el rango de variación de la humedad ($\theta_s - \theta_0$) y se determina el factor ($h_1 - h_2$), en pruebas subsiguientes, donde solo cambie la humedad inicial θ_0 , se podrá recalcular el valor de " β " manteniéndose en principio el valor de " α ".

Substituyendo la expresión (13) en (2), derivando respecto de α y de β e igualando a cero las expresiones obtenidas, después de despejar y simplificar se tiene:

$$\alpha = \frac{\sum_{j=1}^{NT} V I_j T_j^* \sum_{j=1}^{NT} I_j^* (I_j^* - I_j^{**}) - \sum_{j=1}^{NT} V I_j (I_j^* - I_j^{**}) \sum_{j=1}^{NT} T_j^* I_j^*}{\sum_{j=1}^{NT} T_j^{*2} \sum_{j=1}^{NT} I_j^* (I_j^* - I_j^{**}) - \sum_{j=1}^{NT} T_j^* (I_j^* - I_j^{**}) \sum_{j=1}^{NT} T_j^* I_j^*} \quad (15)$$

$$\beta = \frac{\sum_{j=1}^{NT} T_j^{*2} \sum_{j=1}^{NT} V I_j (I_j^* - I_j^{**}) - \sum_{j=1}^{NT} T_j^* (I_j^* - I_j^{**}) \sum_{j=1}^{NT} V I_j T_j^*}{\sum_{j=1}^{NT} T_j^{*2} \sum_{j=1}^{NT} I_j^* (I_j^* - I_j^{**}) - \sum_{j=1}^{NT} T_j^* (I_j^* - I_j^{**}) \sum_{j=1}^{NT} T_j^* I_j^*} \quad (16)$$

donde:

$$T_j^* = \sum_{i=1}^{N_j} \Delta X_i \tau_{ij} \quad (17)$$

$$I_j^* = \sum_{i=1}^{N_j} \Delta X_i \ln \left(1 + \frac{\hat{I}_{ij}}{\beta} \right) \quad (18)$$

$$I_j^{**} = \sum_{i=1}^{N_j} \frac{\Delta X_i (\hat{I}_{ij}/\beta)}{1 + (\hat{I}_{ij}/\beta)} \quad (19)$$

siendo:

$$I = \hat{I}$$

Como puede verse el procedimiento es estrictamente iterativo, porque para el cálculo de I_j^* e I_j^{**} , deben conocerse los valores de \hat{I}_{ij} y β . Se sugiere el siguiente procedimiento:

- 1) Se calculan las expresiones T_j^* , $\sum_{j=1}^{NT} VI_j T_j^*$, que son las únicas que no requieren iteración.
- 2) Se supone un valor de " α " y otro de " β ".
- 3) Se calcula la matriz $l(\tau_{ij}, \alpha, \beta)$, por iteraciones de la fórmula (13) de Green y Ampt.
- 4) Se calculan los vectores I_j^* , I_j^{**} , así como las expresiones de:

$$\sum_{j=1}^{NT} T_j^* I_j^*, \sum_{j=1}^{NT} T_j^* I_j^{**}, \sum_{j=1}^{NT} I_j^* I_j^{**}, \sum_{j=1}^{NT} I_j^{*2}, \sum_{j=1}^{NT} VI_j I_j^* \text{ y}$$

$$\sum_{j=1}^{NT} VI_j I_j^{**}$$

- 5) Se calculan los valores óptimos de " α " y " β ", mediante las expresiones (15) y (16).
- 6) Si estos valores resultan diferentes de los supuestos en el punto 2) se repiten los pasos 3 (con los nuevos valores de " α " y " β "), 4 y 5 hasta que cálculos sucesivos de los parámetros produzcan valores suficientemente cercanos de los mismos. La convergencia puede ser acelerada mediante un proceso de relajación.

Programa de cómputo

Para facilitar los cálculos, que resultan muy laboriosos sobretodo para el último caso, se han elaborado programas de cómputo en FORTRAN. Los parámetros se pueden calcular a partir de toda la información de la prueba o con solamente una parte de ella. Asimismo se puede adicionar a los datos un "ruido aleatorio" de magnitud controlada por el usuario, para estudiar la sensibilidad de la determinación.

ENSAYOS DE RIEGO

Durante los meses de octubre a diciembre de 1984, se efectuaron una serie de pruebas de riego en la Estación Experimental de Tlapeaxco, Edo. de México, perteneciente a la Universidad Autónoma Chapingo. Estos trabajos se realizaron conjuntamente con el Dr. Randel Haverkamp, del Instituto de Mecánica de Grenoble, Francia, dentro del marco de colaboración entre el CONACYT de México y el CNRS de Francia. La superficie requerida para el establecimiento de estas pruebas fue de 0.5 ha, y las labores efectuadas en ella fueron: un paso de rastra, un paso de escrepa o empareje así como la construcción de un canal de riego y tres melgas de 220 m de longitud por 3.3 m de ancho.

En las melgas se llevó a cabo un levantamiento topográfico cuyo propósito fue el de realizar una nivelación de las mismas, que se hizo en forma manual. La pendiente de las melgas después de la nivelación fue de 0.18% en el sentido longitudinal y de 0.0 en el transversal. De las tres melgas construidas, la central fue utilizada para la determinación de las propiedades físicas del suelo estudiado y las restantes se reservaron para la realización de las pruebas de riego.

En las melgas destinadas a las pruebas de riego, se instaló en el extremo inicial una barra móvil para el control de la carga y como soporte para sifones; también se instalaron estaciones de control cada 10 m cubriendo toda la longitud, las cuales consistieron de tubos piezométricos que partían del centro hacia un extremo de la melga, donde se hallaba colocada una estaca con una regla graduada, cuyo cero de la escala fue nivelado previamente. En la estación 110, se colocó un tubo de aluminio de 5.08 cm de diámetro, que fue enterrado verticalmente hasta una profundidad de 1.50 m; en el extremo final de la melga, se colocaron estructuras aforadoras tipo Parshall.

La fuente principal de abastecimiento de agua, fue un pozo profundo con un gasto de 50 lps.

Antes de iniciar cualquier prueba de riego, en el tubo de aluminio, se medían los contenidos de humedad inicial, haciendo uso de un aspersor de neutrones y posteriormente durante la prueba misma, se continuaba midiendo la humedad a intervalos de tiempo variable.

Las pruebas de riego realizadas, fueron similares entre sí, diferenciándose únicamente por el gasto utilizado. El gasto de entrada se manejó a través de sifones calibrados y considerándose una carga de operación $h = 12.0$ cm. A medida que el agua fue escurriendo a través de la melga, se midió en cada una de las estaciones de control el tiempo de avance, así como los tirantes observados en los piezómetros, haciéndose las mediciones cada minuto hasta el momento en que las variaciones de tirante fueron mínimas; cada cinco minutos en la etapa de almacenamiento y nuevamente cada minuto en la etapa de recesión.

Considerando que en las pruebas se tuvieron melgas abiertas, al llegar el agua a los medidores Parshall, se midieron en estos los tirantes, con el propósito de determinar el gasto de salida. Los medidores Parshall y los sifones fueron calibrados con anticipación en el Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo.

Determinación de los volúmenes infiltrados

En cualquier tiempo, el volumen infiltrado se puede calcular a partir de la ecuación de balance mediante la siguiente expresión general:

$$VI_j = VE_j - VA_j - VS_j \quad (20)$$

donde:

VI_j = Volumen infiltrado (acumulado) al tiempo j , (L^3)

VE_j = Volumen que entra a la melga (acumulado) hasta el tiempo j , (L^3)

VA_j = Volumen almacenado sobre la superficie (acumulado) hasta el tiempo j , (L^3)

VS_j = Volumen de salida (acumulado) al final de la melga hasta el tiempo j , (L^3)

Nótese que durante la fase de avance $VS_j = 0$.

El volumen de entrada VE_j se calcula con la siguiente expresión:

$$VE_j = q \cdot T0_j \quad (21)$$

donde q es el gasto de entrada (constante durante la prueba), en $m^3/\text{min}/m$ y $T0_j$ es el tiempo transcurrido desde el inicio de la prueba, en minutos.

El volumen almacenado sobre la superficie VA_j se calcula de la siguiente manera:

$$VA_j = \sum_{i=1}^{N_j} Y_{ij} DX_i \quad (22)$$

donde:

Y_{ij} = Tirantes en la i -ésima estación al tiempo T_{0j} , (L)

DX_i = Intervalo de influencia, que tiene los siguientes valores:

Durante la fase de avance, $DX_1 = \frac{\Delta X}{2}$ y $DX_i = \Delta X$ para $i \neq 1$, durante la fase de almacenamiento, $DX_1 = DX_{NX} = \frac{\Delta X}{2}$ y $DX_i = \Delta X$ para $i \neq 1$ e $i \neq NX$ y NX es el número de puntos de control.

Durante la fase de recesión, $DX_{NT} = \frac{\Delta X}{2}$ y $DX_i = \Delta X$ para $i \neq NT$, y NT es el número de tiempos de observación.

En las pruebas $\Delta X = 10$ m.

El volumen de salida VS_j se calculó una vez conocido el gasto de salida al final de la melga, (medido con los medidores Parshall) mediante integración numérica del hidrograma de salida.

Debido a que los tiempos en que se consideró necesario calcular los volúmenes sobre la superficie no coincidieron, en general, con los tiempos en que se midieron los tirantes, fue necesario estimar estos últimos mediante interpolación lineal.

Determinación de tiempos de oportunidad

En experimentos de riego, al tiempo que permanece el agua sobre la superficie del terreno en el que se presenta infiltración, en cualquier punto, se le llama tiempo de oportunidad y éste puede ser determinado con la siguiente ecuación:

$$\tau_{ij} = T_{0j} - TX_i \quad (23)$$

donde:

τ_{ij} = Tiempo de oportunidad durante el cual ocurre infiltración en la i -ésima estación, (T)

T_{0j} = Tiempo transcurrido desde el inicio del ensayo, (T)

TX_i = Tiempo requerido para que el agua avance hasta la i -ésima estación, (T).

Cabe hacer notar que esta ecuación es solamente válida para los puntos en que existe agua sobre la superficie.

La Figura 1 muestra esquemáticamente el desarrollo de la prueba de riego y el cálculo de los tiempos de oportunidad para cada estación de control.

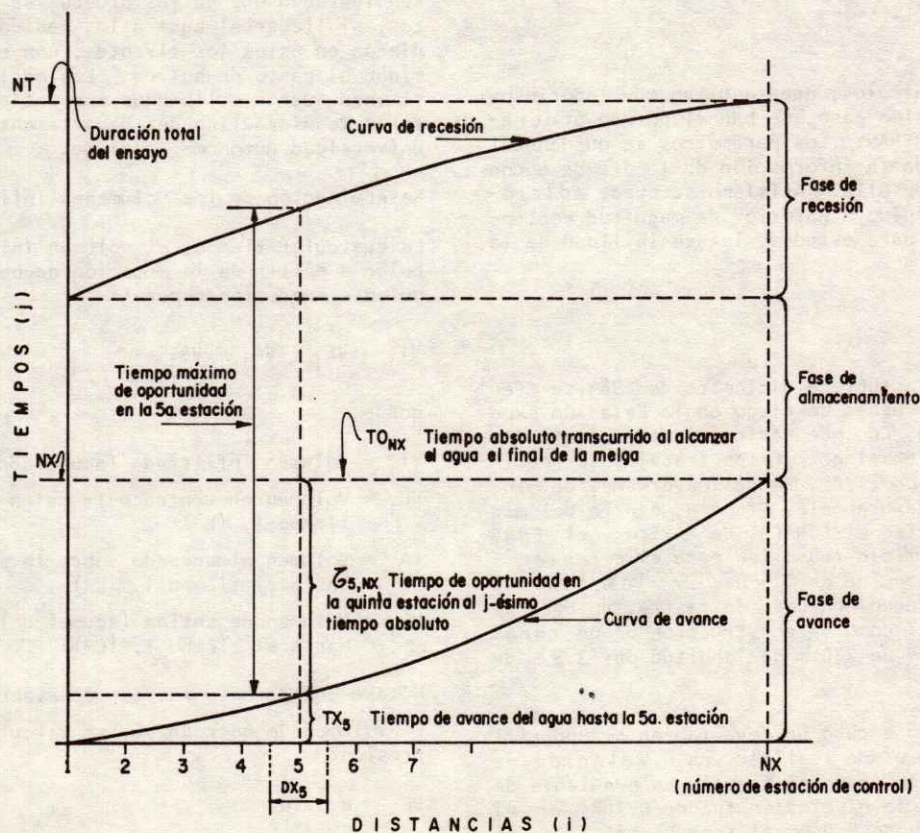


Fig. 1. Desarrollo esquemático de la prueba de riego y cálculo del tiempo de oportunidad en la 5a. estación.

La matriz τ_{ij} tiene las siguientes características:

- 1) Durante la fase de avance; es decir $\tau_{ij} = 1, 2, \dots$, ..., NX, es triangular superior, puesto que todos los tiempos abajo de la diagonal principal son iguales a cero. Los tiempos de la diagonal principal corresponden al avance del agua.
- 2) Durante la fase de almacenamiento todos los tiempos de oportunidad son superiores a cero y se incrementan cuando j aumenta.
- 3) Durante la fase de recesión, una vez que se corta el provisionamiento de agua en la cabecera de la melga, los tiempos de oportunidad alcanzan un valor máximo en lo que corresponde a la llamada curva de recesión, lo que marca otra diagonal que finalmente definirá el extremo superior derecho de la matriz. Encima de esta diagonal los tiempos son los mismos que en dicha diagonal.

En la Figura 2 se muestra a grandes rasgos la forma de la matriz de tiempos de oportunidad.

RESULTADOS Y DISCUSION

Se ha analizado los resultados de una de las pruebas de riego realizadas en la forma descrita anteriormente. Con la información obtenida y con ayuda de los programas de cómputo elaborados, se obtuvieron los resultados que se reportan en el Cuadro 1 y en la Figura 3. Se han anotado también los resultados de dos pruebas con infiltrómetro de doble cilindro, a un lado de la melga, en las estaciones 130 y 180 m realizadas en una etapa posterior.

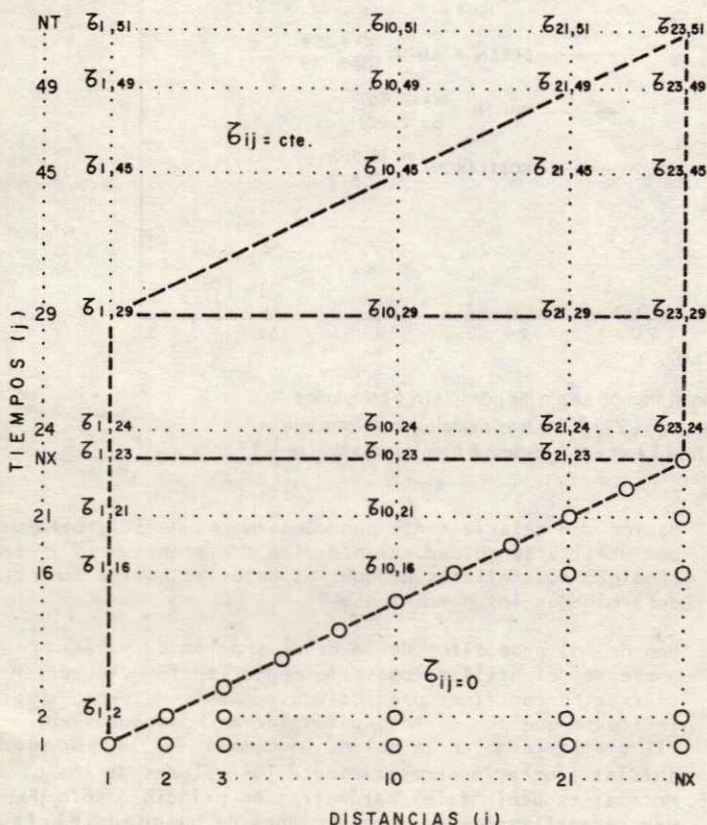


Fig. 2. Características y forma de la matriz de tiempos de oportunidad, $\tau_{ij}, NX_j, NT_j, (i=1,2,3, \dots, 23, j=1,2,3, \dots, 51)$.

Como puede verse el coeficiente de variación entre volúmenes infiltrados "medidos" y calculados con los modelos resultó casi igual para las fórmulas de Philip y Green y Ampt y un poco mayor para la fórmula de Kostiaikov. La coincidencia de los tres modelos se aprecia mejor en la Figura 3, donde se muestra la infiltración acumulada, calculada con los parámetros encontrados. También puede verse que los valores de los parámetros obtenidos con las pruebas de infiltrómetro de doble cilindro, son significativamente diferentes de los valores anteriores. Sin embargo, antes de analizar las posibles causas de estas discrepancias, es conveniente estudiar otros aspectos de la metodología.

Para el caso particular de la fórmula de Green y Ampt, que requiere un proceso iterativo complejo, se estudió la influencia que pudiera tener la precisión de los cálculos sobre los valores de los parámetros obtenidos. Los resultados de una prueba realizada se muestra en el Cuadro 2. Como puede verse en este cuadro, la precisión mínima requerida debe ser de 0.001. Precisiones mayores proporcionan un menor coeficiente de variación, pero el tiempo de cómputo se incrementa significativamente.

Debe tenerse en cuenta que todas las mediciones que se hicieron en el campo, tales como cargas de agua sobre los sifones o sobre los aforadores Parshall, tirantes del agua a lo largo de la melga, etc. están sujetas a errores de magnitud difícil de medir. Por este motivo se decidió estudiar el efecto que sobre la determinación de parámetros pudiera tener una variación aleatoria de distribución normal, con media cero y varianza de diferente magnitud, introducida artificialmente en los datos de los volúmenes infiltrados (también pudieron introducirse en los tiempos medidos). Los resultados de este estudio están resumidos en el Cuadro 3. Como puede verse, las variaciones aleatorias tienen poco efecto tanto sobre los parámetros, aunque la precisión del modelo se fue haciendo menor en la medida que aumentaba el valor de la variación máxima aleatoria introducida. Esto sugiere que la metodología de estimación es "robusta" en el sentido de que los errores en los datos no se transmiten íntegramente en los resultados.

Por algunas consideraciones teóricas que se presentan más adelante, se previó que el valor de los parámetros podrían depender tanto de la cantidad como del tipo de información utilizada en su obtención. Es decir, fórmulas que en su desarrollo conceptual han esquematizado fuertemente las condiciones reales, o fórmulas que son resultado de simplificaciones matemáticas, como es el caso de las fórmulas de Green y Ampt y de Philip, no pueden representar adecuadamente todo el proceso de infiltración en todo tipo de suelo. En el Cuadro 4 se presentan las estimaciones de los parámetros usando toda o una parte de la información, según se especifica. En la Figura 4 se muestran las curvas de infiltración acumulada por la fórmula de Green y Ampt, con parámetros calculados con diferente tipo y cantidad de información.

Como puede verse, los valores de los parámetros varían muy considerablemente. Esa situación puede ser explicada por dos razones fundamentales:

- 1) Las fórmulas son imperfectas para simular todo el proceso de la infiltración, sobre todo en los primeros tiempos del proceso, que corresponden a la fase de avance. Esta situación se refleja en un mayor valor del coeficiente de variación lo que significa menor ajuste. El hecho de que los coeficientes de variación sean menores cuando los parámetros se determinan con la información correspondiente a la fase de recesión, confirmaría entonces que esta fase es mejor modelada por ambas fórmulas.

Cuadro 1. Valores de los parámetros de las fórmulas de infiltración.

Prueba	Parámetros	A u t o r		
		Kostiakov	Philip	Green y Ampt
Melga	α	15.562 cm/hr ^{β}	12.657 cm/hr ^{1/2}	4.254 cm/hr
	β	0.577	2.801 cm/hr	18.139 cm
	Coefficiente de variación(%)	2.2620	2.0511	2.0560
Infiltrómetro doble cilindro estación 130	α	17.767 cm/hr ^{β}	4.2227 cm/hr ^{1/2}	13.996 cm/hr
	β	0.8289	12.9887 cm/hr	1.0259 cm
	R ²	0.9915	0.9698	0.9903
Infiltrómetro doble cilindro estación 180	α	14.4525 cm/hr ^{β}	7.65926 cm/hr ^{1/2}	7.5386 cm/hr
	β	0.6603	6.6826 cm/hr	4.8018 cm
	R ²	0.9987	0.9260	0.9864

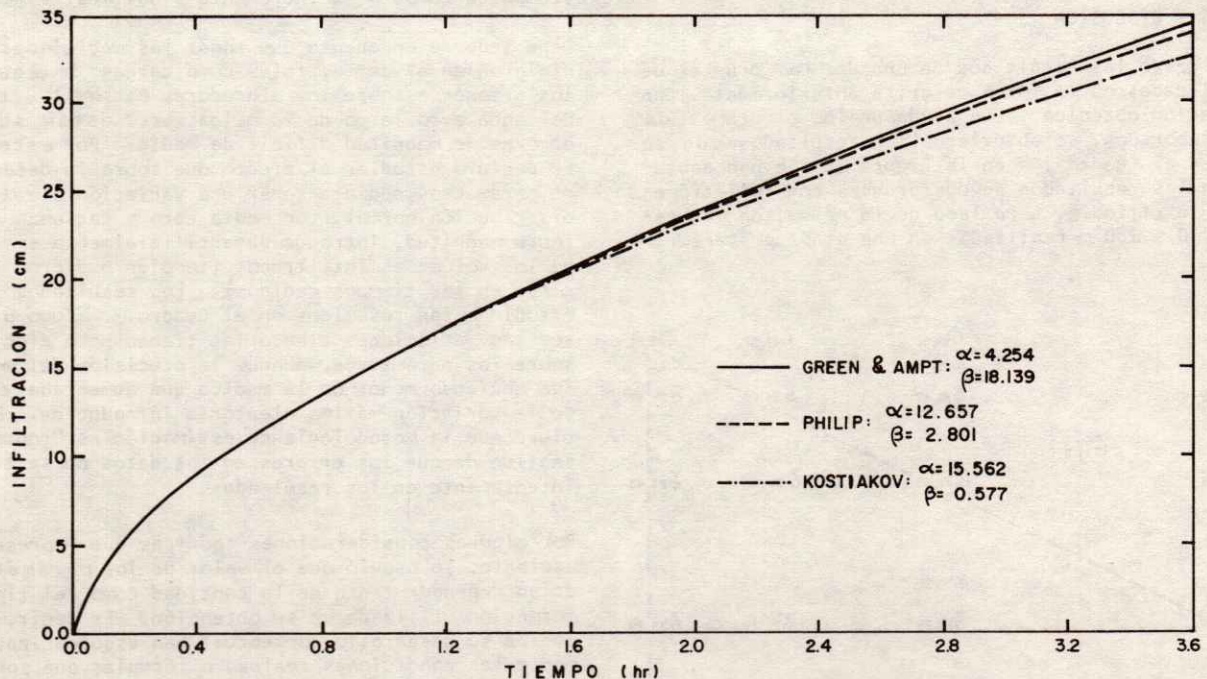


Fig. 3. Curvas de infiltración acumulada en el tiempo según los parámetros calculados. Obsérvese que durante el ensayo de riego (2 hr.), los tres modelos prácticamente coinciden, Kostiakov ($I = \alpha t^\beta$); Philip ($I = \alpha t + \beta t$) y Green & Ampt ($I = \alpha t + \beta \ln(1 + \frac{t}{\beta})$).

2) Heterogeneidad de los suelos, en perfil y a lo largo de la melga. Todos los modelos de infiltración desarrollados presuponen suelos homogéneos y distribución uniforme de la humedad inicial considerando además que el suelo es de espesor infinito. Por un lado, si los suelos son estratificados, eso significaría que una vez que se alcanzan estratos con una conductividad hidráulica significativamente diferente de la que se tiene en la parte superior del suelo, la función de infiltración deberá cambiar. Igualmente, si los suelos son heterogéneos a lo largo de la melga, cuando se alcanzaran zonas con permeabilidad diferente, debería cambiar la fórmula de infiltración.

Los datos del Cuadro 4 indican que los coeficientes de variación de los parámetros obtenidos con toda la infor-

mación son relativamente pequeños (menos de 5%); pero deben utilizarse cuidadosamente y de preferencia sólo en condiciones similares a aquellas bajo las cuales fueron determinados los parámetros.

Uno de los propósitos de la determinación de parámetros puede ser el utilizar posteriormente las fórmulas de infiltración con fines predictivos. A este respecto debe indicarse que aún si los suelos fueran homogéneos en perfil y a lo largo de la melga, un cambio de la humedad inicial afectaría necesariamente los valores de los parámetros; es decir tales parámetros en principio sólo pueden ser utilizados para condiciones de humedad inicial similares a aquellos bajo las cuales se determinaron. De otra manera se podría cometer errores de magnitud impredecible. Sin embargo para el caso particular de la fór-

mula de Green y Ampt y por lo menos para suelos de textura ligera (Rendón, 1984), pueden hacerse predicciones, puesto que el parámetro " α " corresponde a la conductividad hidráulica a saturación, por lo que debe mantenerse constante, mientras que " β " de acuerdo con la fórmula (14), podría ser recalculado para una nueva humedad volumétrica inicial en el perfil del suelo. Por esta razón los nuevos modelos de infiltración que se están desarrollando tratan de utilizar parámetros expresados en función de características del suelo, lo que permite recalcular sus valores para condiciones diferentes de aquellas en que fueron determinados.

Cuadro 2. Valores de los parámetros y del coeficiente de variación para la fórmula de Green y Ampt obtenidos con diferente precisión en los cálculos.

Precisión de los cálculos	α	β	CV (%)
0.01	4.0699	19.4801	2.3371
0.001	4.2302	18.3630	2.0828
0.0001	4.2540	18.1390	2.0560

Cuadro 3. Variación de los parámetros de las fórmulas de Philip y Green y Ampt al introducir una variación aleatoria de distribución normal en los datos de volúmenes infiltrados.

Variación aleatoria máxima (%)	Philip			Green y Ampt		
	α	β	CV	α	β	CV
1	12.6529	2.8015	2.3481	4.2774	18.0323	2.3883
3	12.6456	2.8023	3.7779	4.3667	17.5223	3.7853
5	12.6384	2.8031	5.6077	4.4480	17.2828	5.5812
7	12.6311	2.8039	7.5529	4.5264	17.1856	7.4885
10	12.6204	2.8050	10.5477	4.6380	17.2841	10.4194
15	12.6021	2.8071	15.6127	4.8040	18.3710	15.3861
20	12.5840	2.8092	20.7112	4.9763	20.2593	20.5176
30	12.5477	2.8132	30.9424	5.4082	22.5564	31.2507
40	12.2800	3.0720	40.4824		1)	
50	12.4929	2.8154	49.1568		1)	

1) Se observaron problemas de convergencia.

Cuadro 4. Variación de los parámetros en función de la cantidad y tipo de información utilizada en su estimación.

Número de tiempo Inicial	final	Philip			Green y Ampt		
		α	β	CV	α	β	CV
1	50 ¹⁾	12.6570	2.8010	2.0511	4.2540	18.1390	2.056
1	40	13.0645	2.3380	2.3455	3.6627	22.4153	2.3589
1	30	14.0521	1.1617	2.4828	2.0712	45.9586	2.5133
1	23 ²⁾	15.1694	-0.2509	3.1329	0.7675	149.4576	4.6604
10	50	12.4080	3.0165	1.6177	4.3997	17.1786	1.6153
20	50	11.1819	4.0678	1.2636	5.5214	11.5203	1.2575
27	50 ³⁾	4.8149	9.4443	0.4428	10.6459	1.5545	0.4431
10	40	12.8083	2.5666	1.7200	3.7955	21.2655	1.7281

1) Corresponde a la prueba completa.

2) Corresponde a la fase de avance.

3) Corresponde a la fase de recesión.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se ha desarrollado una metodología para la estimación de parámetros de diferentes fórmulas de infiltración, a partir de pruebas de riego. De los resultados del análisis de una prueba se ha concluido que la metodología propuesta proporciona estimadores robustos, en el sentido de que varían poco al introducir un ruido aleatorio en los datos; pero en cambio se ha establecido que su valor depende fuertemente de la cantidad y tipo de información;

es decir de si se utiliza únicamente la fase de avance, la fase de recesión o la prueba entera. Como los coeficientes de variación resultaron menores cuando los parámetros fueron determinados usando únicamente la fase de recesión, debe concluirse que los modelos parecen simular mejor las etapas avanzadas de la infiltración y no el principio de la misma.

La utilización de estas fórmulas con fines predictivos debe restringirse a casos en que la humedad inicial sea

similar a aquella observada durante las pruebas que sirvieron de base para determinar sus parámetros, excepto la fórmula de Green y Ampt cuyos parámetros pueden ser recalculados y utilizados con cierta confianza, por lo menos para suelos de textura ligera.

Sería recomendable realizar otras pruebas y comparar los valores de los parámetros determinados con la metodología propuesta, con parámetros obtenidos de pruebas de infiltrómetro de doble cilindro, realizadas a lo largo de la melga y ver que correspondencia existe entre esos valores.

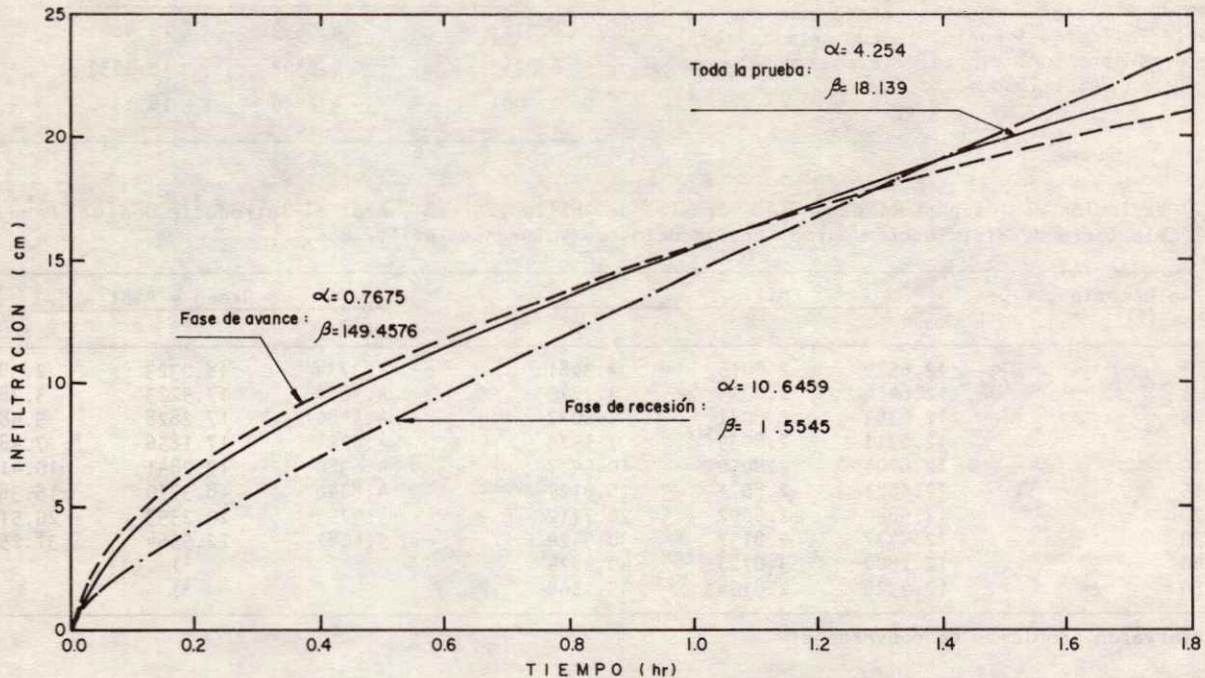


Fig. 4. Curvas de infiltración acumulada, según fórmula de Green & Ampt, con parámetros calculados con diferente tipo y cantidad de información, $I = \alpha t + \beta \ln(1 + \frac{t}{\beta})$.

LITERATURA CITADA

- Fuentes, C., R.Haverkamp y J.-Y. Parlange. 1986. Predicción del potencial de presión a partir de la distribución de partículas del suelo por tamaño. Trabajo en proceso de elaboración.
- Green, W.A. y G.A.Ampt. 1911. Studies on soil physics. 1. The flow of air and water through soils. J.Agric. Sci. 4: pp. 1-24.
- Kostiakov, A.N. 1932. On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity of studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. Trans. Cam. Int. Soc. Soil Sci. 6th Moscow. Part. A: pp. 17-21.
- Philip, J.R. 1957. The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. Soil Sci. 83: pp. 345-357.
- Rendón P., L. 1984. Etude comparative de six équations de l'infiltration. Mémoire de DEA, Institut de Mécanique, USMG, Grenoble, France. 109 pp.
- Vauclin, M. 1983. Méthodes d'étude de la variabilité spatiale des propriétés d'un sol. In: Variabilité spatiale des processus de transfert dans les sols. Les Colloques de l'INRA, No. 15 Avignon, 24-25 juin 1982. 9: 43.

ECUACIONES DE INFILTRACION Y SU APLICABILIDAD +

Rendón Pimentel, L. 1
Haverkamp, R. 2
Hernández Saucedo, R. 3

RESUMEN

En muchos estudios relacionados con el riego superficial, el conocimiento de la infiltración es esencial para desarrollar criterios de optimización del uso del agua.

En este trabajo, se analizan cuatro diferentes ecuaciones de infiltración: Kostiakov, Green y Ampt, Philip y Parlange desde el punto de vista de su aplicabilidad con fines predictivos, haciéndose especial énfasis en el comportamiento de los parámetros con respecto al tiempo y al cambio de las condiciones de frontera. Se efectuaron pruebas comparativas considerando dos condiciones de carga en la superficie del suelo ($h=0$ y $h>0$) y dos texturas de suelo.

Los resultados muestran que tanto los parámetros de las ecuaciones de Kostiakov como los de las ecuaciones de Green y Ampt y de Philip son altamente dependientes del tiempo. En consecuencia, dichos parámetros deben sólo considerarse como parámetros de ajuste, sin alguna significación física. Únicamente la ecuación de Parlange tiene parámetros que son independientes del rango del tiempo para el cual son determinados.

La aplicabilidad de la ecuación de Kostiakov con fines predictivos es totalmente nula, mientras que las otras tres ecuaciones se consideran muy limitadas e insuficientes. La inoperancia de las ecuaciones de infiltración con dos parámetros es claramente demostrada.

ABSTRACT

In most studies dealing with surface irrigation systems, knowledge on the infiltration process is of crucial interest for developing water use optimization criteria.

In the context of this paper four different infiltration equations: Kostiakov, Green and Ampt, Philip and Parlange, are analyzed on their applicability for predictive use with special emphasis on the parameter behavior as function of time and changing boundary conditions. The comparative tests are carried out for two different head conditions at the soil surface ($h=0$ and $h>0$) and for two soil textures. The results show that the parameters used by the Kostiakov, Green and Ampt, and Philip equations are all highly time dependent. In consequence, they must be considered as pure fitting parameters without any physical significance. Only the Parlange equation uses parameters independent of the time range for which they are determined. The applicability of the Kostiakov equation for predictive use is totally non-existent, while for the other three equations it seems very limited and insufficient.

The inadequacy of infiltration equations with two descriptive parameters is clearly demonstrated.

INTRODUCCION

En los estudios sobre cuencas, y en particular en sistemas de riego superficiales, el conocimiento de la infiltración del agua en el suelo es de gran importancia.

El proceso de infiltración puede describirse en forma de tallada resolviendo la ecuación general de movimiento del agua en el suelo (Fokker-Planck o Richards), si se conocen las dos características de humedad del suelo: la relación entre el contenido de humedad del suelo con la presión del agua del suelo $h(\theta)$ y la relación del contenido de humedad del suelo con la conductividad hidráulica, $K(\theta)$. Sin embargo, en el caso de grandes áreas, es difícil aplicar esta metodología debido a la variabilidad espacial de las características de humedad del suelo men-

cionadas anteriormente. Por tal motivo es común el uso de una descripción simplificada de la infiltración, considerando la existencia de una relación global de infiltración acumulada y tiempo, $I(t)$, que es representativa de toda el área bajo estudio.

Una vez que se conocen pares de valores de $I(t)$, a partir de pruebas de campo, estos se ajustan por técnicas de regresión a modelos simples que utilizan dos o tres parámetros. Con fines de simulación, tal procedimiento puede justificarse puesto que los parámetros obtenidos por mejor ajuste son representativos de las condiciones iniciales y de frontera utilizados en la prueba, i.e. el perfil de humedad que se tiene al comienzo de la infiltración y el tirante de agua en la superficie del suelo.

+ Ponencia presentada en el XVIII Congreso Nacional de la SMCS.

1 Centro de Hidrociencias, Colegio de Postgraduados, Chapingo, Méx.

2 Institut de Mécanique, Grenoble, Francia

3 Departamento de Irrigación, UACH, Chapingo, Méx. 56230.

Sin embargo, cuando las ecuaciones anteriores se aplican con fines predictivos para evaluar criterios de optimización del gasto y del tiempo de riego, se considera implícitamente que los parámetros de mejor ajuste son independientes del tiempo y de las condiciones iniciales y de frontera.

El objetivo de este trabajo es analizar con algún detalle esta ampliamente aceptada hipótesis, para cuatro diferentes ecuaciones de infiltración. Este trabajo es básicamente un resumen del efectuado por Rendón (1984), como requisito parcial para la obtención de su D.E.A. en el Instituto de Mecánica de Grenoble, Francia.

Planteamiento detallado del problema

En su forma más general, el flujo unidimensional del agua en un suelo no saturado, es expresado por la ecuación de Fokker-Planck:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} - K(\theta) \right] \quad (1)$$

donde θ es el contenido de humedad volumétrico (cm^3/cm^3) expresado como una función única de la presión efectiva del agua, $h(\text{cm})$; z es la profundidad orientada positivamente hacia abajo (cm); t es el tiempo (hr); $K(\theta)$ es la conductividad hidráulica (cm/hr) y $D(\theta)$ es la difusividad capilar (cm^2/hr) definida por Childs y Collis-George (1950) como:

$$D(\theta) = K(\theta) \frac{dh}{d\theta} \quad (2)$$

Integrando la ecuación (1), se obtiene la solución en términos de la distribución del contenido de humedad en el perfil del suelo, como función de la profundidad y del tiempo: $\theta(z, t)$. Una segunda integración del perfil de humedad del suelo, $\theta(z, t)$, sobre el intervalo $[\theta_0, \theta_1]$ permite obtener la ecuación de infiltración acumulada (I), en la forma:

$$I(t) = \int_{\theta_0}^{\theta_1} [\theta(z, t) - \theta_0] dz + K_0 t \quad (3)$$

donde θ_1 es el contenido de humedad en la superficie del suelo, θ_0 es el contenido de humedad inicial equivalente, que se considera distribuido uniformemente en el perfil del suelo y K_0 es el valor de la conductividad hidráulica para $\theta = \theta_0$.

Directamente, de la ecuación (3), se pueden obtener los límites de I con respecto al tiempo:

$$\lim_{t \rightarrow 0} I(t) = 0 \quad (4)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} I(t) = \infty \quad (5)$$

De acuerdo con la ley de Darcy, la velocidad de infiltración en la superficie del suelo, definida como $q = dI/dt$, se puede expresar en la forma:

$$q = -K_1 \left[\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right] \quad (6)$$

donde K_1 es la conductividad hidráulica en la superficie del suelo para el valor de $\theta = \theta_1$.

Los límites de la ecuación (6), con respecto al tiempo son:

$$\lim_{t \rightarrow 0} q(t) = 0 \quad (7)$$

$t \rightarrow 0$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} q(t) = K_1 \quad (8)$$

Si se conocen las relaciones $h(\theta)$ y $K(\theta)$, se pueden resolver las ecuaciones (1) y (3) directamente, utilizando métodos numéricos o quasi-analíticos. En la práctica, la determinación de ambas características hidráulicas del suelo es tediosa y pesada por una parte, y por otra, es necesario enfrentar el problema de la variabilidad espacial cuando se trata de caracterizar un lote agrícola. Por esta razón, durante las últimas décadas se ha dado gran énfasis al desarrollo de ecuaciones de infiltración físico-empíricas confiables, basadas en el uso de parámetros con mayor o menor significado físico.

A pesar de la relativa simplicidad de este tipo de ecuaciones de infiltración, su aplicación se ve limitada en la mayoría de los casos, cuando cambian las condiciones iniciales y de frontera. La selección apropiada de la ecuación de infiltración es de crucial importancia, para el desarrollo de criterios de decisión en los estudios de infiltración-irrigación.

El objetivo de este trabajo es analizar cuatro ecuaciones de infiltración en función de los siguientes criterios de prueba: (i) precisión, (ii) elección de los parámetros con especial énfasis en su dependencia con el tiempo, y (iii) aplicabilidad con fines predictivos.

MATERIALES Y METODOS

Para los fines anteriormente señalados, tres ecuaciones de infiltración fueron seleccionadas (Kostiakov, 1932; Green y Ampt, 1911; Philip, 1957b) y una ecuación recientemente desarrollada (Parlange *et al.*, 1985).

En el caso de la ecuación de Kostiakov (1932), la velocidad de infiltración en la superficie del suelo, q , es expresada en función del tiempo mediante:

$$q(t) = \alpha t^\beta \quad (9)$$

siendo α ($\text{cm}/\text{hr}^{1+\beta}$) y β (adim.) dos parámetros de ajuste definidos respectivamente sobre los intervalos: $\alpha > 0$ y $-1 < \beta < 0$.

Integrando la ecuación (9), se obtiene la ecuación de infiltración acumulada:

$$I(t) = \frac{\alpha}{1+\beta} t^{1+\beta} \quad (10)$$

Investigando los dos límites de tiempo ($t \rightarrow 0$ y $t \rightarrow \infty$) para las ecuaciones (9) y (10), se comprueba que estas se comportan correctamente, excepto para el caso $\lim_{t \rightarrow \infty} q(t) = 0$.

(Ec. 9). Conciencia de este problema, Kostiakov propuso un rango de tiempo máximo de aplicabilidad:

$$t \leq \left[\frac{\alpha}{K_1} \right]^{-\frac{1}{\beta}} \quad (11)$$

Ambos parámetros de ajuste pueden determinarse directamente mediante regresión lineal simple, a partir de datos experimentales de $I(t)$.

Contrariamente a la ecuación anterior, la ecuación de Green y Ampt (1911) está basada en algunas consideraciones físicas; esta ecuación se basa en los siguientes supuestos: (i) La existencia de un frente de humedecimiento bien definido, caracterizado por un valor de presión h_f (cm), constante con la profundidad y el tiempo. (ii) Atrás de este frente de humedecimiento, el perfil de humedecimiento es uniforme (tipo pistón) con una conductividad hidráulica constante igual a $K(\theta) = K_1$. Cuando se presenta la saturación en la superficie del suelo, K_1 toma el valor de la conductividad hidráulica a saturación natural, K_s .

De acuerdo a las hipótesis anteriores y la ecuación de Darcy (6), la infiltración acumulada puede expresarse en una forma implícita, de la siguiente manera:

$$l(t) = K_1 \cdot t + [h_1 - h_f][\theta_1 - \theta_0] \ln \left\{ 1 + \frac{l}{[\theta_1 - \theta_0][h_1 - h_f]} \right\} \quad (12)$$

donde h_1 (cm) es el valor de la presión del agua en la superficie del suelo, $h(\theta_1)$.

La velocidad de infiltración se convierte en:

$$q(t) = -K_1 \left\{ \frac{[\theta_1 - \theta_0][h_f - h_1]}{l} - 1 \right\} \quad (13)$$

Considerando ambos límites de tiempo ($t \rightarrow 0$ y $t \rightarrow \infty$), es evidente que las condiciones (4), (5), (7) y (8) se satisfacen plenamente en las ecuaciones (12) y (13).

La interpretación del valor de presión h_f ha sido objeto de numerosos estudios con el propósito de encontrar algún significado físico de este parámetro (Bouwer, 1964; Mein y Larson, 1973; Parlange, 1975; Neuman, 1976; Brakensiek, 1977). Más recientemente, se ha efectuado un amplio estudio para relacionar a h_f directamente con la textura del suelo (Rawls y Brakensiek, 1983). Sin embargo, la experiencia ha demostrado que tales determinaciones de h_f en la mayoría de los casos conduce a grandes imprecisiones en los valores de $l(t)$, reduciendo por lo tanto a h_f , a un simple parámetro de ajuste.

Las ecuaciones (12) y (13) involucran a tres parámetros y por lo tanto requieren un procedimiento iterativo para calcularlos, a partir de datos experimentales de $l(t)$.

Reemplazando a $\frac{[\theta_1 - \theta_0][h_f - h_1]}{l}$ por un simple parámetro "falso" λ , la ecuación (12) toma la siguiente forma:

$$l(t) = K_1 t + \lambda \ln \left[1 + \frac{l}{\lambda} \right] \quad (14)$$

cuya expresión permite directamente la obtención de los parámetros K_1 y λ .

En esta etapa, se debe reconocer que la identificación del valor K_1 calculado, con la conductividad hidráulica a saturación es bastante peligrosa, puesto que K_1 es solamente el resultado de un procedimiento de ajuste. Más aún, tal identificación implica la validez de las suposiciones básicas de Green y Ampt con respecto al flujo tipo pistón. Es evidente que esta última hipótesis es más adecuada cuando se refiere a suelos arenosos.

La ecuación de infiltración propuesta por Philip (1957b) previamente derivada a partir de la solución en series de tiempo (Philip, 1955 y 1957a) se puede expresar de la siguiente manera:

$$l(t) = K_0 t + \sum_{m=1}^M S_m \cdot t^{m/2} \quad (15)$$

donde S_m son coeficientes de la serie, calculados en función de las características de humedad del suelo y de las condiciones iniciales y de frontera.

Note que $S_1(\theta_0, \theta_1)$ es la llamada sorbilidad y puede interpretarse como la capacidad del suelo para absorber agua debido solamente a las fuerzas capilares y es función de las condiciones iniciales y de frontera.

La ecuación de infiltración de Philip simplificada (Philip, 1957b) se obtiene tomando en cuenta solamente los primeros dos términos:

$$l(t) = St^{1/2} + At \quad (16)$$

donde S y A son constantes. La ecuación de velocidad de infiltración correspondiente es por lo tanto:

$$q(t) = \frac{1}{2} St^{-1/2} + A \quad (17)$$

La ecuación (17) no se sostiene para cuando el tiempo tiende a infinito, puesto que $\lim_{t \rightarrow \infty} q(t) = A$, con $A \neq K_1$

(Ecuación 8).

Erróneamente muchos autores confunden el parámetro S con la sorbilidad. En efecto, identificando S con la sorbilidad, el segundo término A toma la forma (Ecs. 15 y 16):

$$A = K_0 + \sum_{m=2}^M S_m t^{m/2 - 1} \quad (18)$$

cuya igualdad no se sostiene, puesto que por definición A es independiente del tiempo (Ec. 16).

Con respecto al parámetro A , existe escasa literatura disponible; la única estimación citada es $A \approx \frac{2}{3} K_s$ propuesta por Youngs (1968). En este trabajo, S y A son considerados sólo como parámetros de ajuste, obtenidos a partir de datos experimentales de $l(t)$.

En analogía con la ecuación de Green y Ampt (Ec.12), Philip (1969) desarrolló una expresión que permite ajustar el valor de S para diferentes condiciones de frontera en la superficie del suelo.

$$S^2 = 2 K_1 [\theta_1 - \theta_0][h_1 - h_f] \quad (19)$$

Una vez calculado el valor de S a partir de una primera prueba de infiltración, el valor de h_f puede estimarse si se conoce K_1 y $[\theta_1 - \theta_0]$. Para subsecuentes pruebas que se efectúen con la misma condición inicial (θ_0), el valor de h_f permitirá obtener el nuevo valor de S en función de la carga en la superficie del suelo (h_1). Desafortunadamente, no se dispone de alguna ecuación de predicción para ajustar el parámetro A en función de condiciones de frontera variables.

Parlange et al. (1982 y 1985) y Haverkamp (1983), desarrollaron una nueva ecuación de infiltración. Esta ecuación se obtiene directamente a partir de la ecuación de Fokker-Planck (Ec. 1), mediante una técnica de doble integración quasi-analítica. La expresión general, válida para cualquier tipo de carga en la superficie del suelo es:

$$[1 - K_0 t] = \frac{K_1 h_s [\theta_1 - \theta_0]}{[q - K_1]} + \frac{S^2}{2 \delta [K_1 - K_0]} \ln \left[1 + \delta \frac{K_1 - K_0}{q - K_1} \right] \quad (20)$$

donde h_s es el tirante de agua en la superficie del suelo, pero sujeto a la siguiente convención: $h_s = h_1$ para $h_1 > 0$ y $h_s = 0$ para $h_1 \leq 0$.

δ es un índice del suelo definido sobre el intervalo $0 < \delta < 1$.

Para suelos pesados, donde la difusión es la principal responsable de la infiltración, δ tiende a la unidad; mientras que para suelos ligeros, donde la gravedad es preponderante, el valor de δ decrece rápidamente. Para el caso particular cuando δ tiende a cero, la ecuación (20), toma el comportamiento de flujo de pistón de la ecuación de Green y Ampt.

De acuerdo al desarrollo de la ecuación (20), el parámetro S representa, sin ambigüedad alguna, el valor de la sorbilidad S_1 ; lo mismo se sostiene para los restantes parámetros K_1, K_0 y $[\theta_1 - \theta_0]$.

Evidentemente, la infiltración acumulada (l), a partir de la ecuación (20), sólo puede calcularse cuando se conocen los valores correspondientes de la velocidad de infiltración (q). Por esta razón se deriva la Ec. (20) para obtener una ecuación explícita de t en función de q :

$$t = \frac{S^2}{2\delta [1-\delta] [K_1-K_0]^2} \ln \left[1 + \delta \frac{K_1-K_0}{q-K_1} + \frac{K_1 h_s [\theta_1-\theta_0]}{[q-K_1] [K_1-K_0]} \right] - \frac{S^2 + 2 [1-\delta] K_1 h_s [\theta_1-\theta_0]}{2 [1-\delta] [K_1-K_0]^2} \ln \left[\frac{q-K_0}{q-K_1} \right] \quad (21)$$

El uso combinado de las ecuaciones (20) y (21), permite calcular la infiltración en cualquier tiempo.

Una desventaja importante de este modelo desde el punto de vista de su uso en la práctica, parece ser el gran número de parámetros involucrados (5). Sin embargo, en la mayoría de los casos, el parámetro K_0 tiene poca influencia en el proceso de infiltración, especialmente cuando se parte de condiciones de humedad iniciales muy bajas.

Además, el valor de la sorbilidad S , es función de la capacidad de almacenamiento de agua: $\theta_1-\theta_0$ lo cual se observa directamente de la ecuación (19). Estableciendo un tipo de ecuación similar con $S = f [K_1, \delta, (\theta_1-\theta_0)]$, el número de parámetros se reduce a tres.

Puesto que el procedimiento para la identificación de parámetros en esta nueva fórmula de infiltración está todavía en desarrollo por nuestro grupo de investigadores en Grenoble, Francia, en este trabajo solamente se analizará el comportamiento del parámetro δ en el modelo de infiltración (Ec. 20 y 21), en función del tiempo y de los cambios en las condiciones de frontera.

Para inferir sobre la precisión de cada una de las cuatro ecuaciones, se requiere una solución de referencia. Se dispone de tres tipos de solución de referencia: soluciones quasi-analíticas y numéricas de la ecuación general de flujo del agua en el suelo (Ec. 1) obtenida a partir de datos experimentales de $I(t)$. En este trabajo se comparan las cuatro ecuaciones mencionadas anteriormente, con estas soluciones de referencia.

Para poder obtener conclusiones generales, se utilizarán dos suelos con diferente textura (arcilloso y arenoso) y dos condiciones de frontera en la superficie del suelo: (a) tirante nulo constante ($h_1=0$) y (b) tirante positivo constante ($h_1>0$).

(a). Para la condición inicial $h_1=0$, se utilizará como referencia la solución quasi-analítica en series en tiempo de Philip (1955 y 1957a), Ec. (15). En esta solución de referencia, existe un límite de tiempo hasta el cual se obtienen resultados congruentes con el fenómeno físico, que depende hasta cierto punto, del número de términos que se toman en cuenta en la serie. Por tal motivo, es necesario determinar el número máximo de términos que permita prolongar el tiempo de aplicabilidad tanto como sea posible. Haverkamp (1983) desarrolló una ecuación recurrente para ampliar el número de términos más allá de los cuatro términos originalmente propuestos por Philip (1955).

Usando nueve términos ($M=9$) para cada suelo, los tiempos límite de aplicación son respectivamente: $t_{lim} = 250$ hr para el suelo arcilloso y $t = 0.67$ hr para el suelo arenoso. Los valores de los coeficientes de la serie $[S_m(\theta_0, \theta_1)]$ para $m \leq 9$ involucrados en la Ecuación (15), se muestran en el Cuadro 1. Recuérdese que $S_1(\theta_1, \theta_0)$ representa el valor de la sorbilidad.

(b). Para la condición de frontera $h > 0$, se comparará con resultados experimentales obtenidos en laboratorio para un suelo arenoso (Touma, 1984). Estos datos fueron obtenidos con un tirante de 2.25 cm en la superficie del suelo y con un contenido de humedad uniforme ($\theta_0=0.0816$) hasta una profundidad de $z=40$ cm, hasta un tiempo de infiltración de $t=0.4$ hr.

Cuadro 1. Parámetros y Coeficientes de la solución quasi-analítica de Philip (1955), para dos texturas de suelo.

Parámetros y Coeficientes	Suelo Arcilloso	Suelo Arenoso
θ_0 (cm ³ /cm ³)	0.2376	0.0816
θ_1 (cm ³ /cm ³)	0.4950	0.3120
θ_s (cm ³ /cm ³)	0.4950	0.3120
K_1 (cm/hr)	0.0443	15.37
K_0 (cm/hr)	4.32×10^{-5}	4.47×10^{-3}
S_1 (cm/hr ^{1/2})	0.7439	9.406
S_2 (cm/hr)	1.685×10^{-2}	7.385
S_3 (cm/hr ^{3/2})	3.177×10^{-4}	3.226
S_4 (cm/hr ²)	2.130×10^{-6}	1.035×10^{-1}
S_5 (cm/hr ^{5/2})	-6.248×10^{-8}	-5.917×10^{-1}
S_6 (cm/hr ³)	-9.721×10^{-10}	-5.059×10^{-2}
S_7 (cm/hr ^{7/2})	3.164×10^{-11}	2.201×10^{-1}
S_8 (cm/hr ⁴)	5.339×10^{-13}	2.809×10^{-2}
S_9 (cm/hr ^{9/2})	-2.468×10^{-14}	-1.029×10^{-1}
t_{lim} (hr)	250	0.67

Para el caso del suelo arcilloso no se disponía de resultados experimentales, por lo cual se utilizó un método numérico como solución de referencia. Se escogió un perfil de humedad inicial uniforme, con $\theta_0=0.2376$ cm³/cm³ (como en el caso de $h_1=0$ cm) y un tirante en la superficie del suelo de $h_1=10$ cm. Se utilizó el esquema LOC1.B3 de diferencias finitas (Haverkamp y Vauclin, 1981), seleccionado entre un gran número de esquemas de diferencias finitas (42), por su gran precisión y estabilidad. El error total de los valores de infiltración acumulada, en términos de varianza fue de: $\sigma^2 \leq 0.005$.

En el Cuadro 2 se resumen las condiciones en las cuales se efectuaron las pruebas comparativas.

La precisión de las ecuaciones de infiltración es expresada en términos de la varianza (σ^2) entre los valores de la infiltración acumulada de la solución de referencia (I_{ref}) y los calculados con las ecuaciones simplificadas (1), mediante:

$$\sigma^2(I) = \frac{\sum_{i=1}^N (I_{refi} - I_i)^2}{N - 1} \quad (22)$$

RESULTADOS Y DISCUSION

A continuación se presentan y discuten los resultados obtenidos para cada una de las ecuaciones de infiltración.

Ecuación de Kostiaikov

Los parámetros α y β , calculados para diferentes intervalos de tiempo, para ambos tipos de suelo, se muestran en el Cuadro 3. Usando la ecuación de Kostiaikov exclusivamente como modelo de mejor ajuste, los resultados muestran una gran precisión hasta el tiempo límite de aplicación: t_{lim} (Ec. 11), más allá del cual la precisión se pierde rápidamente, sobrepasando un valor de varianza de $\sigma^2=0.005$. Una de las principales fallas de esta ecuación

Cuadro 2. Resumen de condiciones comparativas de la prueba.

Condiciones de frontera en la superficie del suelo		
Suelo	Carga nula	Carga positiva
Arcilloso	Solución quasi-analítica en series de tiempo de Philip con 9 términos	$h_1 = 10$ cm Solución numérica
Arenoso		$h_1 = 2.25$ cm
Datos experimentales		

ción se pone en evidencia: ésta no permite describir el fenómeno de infiltración en todo el rango de tiempo, sin pérdida de precisión.

Con respecto a la dependencia del tiempo de los parámetros de ajuste, el Cuadro 3 muestra una variación considerable de dichos valores.

El mismo problema puede observarse con relación al cambio de las condiciones de frontera.

La dependencia de los parámetros de ajuste con el tiempo puede ilustrarse desarrollando algunos valores teóricos de α y β . La ecuación de velocidad de infiltración (9), puede compararse con la solución quasi-analítica de referencia, escrita en la forma:

$$q(t) = 1/2 S_1 t^{-1/2} + [S_2 + K_0] + 3/2 S_3 t^{1/2} + \dots + m/2 S_m t^{m/2-1} \quad (23)$$

la cual se obtiene de la ecuación (15), con $q(t) = di/dt$. Note una vez más, que S_1 es el valor de la sorbilidad.

Al inicio de la infiltración, cuando la influencia de la capilaridad es aún preponderante sobre las fuerzas gravitacionales, la ecuación de velocidad de infiltración (23) puede aproximarse mediante:

$$q(t) = 1/2 S_1 t^{-1/2} \quad (24)$$

Por lo tanto, comparando esta ecuación con la ecuación (9), se sigue que el valor de α tenderá a $1/2 S_1$ para tiempos pequeños, i.e.: $\lim_{t \rightarrow 0} \alpha = 0.3719$ y 4.703 para el suelo arcilloso y el arenoso, respectivamente (Cuadro 1). De la misma manera, $\lim_{t \rightarrow 0} (\beta) = -0.5$.

Comparando estos valores teóricos con los dados en el Cuadro 3, se observa similitud solamente para el caso de suelo arcilloso, para el cual la hipótesis de capilaridad se verifica aproximadamente.

Al aumentar el tiempo, las fuerzas gravitacionales se convierten más y más importantes en el proceso de infiltración y los términos S_m (para $m \geq 2$), en la ecuación (23) no pueden ya despreciarse. Ello conduce a una disminución de $|\beta|$ con el tiempo.

Este fenómeno es aún más pronunciado cuando se aplica una carga positiva en la superficie del suelo, e.g.: para $t=200$ hr en el caso de un suelo arcilloso el valor de β cambia de -0.418 a -0.381 .

De lo anterior, es evidente que los parámetros α y β deben ser considerados únicamente como coeficientes de ajuste, válidos sólo para la prueba a partir de la cual fueron calculados; la aplicación de esta ecuación con fines predictivos es por lo tanto errónea.

Esto último puede ilustrarse con el siguiente ejemplo: Para el suelo arcilloso los valores de α y β obtenidos para $h_1=0$ y $t=200$ hr son usados para predecir la función de infiltración acumulada para $t=200$ hr y una carga $h_1=10$ cm. La desviación con respecto a la solución estándar

produce una varianza de $\sigma^2=3.842$, cerca de 1000 veces más grande que el criterio de precisión $\sigma^2=0.005$. Esto enfatiza la segunda falla importante de la ecuación de Kostiaikov: No puede ser usada con fines predictivos sin conducir a resultados erróneos.

Ecuación de Green y Ampt

Los resultados se presentan en el Cuadro 4. Como se explicó anteriormente, los parámetros que intervienen en la ecuación de Green y Ampt son considerados en el contexto de este trabajo, como parámetros de ajuste; por lo tanto, recordando la ecuación (14):

$$I(t) = K_1 t + \lambda \ln \left[1 + \frac{1}{\lambda} \right]$$

Con $\lambda = \frac{[h_1 - h_f] [\theta_1 - \theta_0]}{K_1}$, es más apropiado reescribirla en la forma:

$$I(t) = Kt + \lambda \ln \left[1 + \frac{1}{\lambda} \right] \quad (25)$$

esto, con el propósito de evitar cualquier asociación entre el parámetro de ajuste K y el valor de la conductividad hidráulica en la superficie del suelo K_1 , para el cual se desarrolló originalmente la ecuación de Green y Ampt.

El uso de la Ec. (25), con los valores de K y λ obtenidos por ajuste sobre los datos de $I(t)$, satisface plenamente el criterio de precisión: $\sigma^2 < 8 \times 10^{-4}$ (Cuadro 4). Es por esto que la Ec. (25) describe bastante bien el proceso de infiltración.

Cuadro 3. Parámetros α y β calculados en función de diferentes intervalos de tiempo, para dos suelos y dos diferentes condiciones de frontera.

Ecuación de Kostiaikov: $I(t) = \frac{\alpha}{1+\beta} t^{1+\beta}$

Suelo arcilloso						
Tiempo (hr)	$h_1 = 0$ cm			$h_1 = 10$ cm		
	α	β	σ^2	α	β	σ^2
(cm/hr ^{1+β})						
1.0	0.385	-0.494	0.0001			
5.0	0.392	-0.486	0.0001			
50.0	0.398	-0.457	0.0013			
100.0	0.394	-0.441	0.0071			
200.0	0.382	-0.418	0.0401	0.407	-0.381	0.0083
250.0	0.372	-0.406	0.0625			
t_{lim}	173 hr (Ec. 11)			337.3 hr (Ec. 11)		
Suelo arenoso						
Tiempo (hr)	$h_1 = 0$ cm			$h_1 = 2.25$ cm		
	α	β	σ^2	α	β	σ^2
(cm/hr ^{1+β})						
0.200	9.003	-0.406	0.0051			
0.300	9.708	-0.390	0.0166			
0.400	10.547	-0.369	0.0331	11.521	-0.360	0.0321
0.500	11.024	-0.358	0.0662			
0.667	11.683	-0.343	0.0562			
t_{lim}	0.36 hr (Ec. 11)			0.45 hr (Ec. 11)		

Cuadro 4. Parámetros K, λ y h_f calculados en función de diferentes condiciones de frontera.

$$\text{Ecuación de Green y Ampt: } I(t) = Kt + \lambda \ln \left[1 + \frac{I}{\lambda} \right]$$

Suelo arcilloso								
Tiempo (hr)	$h_1 = 0 \text{ cm}$ $\theta_1 - \theta_0 = 0.2574 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$				$h_1 = 10 \text{ cm}$ $\theta_1 - \theta_0 = 0.2574 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$			
	K (cm/hr)	λ (cm)	h_f (cm)	σ^2	K (cm/hr)	λ (cm)	h_f (cm)	σ^2
5.0	0.028	9.810	-38.11	10^{-5}				
50.0	0.029	9.385	-36.46	10^{-5}				
100.0	0.030	8.945	-34.75	10^{-5}				
200.0	0.032	8.110	-31.51	3×10^{-4}	0.039	9.235	-25.88	2.3×10^{-3}
250.0	0.032	8.120	-31.55	5×10^{-4}				
$K = K_1 = 0.0443 \text{ cm/hr}$								
200.0	0.0443	4.157	-16.15	6.8×10^{-2}				
Suelo arenoso								
Tiempo (hr)	$h_1 = 0 \text{ cm}$ $(\theta_1 - \theta_0) = 0.2304 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$				$h_1 = 2.25 \text{ cm}$ $(\theta_1 - \theta_0) = 0.2304 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$			
	K (cm/hr)	λ (cm)	h_f (cm)	σ^2	K (cm/hr)	λ (cm)	h_f (cm)	σ^2
0.2	13.00	3.245	-14.08	10^{-5}				
0.3	13.40	3.080	-13.37	10^{-4}				
0.4	13.85	2.908	-12.62	3×10^{-4}	15.0	2.85	-10.12	5×10^{-3}
0.5	14.15	2.753	-11.95	5×10^{-4}				
0.667	14.51	2.727	-11.83	8×10^{-4}				
$K = K_1 = 15.32 \text{ cm/hr}$								
0.4	15.32	2.149	-9.33	1.1×10^{-2}				

Un segundo punto interesante a resaltar es que el valor de K es muy diferente de su valor teórico K_1 . En el caso del suelo arcilloso K es de un 68% de K_1 para $t=0.4$ hr. La discrepancia entre K y K_1 puede explicarse por el hecho de que la suposición básica de la ecuación de Green y Ampt con relación al flujo tipo pistón (ver hipótesis (i) y (ii) no se satisface plenamente. A medida que las fuerzas capilares se hacen más importantes (suelos arcillosos), mayor será esta diferencia.

En resumen, puede decirse que el valor de K tenderá más y más a su valor teórico K_1 a medida que: (a) el suelo es más conductivo, (b) el perfil de contenido de humedad inicial disminuye y (c) el tirante de agua en la superficie del suelo se incrementa.

El primer punto (a) explica el incremento gradual del valor de K con el tiempo para ambos tipos de suelo. El último punto (c) se ilustra al comparar los valores de K para diferentes tirantes de agua en la superficie del suelo, e.g.: para el suelo arcilloso, para $t=200$ hr, K se incrementa de 72% a 88% al aumentar el tirante de agua de $h_1=0$ a $h_1=10$ cm.

Es evidente que la variación de K con el tiempo automáticamente implica una dependencia con el tiempo de λ y h_f . Para enfatizar las graves consecuencias de confundir el valor de K con K_1 , una prueba adicional fue efectuada ajustando la Ec. (25) sobre los datos de $I(t)$, fijando el valor de $K(K=K_1)$ y dejando variar libremente al parámetro λ . La precisión que se obtiene disminuye drásticamente: $\sigma^2=6.8 \times 10^{-2}$ y $\sigma^2=1.1 \times 10^{-2}$ para el suelo arcilloso y arenoso, respectivamente (Cuadro 4).

Como en el caso de la ecuación de infiltración anterior, la ecuación de Green y Ampt no puede usarse confines predictivos, sin conducir a grandes errores en los resultados, puesto que ni K ni λ pueden ser ajustados para tomar en cuenta el cambio en las condiciones de frontera. Para ilustrar lo anterior, la prueba de infiltración para el suelo arcilloso, con $h_1=10$ cm es predicho con los parámetros $K=0.032$ cm/hr y $\lambda=8.12$ cm que se obtuvieron con $h_1=0$ cm. Los resultados se muestran en la Fig. 1.

La varianza entre los valores predichos de $I(t)$ y la solución de referencia es de $\sigma^2=3.507$, lo que representa un error global relativo de 16% con respecto a los valores de infiltración acumulada.

Esta falta de posibilidad predictiva, puede considerarse como la principal falla de la ecuación de infiltración de Green y Ampt.

Ecuación de Philip

Los parámetros S y A obtenidos para ambos suelos en función de diferentes intervalos de tiempo se muestran en el Cuadro 5.

El uso de la Ec. (16) con S y A como parámetros de ajuste, satisface fácilmente el criterio de precisión: $\sigma^2 < 2 \times 10^{-3}$. Esto ilustra que la ecuación de Philip de dos parámetros describe bien el proceso de infiltración. Para tiempos pequeños ($t \rightarrow 0$), cuando las fuerzas de capilaridad son dominantes, la Ec. (15) puede escribirse en la forma:

$$I(t) = S_1 \sqrt{t} \quad (26)$$

SUELO ARCILLOSO

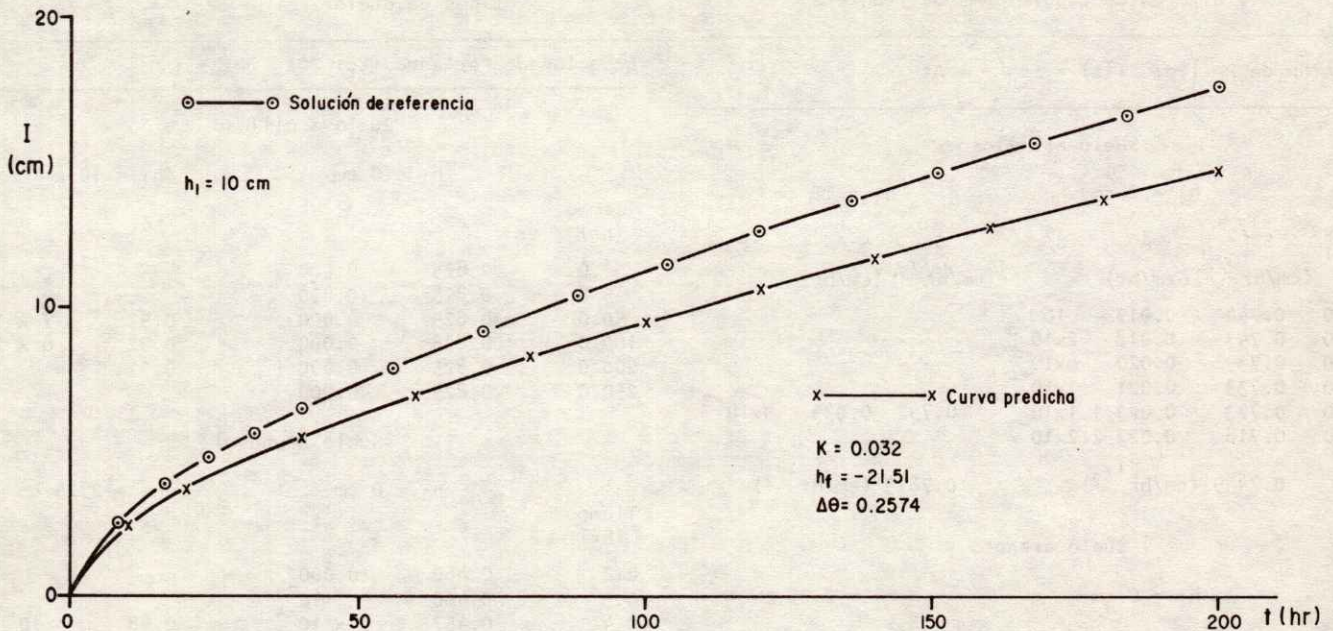


Figura 1. Infiltración acumulada (I) en función del tiempo (t), para un suelo arcilloso y un tirante de agua de \$h_1=10\$ cm en la superficie del suelo. Comparación entre la solución de referencia y la curva predicha, obtenida con la ecuación de Green y Ampt.

Por lo tanto, cuando el parámetro de ajuste S de la Ec. (16) se determina para intervalos de tiempo muy pequeños, es obvio que S tenderá a su valor teórico \$S_1\$: sorbilidad. Al aumentar el intervalo de tiempo, el valor de S se aparta cada vez más del valor de la sorbilidad, puesto que la hipótesis (26) se cumple cada vez menos.

La desviación del parámetro S es más rápida a medida que la contribución de la gravedad en el proceso de flujo se hace más importante: como en el caso de suelos de alta conductividad o de carga de agua positiva en la superficie del suelo. Por ejemplo, para el suelo arcilloso, el parámetro de ajuste S aún representa 99.9% del valor de la sorbilidad \$S_1\$ cuando se determina sobre el intervalo de una hora, mientras que para el suelo arenoso, el valor de S ya ha decrecido a 97% del valor de \$S_1\$ cuando se determina sobre el lapso de tiempo de solo 12 minutos (Cuadro 5).

Con respecto al parámetro A, un análisis comparativo entre la ecuación de Green y Ampt (Ec. 12) y la ecuación de Philip (Ec. 16) permite establecer un valor teórico de \$2/3 K_1\$ cuando el tiempo tiende a infinito (Youngs, 1968). Por lo tanto, a medida que la hipótesis de flujo de pistón de Green y Ampt se satisface, el valor de A se acercará más al valor de \$2/3 K_1\$; e.g.: en el caso del suelo arenoso, la identidad de \$A=2/3 K_1\$ se alcanza efectivamente en el tiempo \$t=0.66\$ hr, mientras que para el suelo arcilloso, el valor de A calculado sobre un intervalo de 250 hr, aún representa sólo el 52% de \$K_1\$ (los valores de \$K_1\$ aparecen en el Cuadro 1, para los dos tipos de suelo). Como se mostró anteriormente, la solución de Philip permite en cierta medida, modificar el parámetro S en función de las condiciones de frontera utilizando la Ec. (19):

$$S^2 = 2 K_1 (\theta_1 - \theta_0) (h_1 - h_f).$$

donde \$h_f\$ es un parámetro mudo que Philip considera constante. Aplicando esta ecuación al caso del suelo arcilloso, la prueba de infiltración, con S determinada sobre un intervalo de tiempo de 200 hr y \$h_1=0\$ cm, permite calcular un valor de \$h_f = -22.93\$ cm con \$(\theta_1 - \theta_0) = 0.2574\$ (Ver Cuadro 4). Un subsecuente cambio en la condición de frontera en la superficie del suelo hasta \$h_1=10\$ cm, produce un nuevo valor de \$S=0.8664\$ cm/hr\$^{1/2}\$. Una comparación de este valor con el valor de S obtenido por ajuste, sobre datos de \$I(t)\$: \$S=0.792\$ cm/hr\$^{1/2}\$ (Cuadro 5), muestra una discrepancia importante que enfatiza la muy limitada precisión de la ecuación de predicción (19).

Más aún, reconociendo que el parámetro A no puede adaptarse para tomar en cuenta cambios en las condiciones de frontera en la superficie del suelo, es evidente que la aplicabilidad de la ecuación de Philip con fines predictivos es muy limitada y con frecuencia conduce a resultados erróneos.

Ecuación de Parlange

Como se mencionó anteriormente, se propone analizar esta ecuación sólo desde el punto de vista del comportamiento de los parámetros en función del tiempo y del cambio en las condiciones de frontera. Los valores de los parámetros S, \$K_1\$ y \$(\theta_1 - \theta_0)\$ se consideran iguales a aquellos que se presentan en el Cuadro 1.

Los valores de \$\delta\$ calculados por ajuste mediante el uso combinado de las Ecs. (20) y (21), para diferentes intervalos de tiempo y diferentes condiciones de frontera, se muestran en el Cuadro 6.

Los resultados muestran una gran precisión para ambos suelos: \$\sigma^2 < 8 \times 10^{-4}\$, lo cual demuestra la bondad de esta nueva técnica quasi-analítica de doble integración.

Cuadro 5. Parámetros S y A calculados en función de diferentes intervalos de tiempo, para dos suelos y diferentes condiciones de frontera.

Ecuación de Philip: $I(t) = St^{1/2} + At$

Suelo arcilloso						
Tiempo (hr)	$h_1 = 0$ cm			$h_1 = 10$ cm		
	$S^{1/2}$ (cm/hr ^{1/2})	A (cm/hr)	σ^2	S (cm/hr ^{1/2})	A (cm/hr)	σ^2
1.0	0.744	0.017	10^{-5}			
5.0	0.743	0.018	2×10^{-5}			
50.0	0.739	0.020	6×10^{-5}			
100.0	0.733	0.021	1×10^{-4}			
200.0	0.723	0.023	1.1×10^{-3}	0.792	0.033	9×10^{-3}
250.0	0.718	0.023	2.2×10^{-3}			
S_1	0.7439 (cm/hr ^{1/2})			0.7813 (cm/hr ^{1/2})		

Suelo arenoso						
Tiempo (hr)	$h_1 = 0$ cm			$h_1 = 2.25$ cm		
	S (cm/hr ^{1/2})	A (cm/hr)	σ^2	S (cm/hr ^{1/2})	A (cm/hr)	σ^2
0.2	9.190	9.177	10^{-4}			
0.3	9.101	9.517	3×10^{-4}			
0.4	8.991	9.850	5×10^{-4}	9.249	11.121	7.4×10^{-3}
0.5	8.909	10.081	1×10^{-3}			
0.667	8.787	10.403	2×10^{-3}			
S_1	9.4061 (cm/hr ^{1/2})			10.2156 (cm/hr ^{1/2})		

Cuadro 6. Parámetro δ calculado en función del tiempo y diferentes condiciones de frontera, para dos tipos de suelo.

Ecuación de Parlange (Ec. 20)

Suelo arcilloso				
Tiempo (hr)	$h_1 = 0$ cm		$h_1 = 10$ cm	
	δ	σ^2	δ	σ^2
1.0	0.825	0.000		
5.0	0.825	0.000		
50.0	0.825	0.000	0.92	7×10^{-4}
100.0	0.825	0.000	0.92	8×10^{-4}
200.0	0.825	0.000	0.92	10^{-3}
250.0	0.825	0.000		

Suelo arenoso				
Tiempo (hr)	$h_1 = 0$ cm		$h_1 = 2.25$ cm	
	δ	σ^2	δ	σ^2
0.2	0.460	0.000_{-4}		
0.3	0.460	10_{-4}		
0.4	0.457	$2 \times 10_{-4}$	0.48	10_{-3}
0.5	0.456	$4 \times 10_{-4}$		
0.667	0.456	$8 \times 10_{-4}$		

de el punto de vista del comportamiento de sus parámetros con el tiempo y condiciones de frontera. Las pruebas comparativas efectuadas para dos diferentes condiciones de frontera en la superficie del suelo y dos tipos de suelo, permitieron obtener las siguientes conclusiones:

- Las tres primeras ecuaciones involucran sólo dos parámetros de ajuste lo cual constituye una ventaja desde el punto de vista práctico; la última ecuación utiliza al menos tres parámetros independientes, reduciendo en cierta medida su operatividad.
- Los parámetros involucrados en las ecuaciones de Kostia kov, Green y Ampt y Philip, son altamente dependientes del intervalo de tiempo para el cual han sido establecidos. Contrariamente a lo que generalmente es asumido, no debe atribuirse significado físico alguno a dichos parámetros de ajuste. Únicamente la ecuación de Parlange involucra parámetros independientes del tiempo, los cuales pueden considerarse que dependen del tipo de suelo.
- Ninguna de las cuatro ecuaciones puede ser usada con fines predictivos sin producir resultados erróneos. Con relación a esto, la aplicabilidad de la ecuación de Kostia kov es totalmente nula, mientras que en las otras tres ecuaciones es muy limitada e insuficiente.
- La inoperancia de las ecuaciones de infiltración de dos parámetros probadas para situaciones prácticas, con cambios en las condiciones de frontera parece ser evidente, mientras que la ecuación de tres parámetros en su forma actual aún presenta dificultades en su posibilidad predictiva. Sin embargo, una solución más reciente basada en el mismo enfoque de doble integración parece salvar este obstáculo (Haverkamp y Parlange, 1986).

Independientemente del tipo de suelo, el comportamiento con relación al tiempo del parámetro δ es significativamente constante. Sin embargo, al variar las condiciones de frontera el valor de δ varía ligeramente, lo cual muestra que el parámetro de ajuste no sólo es función del tipo de suelo, sino también de las condiciones de frontera. Un análisis gráfico más detallado efectuado en analogía con una solución en series de tiempo (Rendón, 1984), puso en evidencia que la influencia de δ en la precisión de la solución se incrementa importantemente cuando las fuerzas de gravedad gobiernan el proceso de flujo.

A pesar de que la ecuación de Parlange tiene la considerable ventaja sobre las otras ecuaciones de infiltración, de que los parámetros son constantes con el tiempo, toda vía no puede usarse con fines predictivos puesto que δ es función de las condiciones de frontera. Para salvar este obstáculo, una versión más reciente del método de doble integración ha sido desarrollada (Haverkamp y Parlange, 1986), la cual usa tres parámetros del suelo independientes, todos ellos constantes con el tiempo y condiciones de frontera.

CONCLUSIONES

Cuatro diferentes ecuaciones de infiltración: Kostia kov, Green y Ampt, Philip y Parlange fueron analizadas, des-

LITERATURA CITADA

- Bouwer, H. 1964. Unsaturated flow in ground-water hydrodynamics. *J. Hydr. Div. Amer. Soc. Civil Eng.* 90-H Y5, pp. 121-127.
- Brakensiek, D.L. 1977. Estimating the effective capillary pressure in the Green and Ampt infiltration equation. *Water Resour. Res.* 13: pp. 680-682.
- Childs, E.C. y N. Collis-George. 1950. The permeability of porous materials. *Proc. R. Soc. London, Serie A* (201), pp. 392-405.
- Green, W.A. y G.A. Ampt. 1911. Studies on soil physics. 1. The flow of air and water through soils. *J. Agric. Sci.* 4: pp. 1-24.
- Haverkamp, R. 1983. Résolution de l'équation de l'infiltration de l'eau dans le sol. Approches analytiques et numériques. Thèse de Docteur-ès-Sciences Physiques, Université Scientifique et Médicale de Grenoble, France.
- Haverkamp, R. y J.Y. Parlange. 1986. Infiltration under ponded conditions (part 3). A predictive equation based on physical parameters. *Soil Sci. Soc.*, en prensa.
- Haverkamp, R. y M. Vauclin. 1981. A comparative study of three forms of the Richards equation used for predicting one-dimensional infiltration in unsaturated soils. *Soil Sci. Am. J.* 45: pp. 13-20.
- Kostiakov, A.N. 1932. On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity of studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. *Trans. Com. Int. Soc. Soil Sci.* 6th Moscow, Part. A: pp. 17-21.
- Mein, R.G. y C.L. Larson. 1973. Modeling infiltration during a steady rain. *Water Resour. Res.* 9: pp. 384-394.
- Neuman, S.P. 1976. Wetting front pressure head in the infiltration model of Green and Ampt. *Water Resour. Res.* 12(3): pp. 564-566.
- Parlange, J.Y. 1975. A note on the Green and Ampt equation. *Soil Sci.* 119(6): pp. 466.
- Parlange, J.Y., R.D. Braddock, I. Lisle y R.E. Smith. 1982. Three parameter infiltration equations. *Soil Sci.* 133: pp. 337-341.
- Parlange, J.Y., R. Haverkamp y J. Touma. 1985. Infiltration under ponded conditions: 1. Optimal Analytical solution and comparison with experimental observations. *Soil Sci.* 139: pp. 305-311.
- Philip, J.R. 1955. Numerical solution of equations of the diffusion type with diffusivity-concentration dependent I. *Trans. Faraday Soc.* 51: pp. 885-892.
- Philip, J.R. 1957a. Numerical solution of equations of the diffusion type with diffusivity-concentration dependent II. *Austr. Jour. of Phys.* 10(2): pp. 29-42.
- Philip, J.R. 1957b. The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. *Soil Sci.* 83: pp. 345-357.
- Philip, J.R. 1969. Theory of infiltration. *Adv. Hydrosc.* 5: pp. 215-305. Academic Press, New York.
- Rawls, W.J. y D.L. Brakensiek. 1983. A procedure to predict Green and Ampt infiltration parameters. *Proc. Nat. Conference on Advances in Infiltration*: pp. 102-112. Ed. Amer. Soc. of Agri. Eng. Michigan.
- Rendon P., L. 1984. Etude comparative de six équations de l'infiltration. Mémoire DEA. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, France.
- Touma, J. 1984. Etude critique de la caractérisation hydrodynamique des sols non-saturés: rôle de l'air, influence de l'écoulement multidimensionnel de l'eau. Thèse de Docteur-ès-Sciences Physiques, Université Scientifique et Médicale de Grenoble, France.
- Youngs, E.G. 1968. An estimation of sorptivity for infiltration studies from moisture moment considerations. *Soil Sci.* 106(3): pp. 157-163.

EVALUACION DE PORTAINJERTOS Y CULTIVARES DE VID BAJO CONDICIONES DE LIMITACION DE AGUA: RELACIONES HIDRICAS INTERNAS ¹

Godoy Avila, C. ²
López Montoya, I. ²

RESUMEN

Con el propósito de validar la técnica presión-volumen como herramienta a utilizar para la evaluación de las relaciones hídricas de 24 portainjertos y dos cultivares de vid, bajo condiciones de limitación de agua, se realizó un estudio en el que se encontraron los siguientes resultados: Couderc 1616, Freedom SO#4, Harmony, AXR#1, J-1791, 110R y LN-33 presentaron los valores más bajos en lo que se refiere al Punto Inicial de Pérdida de Turgencia (PIPT), Potencial Osmótico a Turgencia Completa y Potencial Total a cero de Potencial de Presión, indicando ésto, que estos portainjertos son más tolerantes a la deficiencia de humedad impuesta, que en el presente trabajo fue de 69 días.

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the usefulness of the pressure-volume method as an evaluation tool for water relations of 24 grape rootstocks and two cultivars under limiting water conditions. It was found that Couderc 1616, Freedom SO#4, Harmony, AXR#1, J-1791, 110R y LN-33 showed the lowest values for initial turgor loss point (ITLP), osmotic potential at full hydration and leaf water potential at zero pressure potential, indicating that these rootstocks have drought tolerance to the water stress imposed, which lasted 69 days.

INTRODUCCION

La vid ha sido considerada muy resistente a condiciones de baja humedad en el suelo y se asegura que esta resistencia no se debe a una mayor habilidad para extraer agua del suelo, sino que es debida a su capacidad para balancear el abastecimiento de agua a través de las raíces y la que se pierde por transpiración (Winkler *et al.* 1974).

En lo que se refiere a la resistencia a sequía de los portainjertos, el "Institut Coopératif de Sélection de Bois et Plants de Vignes" proporciona una escala de resistencia a la sequía de los principales portainjertos, lista que encabeza el 110 de Richter y termina con los híbridos *riparia x rupestris* 3309 y 3306 a los que se asigna resistencia débil o ninguna (Oriolani y Vega, 1969) Cabe hacer notar que la evaluación de la resistencia a sequía de los diferentes portainjertos ha sido únicamente en el sistema radicular (número de raíces, longitud, peso seco, ángulo, etc.) y observando la marchitez temporal o permanente que se presenta en las hojas al variar la disponibilidad de agua.

Por otro lado, los genetistas generalmente seleccionan para tolerancia a sequía comparando la producción de los genotipos durante años en que ocurre sequía; sin embargo, este procedimiento requiere años de prueba y no está di-

señado para identificar las características morfológicas o fisiológicas de las plantas que están asociadas con tolerancia a sequía (Frank *et al.*, 1984).

El método presión-volumen (Tyree y Howmel, 1972) ha sido usado para evaluar tolerancia a sequía (Kyriakopoulos y Richter, 1981) y osmorregulación (Campbell *et al.*, 1979; Hinckler *et al.*, 1980; Ike y Thurtell, 1981) en plantas. Esta técnica también puede ser usada para medir el potencial osmótico (ψ_o) a turgencia completa, el potencial osmótico a plasmolisis o potencial de presión (ψ_p) igual a cero y el módulo de elasticidad (ϵ) (Richter, 1978). Adicionalmente ha sido establecido que la habilidad de las plantas para evitar la deshidratación de las hojas al mantener un contenido relativo de agua (CRA) alto en la hoja a potenciales hídricos (ψ_h) bajos (más negativos) pudiera ser interpretado como una indicación de tolerancia a sequía (Ike y Thurtell, 1981).

El presente trabajo tiene los objetivos siguientes:

- determinar los portainjertos que presentan condiciones de tolerancia a sequía, que servirán de sostén a una variedad productora de uva;
- validar la técnica presión-volumen como herramienta a utilizar para la evaluación de las relaciones hídricas de los diferentes portainjertos.

¹ Ponencia presentada en el XIX Congreso de la SMCS.

² INIFAP-CIAN. Torreón, Coah.

MATERIALES Y METODOS

El estudio se realizó en las instalaciones del Campo Agrícola Experimental "La Laguna" que se encuentra localizado en el municipio de Matamoros, Coahuila, México. Se utilizaron 25 sarmientos con una longitud de 30-35 cm y un diámetro de 1.0 ± 0.1 cm de 24 portainjertos y dos variedades de *Vitis vinifera*, una para vino y otra para mesa (Cuadro 1).

Antes de proporcionar el primer riego de auxilio el 22 de mayo (69 días después de la aplicación del primero) se realizó la curva característica de retención de agua en la hoja (curvas presión-volumen), usando la bomba de presión tipo Scholander. Las hojas fueron muestreadas a las 14.00 hr y se obtuvieron del 6° nudo del sarmiento y fueron colocadas en un tubo de ensaye el cual contenía 150 cc de agua destilada con el propósito de inducir la saturación de la hoja.

Una vez que se logró la saturación de la hoja (4-10 horas), se registró inmediatamente su peso, para luego ser cubierta con un trapo húmedo y ser colocada en la cámara de presión con su peciolo hacia arriba, después se colocó un tubo de ensaye con papel absorbente en su interior, el cual previamente había sido pesado, y se empezó a aplicar una presión de 0.15 MPa con nitrógeno gas, de tal forma que cualquier líquido que estuviera exudando la hoja era absorbido por el papel absorbente dentro del tubo, para luego pesarlo y obtener su peso final. Este mismo procedimiento fue repetido utilizándose incrementos de presión de 0.15 MPa en las primeras cinco lecturas, para luego ser reducidas a 0.10 MPa para las restantes.

El peso final de la hoja fue determinado después de remover la presión de la cámara, y para la obtención del peso seco se colocó la hoja en una estufa a una temperatura de 70°C por un período de 8-12 horas.

Se construyeron dos tipos de curvas de presión-volumen, (a) en la que se relacionó CRA^{-1} Vs potencial total de la hoja (ψ_h), para obtener el potencial osmótico a turgencia completa (ψ_o), y el potencial total de la hoja a 0 de potencial de presión (ψ_p), y (b) en la que se relacionó CRA Vs ψ_t para obtener el punto inicial de pérdida de turgencia (PIPT) (Melkonian *et al.*, 1982). El contenido relativo de agua en la hoja (CRA) fue calculado como sigue: $CRA = (V_o - \Sigma V_j) / V_o$, donde V_o es el volumen total de agua calculado por la diferencia entre el peso a saturación de la hoja y el peso seco de la misma y ΣV_j es el peso acumulado de la savia exudada de la hoja y colectada en los tubos de ensaye a cada intervalo de presión.

Para utilizar las curvas características de retención de humedad en la hoja (Figura 1) y poder seleccionar aquellos portainjertos que tuvieron tolerancia a deficiencias hídricas, se compararon las diferencias en el punto inicial de pérdida de turgencia (PIPT) de los portainjertos (Cuadro 2). La intersección del segmento lineal de la curva a potenciales hídricos (ψ_h) altos y del segmento que obedece a la Ley de Boyle-Van t-Hoff fue tomada como PIPT.

RESULTADOS Y DISCUSION

Los resultados en el Cuadro 2 muestran que los portainjertos Couderc 1616, Freedom S04, 110R, J-1791, AXR#1 y LN-33 mostraron un PIPT más negativo que todos los demás portainjertos, los cuales tuvieron un PIPT muy similar. Existen evidencias que un valor de PIPT bajo (más negativo) es una indicación de una disminución en el potencial osmótico (ψ_o) y un incremento en el módulo volumétrico de elasticidad (Melkonian *et al.*, 1982).

Cuadro 1. Portainjertos y cultivares de vid bajo estudio.

Couderc 1616	(<i>V. solonis</i> x <i>V. riparia</i>)
Freedom	(<i>V. Champini</i> x Couderc 1613)
Couderc 1202	(<i>V. vinifera</i> x <i>V. rupestris</i>)
A x R #1	(<i>V. vinifera</i> x <i>V. rupestris</i>)
J-1791	(<i>V. Champini</i> x <i>V. rupestris</i>)
J-7481	(<i>V. Champini</i> x <i>V. rupestris</i>)
K-49569	(<i>V. Champini</i> x <i>V. rupestris</i>)
K-51321"	(<i>V. Champini</i> x <i>V. rupestris</i>)
Ji-7c-9i	(<i>V. Champini</i> x <i>V. rupestris</i>)
S0 #4	(<i>V. Champini</i> x <i>V. rupestris</i>)
Foex-33EM	(<i>V. berlandieri</i> x <i>V. rupestris</i>)
Teleki-5A	(<i>V. berlandieri</i> x <i>V. rupestris</i>)
Kober 5BB	(<i>V. berlandieri</i> x <i>V. rupestris</i>)
Harmony	(Couderc 1613 x Dog Ridge)
LN-33	(Couderc 1613 x <i>V. vinifera</i>)
Couderc 1613	(<i>V. solonis</i> x Othello)
Rupestris San Jorge	(Var. de <i>V. rupestris</i>)
Rupestris Constantia	(Var. de <i>V. rupestris</i>)
Couderc 3309	(<i>V. riparia</i> x <i>V. rupestris</i>)
Salt Creek	(Var. de <i>V. Champini</i>)
Dog Ridge	(Var. de <i>V. Champini</i>)
41 B	(<i>V. vinifera</i> x <i>V. berlandieri</i>)
Cv. Carignan	
Cv. Queen	

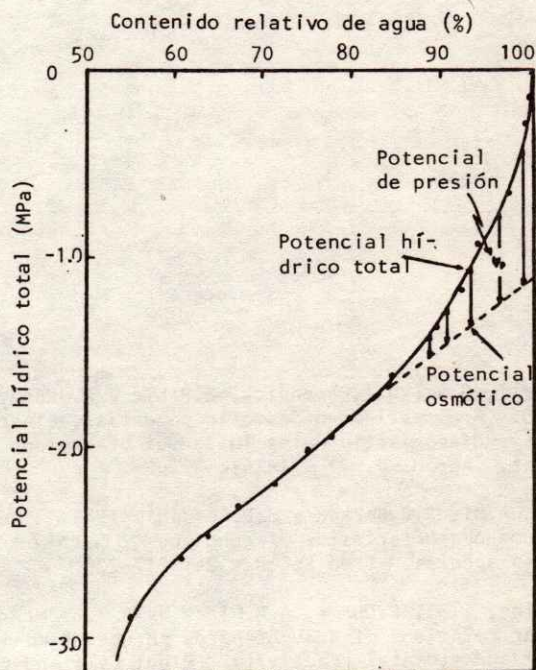


Figura 1. Curva presión-volumen relacionando el potencial hídrico total y el contenido relativo de agua en la hoja.

Cuadro 2. Potencial hídrico total a cero de potencial de presión, potencial osmótico a turgencia completa y punto inicial de pérdida de turgencia de portainjertos y variedades bajo limitación de agua.

Portainjertos	Ψ_o a Max Ψ_p (MPa)	Ψ_h a $\Psi_p = 0$ (MPa)	PIPT (MPa)
Freedom	- 1.99	- 2.64	- 1.90
Couderc 1616	- 2.03	- 2.51	- 1.90
J-1791	- 1.96	- 2.50	- 1.80
110R	- 1.99	- 2.47	- 1.71
A x R #1	- 1.95	- 2.42	- 1.65
S0 #4	- 2.00	- 2.41	- 1.75
LN-33	- 1.81	- 2.30	- 1.64
Couderc 1202	- 1.77	- 2.26	- 1.51
Dog Ridge	- 1.59	- 2.24	- 1.57
Couderc 1613	- 1.76	- 2.18	- 1.60
K-49569	- 1.76	- 2.07	- 1.39
Teleki-5A	- 1.47	- 1.97	- 1.34
J-7481	- 1.50	- 1.87	- 1.25
Kober 5BB	- 1.46	- 1.86	- 1.32
LN-33	- 1.48	- 1.86	- 1.20
Rupestris Constantia	- 1.51	- 1.79	- 1.40
Ji-7c-9i	- 1.46	- 1.76	- 1.29
Carignan	- 1.37	- 1.74	- 1.35
Queen	- 1.32	- 1.60	- 1.16
Harmony	- 1.30	- 1.72	- 1.15
41 B	- 1.30	- 1.71	- 1.17
K-51321	- 1.41	- 1.70	- 1.60
Couderc 3309	- 1.25	- 1.67	- 1.06
Foex-33EM	- 1.24	- 1.61	- 1.11
Salt Creek	- 1.26	- 1.57	- 1.04
Rupestris San Jorge	- 1.27	- 1.57	- 0.99
Tukey (0.05)	0.13	0.14	0.10

Con el propósito de definir el Ψ_o a turgencia completa y el potencial hídrico (Ψ_h) a cero de potencial de presión, el segmento de la curva que se comporta en forma lineal fue extrapolado al eje vertical para obtener el Ψ_o a turgencia completa, el Ψ_h a cero de Ψ_p fue localizado en la intersección de los segmentos lineal y no-lineal de la curva característica de retención de agua en la hoja.

Los portainjertos que mostraron valores más bajos en el Ψ_o a turgencia completa y Ψ_h a cero de Ψ_p son los mismos que presentaron el valor más bajo de PIPT (Cuadro 2). Un aumento en el Ψ_o generalmente está asociado con tolerancia a sequía y se parte del principio de que las células de especie tolerantes pueden mantener el Ψ_p alto (más positivo) a potencial hídrico (Ψ_h), bajos (más negativos) cuando se comparan con especies no tolerantes. Al mismo tiempo, plantas con un Ψ_o más bajo (más negativo) son consideradas capaces de retener una cantidad más grande de agua en el tejido a Ψ_t bajos.

Los datos del Cuadro 2 muestran diferencias entre los portainjertos, en los que se refiere al PIPT, Ψ_o a turgencia completa y Ψ_h a cero Ψ_p , por lo que se puede decir que existe cierta relación entre aquellos portainjertos que mostraron bajo (más negativo) PIPT, tuvieron también valores de Ψ_o a turgencia completa y Ψ_h a cero de Ψ_p bajos. En lo que se refiere a la pendiente de la parte lineal de las curvas, se puede decir que éstas están íntimamente ligadas a la concentración osmótica de la célula; y al observar las curvas de cada portainjerto y aquellas que tuvieron una pendiente más grande retuvieron más agua en el tejido a Ψ_h más bajos. En el mismo Cuadro 2, se puede observar que el comportamiento de las variedades estudiadas fue regular, siendo superadas por los portainjertos ya mencionados anteriormente como mejores, y algunos otros más.

CONCLUSIONES

- La técnica presión-volumen tiene potencial para identificar plantas con tolerancia a sequía, en este cultivo.
- Existen algunos portainjertos que pudieran ser utilizados como sostén para algunas variedades productoras de uva bajo condiciones de limitación de agua.

LITERATURA CITADA

- Campbell, G.S., R.I. Papendick, E. Rabie y A.J. Shayo-Ngowi. 1979. A comparison of osmotic potential, elastic modulus and apoplastic water in leaves of dryland winter wheat. *Agron. J.* 71: 31-36.
- Frank, A.B., R.E. Barker y J.D. Berdahl. 1984. Pressure-volume characteristics of genotypes of three wheat-grass species. *Crop Science* 24: 217-220.
- Hinckler, T.M., F. Duhme, A.R. Hinckley y H. Richter. 1980. Water relations of drought hardy shrubs: Osmotic potential and stomatal reactivity. *Plant Cell and Environment* 3: 131-140.
- Ike, I.F. y G.W. Thurtell. 1981. Osmotic adjustment in indoor grown cassava in response to water stress. *Physiol. Plant* 52: 257-262.
- Kyriakopoulos, E. y Hanno Richter. 1981. Pressure-Volume curves and drought injury. *Physiol. Plant* 52:124-128.
- Melkonian, J.J., J. Wolfe y P.L. Steponkus. 1982. Determination of the volumetric modulus of elasticity of wheat leaves by pressure-volume relations and the effect of drought conditioning. *Crop Science* 22:116-123.
- Oriolani J.C. y J. Vega. 1969. *Revista de Investigaciones Agropecuarias INTA*. Buenos Aires, Rep. Argentina Serie 2. *Biología y Producción Vegetal*. Vol. VI No.18.
- Richter, H. 1978. A diagram for the description of water relations in plant cells and organs. *J. Exp. Bot.* 29 (112): 1197-1203.

- Tyree, M.T. y H.T.Howmel. 1972. The measurement of the turgor pressure bomb technique. J. Exp. Bot. 23: 267-282.

- Tyree M.T. 1976. Physical parameters of the soil-plant-atmosphere system: Breeding for drought resistance characteristics that might improve wood yield. In:

Cawrel, M.G.R. y F.F.Last (ed.). Tree physiology and Yield Improvement. Academic Press, New York. p 329-348.

Winkler, A.J., J.A.Cook, W.M.Kliewer y L.A.Lider. 1974. General Viticulture (Revised and Enlarged Edition Originally published 1962). Univ. of California Press Berkeley and Los Angeles, USA.

EVALUACION DE PORTAINJERTOS Y CULTIVARES DE VID BAJO CONDICIONES DE LIMITACION DE AGUA: EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA (EUA) ¹

Godoy Avila, C. ²
López Montoya, I. ²

RESUMEN

El presente trabajo se realizó con el objetivo de conocer si existen diferencias en la eficiencia del uso del agua entre portainjertos y variedades de vid, con el propósito de seleccionar los más eficientes para producir uvas. Se encontró una alta correlación entre la evapotranspiración y la materia seca total, aun cuando los datos usados fueron para diferentes portainjertos. En el presente estudio el valor medio de eficiencia del uso del agua fue de 1.25 mg de materia seca/g de agua.

ABSTRACT

The main objective of this study was to determine the possible difference in water use efficiency between grape rootstocks and cultivars, so to select the most efficient ones to produce grapes. A close correlation between evapotranspiration and total dry matter was found, even though the data used were for different rootstocks. The average value of water use efficiency was 1.25 mg of dry matter per g of water.

INTRODUCCION

Frecuentemente se reporta que el mejorar prácticas de manejo tales como: fertilización, riegos, densidad de plantación, etc., aunado al mejoramiento de plantas, ha contribuido a elevar la producción del producto económico, por unidad de agua suministrada (Arnon, 1972, 1975; Begg y Turner, 1976); sin embargo, la eficiencia del uso del agua (EUA) definida como materia seca total por cantidad de agua transpirada no se ha modificado.

La eficiencia del uso del agua (EUA) basada en la acumulación de materia seca presenta dos problemas; primero la transpiración y la evaporación del suelo no pueden ser separadas, y segundo, las raíces normalmente no son consideradas cuando se mide la acumulación de materia seca (Fischer y Turner, 1978).

Experimentos realizados en tanques, sugieren que no existe una gran diferencia en EUA entre plantas de la misma forma de vida dentro de los grupos C₃ y C₄ (Dwyer y De Garmo, 1970; Henzell *et al.*, 1976). El presente trabajo tiene como objetivo principal el de conocer si existen diferencias en EUA entre portainjertos y variedades de vid con el propósito de seleccionar los más eficientes para producir uvas.

MATERIALES Y METODOS

El estudio se realizó en las instalaciones del Campo Agrícola Experimental "La Laguna", que se encuentra localizado en Matamoros, Coahuila, México. Antes del inicio del experimento se tomaron muestras de suelo para el análisis de textura y la determinación de los parámetros de

capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP) y densidad aparente (DA), para luego calcular la humedad aprovechable (cm) de cada estrato (Cuadro 1).

Se utilizaron 25 sarmientos, con una longitud de 30-35 cm y un diámetro de 1.0 ± 0.1 cm, de los portainjertos y variedades que se muestran en el Cuadro 2. Antes de establecerlos en el campo, éstos fueron colocados en "camas calientes" (18 de enero de 1984), con el propósito de acelerar la formación de raíces y la brotación en los sarmientos. La temperatura de la cama caliente se mantuvo en $24^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, siendo la temperatura del ambiente de 30°C . Los portainjertos fueron trasladados hacia macetas individuales (25 de febrero), cuya capacidad fue de 727 cc, las cuales contenían arena de lecho de río, previamente desinfectada con bromuro de metilo, utilizándose una libra de este producto por cada m^3 de arena. Posteriormente, el 14 de marzo, al momento de aplicar el riego, fueron establecidos en el lote experimental, utilizándose un espaciamiento de 2 m entre plantas y 3 m entre hileras, y fue precisamente a partir de la aplicación del riego, hasta antes de la aplicación del primer riego de auxilio (69 días después) en que se realizó un muestreo frecuente de la humedad del suelo, utilizándose para ello el dispersor de neutrones, realizándose los muestreos cada tres días.

Antes de proporcionar el primer riego de auxilio (69 días después del establecimiento), se procedió a extraer cuatro plantas completas de cada portainjerto y variedades para cuantificar el peso seco de las raíces y de la parte aérea (hojas + brote), utilizándose para ello una estufa de secado. Para secar las muestras se utilizó una temperatura de $65-70^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas.

¹ Ponencia presentada en el XIX Congreso Nacional de la SMCS.

² INIFAP-CIAN, Torreón, Coah.

Cuadro 1. Características físicas del sitio experimental. INIFAP-CIAN. 1984.

Profundidad	Textura	Capacidad de campo	Punto marchitez permanente	Densidad aparente	Agua disponible
cm		%	%	(g/cm ³)	cm
0 - 30	Migaj-Arc-Aren.	30.2	19.3	1.25	4.08
30 - 60	Migaj-Arc-Aren.	31.4	19.0	1.27	4.72
60 - 90	Migaj-Arc-Aren.	30.7	18.7	1.25	4.50

RESULTADOS Y DISCUSION

En el Cuadro 3 se muestra el peso seco de las raíces (PSR), el peso seco aéreo (PSA) y el total, así como la cantidad de agua consumida. La mayoría de los portainjertos, que presentaron una mayor acumulación de materia seca son: Couderc 1616, Freedom, C-1202, J-1791, SO # 4, Harmony, 110 y 99R y K-49569; observándose que coinciden con los que mostraron el punto inicial de pérdida de turgencia, potencial osmótico a saturación y potencial total a cero de potencial de presión más altos (más negativos) que se encontraron en el trabajo discutido anteriormente.

Se observa en dicho Cuadro, que aquellos portainjertos que desarrollaron un sistema radicular grande también desarrollaron un sistema aéreo grande, lo cual indica que éstos portainjertos tuvieron más habilidad para extraer la máxima cantidad de agua del suelo. Mas sin embargo,

Cuadro 2. Portainjertos y cultivares de vid bajo estudio.

Couderc 1616	(<i>V. solonis</i> x <i>V. riparia</i>)
Freedom	(<i>V. Champini</i> x Couderc 1613)
Couderc 1202	(<i>V. vinifera</i> x <i>V. rupestris</i>)
A x R #1	(<i>V. vinifera</i> x <i>V. rupestris</i>)
J-1791	(<i>V. Champini</i> x <i>V. rupestris</i>)
J-7481	(<i>V. Champini</i> x <i>V. rupestris</i>)
K-49569	(<i>V. Champini</i> x <i>V. rupestris</i>)
K-51321 ¹¹	(<i>V. Champini</i> x <i>V. rupestris</i>)
Ji-7c-9i	(<i>V. Champini</i> x <i>V. rupestris</i>)
SO #4	(<i>V. Champini</i> x <i>V. rupestris</i>)
Foex-33EM	(<i>V. berlandieri</i> x <i>V. rupestris</i>)
Teleki-5A	(<i>V. berlandieri</i> x <i>V. rupestris</i>)
Kober 5BB	(<i>V. berlandieri</i> x <i>V. rupestris</i>)
Harmony	(Couderc 1613 x Dog Ridge)
LN-33	(Couderc 1613 x <i>V. vinifera</i>)
Couderc 1613	(<i>V. solonis</i> x Othello)
Rupestris San Jorge	(Var. de <i>V. rupestris</i>)
Rupestris Constantia	(Var. de <i>V. rupestris</i>)
Couderc 3309	(<i>V. riparia</i> x <i>V. rupestris</i>)
Salt Creek	(Var. de <i>V. Champini</i>)
Dog Ridge	(Var. de <i>V. Champini</i>)
41 B	(<i>V. vinifera</i> x <i>V. berlandieri</i>)
Cv. Carignan	
Cv. Queen	

ahora es posible asumir que el mecanismo de resistencia a sequía está más directamente relacionado con la actividad de extracción y tal vez con la distribución del agua, que con la habilidad del sistema radicular para explorar grandes volúmenes de suelo, siendo este fenómeno consecuencia de la actividad absorbadora de los pelos radiculares (Branas, 1974).

Respecto a este estudio, se detectó que de los portainjertos Couderc 1616, Freedom, C-1202, J-1791, SO #4, 110R, del 100% del peso seco total de las raíces el 20, 32, 25, 45, 30 y 26%, respectivamente, correspondió a raíces con menos de o igual a 2 mm de diámetro.

En la relación entre la materia seca total producida y los litros de agua consumidos (Cuadro 3, Figura 1) a través de evapotranspiración de los 24 portainjertos y dos variedades, es evidente que existe una alta correlación entre estos parámetros, aun cuando los datos sean para diferentes portainjertos. La Figura 1 también sugiere que la pendiente de la línea no es modificada por deficiencias de agua en estas plantas, ya que el nivel de humedad en el suelo, al momento en que se sacaron las plantas, varió de 23 a 14% de humedad en base a peso seco. Estos datos concuerdan con otros estudiados (Anderson y Read, 1966; de Wit, 1958), de que se encontró que las deficiencias de humedad y nutricionales, muestran cambios relativamente pequeños en la eficiencia del uso del agua (EUA).

Cuadro 3. Peso seco aéreo, radical, total y agua consumida de 24 portainjertos y dos variedades de vid.

Portainjerto	Peso seco		Peso seco total	Agua consumida
	Aéreo	Radical		
	g		g	m ³
Couderc 1616	13.92	4.44	18.36	0.0160
Freedom	13.80	4.35	18.15	0.0163
C-1202	13.40	3.03	16.43	0.0155
K-49569	11.86	2.37	14.23	0.0126
J-1791	11.22	3.09	14.31	0.0120
SO #4	10.18	3.93	14.11	0.0131
99R	10.60	3.03	13.36	0.0123
Harmony	9.82	3.36	13.18	0.0125
110-R	9.76	1.29	11.05	0.0117
LN-33	5.82	3.45	9.27	0.0095
A x R #1	6.14	2.76	8.90	0.0082
Teleki-5A	6.06	1.98	8.04	0.0086
J-7481	5.66	2.49	8.15	0.0071
Couderc 1613	5.50	2.52	8.02	0.0086
Foex-33EM	5.28	2.13	7.41	0.0093
Kober 5BB	4.82	2.58	7.40	0.0087
K-51321	4.62	1.62	6.24	0.0070
Carignan	4.37	1.97	6.34	0.0073
Queen	4.20	2.02	6.22	0.0075
Rupestris Constantia	4.18	1.77	5.95	0.0072
Couderc 3309	3.64	2.07	5.71	0.0069
Salt Creek	3.82	1.38	5.20	0.0064
41 B	3.16	1.83	4.99	0.0060
Ji-7c-9i	3.20	1.53	4.73	0.0068
Dog Ridge	3.34	0.93	4.27	0.0046
Rupestris San Jorge	2.16	0.78	2.94	0.0042
Tukey (0.05)	1.44	0.34	1.70	

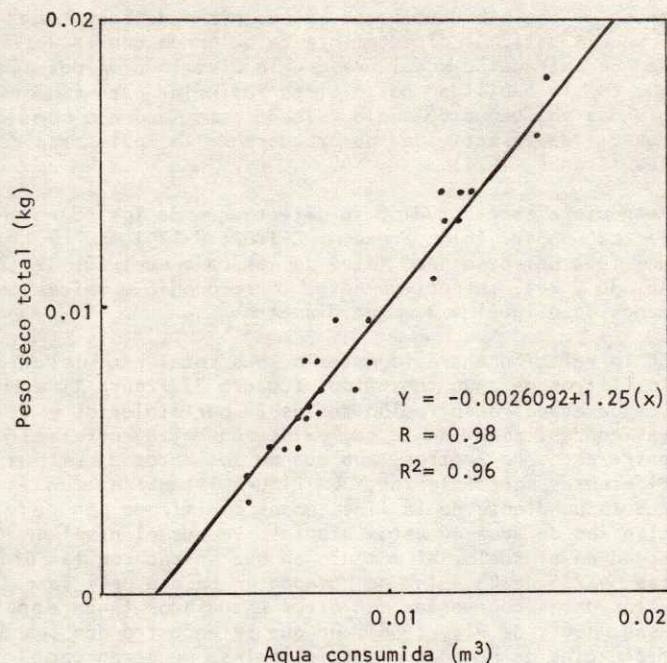


Figura 1. Relación entre materia seca total y agua consumida para 24 portainjertos y dos variedades.

Downes (1969), reagrupando datos de muchos experimentos realizados en tanques, calculó valores medios de eficiencia del uso del agua (EUA) de 1.5 y 3.3 mg de materia seca/g de agua para las especies C_3 y C_4 , respectivamente. En el presente estudio para los portainjertos y variedades de vid que pertenecen a la C_3 dicho valor fue de 1.25, siendo éste menor que el encontrado por Downes; mas sin embargo, cabe hacer mención de que cuando la transpiración de la planta y la evaporación del suelo no pueden ser separadas (como fue el caso del presente estudio), la eficiencia del uso del agua (EUA) calculada puede ser reducida de 20 a 50% cuando se trata de cultivos anuales y perennes, respectivamente (Fischer y Turner, 1978).

Finalmente, los datos presentados en la Figura 1 constituyen una buena evidencia para indicar que la acumulación de materia seca total está íntimamente ligada a la cantidad de agua evapotranspirada. Existiendo la limitante de que esta relación requiere otro tipo de estudio, esto es, el de provocar diferentes niveles de deficiencias de agua dentro de cada portainjerto y variedades y ver si los resultados se siguen manteniendo dentro de la relación encontrada en este estudio. Esto tiene trascendencia para en el futuro poder definir si es o no posible seleccionar plantas con el criterio de que sean más eficientes en el uso del agua.

CONCLUSIONES

- No existe diferencia en la eficiencia del uso del agua entre portainjertos y cultivares de vid siendo su valor de 1.25 mg de materia seca/g de agua.
- Una alta producción de materia seca provocada por una alta tasa de absorción de agua es conferida por una mayor actividad radical.

LITERATURA CITADA

- Anderson, C.D. y D.W.L. Read. 1966. Water-use efficiency of some varieties of wheat, oats, barley and flax grown in the green house. *Can. J. Plant Sci.* 46: 375-378.
- Arnon, I. 1972. Crop productivity in dry regions. Vol. I Background and principles. London: Hill 650 pp.
- Arnon, I. 1975. Physiological principles of dryland crop production. In: Physiological aspects of dryland farming. Ed. U.S. Gupta pp 3-145 New Delhi: Oxford and IBH 391 pp.
- Begg, J.E. y N.C. Turner. 1976. Crop water deficits. *Adv. Agron.* 28: 161-217.
- Branas, J. 1974. Viticulture. Dehan Montpellier. 990 pp.
- Downes, R.W. 1969. Differences in transpiration rates between tropical and temperate grasses under controlled conditions. *Planta* 88: 261-73.
- Dwyer, D.D. y H.C. de Garmo. 1970. Greenhouse productivity and water-use efficiency of selected desert shrubs and grasses under four soil-moisture levels. *New Mexico State Univ. Agric. Exp. Sta. Bull.* 570. 15 pp.
- Fischer, R.A. y N.C. Turner. 1978. Plant productivity in the arid and semi-arid zones. *Ann. Rev. Plant Physiology*: 29: 277-317.
- Godoy A., C. y I. López M. 1984. Evaluación de 19 combinaciones portainjerto-variedad en condiciones limitantes de agua. CIAN-INIFAP. Informe de Fruticultura Vol. 1: 743-757.
- Henzell, R.G., K.J. McCree, C.H.M. van Bavel y K.F. Schertz. 1976. Sorghum genotype variation in stomatal sensitivity to leaf water deficit. *Crop Sci.* 16: 660-62.
- Wit, C.T. de. 1958. Transpiration and crop yield. *Versl. Landbouwk. Onderz. (Agric. Res. Rep.)* 64(6): 1-88.

EL USO DE MODELOS EN IRRIGACION Y AREAS AFINES +

Palacios Vélez, O.L. *

RESUMEN

Se analizan algunos de los problemas con que se enfrenta el investigador al seleccionar o desarrollar, calibrar y validar los modelos matemáticos que resumen los resultados de la investigación y que permiten predecir nuevos valores de la variable dependiente. Los problemas de selección y desarrollo se ilustran con varios ejemplos tomados de la Irrigación y la Hidrología. Se analizan algunos de los problemas de calibración cuando se tienen funciones de una variable con un número reducido (no mayor de 3) de parámetros. Finalmente se explica la manera de mejor utilizar la información para calibrar y validar los modelos, estableciéndose la diferencia entre estos dos procesos, que muchas veces son equivocadamente confundidos.

ABSTRACT

The problems encountered during the selection, calibration and validation of mathematical models are analyzed. The models are used for describing the results of research and for prediction purposes. The problems of selection and development are illustrated with examples taken from the Irrigation and Hydrology fields. The problems of calibration and parameter identification are also discussed. The differences between calibration and validation procedures are emphasized.

INTRODUCCION

Los resultados de la mayor parte de los trabajos de investigación suelen sintetizarse en forma de un modelo matemático. Esto es una función que relaciona a la variable incógnita o dependiente, con las variables conocidas, de entrada o independientes, así como una serie de parámetros. El propósito de este trabajo es revisar algunos de los problemas con que se enfrenta el investigador al seleccionar o desarrollar un tipo de modelo, calibrarlo y validarlo. Los ejemplos que se mencionarán han sido tomados de la Hidrología y la Irrigación, pero los comentarios y recomendaciones son seguramente extensivos a otras áreas del conocimiento.

Este trabajo está orientado principalmente a los jóvenes investigadores, pero algunas de las observaciones pudieran ser de interés para investigadores más experimentados tanto de ésta como de otras áreas, si se acepta que el intercambio de puntos de vista entre personal de diferentes campos o con diferente formación puede reportar beneficios.

CLASIFICACION DE MODELOS

En un primer intento definiremos la palabra *modelo* como *cualquier sustituto material o inmaterial de un ente, fenómeno o cosa, de cuyo estudio es posible inferir, al menos bajo ciertas restricciones, el comportamiento del ente natural*. El uso de modelos en lugar de los entes naturales, se explica porque casi siempre el manejo del modelo resulta más económico, más cómodo, más rápido, etc.

Como todas las cosas, los modelos se pueden clasificar de muchas maneras. Una de estas clasificaciones se presenta en el Cuadro 1,

1. Modelos matemáticos o físicos.

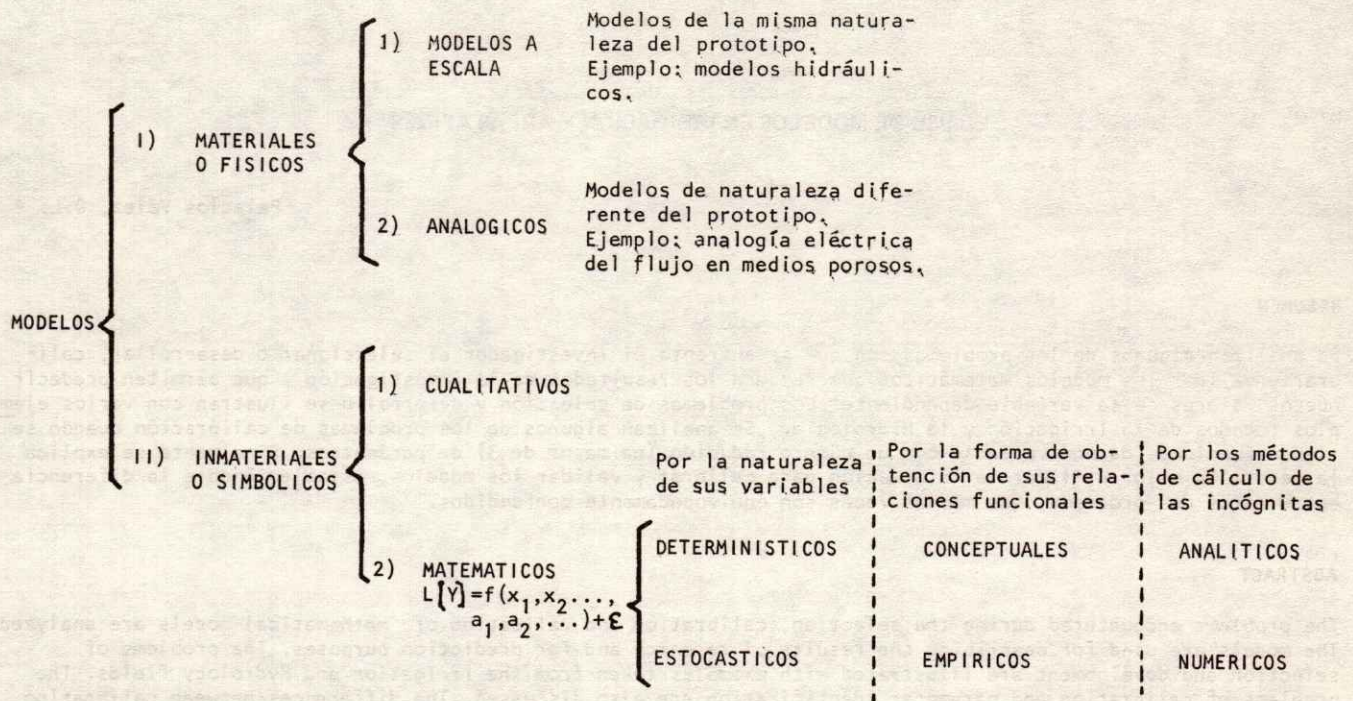
Estos pueden ser de la misma naturaleza que el ente estudiado o de naturaleza diferente. En el primer caso cae prácticamente toda la investigación agrícola en parcelas de campo. Asimismo cabe citar los modelos hidráulicos, todavía muy utilizados para el diseño de estructuras en ríos, canales, presas, etc. La gran ventaja de este tipo de modelos, donde básicamente sólo se han cambiado las escalas o los rangos de valor de algunas variables de estudio, es que sólo se hacen suposiciones sobre relaciones cuantitativas para obtener inferencias. La principal desventaja de estos modelos es su alto costo, así como el tiempo que requieren para su estudio. Normalmente sirven para apoyar la investigación básica, proporcionar información y servir para calibrar otros modelos, que serán los que se van a emplear más a menudo.

Los modelos analógicos son también físicos, pero de naturaleza diferente al ente estudiado, como pueden ser los modelos eléctricos que substituyen al suelo para hacer estudios del movimiento de agua subterránea. La fundamentación del uso de modelos analógicos la proporcionan la similitud de las ecuaciones que describen el comportamiento de variables correspondientes y los resultados obtenidos del estudio de estos modelos son tan buenos o fieles, como lo sean las ecuaciones generales. Actualmen

+ Ponencia presentada en el XVII Congreso Nacional de la S.M.C.S.

* Profesor Investigador del Centro de Hidrociencias del Colegio de Postgraduados.

Cuadro 1. Clasificación de los modelos según su naturaleza.



te, si se conoce la ecuación general que describe el comportamiento de alguna variable en un sistema natural, es preferible la utilización de modelos matemáticos, aún cuando las ecuaciones o la geometría, o la heterogeneidad de parámetros, o las condiciones iniciales y de frontera sean complicadas, puesto que los métodos numéricos utilizados, con ayuda de computadoras, permiten manejar estos problemas, sobre todo a medida que se desarrollan tanto las computadoras como los métodos numéricos. La tendencia actual es utilizar los modelos matemáticos en lugar de modelos analógicos.

2. Modelos inmateriales o simbólicos.

En estos modelos se maneja exclusivamente información, en forma de conceptos y símbolos, que tienen razón de ser cuando se les hace corresponder a cosas, actos o interacciones de los entes modelados.

La característica más sobresaliente de este tipo de modelos es que son representaciones en mayor o menor grado idealizadas de la realidad. Esto significa que en la construcción de cualquier modelo siempre será necesario hacer abstracción de un mayor o menor número de cosas o procesos; siempre será necesario esquematizar la realidad.

Los modelos cualitativos, como su nombre lo indica, no pretenden establecer relaciones cuantitativas fijas entre las variables del modelo y normalmente constituyen sólo un punto de partida para los modelos matemáticos, que son los que presentan mayor interés en la investigación y sobre los que se tratará de enfocar la atención de este trabajo,

Esquemáticamente un modelo matemático se puede representar como:

$$L [Y] = f(x_1, x_2, \dots, a_1, a_2, \dots) + \epsilon$$

Los modelos matemáticos, a su vez, pueden clasificarse de muchas maneras. Por ejemplo, según la naturaleza de las variables de entrada x_1, x_2, \dots , los modelos pueden ser determinísticos, si así lo son estas variables de entrada, o estocásticos si los valores provienen de alguna distribución estadística cuyos parámetros pueden también variar en el tiempo. De acuerdo con la naturaleza de la función "f" los modelos pueden ser conceptuales, si han sido deducidos de leyes físicas generales, correspondientes a los llamados modelos de caja blanca o transparente; mientras que si tal función es seleccionada arbitrariamente con la única restricción de ajustar a ciertos datos experimentales básicos los modelos son empíricos (Clarke, 1973). Otras veces la función "f" puede ser expresada a través de funciones matemáticas conocidas, casi siempre como resultado de la aplicación de métodos analíticos aunque la mayoría de las veces la función "f" sólo puede ser obtenida como tablas de valores numéricos, como resultado de un proceso de simulación en computadora.

Hablando en particular de modelos matemáticos es oportuno señalar que frecuentemente no se puede establecer una función explícita de la variable o variables desconocidas, en función de los parámetros y de las variables de entrada conocidas. Así por ejemplo, cuando se estudia el movimiento del agua tanto sobre la superficie del suelo, como bajo ella, ya sea en condiciones saturadas o no saturadas, frecuentemente lo que se da es una ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones diferenciales, que

relacionan a las variables incógnitas, como pueden ser el contenido de humedad, el tirante de aguas sobre la superficie, etc., con otras variables, como pueden ser las coordenadas en el espacio, el tiempo, y los parámetros suelen ser característicos del suelo, datos climatológicos, etc. Este tipo de modelos pueden ser considerados como modelos generales de clase y su particularización a condiciones concretas requieren de procesos de integración. Esta integración puede ser lograda por métodos analíticos sólo para condiciones muy simplificadas o esquematizadas y por métodos numéricos para condiciones más generales. La particularización a un caso concreto requiere de los siguientes tipos de datos:

- Determinación de la geometría del dominio espacial en estudio
- Variación de los parámetros característicos en el dominio espacial en estudio
- Condiciones iniciales (cuando se estudian problemas de flujo variable en el tiempo)
- Condiciones de frontera,

Las últimas dos condiciones ameritan comentarios, en particular las llamadas condiciones de frontera. Evidentemente que la naturaleza es una sola y cuando se estudia un aspecto separado o particular de la misma, es decir un sistema específico, la relación que guarda este sistema con el resto del universo debe también ser modelada a través de lo que ha dado en llamarse condiciones de frontera. Obviamente también es necesario simplificar o esquematizar estas condiciones.

Un buen entendimiento y una correcta consideración de las condiciones de frontera suele ser tan importante como las ecuaciones básicas que describen al proceso que se estudia. Puede aseverarse que una de las deficiencias más notables de muchos modelos que se estudian en Hidrología y en otras áreas del conocimiento son debidas a que no se modelaron adecuadamente las mencionadas condiciones. Para los investigadores que tienen una buena formación en matemáticas, en particular, en el empleo de ecuaciones diferenciales son derivadas parciales, la importancia de las condiciones de frontera es muy conocida, puesto que saben que la solución de una ecuación de este tipo se ve increíblemente afectada precisamente por ellas. Las ecuaciones diferenciales con derivadas parciales no tienen una solución general con simples constantes de integración, sino que la forma misma de la solución, su existencia y unicidad, dependen de las condiciones de frontera. Es decir, no se puede resolver una ecuación si no se especifican estas condiciones. Una situación menos marcada la tienen las ecuaciones diferenciales ordinarias, donde en general sí puede hablarse de una solución general, aunque la obtención de ésta se dificulta para órdenes superiores.

En muchos campos de la física las ecuaciones que describen al transporte de masa y energía son de segundo grado. Al estudiar problemas unidimensionales, que muchas veces son una buena aproximación de los problemas tridimensionales del mundo real, la integración de las ecuaciones que describen un proceso produce dos constantes de integración, cuyos valores se encuentran de las condiciones en las fronteras o bordes del segmento de estudio de la variable independiente, lo cual ejemplifica en su manera más simple la necesidad de tomar en cuenta estas condiciones, puesto que de otra manera el problema quedaría indeterminado. Cuando los modelos no son producto de la integración la consideración de las condiciones de frontera es menos obvia.

EJEMPLOS DE SELECCION Y EVALUACION DE MODELOS

Tal vez una buena manera de ilustrar los problemas de la selección o desarrollo de modelos sea mediante algunos ejemplos específicos. Obviamente estos ejemplos son de los más sencillos y tienen las siguientes características en común.

i) Se supone que se estudia una función continua de una sola variable. Observaciones similares podrían hacer se para funciones de más de una variable, pero su manejo es más difícil.

ii) La información de partida la constituyen una serie de pares de valores.

$$X_i, Y_i; i = 1, 2, \dots, n;$$

Donde:

X - La variable independiente o de entrada del modelo
Y_i - Las respuestas conocidas del sistema

iii) Se trata entonces de encontrar un modelo $Y = f(X)$, que sirva para predecir el valor de Y para cualquier valor de X. Se va a considerar que los valores calculados para Y no son necesariamente iguales a los valores observados. Desde luego existen procedimientos para obligar que los valores calculados sean estrictamente igual a los observados; pero su uso está restringido al caso de interpolación de funciones matemáticas y de problemas en los que se desprecia el error experimental. La condición más frecuente parece ser aquella en que se desea que la suma de las diferencias al cuadrado, entre los valores calculados y observados, sea mínima, adicionándose algunas veces restricciones complementarias.

1. Espaciamento de drenes agrícolas.

En este primer ejemplo vamos a considerar que las X_i son las sobre-elevaciones máximas del nivel freático en relación al nivel del agua en los drenes, mientras que las Y_i son los espaciamentos entre drenes (ver Fig. 1). Se aclara que en las áreas donde los niveles freáticos son muy elevados y constituyen un impedimento para la obtención de buenos rendimientos la construcción de drenes puede ser la solución adecuada. Evidentemente, entre más cercanos estén los drenes el efecto de abatimiento de los niveles freáticos es más grande, pero el costo por hectárea también resulta más elevado. Inversamente, drenes más espaciados son más económicos, pero su efecto es menor. Con fines de determinar un espaciamento óptimo, además de estudios teóricos diversos puede ser conveniente la experimentación local. Esta puede llevarse a cabo de diferentes maneras, por ejemplo mediante parcelas con drenes construidos a diferentes espaciamentos. Este enfoque limita la posibilidad de ensayar y medir el efecto de muchos espaciamentos, por lo que también se ha desarrollado otro enfoque, que consiste en construir drenes que en lugar de correr paralelamente se van abriendo, de manera que en diferentes partes se tienen los efectos de diferentes espaciamentos, y de esta manera se aumenta en cierta forma el valor de n.

Este tipo de problemas que se menciona en primer término ha sido estudiado desde hace mucho tiempo, sobre todo en el norte de Europa y en Estados Unidos, por lo que existe una teoría relativamente desarrollada, sobre el movimiento del agua en el suelo, que se basa en la ecuación de la continuidad y en la llamada Ley de Darcy,

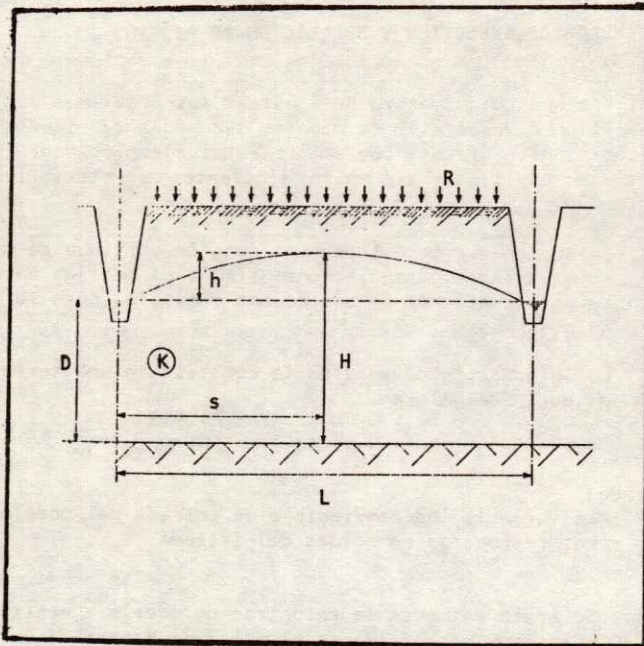


Figura 1. Esquema del diseño del drenaje subterráneo.

Ecuación de continuidad: (despreciando interacción con acuíferos profundos)

$$\frac{dq}{ds} = R \quad (1)$$

Donde:

q - Gasto hacia los drenes

s - Distancia horizontal

R - Recarga superficial media durante el período considerado, formada de agua de lluvia y/o riego,

Ley de Darcy: (despreciando las componentes verticales del gradiente)

$$q = -KH \frac{dH}{ds} \quad (2)$$

Donde:

K - Conductividad hidráulica

H - Espesor de la capa freática

De la solución de estas ecuaciones se obtiene la siguiente fórmula

$$L = \sqrt{\frac{8KH}{R}} \sqrt{h} \quad (3)$$

Donde:

L - Espaciamento entre drenes

H - Valor medio de H

h - Sobre elevación máxima del nivel freático en relación con el nivel del agua en los drenes. Su valor conveniente depende de la profundidad de los drenes y del cultivo.

Esta es una de las fórmulas más sencillas y más conocidas para calcular el espaciamento entre drenes. En este caso $X_i = \sqrt{h}$ y $Y_i = L$.

El radical que aparece en esta fórmula es un parámetro que depende tanto de las características del suelo (K), del flujo (H), como de la recarga media durante el período considerado (R), proveniente de la lluvia o del riego. Este parámetro podría ser determinado con base en el análisis de algunos de los datos disponibles, como se verá más adelante.

Aunque esta fórmula o modelo puede ser considerado como conceptual, el esquema para el cual se han formulado las ecuaciones 1 y 2 ha sido muy simplificado; por un lado se han ignorado los componentes verticales del movimiento del agua en el suelo, puesto que en la fórmula 2 sólo se ha considerado el gradiente en la dirección horizontal y en la fórmula 1 se ha considerado que la única variación del gasto hacia los drenes se debe a la recarga, ignorándose, para simplificar las cosas, las salidas subterráneas hacia acuíferos profundos o hacia terrenos laterales.

La mayor parte del desarrollo de la teoría del drenaje ha sido enfocado hacia la consideración de las componentes verticales del gasto, lo cual conduce a modelos más complejos que el ejemplificado con la fórmula 3, pero que tienen el mismo tipo de características negativas que se va a analizar a continuación.

De la fórmula 3 se observa claramente que la única manera de llegar a la conclusión que no se requieren drenes; es decir que L tiende a infinito, es cuando la h también tiende a infinito. Evidentemente esta situación no es correcta, puesto que si se incluyera un tratamiento testigo sin drenes, lo más probable es que a éste correspondiera una cierta h_0 , evidentemente mayor que cualquier h_i , pero de un valor finito y casi siempre inferior a la profundidad media prevista de los drenes, o cuando mucho igual a ésta, si es que el terreno se encuentra saturado en todo el perfil.

La capacidad predictiva del modelo puede ser incrementada si se corrige por este aspecto; es decir el modelo debería cumplir: $L \rightarrow \infty$ cuando $h \rightarrow h_0$. Para llegar a esta situación se podrían seguir dos caminos: a) el primero consistiría en modificar la ecuación (1) haciéndola más compleja, de manera de considerar los acuíferos profundos, sus niveles piezométricos, la situación en los terrenos adyacentes, etc. y b) un camino mucho más sencillo, aunque menos rigurosos, consiste en los siguientes pasos:

i) Se considera que en condiciones naturales de ausencia de drenaje, existen ciertos drenes hipotéticos espaciados a la distancia L_0 , calculada con la fórmula (3) cuando $h = h_0$. El efecto de estos hipotéticos drenes es equivalente al drenaje natural. En un corte transversal de ancho W se tiene $N_0 = \frac{W}{L_0}$ drenes naturales.

ii) Se considera que el espaciamento obtenido con la fórmula (3) se refiere al número de drenes necesarios en total: $N = \frac{W}{L}$.

iii) Los drenes que deben ser construidos son $N_C = N - N_0$ y como $N_C = \frac{W}{L}$ se obtiene:

$$L_C = \frac{L \cdot L_0}{L_0 - L} \quad (4)$$

substituyendo (3) en (4) se obtiene la siguiente fórmula corregida.

$$L_c = \sqrt{\frac{8KH}{R}} \frac{\sqrt{h} \sqrt{h_o}}{\sqrt{h_o} - \sqrt{h}} \quad (5)$$

Obsérvese ahora que el espaciamento se hace infinito cuando $h = h_o$. Esta fórmula corregida debe proporcionar una mejor estimación del parámetro $\sqrt{\frac{8KH}{R}}$,

así como mejores estimadores de L sobre todo para valores de X_i fuera del rango estudiado. Este procedimiento de corrección de fórmulas para el cálculo de espaciamento de drenaje puede ser utilizado en modelos más complicados, siguiendo los mismos pasos.

2. Escurrimiento en cuencas en función del tiempo

En este segundo ejemplo se analiza la variación temporal del escurrimiento en una cuenca. Se presentan dos enfoques de apariencia totalmente diferente, pero que en el fondo pueden ser equivalentes.

En primer enfoque obsérvese que el gasto es la variación del almacenamiento con relación al tiempo:

$$Q(t) = - \frac{dS(t)}{dt} \quad (6)$$

Donde:

$Q(t)$ - Gasto al tiempo t

$S(t)$ - Almacenamiento al tiempo t

También puede considerarse que el gasto es proporcional al almacenamiento existente;

$$Q(t) = C_1 S(t) \quad (7)$$

Donde:

C_1 - Constante de proporcionalidad

De las dos ecuaciones anteriores, mediante integración, se obtiene:

$$\ln S(t) = -C_1 t + C_2 \quad (8)$$

Donde:

C_2 - Constante de integración

Considerando la condición inicial

$$S(t) = 1 \text{ para } t = 0 \quad (9)$$

Se obtiene que $C_2 = 0$; es decir;

$$S(t) = e^{-C_1 t} \quad (10)$$

$$Q(t) = C_1 e^{-C_1 t} \quad (11)$$

Esta fórmula indica que para una entrada instantánea unitaria al principio del período de tiempo considerado, el gasto de escurrimiento es una función exponencial del tiempo,

Se puede demostrar que para el problema análogo, de considerar una lluvia de duración T en horas, con intensidad de $1/T$, se obtendría;

$$Q(t) = \frac{1}{T}(e^{TC_1} - 1) e^{-C_1 t} = Q_0 e^{-C_1 t} \quad (12)$$

Donde;

Q_0 - Correspondería al gasto al tiempo $t = 0$

Como puede verse, de una serie de observaciones, donde las X_i correspondieran a diferentes tiempos de medición y las Y_i correspondieran a diferentes gastos medidos, podrían calcularse los parámetros Q_0 y C_1 , de la ecuación (12). Los parámetros podrían ser fácilmente determinados por mínimos cuadrados, si se lineariza esta expresión:

$$\ln Q(t) = -C_1 t + \ln Q_0 \quad (13)$$

En este caso convendría conservar $X_i = t$; pero ahora $Y_i = \ln Q(t)$.

Un enfoque totalmente diferente se puede desarrollar a partir de la teoría de las Series de Tiempo (Salas, et al, 1980). Considérese que se tiene una serie de observaciones sobre el gasto a intervalos fijos de tiempo, Δt . Considérese también que los valores de los escurrimientos han sido normalizados. En tal situación se puede emplear el modelo autoregresivo,

$$Q_j = \alpha Q_{j-1} + \epsilon_j \quad (14)$$

Donde;

α - Es el coeficiente de autocorrelación;

$$\alpha = \frac{\sum_{j=1}^{n-1} (Q_j - \bar{Q})(Q_{j+1} - \bar{Q})}{\sum_{j=1}^n (Q_j - \bar{Q})^2} \quad (15)$$

ϵ - Error

El modelo (14) es equivalente al modelo (12), como se muestra a continuación;

Considerando al tiempo dividido en intervalos iguales Δt el gasto al final del primer intervalo de tiempo sería;

$$Q_1 = Q_0 e^{-C_1 \Delta t} \quad (16)$$

El gasto para el segundo intervalo sería:

$$Q_2 = Q_0 e^{-C_1 2\Delta t} = Q_0 e^{-C_1 \Delta t} \cdot e^{-C_1 \Delta t} = Q_1 \cdot e^{-C_1 \Delta t} \quad (17)$$

Como puede verse la fórmula (17) es equivalente a la No. (14), donde sólo faltaría adicionar el término de error y donde $\alpha = e^{-C_1 \Delta t}$.

Este ejemplo muestra que dos modelos de apariencia totalmente diferente, uno derivado de un desarrollo matemático conceptual y otro de apariencia empírica, tomado de la Teoría de las Series de Tiempo son básicamente equivalentes.

3. Infiltración del agua en el suelo

En este tercer ejemplo vamos a analizar la infiltración del agua en el suelo. El estudio de este proceso es muy importante para el diseño del riego superficial, estudio de la recarga de acuíferos y determinación del escurrimiento de cuencas hidrológicas. Una de las fórmulas que actualmente se utiliza más, fue deducida por Green & Ampt, partiendo del supuesto de que se tiene un flujo tipo "pistón", donde el agua que se infiltra va empujando a la que ya se infiltró, con un gradiente que es la dife

rencia de potencial entre la carga en la superficie menos el potencial en el frente de avance de la humedad y entre la profundidad humedecida. La fórmula que se obtiene es la siguiente:

$$I = Kt + (\theta_s - \theta_i)(h_o - h_z) \ln \left\{ 1 + \frac{I}{(\theta_s - \theta_i)(h_o - h_z)} \right\} \quad (18)$$

Donde:

- I - Infiltración acumulada
- t - Tiempo desde el inicio de la infiltración
- K - Conductividad Hidráulica a saturación
- θ_s - Humedad volumétrica de saturación
- θ_i - Humedad volumétrica inicial
- h_o - Carga o tirante de agua en la superficie del terreno
- h_z - Carga o potencial de humedad en el frente de avance del humedecimiento.

Este modelo es interesante por una serie de razones. En primer lugar y no obstante que ha sido derivado de condiciones simplificadas, donde se han ignorado los procesos difusivos o capilares de suelo, se ha observado que describe con buena aproximación el proceso real de la infiltración. Debe notarse, sin embargo, que la fórmula es implícita; es decir no es posible despejar la I, por lo que su valor debe ser obtenido por tanteos o en forma inversa; es decir fijar un valor de I y encontrar el valor correspondiente para el tiempo t. Finalmente puede verse que existen 5 parámetros los que con fines de calibración pueden ser reducidos a dos:

$$I = Kt + \lambda \ln \left\{ 1 + \frac{I}{\lambda} \right\} \quad (19)$$

Donde:

$$\lambda = (\theta_s - \theta_i)(h_o - h_z)$$

Los parámetros K y λ pueden ser obtenidos de pruebas de infiltración, pero para poder aplicar las fórmulas de regresión lineal simple, la ecuación (19) debe ser linealizada, por ejemplo en la forma indicada a continuación:

$$I' = Kt' + \lambda \quad (20)$$

Donde:

$$I' = \frac{I}{\ln \left\{ 1 + \frac{I}{\lambda} \right\}}$$

$$t' = \frac{t}{\ln \left\{ 1 + \frac{I}{\lambda} \right\}}$$

Para obtener los valores de K y λ se puede seguir el siguiente procedimiento iterativo.

- i) Supóngase un primer valor de λ
- ii) Calcúlense las nuevas variables I' y t'
- iii) Calcúlense los valores de K y λ usando métodos de la regresión lineal simple.
- iv) Si el valor del λ encontrado se diferencia significativamente del valor supuesto, repítanse las operaciones a partir del punto ii), con el nuevo valor de λ encontrado.

Se puede acelerar la convergencia usando un procedimiento de sobrerrelajación.

Una de las principales ventajas de los modelos conceptuales es que los parámetros que se obtienen están provistos de un significado físico concreto, lo cual permite señalar valores aproximados con anticipación a la realización de pruebas de campo, o bien es posible recalcular los parámetros cuando se cambian las condiciones de cam-

po. Por ejemplo, si se repitieran pruebas de infiltración en el mismo sitio, sería de esperarse que el parámetro K conservara el valor, que corresponde a la conductividad hidráulica a saturación del suelo. Por el contrario, sería de esperar un cambio en el valor de λ , que como puede verse en la fórmula (19), depende sobre todo del valor de la humedad inicial al principio de la prueba.

CALIBRACION Y VALIDACION DE MODELOS

Frecuentemente los datos disponibles $X_i, Y_i, i = 1, 2, \dots, n$, deben servir tanto para calibrar como para validar al modelo seleccionado o desarrollado. Estos son dos procesos complementarios pero excluyentes en cuanto a la información que utilizan. Vale la pena hacer algunos comentarios al respecto, porque lamentablemente no es raro que estos procesos se confundan, cuando se le da el mismo uso a toda la información disponible.

La calibración es la obtención de valores numéricos de los parámetros desconocidos del modelo, mientras que la validación es una medición de la capacidad predictiva del modelo, por ejemplo comparando valores calculados y observados, siempre y cuando estos últimos no hayan sido tomados en cuenta en el proceso de calibración, puesto que de otra forma sólo estaríamos midiendo la bondad de dicha calibración y no el poder predictivo del modelo.

Para evitar estas confusiones una forma de proceder podría ser dividir los datos disponibles en dos grupos, utilizando un subgrupo para encontrar los valores de los parámetros desconocidos, y utilizando el segundo subgrupo para comparar los valores calculados con los observados y de esta forma medir el poder predictivo del modelo.

Otra variante que permite una mejor utilización de la información, es que para cada observación, por ejemplo la K-ésima, se utilice las n-1 restantes para encontrar los valores de los parámetros y posteriormente se calcula el valor de la variable dependiente para esta K-ésima observación, que no fue tomada en cuenta en el proceso de calibración, y de esta manera se puede medir el valor predictivo del modelo para todas las observaciones disponibles.

El método más popular para determinar los parámetros de un modelo, que ha sido previamente linealizado, como se mostró en los ejemplos, es determinando los parámetros de la regresión lineal por mínimos cuadrados. Durante este proceso deben tenerse ciertos cuidados, como hacer siempre una representación gráfica, para evitar los problemas que se ilustran en las figuras 2-7, construidas con datos arbitrarios.

En la figura No. 2 se muestran tres rectas, una que minimiza la suma de $(Y - Y_i)^2$, que es la más empleada, pero que presupone que no existen errores en las X_i ; una segunda línea que minimiza la suma de $(X - X_i)^2$ que se pone solamente para comparación con la anterior y una tercera línea que minimiza la suma de los cuadrados de las distancias medidas perpendicularmente de cada punto hacia la recta de regresión. Esta última es mucho menos conocida y debe observarse que no se obtiene promediando las pendientes de las rectas anteriores, como podría pensarse y en cierta forma toma en cuenta tanto los errores en X como en Y.

Los comentarios que se hacen a continuación se refieren a rectas que minimizan la suma $(Y - Y_i)^2$, que son las más empleadas, puesto que frecuentemente las X_i son mediciones cuyo error se desprecia.

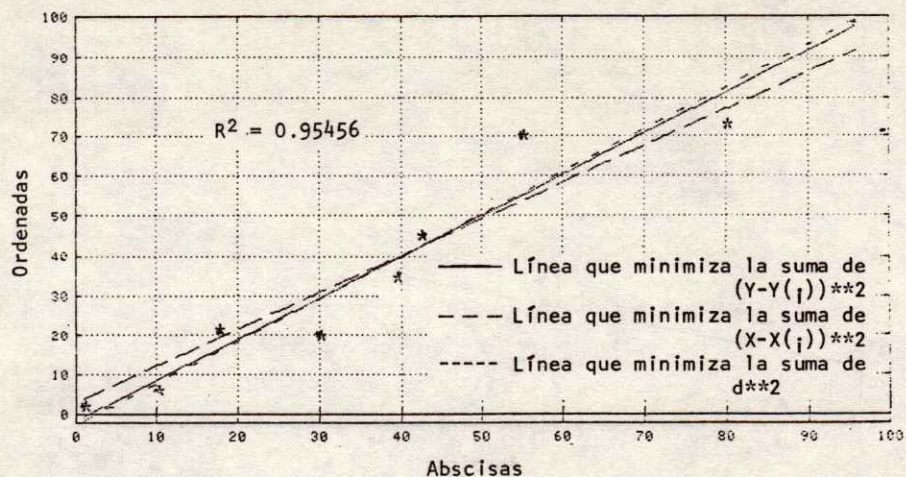


Figura 2. Diferentes líneas de regresión.

En la figura No. 3 se presenta un caso típico de regresión lineal con un alto coeficiente de correlación. En la figura 4 se presenta una recta correspondiente a los mismos puntos de la figura anterior, en los que se ha cambiado un punto que pudiera corresponder a una observación equivocada y que, como puede observarse, reduce significativamente el coeficiente de correlación. Es evidente que si se llega a demostrar que este punto corresponde a un dato por alguna razón equivocada y se elimina, se mejora substancialmente la correlación.

Asimismo, en la figura No. 5 se indican una serie de puntos cuyo coeficiente de correlación es prácticamente nulo y en la figura 6 se muestran los mismos puntos en los que se ha cambiado uno que pudiera estar equivocado, pero que hace que se defina una recta de regresión falsa, con un coeficiente de correlación más elevado que el anterior.

Finalmente en la Figura 7 se presentan una serie de puntos que corresponden exactamente a una circunferencia pero que si sus coordenadas se utilizan para encontrar los parámetros de una recta, el coeficiente de correlación resulta muy bajo. Esto significa que pudiera ser conveniente seleccionar nuevas variables, calculadas en función de las originales como fue ilustrado en los ejemplos que se mencionan anteriormente.

RECOMENDACIONES SOBRE LA SELECCION Y DESARROLLO DE LOS MODELOS

1. Uno de los primeros problemas a que se enfrenta el investigador es determinar hasta qué grado es conveniente simplificar o esquematizar un proceso, con fines de deducir un modelo conceptual que lo represente. El equivalen

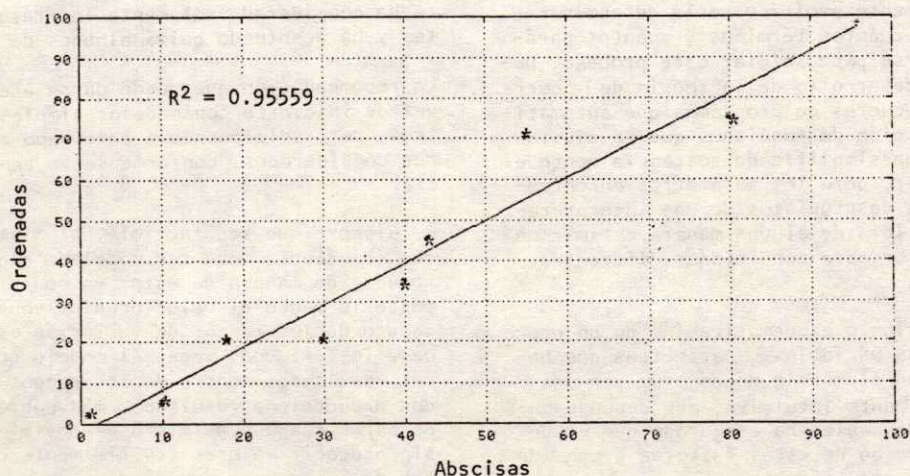


Figura 3. Regresión con alto valor de R².

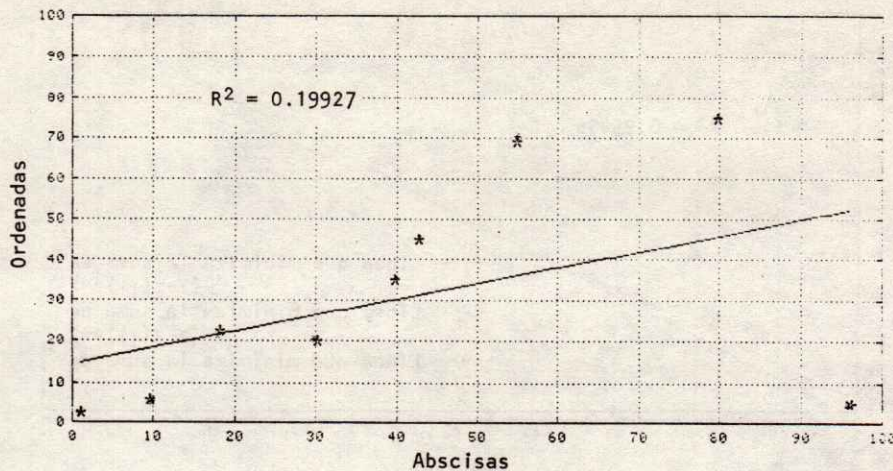


Figura 4. Efecto sobre R^2 de un dato equivocado

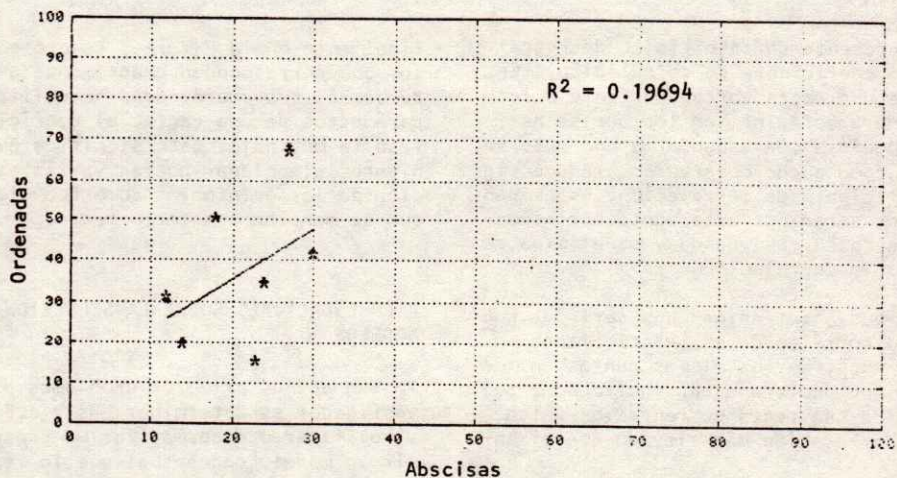


Figura 5. Regresión lineal con bajo valor de R^2 .

te en el enfoque totalmente empírico sería determinar qué tipo de funciones, cuántos términos y cuántos parámetros deben considerarse para iniciar este proceso. Debe mencionarse que el desarrollo de la teoría de la correlación múltiple y de paquetes de programas que automatizan el proceso de selección de funciones que se ajustan mejor a puntos dados, ha simplificado sustancialmente el trabajo del investigador, pero los parámetros encontrados de esta forma están desprovistos de una interpretación física, que permitiera de alguna manera estimar de forma aproximada su valor para condiciones diferentes del medio observado.

El grado de simplificación o esquematización de un proceso y la selección de las variables y parámetros que habrán de ser incluidos en el modelo no deja de ser una operación hasta cierto punto intuitiva, que depende mucho del investigador. Hay quien ha asegurado que es un verdadero arte la selección de estos factores a considerar, estableciéndose la analogía con un caricaturista. Como se sabe, un buen caricaturista con unos cuantos rasgos es capaz de representar de manera reconocible la figura de una persona, muchas veces con la misma seguridad con que lo haría una fotografía. Sin embargo el dibujante

ha considerado solamente los rasgos más sobresalientes y ha acentuado quizá algunos de estos rasgos.

La recomendación que puede darse a este respecto es tal vez de iniciarse con modelos simples, con pocos parámetros, pero adicionando o cambiando algunos de los factores considerados, conforme se va teniendo más experiencia.

2. Siempre que sea factible, el mismo proceso o fenómeno que se estudia debe ser modelado siguiendo diferentes enfoques, de manera de estar en posibilidades de comparar posteriormente el valor predictivo de los modelos, tanto dentro de los rangos de variación estudiados como fuera de ellos. Algunas veces el modelo que predice los mejores resultados dentro de los rangos de variación estudiados proporciona resultados más pobres o irreales fuera de estos rangos. Asimismo es posible que otros modelos sin predecir valores tan fielmente como el anterior dentro de los rangos estudiados, sean capaces de dar valores más razonables fuera de dichos rangos, sea porque han tomado en consideración de mejor manera las condiciones de frontera o porque se han incluido más parámetros o simplemente porque está mejor estructurado.

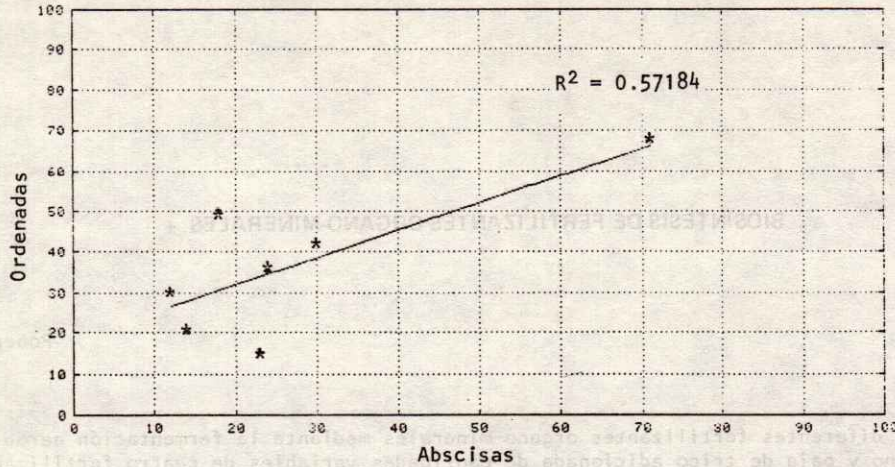


Figura 6. Efecto sobre R² de un dato equivocado.

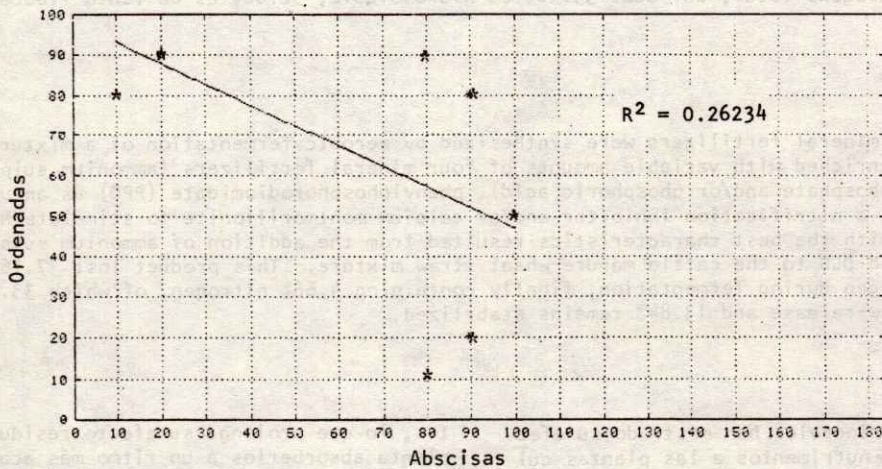


Figura 7. Bajo valor de R² para puntos sobre una circunferencia.

3. Parece que existe la tendencia de probar los modelos menos de lo necesario, puesto que con cierta frecuencia se encuentran fórmulas que al analizarse detenidamente muestran propiedades indeseables. Una buena recomendación para tratar de mejorar los modelos y encontrar posibles errores u omisiones, es buscar que otras personas, que no hayan intervenido en el desarrollo de tal modelo, sean las encargadas de probarlo. De esta manera se nos señalarán omisiones o errores que nosotros, por haber participado demasiado cerca en todo el proceso, hemos pasado por alto.

4. Es conveniente dedicar atención especial a la documentación del modelo; es decir a la descripción detallada que permita que otro grupo de gentes sea capaz de entender las suposiciones básicas y de usar el modelo con otros datos. Es también conveniente que por lo menos una parte de esta documentación esté redactada de manera simple, sin utilizar la terminología muchas veces incomprendible de los especialistas, para que incluso personal no-técnico o de otras especialidades pueda saber de qué se trata (Meadows et al., 1982).

5. Finalmente, es deseable que los posibles usuarios del modelo participen en todo lo posible, desde el desarrollo y prueba del mismo, porque de esta manera es más probable que posteriormente lo utilicen.

LITERATURA CITADA

1. Clarke, R.T. 1973. A review of some mathematical models used in Hydrology with observation on their calibration and use. J. of Hydrology, 19, pp. 1-20.
2. Salas J.D., J.W.Delleur, V.Yevjevich y W.L.Lane.1980. Applied modelling of hydrologic time series. Water Resources Publication, Fort Collins, Co.
3. Meadows D., J.Richardson y G.Bruckmann. 1982. Groping in the dark: The first decade of global modelling. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, U.K.

BIOSINTESIS DE FERTILIZANTES ORGANO-MINERALES +

Roberto Núñez E.¹

RESUMEN

Se sintetizaron nueve diferentes fertilizantes organo-minerales mediante la fermentación aeróbica de una mezcla de estiércol bovino y paja de trigo adicionada de cantidades variables de cuatro fertilizantes minerales (sulfato de amonio, fosfato monoamónico, urea fosfato y/o ácido fosfórico), fenilfosforo diamidato (PPD) como inhibidor de ureasa, dicianodiamida (DCD) como inhibidor de nitrificación y/o montmorillonita cálcica como estimuladora de la síntesis de ácidos húmicos. El producto con mejores características resultó de la adición de sulfato de amonio, fosfato monoamónico, PPD y DCD a la mezcla de estiércol bovino y paja de trigo, el cual perdió 37.16% de su peso seco y 17.32% de su N total durante la fermentación, para contener al final de la misma, 4.66% de nitrógeno total, del cual 33.48% es hidrosoluble, 52.68% es de lenta liberación y 13.84% queda estabilizado.

ABSTRACT

Nine different organo-mineral fertilizers were synthesized by aerobic fermentation of a mixture of cattle manure and wheat straw enriched with variable amounts of four mineral fertilizers (ammonium sulphate, monoammonium phosphate, urea phosphate and/or phosphoric acid), phenylphosphorodiamidate (PPD) as an urease inhibitor dicyandiamide (DCD) as a nitrification inhibitor and/or calcium montmorillonite to stimulate humic acid synthesis. The product with the best characteristics resulted from the addition of ammonium sulphate, monoammonium phosphate, PPD and DCD to the cattle manure-wheat straw mixture. This product lost 37.16% dry matter and 17.32% total nitrogen during fermentation, finally containing 4.66% nitrogen, of which 33.48% is water soluble, 52.68% is slow-release and 13.84% remains stabilized.

INTRODUCCION

Los fertilizantes químicos minerales han mostrado su efectividad como proveedores de nutrientes a las plantas cultivadas y por ello su uso se ha generalizado en todo el mundo, ayudando a elevar los rendimientos, para alimentar una población cada vez mayor. Sin embargo, en ocasiones su alto costo los hace inaccesibles al agricultor, especialmente en países de bajo desarrollo tecnológico. Por otra parte, los fertilizantes químicos pueden mostrar algunas limitaciones en ciertas condiciones, como son su bajo efecto residual, su susceptibilidad a pérdidas por lixiviación o volatilización y sus reacciones con los minerales del suelo, que reducen su aprovechabilidad para las plantas.

Por su parte, los abonos orgánicos muestran la ventaja de favorecer las propiedades físicas del suelo y en general tienen un efecto residual más prolongado; sin embargo, tienen la limitación de contener un porcentaje bajo y generalmente desbalanceado de nutrientes para las plantas, por lo que tienen costos elevados de transporte y manejo.

Los fertilizantes organo-minerales resultan de la combinación de fertilizantes químicos y abonos orgánicos. Su síntesis tiene por objeto reunir en un solo producto las ventajas de los materiales que les dan origen; es decir, lograr una concentración nutricional suficientemente elevada y balanceada, con una liberación lenta de nutrientes,

lo que prolonga su efecto residual y permite a la planta absorberlos a un ritmo más acorde con su requerimiento fisiológico. Con ello se reducen los riesgos de pérdidas por lixiviación, volatilización y fijación.

El trabajo aquí reportado fue realizado por el autor en su período sabático en el Centro Internacional para el Desarrollo de los Fertilizantes (IFDC) y tuvo por objeto la síntesis de fertilizantes organo-minerales a partir de estiércol vacuno fermentado en presencia de fertilizantes nitrogenados que contenían ¹⁵N, para detectar las transformaciones y persistencia del nitrógeno en el proceso, así como la tasa de absorción de este elemento por las plantas en el producto final. Se adicionaron también fertilizantes fosfatados e inhibidores de la hidrólisis de ureasa y de la nitrificación, tratando de estimular la incorporación bioquímica del nitrógeno en la estructura de los radicales orgánicos, para impartirle así la propiedad de liberación lenta.

REVISIÓN DE LITERATURA

Existen varias patentes sobre la amonificación de materia orgánica para elevar su valor fertilizante (Murray y Horn, 1979), usando principalmente turba o desechos de la fabricación de celulosa; sin embargo, el nitrógeno en

+ Ponencia presentada en el XVII Congreso Nacional de la SMCS.

¹ Profesor-investigador del Colegio de Postgraduados, Chapingo, Méx.

estos materiales se libera tan lentamente que no abastece el requerimiento de cultivos anuales. Por el contrario, cuando se adicionan fertilizantes amoniacales a estiércol antes de su fermentación, se alcanzan valores de pH francamente alcalinos y la mayor parte del nitrógeno agregado se pierde por volatilización de amoníaco. Durante el proceso de humificación del material orgánico, un 50% del nitrógeno se incorpora a los ácidos húmicos en forma heterocíclica, que es muy estable y por lo tanto, poco aprovechable a las plantas (Flaig, 1978). El nitrógeno hidrolizable en HCl 6 N es la fuente principal de nitrógeno aprovechable para la nutrición de las plantas y de los microorganismos del suelo (Bremner, 1965). Este nitrógeno se encuentra unido por adición nucleofílica de aminoácidos o péptidos a derivados de catecol y de hidroxiquinonas (Flaig, 1978). Paralelamente con la adición nucleofílica tiene lugar una desaminación de los aminoácidos, por la cual el nitrógeno pasa a amoníaco, que puede perderse por volatilización si el pH es superior a 7.5.

La adición de montmorillonita al estiércol en fermentación, además de retener el amoníaco que se libera, ayuda a mejorar la producción de humus. Filip *et al.* (1972) obtuvieron casi seis veces más ácidos húmicos cuando agregaron 1% de montmorillonita a un cultivo de *Epicoccum nigrum*.

El fenil-fósforodiamidato (PPD) está reconocido como un inhibidor de la ureasa, por lo tanto su adición a la materia orgánica en fermentación se espera que favorezca la aminación. El mismo efecto puede esperarse de la dicianodiamida (DCD), ya que por su capacidad inhibidora de la nitrificación (Amberger, 1981) mantiene el nitrógeno dentro del material en humificación, en una forma susceptible de incorporación al complejo orgánico.

El uso de fertilizante nitrogenado marcado con ^{15}N en la síntesis de fertilizantes organo-minerales, ha ayudado a identificar los procesos bioquímicos en los que el nitrógeno mineral participa, durante la humificación del material orgánico (Szegő, 1977).

MATERIALES Y METODOS

El trabajo experimental consistió en la biosíntesis de fertilizantes organo-minerales mediante la fermentación aeróbica de una mezcla de estiércol fresco de ganado bovino lechero (conteniendo 78.2% de humedad) y paja de trigo seca y molida a trozos máximos de 1 cm. Se tuvieron dos repeticiones de los 10 tratamientos que se reportan en el Cuadro 1. El tratamiento 1 es el testigo y los nueve restantes llevaron cantidades variables de montmorillonita cálcica, sulfato de amonio (SA), fosfato monoamónico (MAP), urea-fosfato (UP), ácido fosfórico, fenilfósforodiamidato (PPD) y/o dicianodiamida (DCD). Los fertilizantes nitrogenados contenían 4.8% de exceso atómico de ^{15}N , excepto para los tratamientos 4 y 9. Las aportaciones de nitrógeno y fósforo de los materiales orgánicos y minerales de cada tratamiento se reportan en el Cuadro 2. En los tratamientos 2 al 10 se hicieron aplicaciones de fosfato monoamónico, urea-fosfato o ácido fosfórico en cantidades tales que proporcionaran a cada tratamiento una cantidad constante de 13.89 gr de fósforo por unidad experimental; sobre esta aplicación y para los tratamientos 2 al 8 se agregó una cantidad de sulfato de amonio, urea-fosfato o DCD (según el tratamiento) suficiente para elevar el contenido total de nitrógeno a 57.37 gr por unidad experimental.

El ácido fosfórico y la montmorillonita cálcica fueron agregados en su totalidad al instalarse el ensayo; en cambio las demás fuentes de N y P, incluyendo la DCD fueron

Cuadro 1. Relación de componentes orgánicos y minerales en el ensayo de biosíntesis de fertilizantes organo-minerales.

Tratamiento	Estiércol (kg)	Paja (kg)	Montmorillonita cálcica (g)	Fuentes de N y P*	PPD (g)	DCD (g)
1	6.0	0.3	0	ninguna	0	0
2	6.0	0.3	30	SA + MAP	1	6
3	6.0	0.3	0	SA + MAP	1	6
4	6.0	0.3	30	MAP**+DCD**	1	20.6
5	6.0	0.3	30	SA + UP	1	6
6	6.0	0.3	30	SA + MAP	1	0
7	6.0	0.3	30	SA + MAP	0	6
8	6.0	0.3	0	SA + MAP	0	0
9	6.0	0.3	0	MAP**	0	0
10	6.0	0.3	0	H ₃ PO ₄	0	0

* Marcadas con 4.8% de exceso atómico de ^{15}N .

** Sin exceso de ^{15}N .

Cuadro 2. Contribución de nitrógeno y fósforo (g/unidad experimental) de los componentes orgánicos y minerales.

Tratamiento	Nitrógeno (g) en:			Fósforo (g) en:		
	Estiércol + paja	Fertilizantes	Total	Estiércol + paja	Fertilizantes	Total
1	37.26	0	37.26	8.61	0	8.61
2	37.26	20.11	57.37	8.61	13.89	22.5
3	37.26	20.11	57.37	8.61	13.89	22.5
4	37.26	20.10	57.36	8.61	13.89	22.5
5	37.26	20.10	57.36	8.61	13.89	22.5
6	37.26	20.11	57.37	8.61	13.89	22.5
7	37.26	20.11	57.37	8.61	13.89	22.5
8	37.26	20.12	57.38	8.61	13.89	22.5
9	37.26	6.27	43.53	8.61	13.89	22.5
10	37.26	0	37.26	8.61	13.89	22.5

aplicadas la novena parte al establecerse el ensayo y el resto en otras ocho fracciones iguales semanales, durante las nueve semanas que duró la fermentación. Para su aplicación a la mezcla de paja y estiércol, estos materiales se disolvieron en 900 ml de agua, de tal forma que se aplicaban 100 ml de solución semanalmente a cada unidad experimental. El PPD se aplicó en tres fracciones iguales, una al inicio y las restantes una cada tres semanas.

El material estuvo bajo fermentación en recipientes de plástico sin tapa, con base de 28x33 cm, en un local cerrado, con temperaturas ambientales mínimas de 20°C. Las temperaturas más altas registradas en el material bajo fermentación fueron de unos 40°C.

Cada tres semanas se muestrearon las unidades experimentales para determinar contenido de humedad y de carbono, nitrógeno y fósforo totales. Al final del período de fermentación se determinaron también los contenidos de nitrógeno en forma de urea, amonio y nitratos, así como nitrógeno hidrolizable en HCl 6 N y el porcentaje de exceso atómico de ^{15}N en cada fracción. Adicionalmente se determinó el contenido de ácidos húmicos en cada unidad experimental.

RESULTADOS Y DISCUSION

Pérdida de materia seca

Las pérdidas de materia seca pueden atribuirse fundamentalmente a la oxidación microbiana de la materia orgánica, liberándose en forma de CO_2 . Casi la totalidad de las pérdidas de materia seca en los distintos tratamientos, ocurrió durante las primeras tres semanas de fermentación. En el Cuadro 3 puede observarse que el tratamiento testigo perdió el mayor porcentaje de su peso de materia seca (47.73% del peso inicial), mientras que el tratamiento 8 sufrió la menor pérdida (33.99%). El alto contenido de DCD del tratamiento 4 no evitó la oxidación de la materia orgánica, ya que su peso de materia seca se abatió en 40.61%, valor mayor al de otros tratamientos con menor contenido de DCD.

Cambios en el pH del sustrato

El pH inicial del estiércol fue de 4.46. Una semana después permanecía abajo de 5 en todos los tratamientos, según se observa en la Figura 1; sin embargo, al cabo de dos semanas alcanzó valores de 8.4 a 8.5 en todos los tratamientos, excepto el número 10, tratado con H_3PO_4 , que alcanzó un pH de sólo 6.5. Al cabo de tres semanas el pH de este tratamiento llegó a 7.5, que fue su máximo valor, mientras que el de todos los demás tratamientos permanecía entre 8.3 y 8.6. A partir de esta fecha en todos los casos el pH empezó a descender con diferente velocidad según el tratamiento, de tal forma que a partir de la quinta semana el pH más alto correspondió al testigo, (manteniéndose arriba de 7.5 hasta el final de la séptima semana) y el más bajo a los tratamientos que llevaron sulfato de amonio y fosfato monoamónico. Los tratamientos con ácido fosfórico, urea-fosfato o alta dosis de DCD conservaron valores de pH intermedios; sin embargo, al cabo de las nueve semanas las diferencias entre tratamientos para esta variable tendieron a minimizarse, variando sólo entre 6.4 y 7.0.

El pH del sustrato durante su fermentación, tiene gran importancia en la conservación del nitrógeno, ya que con valores superiores a 7.5 empieza a haber liberación de amoníaco a partir del ión amonio. El ácido fosfórico tuvo por lo tanto un efecto amortiguador del pH manteniendo en el sustrato el amonio resultante de la amonificación de las formas nitrogenadas de la materia orgánica. El fosfato monoamónico a diferencia del ácido fosfórico, no fue aplicado en su totalidad al inicio de la fermentación, sino en fracciones semanales iguales; por lo tanto su efecto amortiguador del pH se manifestó hasta la cuarta semana.

Cuadro 3. Pérdida de peso de materia seca durante la fermentación del sustrato en los distintos tratamientos ensayados.

Tratamiento	Materia seca (g)		M.S. perdida (% de la inicial)
	Inicial	Final	
1	1607	840	47.73
2	1650	1020	38.18
3	1620	1018	37.16
4	1640	974	40.61
5	1648	968	41.26
6	1651	1065	35.49
7	1649	1039	36.99
8	1621	1070	33.99
9	1613	908	43.71
10	1651	998	39.55

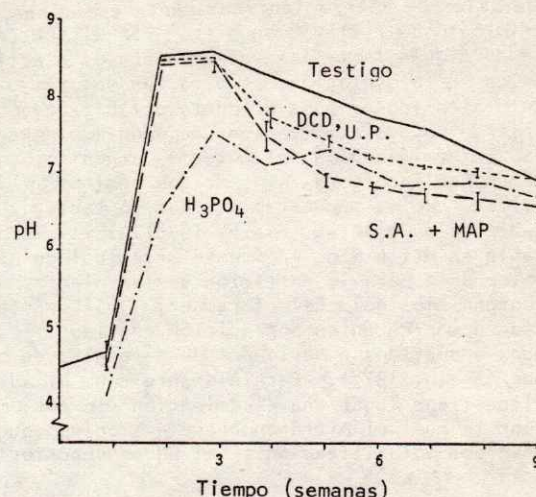


Figura 1. Valores de pH de los diferentes tratamientos durante su fermentación.

Cuadro 4. Contenido de N total al final de la fermentación y pérdidas de este elemento durante el proceso en los diferentes tratamientos.

Tratamiento	Contenido final de N_t (%)		N_t perdido (% del inicial)	^{15}N perdido (% del N químico agregado)
	Teórico*	Real		
1	4.436	3.445	22.34	- 1.21**
2	5.625	4.595	18.31	26.20
3	5.636	4.660	17.32	25.21
4	5.890	4.895	16.89	- 2.67
5	5.926	4.380	26.09	36.10
6	5.388	4.365	18.99	26.24
7	5.522	4.500	18.51	24.65
8	5.363	4.130	22.99	28.84
9	4.794	3.540	26.16	- 4.46
10	3.734	3.315	11.22	- 4.46**

* Si no hubieran ocurrido pérdidas de N.

** % del N total inicial.

Contenido de nitrógeno

En el Cuadro 4 se reporta la concentración teórica de nitrógeno total que se hubiera obtenido si no hubiera ocurrido volatilización de amoníaco. Aparecen también las concentraciones de nitrógeno realmente presentes al final de la fermentación. Con estos datos se calculó el porcentaje del nitrógeno total inicial, perdido por volatilización. Por otra parte el uso de ^{15}N en los fertilizantes químicos empleados, permitió conocer el porcentaje de nitrógeno químico agregado, que se perdió por volatilización.

De acuerdo a las concentraciones de nitrógeno total obtenidas al final de la fermentación, puede observarse que la mayor concentración (4.895%) correspondió al tratamiento 4, que llevó una alta fracción de nitrógeno químico en forma de dicianodiamida (DCD), lo cual comprueba el carácter estabilizador de este producto, sobre el nitrógeno de la materia orgánica y de hecho se le usa en Europa con este fin, agregándolo al estiércol que se usará posteriormente como abono. La limitación para su uso en México es su alto costo.

El más bajo contenido de nitrógeno total correspondió a los tratamientos 1 y 10 por no haber llevado complementación con nitrógeno químico, así como el tratamiento 9, por haberlo llevado en pequeña cantidad. La mínima pérdida de N total (11.22%) correspondió al tratamiento 10, que llevó H_3PO_4 . El testigo en general sufrió mayores pérdidas de nitrógeno que los tratamientos adicionados de sulfato de amonio y MAP, a excepción del tratamiento 9 que llevó una cantidad muy pequeña de este último fertilizante. Aparte de éste, la mayor pérdida de nitrógeno correspondió al tratamiento 5, adicionado de urea-fosfato, lo cual demuestra la inestabilidad del nitrógeno de la urea, aunque ésta vaya asociada al ácido fosfórico. La DCD en pequeñas cantidades (aportando 7% del N total), la arcilla o el PPD en las dosis empleadas, no tuvieron efecto sobre la conservación del nitrógeno durante la fermentación.

Mediante la determinación del porcentaje de exceso atómico de ^{15}N en cada tratamiento al final de la fermentación, pudo detectarse que 36.10% del N aplicado como urea-fosfato y sulfato de amonio se perdió por volatilización en el tratamiento 5. Las pérdidas de N químico en los tratamientos adicionados de SA + MAP variaron entre 24.65 y 28.84%, proveniente en su mayor parte quizás del sulfato de amonio, ya que el tratamiento 9, que llevó solamente MAP tuvo una ganancia de ^{15}N de 4.46%. Los tratamientos 1, 4 y 10, que como el 9 no llevaron ^{15}N , también acusaron ganancias de este isótopo, lo cual no necesariamente representa una ganancia de este elemento en el sustrato, sino que puede tratarse de un intercambio de formas gaseosas, ya que las unidades experimentales se encontraban en un local cerrado.

Formas de nitrógeno

Es importante conocer las diferentes formas del nitrógeno presente en cada tratamiento, ya que de ellas depende su grado de aprovechabilidad en un determinado lapso de tiempo. Las formas nitríticas y amoniacales, por ser hidrosolubles e intercambiables, son inmediatamente aprovechables; la fracción hidrolizable en HCl 6 N es la que se considera disponible durante el desarrollo de un cultivo anual y si a ella se le sustrae el N nitrítico y amoniacal, se obtiene la fracción considerada de lenta liberación. La diferencia entre estas formas y el N total constituye el N considerado estable, que sólo será disponible en forma parcial en cultivos subsecuentes. Será deseable, por lo tanto, que esta última fracción sea reducida para no tener inactivo por mucho tiempo un insumo costoso. Por otra parte es deseable que la fracción de liberación lenta sea elevada, ya que siendo disponible a un cultivo anual, está mejor protegida que las formas hidrosolubles e intercambiables, contra pérdidas por lixiviación o volatilización.

Hechas las consideraciones anteriores, puede observarse en el Cuadro 5 que los tratamientos 1, 9 y 10, que fueron los que llevaron las mínimas adiciones de nitrógeno químico, son también los que muestran los más bajos porcentajes de nitrógeno hidrolizable. En el Cuadro 6 se observa que los tratamientos 3, 4 y 5 contienen más de la mitad de su nitrógeno en forma lentamente aprovechable, pero disponible en un ciclo de cultivo; en cambio los tratamientos 1, 9 y 10 son los que muestran los máximos porcentajes de nitrógeno estable, no aprovechable en el ciclo de su aplicación al suelo. Los mínimos porcentajes de nitrógeno estable corresponden a los tratamientos 2 y 3.

Según datos reportados en el Cuadro 7, el contenido de ácidos húmicos osciló entre 12.81 y 17.09%. El mínimo contenido de ácidos húmicos correspondió al tratamiento tes

Cuadro 5. Concentraciones de tres formas de nitrógeno al final de la fermentación, para cada tratamiento.

Tratamiento	Porcentaje del N total		
	N-NH ₄	N-NO ₃	N-Hid*
1	2.03	6.47	55.59
2	32.32	0.54	82.05
3	33.48	0.00	86.16
4	14.10	0.82	73.34
5	23.33	2.24	81.74
6	41.70	0.80	76.98
7	32.22	1.89	69.11
8	42.98	0.00	78.45
9	20.03	0.42	55.23
10	18.79	3.41	52.94

* N hidrolizable en HCl 6 N.

tigo, que por otra parte fue el que tuvo las mayores pérdidas de materia seca (ver Cuadro 3), lo cual indica que en este tratamiento se favoreció en mayor grado la oxidación completa de la materia orgánica hasta CO_2 . Los más altos contenidos de ácidos húmicos se registraron en los tratamientos 4 y 5, que llevaron DCD en alta dosis y urea-fosfato, respectivamente. El hecho de que el tratamiento 3 haya mostrado un mayor contenido de ácidos húmicos que el 2, no apoya la hipótesis de que la montmorillonita estimule la síntesis de dichos ácidos.

Cuadro 6. Concentración de tres formas de nitrógeno con diferente grado de disponibilidad, al final de la fermentación.

Tratamiento	Porcentaje del nitrógeno total		
	Hidrosoluble	Liberación lenta	Estable
1	8.50	47.09	44.41
2	32.86	49.19	17.95
3	33.48	52.68	13.84
4	14.92	58.42	26.66
5	25.57	56.17	18.26
6	42.50	34.48	23.02
7	34.11	35.00	30.89
8	42.98	35.47	21.55
9	20.45	34.78	44.77
10	22.20	30.74	47.06

Cuadro 7. Contenido de ácidos húmicos (%), carbono total (%) y relación C/N en los diferentes tratamientos, al final de nueve semanas de fermentación.

Tratamiento	Ácidos húmicos (%)	Carbono total (%)	Relación C/N
1	12.81	31.5	9.14
2	14.00	29.7	6.46
3	16.50	29.7	6.37
4	17.09	30.4	6.21
5	17.05	29.9	6.83
6	15.01	29.4	6.73
7	15.35	28.9	6.42
8	13.76	27.3	6.61
9	15.29	30.4	8.59
10	14.56	30.9	9.32

Contenido de carbono total

El contenido de carbono total varió entre 27.3 y 31.5% en los diferentes tratamientos, como puede observarse en el Cuadro 7. Los mayores contenidos de carbono total al final del proceso de fermentación correspondieron, como era de esperarse, a aquellos tratamientos que llevaron el mínimo de aditivos no carbonaceos, siendo éstos los tratamientos 1, 4, 9 y 10. Todos los demás tratamientos tuvieron un contenido de carbono inferior al 30%.

Relación carbono/nitrógeno

Los tratamientos 1 y 10, que no llevaron complemento de nitrógeno químico, mostraron las más amplias relaciones C/N (Cuadro 7), siendo éstas de 9.14 y 9.32, respectivamente. En cambio los tratamientos 2 a 8, que llevaron un complemento de 20.1 g de nitrógeno químico en forma de sulfato de amonio, fosfato monoamónico, urea-fosfato o dicianodiamida, tuvieron relaciones C/N entre 6.21 y 6.83. Finalmente, el tratamiento 9, que llevó un complemento de sólo 6.27 g de nitrógeno químico, mostró una relación C/N intermedia, con valor de 8.59. Por el orden de magnitud de la relación C/N y por las concentraciones de las diferentes formas de nitrógeno en los productos finales, es de esperarse una liberación de nitrógeno aprovechable con todos los tratamientos, pero en mayor grado a partir de los tratamientos 2 a 8.

Contenido final de fósforo y relación de nitrógeno/fósforo

En vista de que todos los tratamientos excepto el 1 llevaron adiciones de fósforo inorgánico, el contenido de este elemento en los tratamientos 2 a 10 varió de 1.975 a 2.240%, como puede observarse en el Cuadro 8. El tratamiento 1 contenía solamente 0.82% de fósforo. Los valores determinados analíticamente son muy semejantes a los calculados en base a las adiciones iniciales y a las pérdidas de materia seca durante la fermentación.

La relación N/P más amplia correspondió al tratamiento 1 por no haber llevado adiciones de fósforo químico; las bajas correspondieron a los tratamientos 9 y 10 por haber llevado poco o nada de nitrógeno químico. Todos los demás tratamientos mostraron relaciones N/P de alrededor de 2. La óptima relación N/P en un tratamiento de fertilización depende de las características del suelo y del cultivo, pero en general oscila de 2/1 a 4/1 en suelos no fijadores de fosfatos.

CONCLUSIONES

- Las características ideales en un fertilizante organo-mineral pueden resumirse como sigue: (a) Pérdidas mínimas de nitrógeno durante el proceso de fermentación. (b) Un contenido final elevado de nitrógeno total, que eleve la densidad económica del producto. (c) Una adecuada relación N/P, semejante a la requerida por los cultivos. (d) Una fracción baja de nitrógeno estabilizado, un alto porcentaje de nitrógeno de lenta liberación, y una cantidad moderada de nitrógeno hidrosoluble para el desarrollo inicial del cultivo.

Cuadro 8. Contenido final de fósforo y relación N/P en los diferentes tratamientos.

Tratamiento	Contenido final de P (%)		Relación N/P
	Calculado	Analizado	
1	1.025	0.820	4.20
2	2.206	2.165	2.12
3	2.210	2.240	2.08
4	2.310	2.115	2.31
5	2.324	2.245	1.95
6	2.113	2.100	2.08
7	2.166	2.145	2.10
8	2.103	1.965	2.10
9	2.478	2.235	1.58
10	2.255	2.030	1.63

- En base a las características anteriores, puede concluirse que los tratamientos 2, 3, 4, 6 y 7 produjeron los materiales finales de mayor contenido de nitrógeno, con mínimas pérdidas de este elemento durante la fermentación; de éstos, los números 2, 3 y 4 fueron los que contuvieron mayor porcentaje de su nitrógeno en forma de lenta liberación y de ellos el número 3 fue el que tuvo la mínima fracción en forma estable. Por lo tanto, es factible la biosíntesis de un fertilizante organo-mineral de características aceptables a partir de la fermentación de una mezcla de estiércol y paja, adicionados de sulfato de amonio, fosfato monoamónico y pequeñas cantidades de inhibidores de nitrificación y de hidrólisis de urea.

LITERATURA CITADA

- Amberger, A. 1981. Dicyandiamide as a nitrification inhibitor. In: Proceedings of the technical workshop on dicyandiamide. Muscle Shoals, Alabama, USA.
- Bremner, J.M. 1965. Organic forms of nitrogen. Capítulo 8 de Methods of Soil Analysis. Agronomy Monograph 9. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.
- Filip, Z., K.Haider y J.P.Martin. 1972. Influence of clay minerals on growth and metabolic activity of *Epilobium nigrum* and *Stachybotrys chartarum*. Soil Biol. Biochem. 4: 135-145.
- Flaig, W. 1978. Specific effects of soil organic matter on the potential of soil productivity. In: Biochemistry of soil organic matter. Boletín FAO de Suelos No. 27: 31-69.
- Murray, T.P. y R.C.Horn. 1979. Organic nitrogen compounds for use as fertilizers. Boletín técnico T-14. International Fertilizer Development Center. Muscle Shoals, Alabama, USA.
- Szegi, J. (editor) 1977. Proceedings of the Symposium on Soil Microbiology. Akademia Kiado, Budapest.

EL PASTO SALADO EN EL EX-LAGO DE TEXCOCO. I. PRODUCCION DE SEMILLA¹

Antonio Becerra M. 2
Bernardo Nava M. 2
Alejandro Velázquez L. 2
Miguel Tarín V. 2

RESUMEN

Con anterioridad se ha planteado utilizar el pasto salado *Distichlis spicata* L. Greene para integrar a la productividad algunas áreas altamente salino-sódicas del país, aprovechando las experiencias obtenidas con la pastización del ex-lago de Texcoco; sin embargo, en el ex-lago la propagación ha sido vegetativa, debido a que en el área el pasto no produce semilla o la produce en mínima cantidad. Con el fin de determinar bajo que condiciones de suelo se favorece la producción de semilla y en que magnitud se alcanza ésta, desde 1982 se viene desarrollando investigación en el ex-lago. A la fecha se han concluido dos experimentos en macetas y algunas observaciones de campo, habiendo definido que: (a) ambos sexos de la planta toleran niveles similares de salinidad en el suelo; (b) la producción de semilla se inhibe fuertemente con una salinidad en el suelo mayor de 20 mmhos/cm; (c) es posible obtener hasta 70 kg/ha de semilla de pasto, siempre que el suelo tenga menos de 15 mmhos/cm y se riegue suficientemente. Aunque faltan muchos aspectos por estudiar a este problema, los resultados obtenidos indican que es factible la producción de semilla del pasto salado con fines de su propagación.

ABSTRACT

Previously, it has been proposed to make use of the salt marsh grass *Distichlis spicata* L. Greene to reclaim some highly saline-alkaline areas, making use of the experience obtained in the Texcoco ex-lake. Nevertheless, the propagation of salt marsh grass in this area has been vegetative due to the fact that it does not produce seed or that its yield is tiny. Since 1982, a research is being conducted by the Texcoco Lake Commission with the purpose to determine under which soil conditions this seed is produced. From two pot experiments and some land observations, the following conclusions have been reached: (a) both sexes of this plant tolerate similar soil salinity; (b) the seed yield is strongly inhibited with soil salinity of more than 20 mmhos/cm; (c) it is possible to produce up to 70 kg/ha of salt marsh grass seed, if the soil salinity is lower than 15 mmhos/cm, and the grass has been adequately irrigated. Although several aspects of this problem still need to be studied, the obtained results indicate that it is feasible to produce salt marsh grass seed with the purpose of its propagation.

INTRODUCCION

Debido al fuerte ensalitramiento de los suelos, algunas extensiones considerables de terreno permanecen improductivas o sub-explotadas en México, principalmente en zonas costeras, en lagunas saladas que han sido desecadas y en áreas adyacentes a los Distritos de Riego del país o incluso dentro de ellos. La recuperación de estos terrenos para fines agronómicos es poco factible en muchos casos, al menos para cultivos comunes; sin embargo, la explotación agropecuaria de áreas con esta problemática es posible mediante la propagación del pasto salado y su utilización con fines pecuarios, de acuerdo con experiencias obtenidas en varios años de pastización y pruebas con ganado en el ex-lago de Texcoco (Llerena y Tarín, 1980).

Buscando una mayor rapidez y economía en el proceso de propagación artificial del pasto salado, el cual ha sido

hasta la fecha sólo vegetativo, en la Comisión del Lago de Texcoco se viene desarrollando algunas investigaciones tendientes a explorar la factibilidad de propagarlo por semilla, definiéndose dos aspectos por investigar: (a) la producción de la semilla, y (b) rompimiento de la latencia en la semilla.

En el primer caso, hay que considerar que las causas de la no producción de semilla en el pasto salado pueden ser complejas, incluyendo factores genéticos, fisiológicos y nutrimentales entre otros. Al menos en estos dos últimos, la excesiva salinidad del suelo en el ex-lago puede ser determinante, y con este enfoque se han desarrollado dos experimentos en el área, cuyos resultados principales se discuten en el presente artículo. Los objetivos básicos que se plantearon son: (a) determinar el rango de salinidad en el cual el pasto puede producir semilla, (b) la magnitud en que este se produce y (c) determinar la época del año en que ocurre el período reproductivo del pasto.

¹ Aunque este artículo es responsabilidad de los autores, la experimentación correspondiente fue desarrollada con la iniciativa y apoyo constante del Ing. M.C. F. Alberto Llerena V., ex-Jefe del Programa Agrícola de la Comisión del Lago de Texcoco.

² Técnico de la Comisión del Lago de Texcoco, SARH, México.

ANTECEDENTES

Descripción y distribución del pasto

El pasto salado *Distichlis spicata* L. Greene es una graminéa dioica, perenne, con desarrollo de rizomas y estolones fuertes y puntiagudos, lo cual es importante para la propagación del pasto. Crece en diversas partes del mundo, y según Mellink y Quintanilla (1979), en México se le encuentra en la mitad de las entidades federativas, principalmente en la parte norte y centro de la república. Mota (1979) menciona que hay seis variedades de esta especie, aunque no se indica la variedad del pasto que crece en el ex-lago de Texcoco. Es posible incluso que debido a los factores extremos de los suelos del área, el pasto haya desarrollado o acentuado características particulares, tendientes al desarrollo de una nueva variedad.

Algunas características y adaptaciones del pasto salado

El pasto salado es característico de suelos salinos, y según autores citados por Mellink y Quintanilla (1979), de lugares húmedos. Sin embargo, observando la distribución del pasto en México presentada por los autores mencionados, se concluye que puede desarrollarse también en condiciones semidesérticas. En el ex-lago de Texcoco se ha observado que dicho pasto se desarrolla tanto en suelos no salinos ($CE < 4$ mmhos/cm), como en terrenos altamente afectados, con CE de hasta 70 mmhos/cm (Llerena y Tarín, 1978) aunque arriba de 40-50 mmhos/cm se restringe fuertemente su desarrollo según Prada (1975). Así mismo, es notable su adaptación tanto a excesos como a deficiencias de humedad (Llerena y Tarín, 1978).

Entre sus adaptaciones para soportar excesos de salinidad en el suelo, se reporta que el pasto posee glándulas para excreción activa de sales (Hansen, *et al.*, 1976), mientras que la presencia de incrustaciones de sílice en las células epidérmicas y de los espacios intercelulares de sus tallos y raíces le proporcionan una cierta protección contra herbívoros y desecación (Hansen, *et al.*, 1976). Otras adaptaciones del pasto para soportar exceso o deficiencia de humedad son los tejidos esponjosos mencionados por Mellink y Quintanilla (1979), la distribución de la raíz en dos profundidades diferentes del perfil del suelo (Mota, 1979) y la presencia de estomas tanto sobre los lomos de los haces vasculares como en las acanaladuras entre dichos haces, de acuerdo con Hansen, *et al.*, (1976).

Pastización del ex-lago de Texcoco

Debido al problema de las tolvaneras que se generaban en el área, a partir de 1972 se inició un programa intensivo de pastización del ex-lago, cubriéndose en 13 años al rededor del 80% del área problema, la cual comprendía 14,500 hectáreas. La propagación debió realizarse vegetativamente, mediante cepellones, lo cual implicó un elevado costo y esfuerzo; sin embargo, esta forma de propagación era la más apropiada para las condiciones del área, pues en ella prácticamente no se produce semilla del pasto, y mediante estolones el prendimiento es muy bajo.

Algunas ventajas que se han obtenido con la propagación del pasto salado en el ex-lago de Texcoco son: (a) la cobertura vegetal evita la formación de tolvaneras, pues se fija el suelo; (b) al estar cubierta la superficie

del suelo, se reduce apreciablemente el ascenso capilar de sales; (c) al penetrar la raíz en el "jaboncillo"³⁾, propicia su deshidratación, ayudando con ello al desarrollo del suelo; (d) lo anterior, aunado al aporte de materia orgánica significa una recuperación paulatina del suelo; y (e) sirve como forraje para rumiantes.

Problemática de la producción de semilla de pasto salado en suelos con exceso de sales

Entre los efectos nocivos que la salinidad del suelo puede causar sobre las plantas, está la alteración de los procesos de floración y formación de grano. De acuerdo con Amen (1970) citado por González (1980), en condiciones favorables el pasto salado produce semilla viable; sin embargo, cuando la salinidad del suelo es excesiva pueden presentarse problemas en la producción o viabilidad de semilla. Llerena y Tarín (1978) indican además que la poca semilla que se produce en el ex-lago no es viable por problemas de fungosis en la panícula del pasto.

Diversas opiniones sugerían que el pasto salado del ex-lago no forma semilla por: (a) tal vez los niveles de salinidad presentes en estos suelos no permitan el desarrollo de plantas masculinas y/o su floración; (b) quizá la excesiva salinidad inhibe la formación de grano; (c) se ha detectado la presencia de un hongo que daña a la semilla en formación; (d) pudiera ocurrir un desfaseamiento del ciclo de floración para ambos sexos.

Por lo tanto, con estos antecedentes a partir de 1981 se proyectó investigar algunos aspectos del pasto salado, con el propósito de definir la factibilidad de su propagación mediante semilla.

METODOLOGIA

De acuerdo a los objetivos planteados, se proyectó y realizó dos experimentos en macetas en el ex-lago de Texcoco. El primero se realizó de 1982 a 1984 y el segundo se inició en 1984, habiendo concluido a la fecha la etapa de campo y se inicia el reporte correspondiente. En la Figura 1 se indica la localización de los sitios experimentales, así como los puntos de colecta del suelo para cada caso.

Tratamientos y diseño experimental

Experimento	Factor de V.	Niveles
A	salinidad del agua de riego	4, 14, 24, 34, 44 y 54 mmhos/cm
B	suelo	Sa = suelo agrícola S1 = suelo del ex-lago sometido a lavado Sm = suelo del ex-lago con mejorador y lavado

En A se utilizó seis repeticiones, y cinco en B. En este último se incluyó además un testigo unitario de pasto masculino (Tm) y otro de femenino (Tf), cada uno con suelo del punto de colecta correspondiente de cada pasto. En ambos experimentos se utilizó un diseño completamente al azar.

³⁾ El jaboncillo es un material arcilloso agua-sedimento con elevada capacidad para retener agua y sales, y cuya deshidratación es irreversible a su nivel original. Constituye gran parte del perfil de los suelos del ex-lago.

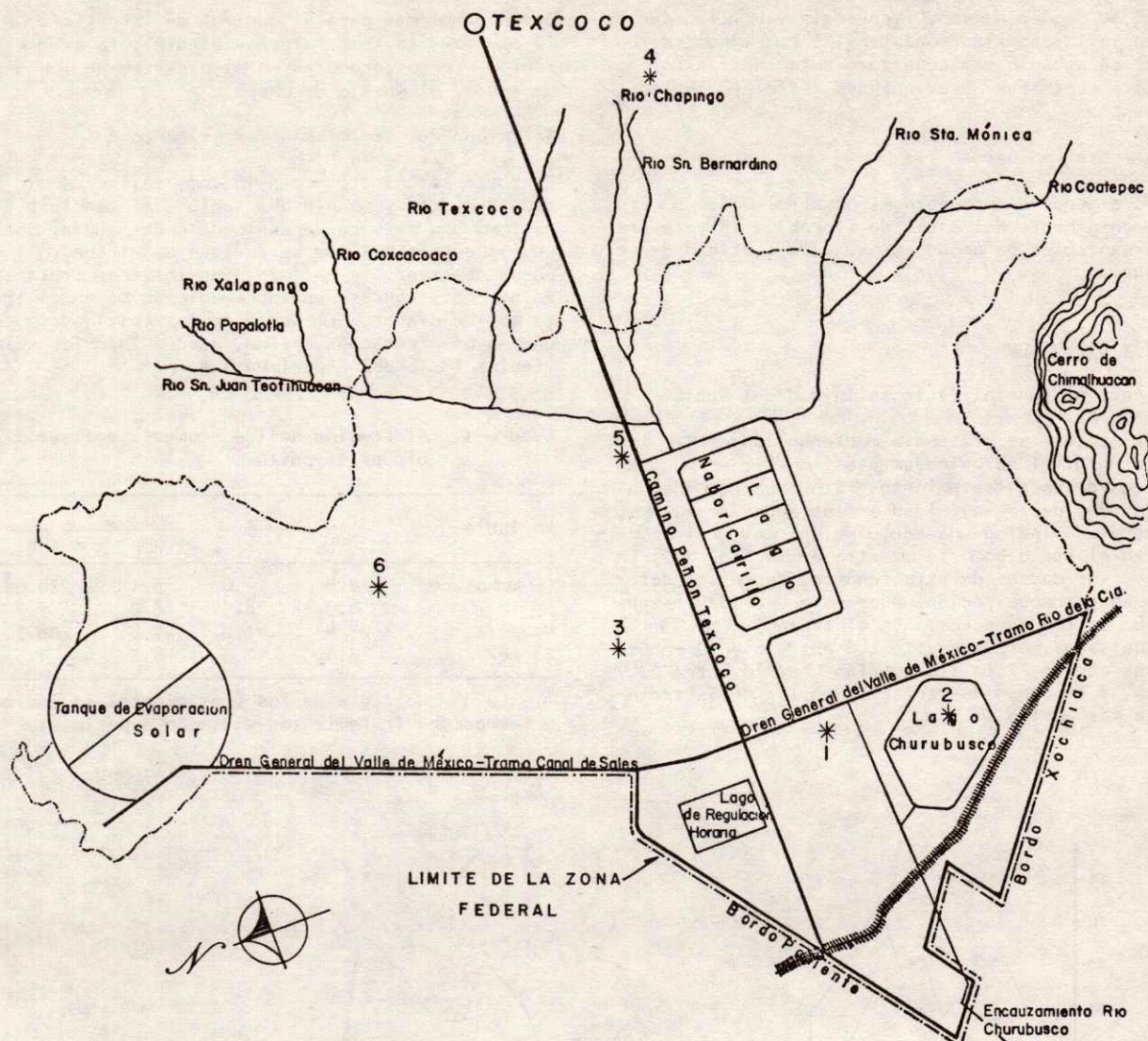


Figura 1. Ubicación de sitios

- 1 Colecta de suelo para el experimento A
- 2 Colecta de pasto de ambos sexos; ubicación del experimento A
- 3 Colecta de suelo para B (dos tratamientos)
- 4 Colecta de suelo para B (suelo agrícola)
- 5 Ubicación del experimento B
- 6 Prueba de campo con ambos pastos

Colecta y manejo del suelo

En la Figura 1 se indica los puntos de colecta del suelo para cada experimento; en el caso de A el suelo se secó al aire, se colocó luego en las macetas y fue sometido a "lavados" con el agua del tratamiento correspondiente hasta alcanzar una salinidad en el agua percolada similar a la del agua de lavado en cada tratamiento; en ese momento se procedió al establecimiento del pasto. En el experimento B el suelo se colocó directamente en las macetas, y se procedió a la incorporación del mejorador y lavado. Se utilizó el equivalente a 20 ton/ha de azufre en el tratamiento correspondiente (Sm), dando un mes como tiempo de oxidación y lavando a continuación con un total de 4 m de lámina en ambos tratamientos con suelo del ex-lago (S1 y Sm).

Establecimiento del pasto

En ambos experimentos se utilizó pasto del área adyacente al lago Churubusco (Fig. 1) previa identificación del material de los dos sexos. Con excepción de los dos testigos del experimento B, se plantó una cantidad similar de pasto masculino y femenino en cada maceta, regando a continuación con frecuencia para asegurar el mayor prendimiento posible.

Riego del pasto

En el experimento A se regó con una mezcla de aguas negras y aguas freáticas tal que la CE fuese la programada en cada tratamiento. El nivel de CE se controló diariamente, aplicando los riegos también a diario. En el ex-

perimento B se regó con menos frecuencia y utilizó aguas negras cuya salinidad fluctuó entre 1.5 y 3 mmhos/cm. En 6 - 8 meses se alcanzó una cobertura total del pasto, y se procedió a registrar observaciones del ciclo reproductivo siguiente.

Registro de observaciones

Se registró algunos datos sobre el desarrollo del pasto pero fundamentalmente del ciclo de floración (B), la proporción de panículas de ambos sexos, y la cantidad de semilla producida.

RESULTADOS Y DISCUSION

Problemas para el control de la salinidad del suelo

En el experimento A se pretendía mantener la salinidad del suelo a un nivel aproximadamente igual que el del agua de riego de cada tratamiento. Sin embargo, pese al estricto control de la salinidad en las aguas de riego, el agua percolada indicó una acumulación paulatina de las sales en el suelo como se muestra en la Figura 2. Entre las diversas causas de este fenómeno debió ser determinante la evapotranspiración, pues esta "salida" de agua no implicaba salida de sales. En el tratamiento T1 la salinidad del agua percolada fluctuó entre 6 y 10 mmhos/cm, mientras que en T2 la fluctuación ocurrió entre 20 y 25 mmhos/cm, y el rango de variación en los demás tratamientos fue más amplio.

Otros problemas para el control de la salinidad fueron la lluvia y la temperatura ambiental; la irregularidad de los vientos, roturas en el plástico de los depósitos de agua y el manejo de campo.

Salinidad del suelo en el experimento B

El suelo se colectó y manejó como se indica en la sección "Colecta y manejo del suelo"; al concluir el lavado se tomó una muestra de suelo de cada maceta, obteniéndose los resultados que se indican en el Cuadro 1. Como se puede observar, la salinidad en los tres tratamientos es baja, registrándose un incremento de Ca en el tratamiento con mejorador. El suelo de los testigos presentaba una mayor afectación salina, aunque inferior a los tratamientos T3-T6 del experimento A.

Cuadro 1. Afectación salina promedio del suelo al establecer el pasto.

Variable	Tratamientos ¹⁾				
	Sa	S1	Sm	Tm	Tf
CE mmhos/cm	2.9	4.6	5.1	20.5	7.8
pH	6.9	8.5	8.0	9.7	9.1
Na me/l	25.4	41.8	42.8	208.2	76.8
Ca me/l	3.4	2.3	8.2	1.5	5.0

¹⁾ La nomenclatura de los tratamientos se indicó en la sección "Tratamientos y diseño experimental".

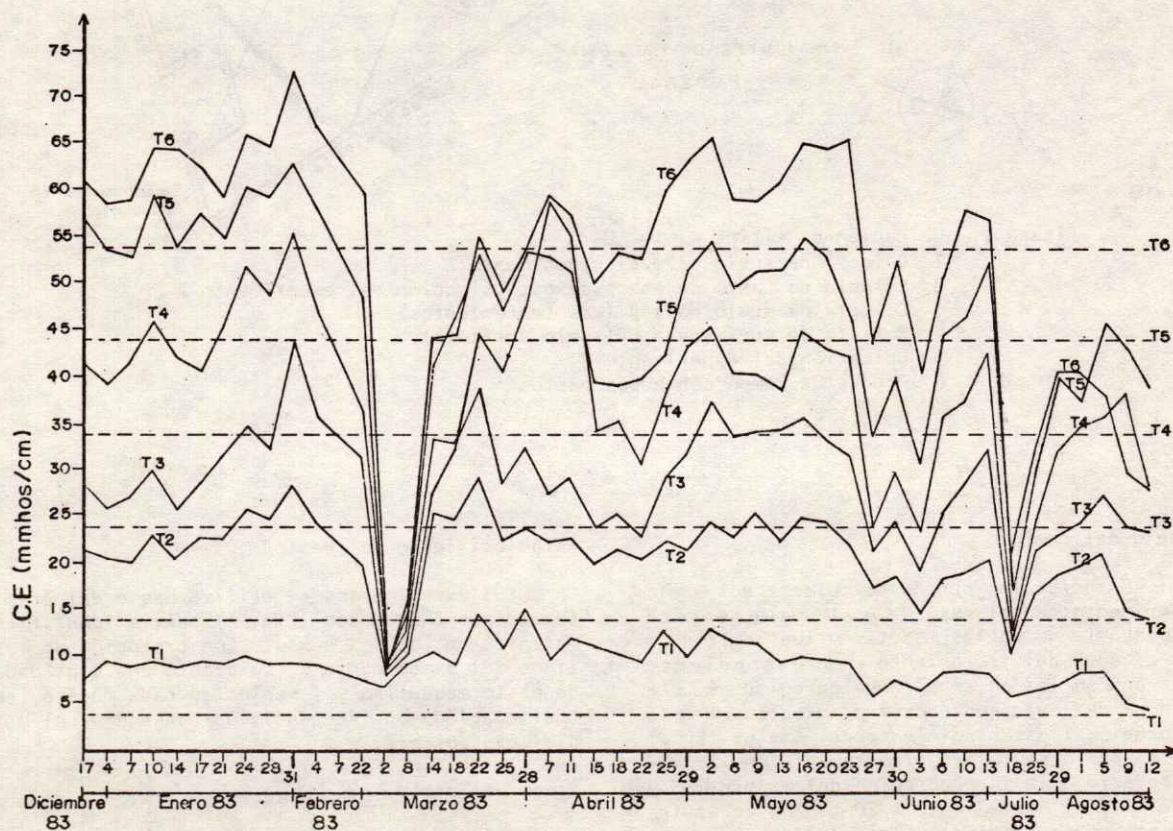


Figura 2. Conductividad eléctrica del agua de escurrimiento en el experimento en pasto salado durante el primer semestre de 1983 (proyecto PS-1-81)

Prendimiento del pasto

En el experimento B el pasto prendió sin mayor problema, mientras que en A el prendimiento dependió del grado de salinidad en cada tratamiento; así, en T1 y T2 el prendimiento fue aceptable, tuvo severas restricciones en T3 y T4 y fue prácticamente nulo en T5 y T6. En junio, 6 meses después de la plantación, se registraba los datos siguientes:

Observación	Tratamientos					
	4	14	24	34	44	54
Desarrollo foliar	MB ¹⁾	MB	R ²⁾	M ³⁾	CN ⁴⁾	NPD ⁵⁾
Floración	*	*	*			
Formación de semilla	*	*				

donde: 1) muy bueno; 2) regular; 3) malo; 4) casi nulo y 5) nulo prendimiento y desarrollo.

Floración

La floración del pasto salado se presentó durante primavera y verano; la cantidad promedio de panículas en el experimento B se indica en la Figura 3.

En dicha Figura se puede observar que la cantidad final de panículas masculinas es mayor a la de femeninas en todos los casos, en una relación que varió entre 1.4:1 y 3:1 para los tratamientos en que ambos sexos de pasto crecieron en la misma maceta; para los testigos unitarios del experimento B la proporción es de 10:1. Por otro lado, es interesante observar que el tratamiento T1 de A registró mayor cantidad de panículas que los tratamientos de B, lo cual se muestra en el Cuadro 2; es muy posible que ello se deba al manejo diferente en cuanto a riegos, pues en A se regó de tres a ocho veces por semana, durante todo el experimento mientras que en B se aplicó dos o tres riegos por mes durante el invierno, y algo más frecuente durante la floración, pero de ninguna manera se alcanzó la frecuencia de A.

Formación de semilla

En el Cuadro 2 se muestra la cantidad de semilla colectada en cada tratamiento. La mayor producción se alcanzó

Cuadro 2. Promedio de panículas y semilla colectada por maceta en cada tratamiento.

Exp.	Tratamiento	Panículas		Proporción M/F	Semillas	
		Masculinas	Femeninas		g	mg/paníc.
A	T1	233.5	77.7	3.0	1.95	25
	T2	194.0	71.7	2.7	0.6	8
	T3	4.0	0.0	-	0.0	-
B	Sa	112.2	77.8	1.4	1.1	18
	Sm	42.8	23.6	1.8	0.6	76
	Sl	56.0	29.6	1.9	0.5	64
	Tm	311.0	-	-	0.0	-
	Tf	-	30.0	-	0.2	-

en T1 del experimento A, con 1.95 g por maceta, lo cual equivale aprox. a 7 g/m² de semilla limpia. Pese a que en el tratamiento Sa del experimento B se produjo la misma cantidad de panículas femeninas, la producción de semilla es inferior, probablemente debido a la insuficiencia de riego, como ya se mencionó en la sección "Floración".

Es interesante notar que T1, T2 y Sa produjeron prácticamente la misma cantidad de panículas femeninas, la cual posiblemente está cerca de una densidad umbral máxima para esta variedad del pasto en las circunstancias del ex-lago. Sin embargo, la cantidad de semilla formada en esos mismos tratamientos fue apreciablemente diferente, lo cual sugiere diferencias importantes en los factores ambientales favoreciendo o limitando la formación de la semilla. Cabe suponer que T1 fue favorecido por el frecuente riego, cosa que no ocurrió con Sa; a su vez en T2 la salinidad del suelo fue determinante, disminuyendo la producción de semilla en un 69% con respecto a T1. En estos tratamientos se produjeron en promedio 25, 18 y 8 mg de semilla por panícula, respectivamente para T1, Sa y T2.

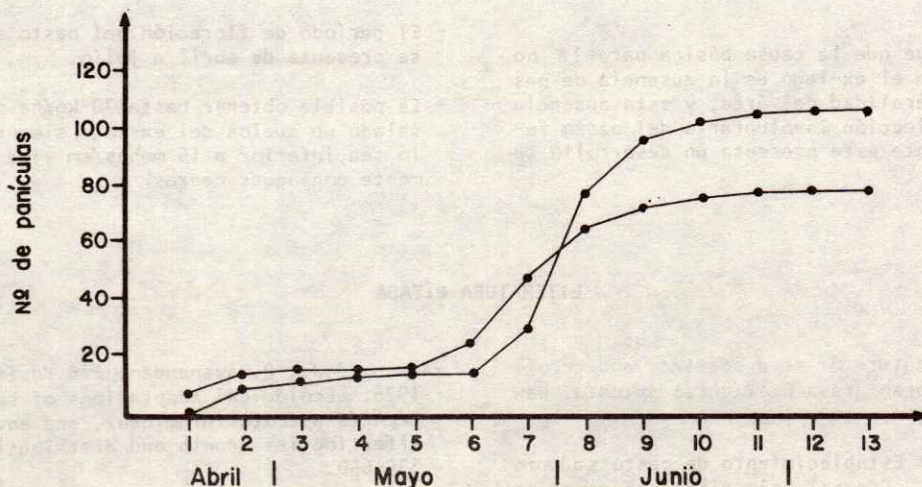


Figura 3. Cuantificación de panículas en floración, a través del tiempo en el tratamiento con suelo agrícola (Sa)

Los tratamientos con suelo típico del ex-lago sometidos a lavado (S1) y con mejorador (Sm) presentaron una producción de panículas femeninas muy inferior a T1, T2 y Sa; pero la formación de semilla fue más eficiente, obteniéndose respectivamente 64 y 76 mg/panícula como se indica en el Cuadro 2. Esta productividad por panícula equivale a tres veces la obtenida en T1 y Sa; posiblemente los cambios logrados en la composición de la solución del suelo favorecieron la fecundidad de los órganos femeninos.

Además, comparando los diversos tratamientos, la cantidad de floración masculina no fue limitante pues en Sm con una proporción de panículas de 1.8 se produjo 76 mg de semilla por panícula, mientras en T2, con M/F = 2.7 sólo se obtuvo 8 mg/panícula; esto último indica que la salinidad del suelo fue determinante tanto en la floración como en la formación de semilla, según se puede apreciar también en la Figura 4.

Prueba de campo con pasto de ambos sexos

Desde 1980 se venía observando que casi la totalidad del área pastizada por la Comisión presenta sólo pasto del sexo femenino; se llegó a sugerir que posiblemente el pasto masculino tenía una tolerancia menor a las condiciones extremas del ex-lago, o su floración se inhibía por la misma causa. Sin embargo, una observación más de tallada en varios recorridos con ese fin, indicaron la presencia de ejemplares de pasto masculino en diversos puntos del área.

En agosto de 1983 se incluyó cepellones de pasto masculino en un terreno que se pastizaba por primera vez, alternando con el pasto que se utilizaba normalmente, proveniente este último de uno de los bancos de pasto utilizados con frecuencia, posteriormente se observó que era pasto femenino; se tuvo un prendimiento de cepellones de 40-50% en ambos tipos de pasto, sin encontrar diferencia notoria en el porcentaje de prendimiento de ambos. A la fecha varios de los cepellones han desarrollado una cobertura de 1-3 m², y en el ciclo reproductivo del 1985 se observó floración y formación de semilla, lo cual sugiere que el pasto masculino tolera niveles similares de salinidad que el femenino. La CE actual en ese terreno es de 30-50 mmhos/cm y el pH es 10-10.5.

Por lo tanto se concluye que la causa básica para la no formación de semilla en el ex-lago es la ausencia de pasto masculino en la generalidad del área, y esta ausencia puede deberse a una selección involuntaria del pasto femenino, pues generalmente este presenta un desarrollo vegetativo más vigoroso.

LITERATURA CITADA

Amen, R.D. 1970. The nature of seed dormancy and germination in the salt marsh grass *Distichlis spicata*. New Phytol. 69: 1005-1013.

González, V.C.E. 1980. Establecimiento de pasto salado (*Distichlis spicata* L. Greene) bajo riego con aguas negras en el Lago de Texcoco. Tesis Profesional UACh. Chapingo, Méx.

Hansen, D.J., P. Dayanandan, P.B. Kaufman y J.D. Brotherson. 1976. Ecological adaptations of salt marsh grass *Distichlis spicata* (Graminae), and environmental factors affecting its growth and distribution. Amer. J. Bot. 63: 635-650.

Llerena, V.F.A. y V.M. Tarín. 1978. Establecimiento de pasto salado (*Distichlis spicata*) como cubierta vege-

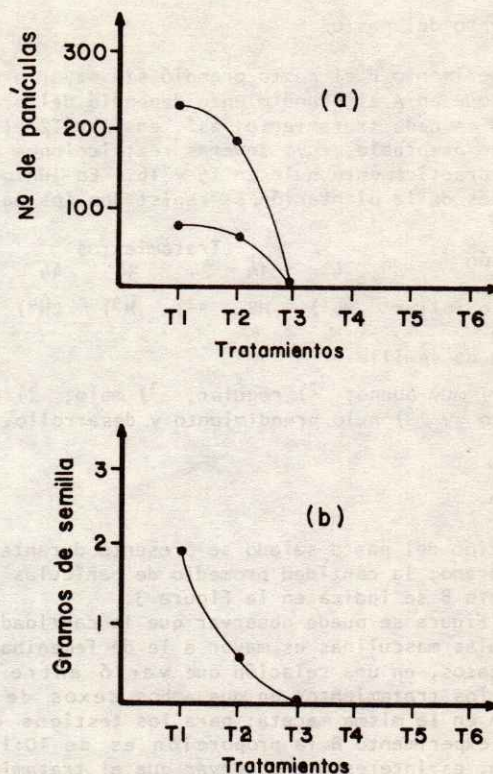


Figura 4. Panículas y semilla formadas en el experimento A

CONCLUSIONES

- La causa básica de que en el ex-lago de Texcoco no produzca semilla es que en la pastización se utilizó básicamente material vegetativo femenino.
- Las plantas de ambos sexos de este pasto toleran niveles similares de salinidad en el suelo.
- La floración y formación de semilla del pasto salado se restringe fuertemente cuando la salinidad del suelo es mayor de 30 mmhos/cm.
- El período de floración del pasto salado en el ex-lago se presenta de abril a julio.
- Es posible obtener hasta 70 kg/ha de semilla del pasto salado en suelos del ex-lago, siempre que la CE del suelo sea inferior a 15 mmhos/cm y se riegue suficientemente con aguas negras.

- tal en suelos extremadamente salino-sódicos del ex-lago de Texcoco. XI Congreso Nacional de la SMCS.
- Llerena, V.F.A. y V.M.Tarín. 1980. Una alternativa para integrar a la productividad algunas de las áreas altamente salino-sódicas del país. Segunda Conferencia interamericana sobre tecnología de la salinidad y manejo del agua. Cd. Juárez, Chih. México.
- Mellink, B.E. y M.A.Quintanilla. 1979. Valor nutritivo del zacate salado (*Distichlis spicata* L. Greene) producido en el ex-lago de Texcoco. Tesis Profesional UACH. Chapingo, Méx.
- Mota, U.J.C. 1979. Determinación del rango de tolerancia al ensalitramiento por el pasto salado *Distichlis spicata* L. Greene, en suelos del ex-lago de Texcoco. Ciencia Forestal No. 22, Vol. 4: 21-44.
- Prada, R.J.N. 1975. Capacidad de adaptación de tres especies vegetales a diferentes condiciones de ensalitramiento en suelos del ex-lago de Texcoco. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados. Chapingo, Méx.

EL PASTO SALADO EN EL EX-LAGO DE TEXCOCO. II. GERMINACION Y EMERGENCIA ¹

Becerra Moreno, A.²
Orea Lara, J.²
Serrano Pérez, R.²
Velázquez Loera, A.²

RESUMEN

Entre los problemas observados con relación a la propagación del pasto salado *Distichlis spicata* L. Greene, además de la nula a baja formación de semilla se tiene: la presencia del fenómeno de latencia en la semilla, y la etapa de germinación y emergencia es una de las más sensibles a la salinidad. Al pretender la propagación sexual del pasto, es necesario definir cómo inducir el rompimiento de la latencia en la semilla, y por otro lado, determinar las condiciones de salinidad del suelo en las que la semilla podría germinar. Con este objeto, desde 1982 se viene desarrollando investigación en el ex-lago de Texcoco, estudiando: (a) diversos métodos de escarificación, (b) el efecto de la edad de la semilla sobre el rompimiento de la latencia, y (c) la germinación en suelos del ex-lago. Se obtuvo, en el mejor de los tratamientos, un porcentaje de emergencia superior al 80%, que la edad de la semilla tiene efecto sobre el rompimiento de la latencia, y que el pasto salado es tolerante a la salinidad aún en la etapa de germinación.

ABSTRACT

Problems related to the propagation of the salt marsh grass *Distichlis spicata* L. Greene, in the neighbourhood of the Texcoco ex-lake, in addition to the little or no seed yield, are: (a) the salt marsh grass presents problem of latency, and (b) since the germination and emergency phase is one of the most sensitive to high salinity, when we pretend the sexual propagation of this grass, we need to define how to break the seed latency, and to determine the soil salinity conditions in which the seed could germinate. Since 1982, we are working in the Texcoco ex-lake to study several scarification methods; the effect of seed age on the latency break; and the germination of the seed in the ex-lake soils. We obtained an emergency percentage over 80 in the best treatment, found that the seed age effects the latency break, and that the salt marsh grass is salinity tolerant in the germination stage.

INTRODUCCION

El establecimiento de pasto salado en áreas con fuertes problemas de salinidad en el país y su posterior utilización pecuaria, se ha planteado como alternativa para incorporar tales áreas a la producción agropecuaria (Llerena y Tarín, 1980). Ante esta perspectiva y con el fin de abatir los costos que implica la propagación vegetativa, ha surgido gran interés en lograr su propagación a base de semilla, lo cual ha sido motivo de varios experimentos en el ex-lago de Texcoco. Entre los problemas que requieren solucionarse para hacer factible la propagación sexual del pasto salado se tiene el rompimiento de la latencia de la semilla para obtener un porcentaje de germinación aceptable, y en una segunda fase, lograr la germinación y emergencia bajo condiciones de salinidad. Estos aspectos constituyeron el objetivo de varios experimentos de germinación en macetas a partir de 1982, probando varios métodos de escarificación de semilla, sembrando en suelos diferentes y con semilla colectada en varios años consecutivos. Paralelamente, se presentó una tesis en Chapingo (Contreras, 1983) con experiencias afines sobre este problema utilizando condiciones ambientales más controladas. Los resultados obtenidos en esta serie de ensayos experimentales son alentadores.

ANTECEDENTES

Descripción del pasto salado

El pasto salado *Distichlis spicata* L. Greene es una gramínea dioica, perenne, con desarrollo de rizomas y estolones fuertes y puntiagudos. Crece en diversas partes del mundo, y según Mellink y Quintanilla (1979) en México se le encuentra en la mitad de las entidades federativas, principalmente en la parte norte y centro de la república. Es característico de suelos salinos, y soporta además períodos prolongados de inundación y sequía. Las ventajas que se han tenido en el ex-lago de Texcoco por su propagación son: (a) forma una cobertura vegetal en donde otras plantas no sobreviven; (b) ayuda a la deshidratación del "jaboncillo"; (c) provoca una recuperación paulatina de los suelos y (d) se le utiliza como forraje para rumiantes.

Latencia de la semilla del pasto salado

La semilla del pasto salado presenta el fenómeno de latencia como indica Amen (1970). Dicho autor señala que la latencia es un fenómeno que ocurre en la semilla de muchas gramíneas, por el cual se inhibe la germinación

¹ Ponencia presentada en el XVIII Congreso Nacional de la SMCS.

Aunque este artículo es responsabilidad de los autores, la experimentación correspondiente fue desarrollada por iniciativa y con el apoyo constante del M.C. F. Alberto Llerena V., ex-jefe del Programa Agrícola de la Comisión Lago de Texcoco.

² Técnicos de la Comisión Lago de Texcoco-SARH.

de las semillas, y constituye una adaptación de ciertas especies a condiciones adversas del medio. Hartman y Kester (1980), citados por Orea y Pérez (1984), señalan que la latencia de las semillas puede deberse a factores internos como la presencia de inhibidores químicos y embriones inmaduros, o también a factores externos como impermeabilidad de las cubiertas al agua o mecánicamente resistentes.

De acuerdo con Amen (1970), la latencia de las semillas de pasto salado está controlado por hormonas; al parecer se presenta un inhibidor específico que impide la actividad de la nitrato reductasa en el endospermo de la semilla. Este autor reporta que en un experimento al respecto, la germinación ocurrió únicamente después de que las semillas cumplieron con un período de baja temperatura, después de cumplida la maduración o con la adición de suficiente nitrato al medio.

Diversos métodos para romper en alguna medida la latencia de las semillas han sido desarrollados por el hombre; entre los cuales se tiene: (a) remojo en agua; (b) tratamiento con altas o bajas temperaturas; (c) tratamiento con una sustancia química; (d) escarificación mecánica.

Hartman y Kester (1980), señalan que las temperaturas justo arriba del punto de congelación son más efectivas en el rompimiento de la latencia de la semilla. A su vez, Croker y Barton, citados por Cárdenas (1974), consideran que quizá no haya mejor método para tratar la semilla aletargada que el enfriamiento, pues éste inicia una serie de cambios químicos en el embrión y el endospermo.

En algunos casos la latencia es un fenómeno temporal, por ejemplo estacional, durante cuyo período las semillas completan su madurez y/o se restablecen las condiciones ambientales favorables para la germinación, según Grime (1979). A su vez, White et al. (1959), afirman que las semillas de pasto recién cosechadas tienen una germinación casi nula, la cual se incrementa hasta un 70% después de estar guardada en un lugar seco por uno o dos años. Ambos autores son citados por Orea y Pérez (1984).

El pasto salado en el ex-lago de Texcoco

El pasto salado establecido en el ex-lago de Texcoco, en la generalidad del área no presenta formación de semilla, debido entre otras causas a los excesivos contenidos de sales presentes en el suelo (Becerra et al., 1984); tal formación de semilla sí ocurre en la periferia del ex-lago, en donde los problemas son menos críticos, aunque la producción es relativamente baja. A su vez, esta semilla presenta el fenómeno de latencia, pues en pruebas realizadas durante 1981 con semilla recién colectada en la periferia oriental del ex-lago se obtuvo un porcentaje de germinación inferior a 12.

Con el propósito de encontrar el tratamiento más apropiado para romper la latencia de la semilla, y observar su tolerancia a la salinidad durante la etapa de germinación y emergencia, desde 1981 se inició una línea de trabajo en el Departamento de Experimentación del entonces Programa Agrícola (CLT); a la fecha se han concluido cinco ensayos experimentales, cuyos resultados principales se discuten en el presente artículo.

Experimento paralelo en la UACH

En su trabajo de tesis Contreras (1983) realiza varios ensayos bajo condiciones controladas de temperatura, humedad y otros, con los mismos objetivos de: (a) rompimiento de latencia en la semilla de pasto salado, y (b) determinar su tolerancia a la salinidad durante la etapa

de germinación. Sus resultados principales indican que del lote de semillas utilizado, sólo el 63.5% era viable, determinado éste con 2, 3, 5-cloruro de trifeníl tetrazolio, utilizando los métodos de corte longitudinal y punzado de la semilla. En un primer ensayo sobre germinación con 17 tratamientos obtiene menos de 10% de germinación en 11 de dichos tratamientos, de 10 a 14% en otros cinco y el 33% en el mejor tratamiento.

En un segundo ensayo sobre germinación, obtuvo en el mejor de los casos, el 91% de germinación, considerando el porcentaje de semilla pura viva del lote utilizado; si se considera que este porcentaje es 63.5, su porcentaje real de germinación en el tratamiento mencionado fue algo más de 57. Contreras (1983) encontró un efecto directo y consistente entre el tiempo en que la semilla estuvo sometida a bajas temperaturas y el porcentaje de germinación obtenido.

METODOLOGIA

Ubicación de los experimentos

Los cinco experimentos aquí reportados se realizaron cerca de las oficinas del centro del lago conocidas como AL. En todos los casos se utilizaron envases de plástico de un litro de capacidad como macetas, y arena de río como sustrato con excepción del experimento V en el cual se comparó la germinación del pasto en varios suelos.

Tratamientos y diseño experimental

En el Cuadro 1 se muestran los tratamientos probados, repeticiones y factores de variación ambiental. En todos los casos se utilizó una distribución completamente al azar.

Los experimentos I, II y III se realizaron bajo dos variantes ambientales: ambiente natural, e invernadero. En esos mismos experimentos, para el riego, se utilizó aguas negras provenientes de la Ciudad de México, cuya salinidad fluctuó entre 1.5 y 2.5 mmhos/cm, y aguas de un pozo profundo del ex-lago cuya conductividad eléctrica (CE) era de 3 mmhos/cm. En los casos IV y V se utilizó sólo aguas negras y la condición ambiental de espacio abierto.

Cuadro 1. Descripción de los experimentos.

Exp.	Factores	Niveles	No. tmts	Rep.
I	Tiempo de remojo	0, 24, 48, 72 h	4	3
II	Temperatura agua de remojo	30°, 45°, 60°C	13	3
	Tiempo de remojo	45, 60, 180, 360 min.		
III	Remojo con KNO ₃	1, 3, 6, 12, 24%	16	3
	Tiempo de remojo	15, 30, 45 min.		
IV	Edad de semilla	1, 2, 3, 4 años	4	8
V	Suelo ¹	A, Sa, L ₁ , L ₂ , L ₃ , L ₄ , L ₅	7	8

¹ Véase nomenclatura en la Figura 2 (V).

Procedencia de la semilla

La semilla utilizada se colectó en la periferia oriental del ex-lago a fines de 1981 para los experimentos I, II y IV, mientras que en III se utilizó además semilla colectada en 1982, 1983 y 1984.

Siembra de la semilla

En cada maceta se sembraron 100 semillas del pasto, procurando una distribución uniforme, y cubriendo con una delgada capa del mismo sustrato (arena o suelo). A partir de ese momento se regó diariamente, utilizando un colchón de pasto seco sobre las macetas para amortiguar el golpe del agua sobre la superficie del suelo; este colchón se retiró al iniciar la emergencia de plántulas.

Conteo de plántulas

Desde el inicio de la emergencia se realizó un conteo diario de plántulas en cada maceta, actividad que se suspendió cuando el incremento de plántulas fue prácticamente nulo, lo cual ocurrió unas cuatro semanas después de iniciada la emergencia.

Análisis estadísticos

En los experimentos I, II y III se realizó un análisis de varianza para determinar la significancia estadística del efecto de tratamientos. En los otros dos, el conteo de plántulas se suspendió en octubre.

RESULTADOS Y DISCUSION

Pruebas preliminares

A principios de 1982 se colectó semilla en cinco sitios de la periferia oriental del ex-lago, realizando varios ensayos experimentales sobre viabilidad y germinación (Carrillo, comunicación personal). Se encontró un porcentaje de viabilidad promedio de 64.8, con una variación de 44 a 95% según el sitio de colecta. Paralelamente se realizó un ensayo experimental, probando cinco métodos de escarificación con tres niveles cada uno. Varios tratamientos presentaron 0% de germinación, obteniéndose los más altos porcentajes con pre-enfriamiento (6.6%) y remojando con KNO_3 (6%). Sin embargo, estos porcentajes son muy bajos comparados con los de viabilidad, indicando el alto grado de latencia en la semilla. Resultados similares de viabilidad fueron encontrados por Contreras (1983), quien también encontró porcentajes de germinación muy bajos en su primer ensayo (ver la sección Experimento paralelo en la UACH).

A fines de 1982 se realizó otro ensayo de germinación, con semilla de los dos sitios que mostraron mayor porcentaje de viabilidad, ensayo que se realizó bajo condiciones de invernadero (Cuadro 2).

Como se puede observar, el porcentaje de germinación fue muy superior al del primer ensayo, lo cual se atribuyó inicialmente al efecto de invernadero. El remojo de la semilla fue favorable, así como también la utilización de arena en vez de cajas petri. Por otro lado, es interesante notar que la semilla más reciente presentó un porcentaje de germinación muy bajo.

Efecto de invernadero en el rompimiento de la latencia

Los experimentos I, II y III (ver la sección Tratamiento y diseño experimental) se realizaron dentro y fuera de invernadero. En promedio general se obtuvo un porcentaje de germinación de 44.7 al ambiente y 53.0 dentro del

Cuadro 2. Resultados de ensayo de germinación.

Tratamiento	Semilla de	Porcentaje germinación
1 - Caja petri, sin remojo	1981	49.4
2 - Caja petri, remojo 24 h	1981	56.6
3 - Germinación en arena	1981	57.9
4 - Caja petri, sin remojo	1982	21.6

invernadero; esta última condición causó un incremento de 18% en plantas emergidas con respecto a la condición de espacio abierto.

Efecto del agua de riego

En los mismos experimentos I, II y III se utilizaron dos tipos de agua para riego: (a) aguas negras, y (b) aguas de pozo profundo. El porcentaje de germinación promedio general fue 53.8 con aguas negras, y 43.9 con aguas blancas, manifestándose sobre todo la baja germinación con estas últimas, fuera del invernadero.

El efecto favorable de las aguas negras pudo ser causado por la menor concentración salina, o bien por el aporte de materia orgánica y nutrientes. En el ex-lago de Texcoco la disponibilidad de aguas negras es amplia.

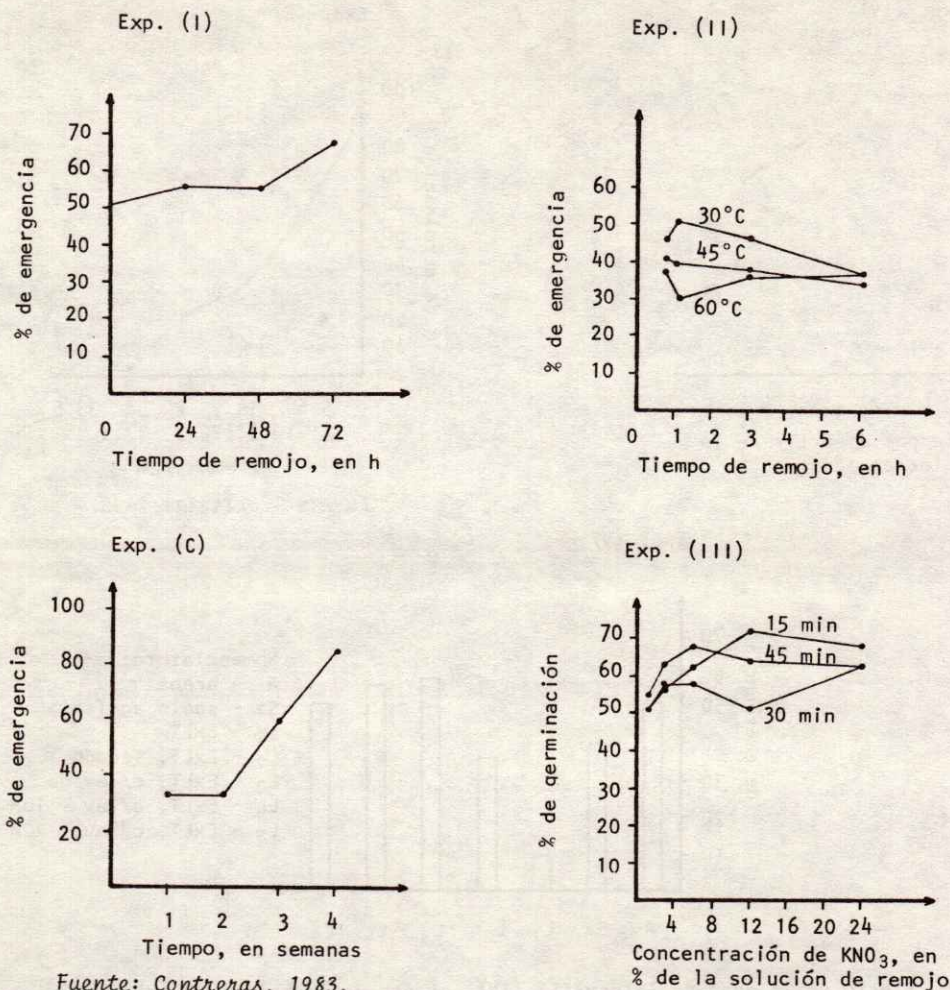
Efecto del remojo y estratificación húmeda

En la Figura 1 se muestra el comportamiento promedio resultante de los experimentos I, II y III para las condiciones de espacio abierto y riego con aguas negras. Como se puede ver, el tiempo de remojo con agua a la temperatura ambiente (20°C) tiene una relación directamente proporcional con el porcentaje de germinación, obteniéndose un incremento de 33% con 72 horas de remojo en relación al testigo, y posiblemente a mayor tiempo de remojo el incremento sea mayor.

El remojo con agua caliente es contraproducente, según el resultado del experimento II. Por el contrario, la escarificación por remojo a bajas temperaturas es favorable, de acuerdo con los resultados obtenidos por Contreras (1983), según se muestra en la Figura 1 (C); esto concuerda con lo señalado por Hartman y Kester (1980) respecto a la efectividad de temperaturas bajas en el rompimiento de la latencia.

Efecto del remojo con KNO_3

Contreras (1983) no encontró efecto del KNO_3 sobre el rompimiento de la latencia de la semilla, probando concentraciones menores de 1%. Por el contrario, Orea y Pérez (1984) encontraron un incremento en el porcentaje de germinación remojando durante 15, 30 y 45 min la semilla en una solución de KNO_3 para el rango de 1% a 6% de concentración (Fig. 1 (III)) el mejor porcentaje obtenido en esta condición ambiental (espacio abierto y aguas negras) se obtuvo 72% remojando la semilla durante 15 min en una concentración de 12% de KNO_3 , tratamiento que fue superado por varios de la condición "dentro de invernadero", en donde el mejor tratamiento (3% KNO_3 -45min) presentó un 84% de emergencia.



Fuente: Contreras, 1983.

Figura 1. Efecto del tiempo de remojo (I), temperatura del agua (II), escarificación húmeda (C), y concentración de KNO₃ (III). Los experimentos I, II y III fueron conducidos en espacio abierto y regando con aguas negras.

Efecto de la edad de la semilla

Como se puede ver en los resultados mostrados en la sección Pruebas preliminares, la semilla recién cosechada presentó un porcentaje de emergencia de 21.6; esto, y algunas referencias bibliográficas (véase White *et al.*, 1959, y Grime, 1979) fueron base para desarrollar experimentos sobre este aspecto durante 1985, cuyos resultados se muestran en la Figura 2 (IV). El espacio explorado fue de 0.5 a 4.5 años, con semilla colectada de un mismo sitio y sembrando sin pre-tratamiento a la semilla. Los mejores resultados se obtuvieron con 2.5 años, es decir con la semilla colectada en 1982; se obtuvo 65% de emergencia.

Es interesante anotar que esta semilla es del mismo lote utilizado en las pruebas preliminares, y en ese entonces presentó 21.6% de germinación. En este caso particular se logró un incremento del 200% en la emergencia con el solo reposo de la semilla durante 2.5 años. Cabe mencionar que la semilla se limpió antes del almacenaje, lo cual debió ser determinante, pues de acuerdo con White *et al.* (1959) el inhibidor de la semilla está en lemas y paleas.

Efecto de la salinidad sobre la germinación y emergencia del pasto salado

Bajo condiciones controladas, Contreras (1983) exploró el comportamiento de la germinación a diferentes niveles de salinidad expresada en mmhos/cm, obteniendo los resultados que se muestran en la Figura 2 (d). Como se puede ver, hay una disminución drástica en el porcentaje de germinación a medida que aumenta el nivel de salinidad del medio, inhibiéndose totalmente la germinación a una CE de aprox. 30 mmhos/cm. Esto sugiere que no podría sembrarse en suelos con CE 10 mmhos/cm si se desea una germinación de al menos 50% de la semilla viable. Contreras (1983) utilizó NaCl para salinizar el medio hasta los niveles programados.

Sin embargo, en un experimento reciente, sembrando semilla del pasto en suelos del ex-lago de Texcoco con diferentes modalidades de tratamiento se obtuvo los resultados que se muestran en la Figura 2 (v). Se obtuvo emergencia del pasto a CE de hasta 40 mmhos/cm. En este trabajo la tendencia en el porcentaje de emergencia de plantas no tiene una relación notoria con la CE del suelo, lo cual denota que no es el único factor determinante;

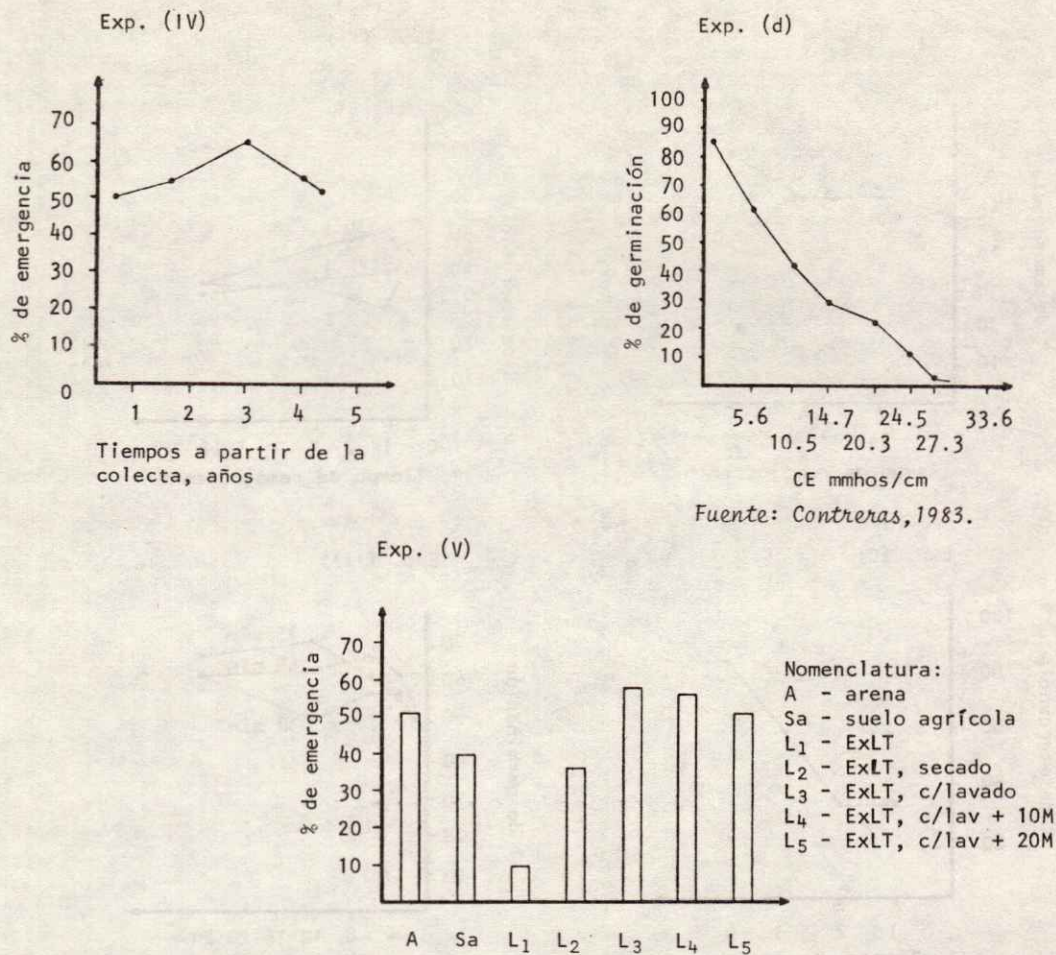


Figura 2. Efecto de la edad de la semilla (IV), efecto de la salinidad (d) y germinación en diferentes suelos (V) sobre el porcentaje de emergencia del pasto salado.

también pueden ser importantes otros factores como la composición de la solución, el pH, la textura del suelo, etc. Es interesante notar que el porcentaje de germinación en suelos del ex-lago sometidos a lavado fue mayor que en arena y suelo agrícola, pese a que la CE de éstos era menor.

Por otro lado es también importante notar que la adición de mejorador (10 y 20 ton/ha de azufre) no causó efecto favorable sobre el porcentaje de emergencia, siendo superado por el tratamiento de solo lavado. Pero sí es importante la deshidratación del jaboncillo, según se desprende del resultado obtenido con los tratamientos L₄ y L₅ (Fig. 2 (V)); pese a tener una CE similar, su porcentaje de emergencia es muy diferente.

Trasplante de plántulas en suelos del ex-lago

Los "cepellones" de pasto del experimento IV fueron trasplantados en macetas de 100 l de capacidad en un suelo altamente salino-sódico del ex-lago, cinco semanas después de la emergencia, obteniéndose un prendimiento del 95%, lo cual indica que el pasto salado es altamente tolerante a la salinidad desde antes de la etapa de amacollamiento.

De acuerdo con los resultados obtenidos en los diversos ensayos aquí reportados, en la reproducción del pasto salado a base de semilla podría recomendarse la siguiente metodología: (a) cosechar la semilla, limpiarla y dejarla en reposo durante 1 ó 2 años; (b) someterla a estratificación húmeda a 4°C durante un mes; (c) sembrarla en bolsas de plástico tubular de diámetro pequeño y germinar bajo condiciones de invernadero; y (d) plantar en el terreno a pastizar.

CONCLUSIONES

- La semilla de pasto salado recién cosechada presenta el fenómeno de latencia, obteniéndose valores muy bajos de germinación (3-10%).
- Esta latencia puede ser superada limpiando la semilla al cosechar y dejándola en reposo durante 1-3 años en un lugar seco.
- Otro método efectivo para romper la latencia de la semilla consiste en la estratificación húmeda a 4°C durante tres a cuatro semanas; con remojo en agua a la temperatura ambiental se obtuvo alguna mejora, pero no hubo efecto favorable remojando con agua caliente.

- También se obtuvieron resultados favorables en el rompimiento de la latencia de la semilla remojándola durante 15-45 min en una solución de KNO_3 al 1-6% de concentración.
- La salinidad afecta negativamente a la germinación de la semilla, sin embargo en un suelo salino-sódico del ex-lago con 38 mmhos/cm se obtuvo un porcentaje de emergencia de 36; abatiendo la salinidad en ese mismo suelo se obtuvo 57.3% de emergencia.
- El pasto salado es altamente tolerante a la salinidad desde antes de iniciar el amacollamiento.

LITERATURA CITADA

- Amen, R.D. 1970. The nature of seed dormancy and germination in the salt marsh grass *Distichlis spicata*. New Phytol. 69: 1005-1013.
- Becerra M., A. et al. 1984. Efecto de la salinidad del suelo sobre la formación de semilla del pasto salado (*Distichlis spicata*) en el ex-lago de Texcoco. Reporte interno. Comisión del Lago de Texcoco, SARH.
- Cárdenas de la F., H.J. 1974. Efecto de la exposición a temperaturas de 40, 50, 60 y 70°C sobre el letargo de la semilla de zacate buffel (*Cenchrus ciliaris* L.) ITESM, Monterrey, N.L.
- Carrillo, E. Información interna Depto. Exp. (CLT).
- Contreras, B.G. 1983. Rompimiento de la latencia y determinación de la tolerancia a la salinidad durante la fase de germinación en pasto salado (*Distichlis spicata* L. Greene). Tesis profesional UACH, Chapingo, Méx.
- Grime, S.P. 1979. Plant strategies and vegetation processes unit of comparative plant ecology (NERC) Department of Botany. Univ. of Sheffield. Ed. John Wiley Sons Chichester, New York.
- Hartman, T.H. y E.D. Kester. 1980. Propagación de plantas. Ed. Continental, S.A. México, D.F.
- Llerena V., F.A. y M. Tarín V. 1980. Una alternativa para integrar a la productividad algunas de las áreas altamente salino-sódicas del país. Segunda Conferencia Interamericana sobre tecnología de la salinidad y manejo del agua. Cd. Juárez, Chih. México.
- Mellink, B.E. y N.A. Quintanilla. 1979. Valor nutritivo del zacate salado (*Distichlis spicata* (L) Greene) producido en el ex-lago de Texcoco. Tesis profesional, UACH, Chapingo, Méx.
- Orea L., J. y M.R. Pérez S. 1984. Evaluación de varios métodos de escarificación en semilla de pasto salado (*Distichlis spicata* L.) en el ex-lago de Texcoco. Reporte interno. Comisión del Lago de Texcoco, SARH.
- White, R.O. et al. 1959. Grasses in agriculture. Plant production in Protection Division FAO of the UN Rome, Italy. pp 152, 274 y 324.

FACTORES DE SUELO Y PLANTA QUE INFLUYEN SOBRE EL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL EN AREAS DE PASTOREO DEL CAÑÓN DEL JUCHIPILA, ZACATECAS +

Velásquez V., M.A. 1
Serna Pérez, A. 1

RESUMEN

El 70% del área del Cañón del Juchipila se dedica a pastoreo, donde las condiciones del suelo y las características de la precipitación pluvial influyen para que las pérdidas de agua por escurrimiento superficial sean considerables. Con el objeto de identificar los factores que influyen sobre tal proceso, se establecieron en 1985 parcelas de 1.2 m² sobre las cuales se indujo escurrimiento con simulador de lluvia, y representativas de las comunidades vegetales de uso pecuario Selva Baja Caducifolia (SBC) y Bosque Latifoliado Esclerofilocaducifolio (BLE), ubicadas en la cuenca hidrológica "El Plateado". Los factores con mayor influencia sobre el escurrimiento en SBC fueron: cobertura basal vegetal (%), suelo desnudo (%), porcentaje de limo y velocidad de infiltración inicial; y para BLE: cobertura basal vegetal (%) y velocidad de infiltración final.

ABSTRACT

Soil properties and rainfall characteristics influence water losses and surface runoff in seventy percent of the Juchipila Canyon, which is used as grazing land. The objective of this study was to identify factors influencing these processes. In 1985, 1.2 m² plots were established and surface runoff induced with a rainfall simulator. Plots were representative of the area's rangeland vegetation units: lowland deciduous woodland and sclerophyllous deciduous woodland, all established in the "El Plateado" watershed. Factors found to influence runoff in lowland deciduous woodland were basal area, bareground, silt, and initial infiltration rate. For sclerophyllous deciduous woodland, basal cover and terminal infiltration rate were the main factors.

INTRODUCCION

En el Cañón de Juchipila, Zacatecas aproximadamente el 70% de la superficie se encuentra cubierta por pastizales. Las limitantes de más importancia en este sistema de explotación son la presencia de lluvias torrenciales y el alto grado de pendiente del suelo, así como el estado de sobrepastoreo en que se encuentra (INIA-CAEDEC, 1985), tales condiciones propician una elevada pérdida de agua y suelo por escurrimiento superficial.

Los efectos del pastoreo sobre el escurrimiento superficial, así como la exclusión del mismo, y sobre los factores de suelo y planta que son modificados por efecto del mismo, han despertado gran interés por parte de algunos investigadores en los últimos años. Blackburn (1983) afirma que el pastoreo modifica la cubierta vegetal y las propiedades físicas de la superficie del suelo alterando las condiciones hidrológicas de la cuenca. Rick y Reynolds (1963) realizaron un estudio sobre el efecto del pastoreo en el escurrimiento superficial de pequeñas cuencas de agostadero y concluyeron que el pastoreo y los cambios que acarrea para las condiciones de clima, suelo y topografía del área de estudio no tuvieron un efecto significativo en la producción de escurrimiento, por otra parte, Rauzi y Hanson (1966) en un estudio similar concluyeron que el escurrimiento anual fue mayor en

las cuencas sobrepastoreadas que en las ligeramente sobrepastoreadas. Estudios posteriores muestran el efecto que el grado de pastoreo tiene sobre la producción de escurrimiento, incrementándose éste conforme se incrementa la intensidad de pastoreo (Blackburn *et al.*, 1982), ya que la vegetación tiende a promover la estabilidad del suelo y a reducir el escurrimiento (Wood *et al.*, 1978).

Entre los factores del suelo que tienen influencia en las pérdidas de agua por escurrimiento superficial se encuentran el suelo desnudo y la textura. Branson y Owen (1970) reportan que en un estudio realizado en 17 cuencas, el porcentaje de suelo desnudo estuvo directamente relacionado a la pérdida de agua por escurrimiento superficial; resultados similares fueron reportados por Tromble (1976).

La textura del suelo afecta en forma directa la velocidad de infiltración del agua y modifica, por ende, la producción de escurrimiento superficial. Blackburn (1975) estudió los factores que tienen influencia sobre la velocidad de infiltración en sitios de pastizal y encontró que las fracciones de limo y arcilla están negativamente correlacionadas con la velocidad de infiltración, mientras que la fracción arenosa tuvo una correlación positiva; además concluyó que de las fracciones, el limo, fue el de mayor influencia sobre la infiltración, y éste se asocia comúnmente con el encostramiento del suelo.

+ Ponencia presentada en el XIX Congreso de la SMCS.

¹ SARH-INIFAP-CIANOC-CAEDEC, Apdo. Postal 69, Jalpa, Zac. CP 99600.

La velocidad de infiltración como un componente del ciclo del agua, juega un papel muy importante dentro del comportamiento hidrológico de los sitios de pastizal. Esta se encuentra influenciada por los factores que afectan al escurrimiento superficial (Gifford y Hawkins, 1978).

El objetivo del presente trabajo fue identificar los factores del suelo y planta que influyen en la producción de escurrimiento en áreas pastoreadas del Cañón del Ju-chipila.

MATERIALES Y METODOS

El presente trabajo se realizó en 1985 en la cuenca hidrológica "El Plateado" localizada al sur del estado de Zacatecas, dentro del área de influencia del Campo Agrícola Experimental de "los Cañones".

En la realización del estudio se tipificó la cuenca de acuerdo a mapas de vegetación (CETENAL, 1973), resultando dos tipos sobresalientes: la Selva Baja Caducifolia (SBC) y el Bosque Latifoliado Esclerofilocaducifolio (BLE). En estos tipos de vegetación se establecieron 24 (SBC) y 16 (BLE) parcelas de escurrimiento de 1.2 m², sobre las cuales se indujo escurrimiento con un simulador de lluvia portátil similar al descrito por Blackburn *et al.* (1974). Las parcelas de escurrimiento fueron pre-humedecidas usando el simulador de lluvia para igualar las diferencias en el contenido de humedad antecedente del suelo y cubiertas con plástico para mantener uniformes las condiciones de humedad de la superficie. Después de que el suelo drenó hasta capacidad de campo (aproximadamente 24 hrs después), la lluvia simulada se aplicó a una intensidad de 7.2 cm/hr durante 45 minutos. El escurrimiento fue colectado continuamente, y mediciones de peso fueron hechas a intervalos de 5 minutos. Las variables de campo y laboratorio que se consideraron para el estudio se presentan en el Cuadro 1.

VARIABLES DE PLANTA

Las mediciones de cobertura del suelo se efectuaron antes de realizar las pruebas, se utilizó un rastrillo de 20 agujas (Kincaid y Williams, 1966) y se efectuaron cinco posiciones por parcela. Las variables de planta que se

tomaron en consideración fueron: cobertura basal del zacate, hierbas de hoja ancha y mantillo orgánico; para cobertura aérea se tomaron en cuenta zacates y hierbas de hoja ancha. Es importante aclarar que para el análisis del presente trabajo la cobertura basal vegetal (CBV) fue la suma de la cobertura basal por zacates más la cobertura basal por hierbas de hoja ancha.

VARIABLES DE SUELO

Antes de cada evento de lluvia simulada, en un sitio adyacente a la parcela de escurrimiento se determinó la densidad aparente y el contenido de humedad del suelo (0-5 y 6-10 cm de profundidad), por el método del cilindro de volumen conocido (Black, 1965) y el método gravimétrico (Gardner, 1965), respectivamente.

La determinación de microrrelieve del suelo y cobertura por rocas y suelo desnudo se efectuó con el rastrillo de agujas, el número de posiciones fue de 3 para el primero y 5 para el segundo y tercero; el microrrelieve fue reportado como la desviación estándar desde un plano paralelo a la superficie del suelo.

Al término de la prueba de simulación de lluvia, en cada parcela se tomó una muestra de suelo de aproximadamente 2 kg y fue enviada al laboratorio para el análisis de materia orgánica por el método de Walkley (Richards, 1980) y textura por el método del hidrómetro (Bouyoucos, 1962).

Las velocidades de infiltración fueron determinadas a intervalos de 5 minutos y se consideraron como la diferencia entre la lluvia simulada aplicada y el escurrimiento producido en cada parcela expresados en cm/hr. La velocidad inicial de infiltración es aquella determinada a los 5 minutos después de comenzada la prueba y la velocidad final de infiltración, la determinada a los 45 minutos.

ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Se realizó el análisis de correlación con la ayuda de una microcomputadora Apple IIe y se definieron aquellas variables cuyo coeficiente de correlación mostró significancia estadística al 5% de probabilidad como las de más influencia sobre la producción de escurrimiento, además se determinaron líneas de regresión entre variables y el volumen escurrido, así como pruebas de "t" entre algunas variables y pendientes de las líneas de regresión.

RESULTADOS Y DISCUSION

Se realizó un análisis de correlación por sitios entre los factores considerados en el estudio (Cuadro 1), se eligieron aquellos cuyo coeficiente de correlación con respecto a volumen escurrido pasaron la prueba al 5% de probabilidad. En los Cuadros 2 y 3 se presentan las matrices de correlación para SBC y BLE, respectivamente. A continuación se presenta cada uno de los grupos de factores (planta y suelo).

FACTORES DE PLANTA

En los Cuadros 2 y 3 se presenta el coeficiente de correlación entre cobertura basal vegetal y volumen escurrido para los dos sitios, ambos son significativos al nivel de probabilidad del 1%. El primer factor redujo apreciablemente el volumen escurrido, su efecto es más fácilmente observable en la Figura 1, donde se presentan las líneas de regresión entre estas dos variables para ambos sitios (SBC y BLE). En esta misma figura se observa que

Cuadro 1. Relación de variables consideradas en el análisis de correlación.

Variable	Unidades
Volumen total escurrido	Litros
Cobertura basal:	
vegetal	%
roca	%
mantillo orgánico	%
suelo desnudo	%
Cobertura aérea vegetal	%
Microrrelieve	S. Dev.
Densidad aparente	g/cm ³
Textura:	
arena	%
limo	%
arcilla	%
Infiltración	cm/hr
Producción de sedimentos	kg/ha

Cuadro 2. Matriz de correlación de las variables en estudio (selva baja caducifolia).

	Volumen escurrido (1)	Cobertura basal vegetal (%)	Suelo desnudo (%)	Limo (%)	Velocidad de infiltración inicial (cm/hr)	Velocidad de infiltración final (cm/hr)
Volumen escurrido (1)	1	-0.603	0.517	-0.404	-0.702	-0.978
Cobertura basal vegetal (%)		1	-0.766	0.172	0.712	0.558
Suelo desnudo (%)			1	0.261	-0.542	-0.475
Limo (%)				1	0.235	0.401
Velocidad de infiltración inicial (cm/hr)					1	0.605
Velocidad de infiltración final (cm/hr)						1

El coeficiente de correlación (r) debe ser mayor o igual a 0.404 para ser significativo al 5% de probabilidad.

La reducción en el volumen escurrido es más drástica en BLE que en SBC, aun cuando los valores de cobertura basal tienden a ser iguales (CBV entre 25 y 40 %). Esto pudo deberse a que en BLE se observaron pastos más amacollados que en SBC; según Blackburn (1983) las áreas de pastizal dominadas por pastos muy amacollados están caracterizadas por una mayor cubierta vegetal, alto contenido de materia orgánica y estabilidad de agregados, superficie del suelo rugosa, baja densidad aparente del suelo y velocidad de infiltración más alta, lo cual propicia condiciones adversas para la producción de escurrimiento.

El factor cobertura basal por mantillo orgánico en SBC se correlacionó significativamente (5% de probabilidad) con la cobertura basal vegetal ($r=0.415$), pero a su vez la cobertura basal por mantillo orgánico no tuvo correlación significativa con el volumen escurrido. García y Pase, citados por Tromble (1976), consignan que una cubierta por mantillo orgánico incrementó la capacidad de infiltración y por ende redujo el escurrimiento superficial. En el presente estudio esto no se observó debido al bajo porcentaje de cobertura de mantillo orgánico en SBC (Cuadro 4).

Cuadro 3. Matriz de correlación de las variables en estudio (bosque latifoliado esclerofilocaducifolio).

	Volumen escurrido (1)	Cobertura basal vegetal (%)	Velocidad de infiltración final (cm/hr)
Volumen escurrido (1)	1	-0.733	-0.641
Cobertura basal vegetal (%)		1	0.645
Velocidad de infiltración final (cm/hr)			1

El coeficiente de correlación (r) debe ser mayor o igual a 0.497 para ser significativo al 5% de probabilidad.

Factores de Suelo

Entre los factores de suelo que mostraron correlación con la variable dependiente volumen escurrido se encontraron: porcentaje de suelo desnudo, porcentaje de limo, velocidad de infiltración inicial (éstos sólo para SBC) y velocidad final de infiltración (este último tanto para SBC como para BLE). Los coeficientes de correlación se presentan en los Cuadros 2 y 3.

Como era de esperarse, el suelo desnudo incrementó la producción de escurrimiento y su coeficiente de correlación fue estadísticamente significativo al nivel de probabilidad del 1%, coincidiendo con los resultados de otros investigadores (Branson y Owen, 1970; Tromble, 1976).

El porcentaje de limo mostró una extraña correlación negativa con respecto a producción de escurrimiento (5% de probabilidad), que no concuerda con los resultados de otros investigadores. Blackburn (1975) en un estudio similar en áreas de pastoreo concluyó que las partículas de limo y arcilla estuvieron negativamente correlacionadas con la velocidad de infiltración, además, este mismo autor en un estudio posterior (1983) establece que las

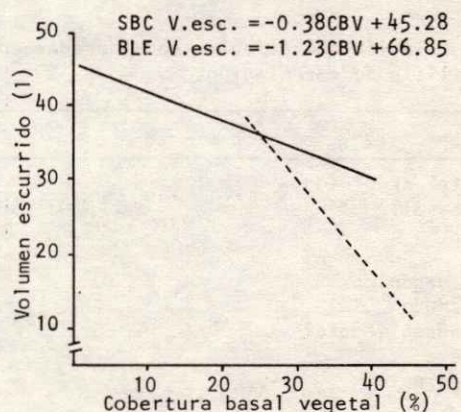


Figura 1. Líneas de regresión entre cobertura basal vegetal (%) y volumen escurrido (1) para SBC y BLE.

Cuadro 4. Valores medios de las variables suelo y planta por sitio.

VARIABLES	Selva baja caducifolia	Bosque latifoliado esclerofilocaducifolio
Volumen total escurrido (l)	38.01	28.37
Cobertura basal (%)		
vegetal	19.08	31.38
roca	9.75	1.31
mantillo orgánico	2.25	8.81
suelo desnudo	68.54	58.88
Cobertura aérea (%)		
vegetal	84.42	95.06
Textura del suelo (%)		
arena	60.83	44.75
arcilla	18.13	16.88
limo	21.0	37.75
Velocidad de infiltración (cm/hr)		
inicial	4.90	6.4
final	1.62	2.49

partículas de limo son las principales responsables de la formación de costra superficial en áreas de pastoreo con condiciones áridas y semiáridas.

Para las presentes condiciones se cree que en SBC no sucedió así, tal vez debido al alto porcentaje de arena presente (Cuadro 4), lo que pudo enmascarar los efectos reales de la fracción limosa, o bien, algún otro factor no considerado en el presente estudio tuvo influencia en esta respuesta.

La velocidad de infiltración inicial se correlacionó muy significativamente con la variable en estudio (1% de probabilidad), esto sólo sucedió en SBC, aun cuando la velocidad de infiltración inicial fue mayor en BLE (1% de probabilidad). El hecho de que la velocidad de infiltración inicial en SBC se asociase con un decrecimiento en el volumen escurrido, pudo ser debido a condiciones favorables del suelo (alto contenido de arena), aun cuando las condiciones de vegetación fueron más críticas (baja cobertura basal vegetal).

Se encontró correlación altamente significativa (1% de probabilidad) entre velocidad de infiltración final y volumen escurrido para los dos sitios en estudio. El efecto de este factor es mejor observado en la Figura 2, en la cual se presentan las líneas de regresión para ambos sitios. En dicha figura se muestra que el efecto de la velocidad de infiltración fue más drástico en disminuir el escurrimiento en SBC que en BLE, además este factor fue el más importante porque explicó en mayor producción el volumen escurrido en el primer sitio, esto debido a que las condiciones de vegetación en dicho sitio fueron más críticas y el suministro de agua al suelo dependió casi exclusivamente de la velocidad de infiltración del mismo.

Por otra parte, en BLE las condiciones de vegetación influyeron mejorando consistentemente las condiciones de infiltración del sitio, como puede observarse en el Cuadro 4. Wood *et al.* (1978) establecen que una mejor condición de la vegetación tiende a estabilizar el suelo

elevando la velocidad de infiltración y, por ende, reduciendo las pérdidas de agua por escurrimiento superficial.

Hasta este punto se han presentado los factores de planta y suelo que más influencia tuvieron en la producción de escurrimiento y se han establecido las diferencias entre los sitios de estudio (SBC y BLE).

De lo ya discutido se desprende que las pérdidas por escurrimiento superficial (expresadas como volumen escurrido) fueron mayores en SBC que en BLE, además, este último presentó mejores condiciones de vegetación (pastos más amacollados), aun cuando ambos presentaron condiciones de sobrepastoreo.

Wood *et al.* (1978) establecen que en algunos ecosistemas un sistema de pastoreo puede no incrementar la producción vegetal de un sitio sobrepastoreado, sin embargo, en ecosistemas donde el incremento de la producción vegetal puede ser alcanzado implementando un sistema de pastoreo, el incremento en la velocidad de infiltración y la disminución de escurrimiento superficial y producción de sedimentos pueden ser esperados.

En el presente estudio, BLE tal vez es el ecosistema donde los resultados en el mejoramiento de las condiciones hidrológicas pueden ser esperados mediante la adopción de un sistema adecuado de pastoreo, mientras que en SBC, tal vez se tenga que manejar el factor planta cambiando las especies existentes por aquellas que ayuden a mejorar las condiciones actuales del suelo.

CONCLUSIONES

De acuerdo a los objetivos planteados y los resultados obtenidos, se desprenden las siguientes conclusiones. Por sitio de estudio los factores de suelo (FS) y planta (FP) que tuvieron influencia en la producción de escurrimiento fueron los que se describen a continuación. Selva baja caducifolia: (a) cobertura basal vegetal (FP), (b) suelo desnudo (FS), (c) limo (FS), (d) velocidad de infiltración inicial (FS), y (e) velocidad de infiltración final (FS). Bosque latifoliado esclerofilocaducifolio: (a) cobertura basal vegetal (FP), y (b) velocidad de infiltración final (FS).

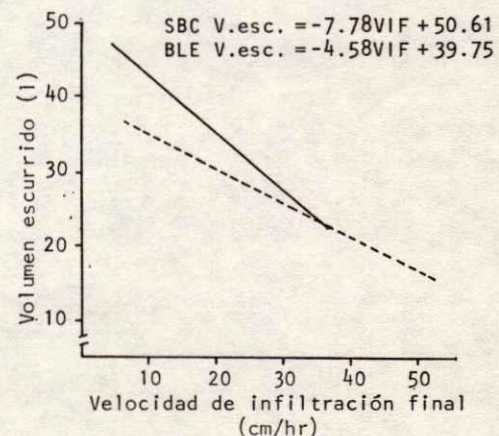


Figura 2. Líneas de regresión entre velocidad de infiltración final (cm/hr) y volumen escurrido (l) para SBC y BLE.

LITERATURA CITADA

- Black, C.A. (Ed.). 1965. Methods of soil analysis. Amer. Soc. of Agron. Series No. 9. Madison, Wisc.
- Blackburn, W.H. 1975. Factors influencing infiltration and sediment production of semiarid rangelands in Nevada. *Water Resources Res.* 6: 929-37.
- Blackburn, W.H. 1983. Livestock grazing impacts on water sheds. *Rangelands* 5: 123-5.
- Blackburn, W.H., R.O. Meeuwig, y C.M. Skau. 1974. A mobile infiltrometer for use on rangeland. *J. Range Manag.* 27: 322-3.
- Blackburn, W.H., R.W. Knight, y M.K. Wood. 1982. Impact of grazing on watersheds: A state of knowledge. Texas Agr. Exp. Sta. Pub. MP-1496.
- Bouyoucos, G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soil. *Agron. J.* 54: 464-5.
- Branson, F.A., y J.B. Owen. 1970. Plant cover, runoff, and sediment yield relationships on mancos shale in western Colorado. *Water Resour. Res.* 6: 783-90.
- CETENAL. 1973. Cartas de uso del suelo, F-13-D-16 (Tlalatenango, Zac.) y F-13-D-17 (Calvillo, Ags.). Comisión de Estudios del Territorio Nacional, México, D.F.
- Gardner W.H. 1965. Water Content. In: C.A. Black (Ed.), *Methods of soil analysis*. Amer. Soc. Agron. Series No. 9. Madison, Wisc.
- Gifford, G.F., y R.H. Hawkins. 1978. Hydrologic impact of grazing on infiltration: A critical review. *Water Resour. Res.* 14: 305-13.
- INIA-CAEDEC. 1985. Diagnóstico agropecuario del CAEDEC. Campo Agrícola Experimental de los Cañones. Jalpa, Zacatecas. Sin publicar.
- Kincaid, D.R., y G. Williams. 1966. Rainfall effects on soil surface characteristics following range improvement treatments. *J. Range Manag.* 19: 346-51.
- Rauzi, F., y C.L. Hanson. 1966. Water intake and runoff as affected by intensity of grazing. *J. Range Manag.* 19: 351-6.
- Rick, L.R. y H.G. Reynolds. 1963. Grazing in relation to runoff and erosion on some chaparral watersheds of Central Arizona. *J. Range Manag.* 16: 322-6.
- Richards, L.A. (Ed.) 1980. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Traducción del Handbook 60 USDA. Ej. LIMUSA, México.
- Tromble, J.M. 1976. Semiarid rangeland treatment and surface runoff. *J. Range Manag.* 29: 251-5.
- Wood, M.K., W.H. Blackburn, F.E. Smeins, y W.A. McGinty. 1978. Hydrologic impacts of grazing systems. In: *Proceedings of the First International Rangeland Congress* pp. 288-91.

CONDICIONES ACTUALES DE SALINIDAD Y DRENAJE DE UNA ZONA REPRESENTATIVA DE LA SERIE CASETA DEL DISTRITO DE RIEGO 009, VALLE DE JUAREZ, CHIH. ¹

Rodríguez Curiel, O. ²

RESUMEN

Los problemas de salinidad y drenaje son dos de los aspectos que afronta la agricultura en el Valle de Juárez, Chih. Los objetivos de este trabajo fueron evaluar las condiciones de salinidad y drenaje de una zona representativa, y plantear las alternativas de solución más adecuadas. Se seleccionó una parcela representativa de la serie caseta. Se inició el estudio mediante un levantamiento topográfico en una superficie de 6.17 ha, con la apertura, descripción y muestreo de tres pozos agrológicos y su posterior análisis. Se delimitaron dos unidades de suelo auxiliándose con un sondeo sistemático. Se detectó que los mayores problemas de salinidad se encontraron en la Unidad II y se diagnosticó que estos suelos corresponden a los salino-sódicos, mientras que en la Unidad I los problemas de salinidad se encontraron en las capas cercanas al nivel del manto freático. Se perforaron 12 pozos de observación con una equidistancia de 100 m, se tomó lectura de la profundidad del freático y se analizaron muestras del mismo. Se elaboraron planos de isobatas e isohypsas para detectar las líneas de flujo. En base a esta información, con los resultados de los análisis del agua del manto freático y de acuerdo al criterio de Hooghoudt, se recomienda la instalación de tres drenes parcelarios a una profundidad de 1.50 m y una equidistancia de 85 m como una primera etapa de la recuperación para aplicar posteriormente mejoradores y lavados en los suelos con problemas de sodio.

ABSTRACT

Salinity and drainage are two of the main problems in the Juárez Valley, Chih. This situation led to the development of the present work to evaluate the soil salinity and drainage status of one field of 6.17 ha, and to suggest possible reclamation procedures. The field was stratified in two units, according to the soil characteristics. The most important salinity problems were located in Unit II, where the soil was classified as saline-sodic. In Unit I, salinity problems were located at the layers near the groundwater level. The drainage requirement was estimated by means of sampling the water table from 12 holes separated 100 m from each other, and using the Hooghoudt criteria. The results obtained showed the requirement of three drains as the first stage of the reclamation procedure. Drains should be placed at a depth of 1.5 m and spaced at intervals of 85 m.

INTRODUCCION

En las regiones con climas áridos y semiáridos, los problemas de ensalitramiento y manejo de agua son dos de los aspectos de mayor importancia en la productividad de los suelos que han preocupado a los científicos y expertos de diferentes países durante muchos años.

En México, en zonas con estas características, con el desarrollo de la irrigación y aún contando con aguas de buena calidad química, se ha presentado el problema de ensalitramiento y/o de manto freático elevado. Esto se originó debido a que las causas y los efectos de los procesos de ensalitramiento y manto freático elevado no fueron adecuadamente comprendidos, y como consecuencia, no se le dio la debida importancia al manejo de los suelos, del agua y de los cultivos. En la actualidad, aproximadamente un 30% de los 5 millones de hectáreas bajo riego del país tiene problemas de ensalitramiento y/o drenaje en diferentes clases y grados.

El Distrito de Riego del Valle de Juárez, localizado en la parte norte del estado de Chihuahua, cuenta con una superficie factible para la agricultura de riego de 24,569 ha, de las cuales aproximadamente 15,000 se encuentran actualmente en explotación y de éstas un área del orden de 11,000 ha se ha dedicado en los últimos ciclos agrícolas al cultivo del algodón que es el principal en el distrito, siguiéndole en orden de importancia los cultivos de trigo, alfalfa y sorgo.

Uno de los principales problemas que afronta la agricultura en el valle es el cambio apreciable de algunas propiedades físicas de los suelos como la estructura y consistencia, a causa de la contaminación por sales y materiales nocivos que provienen de las diversas fuentes de agua de riego. Esto ocasiona que dichas áreas manifiesten una escasa o nula producción. El área afectada por este problema es de aproximadamente 1,555 ha de la superficie bajo riego. Por lo tanto, es de suma importancia

¹ Ponencia presentada en el XVIII Congreso Nacional de la SMCS.

² Escuela Superior de Agricultura "Hermanos Escobar", Ciudad Juárez, Chih.

implementar estudios sobre las condiciones de salinidad y drenaje de áreas de riego en el Valle de Juárez que sirvan de base para la aplicación de metodologías adecuadas para identificar, caracterizar, controlar y combatir los problemas de ensaltramiento y/o drenaje. Es importante además, adaptar plantas a estas condiciones mejorando así la productividad.

En base a lo anterior, los objetivos del presente trabajo son: evaluar las condiciones actuales de salinidad y drenaje de un área representativa de la serie de suelos caseta en el Distrito de Riego 009 Juárez, Chih., y plantear las alternativas de rehabilitación más viables para dicha área.

REVISION DE LITERATURA

Las fuentes originales de los constituyentes salinos son los minerales primarios encontrados en los suelos y las rocas expuestas de la corteza terrestre. Como resultado de la descomposición química y la intemperización física, los constituyentes solubles son liberados gradualmente de los minerales.

En general, los suelos con altas concentraciones de sales, se encuentran en las regiones áridas y semiáridas donde la lixiviación es de naturaleza local dada la escasa precipitación pluvial; la elevada concentración tiende a elevar las sales en la superficie del suelo y en las aguas subterráneas. Además, este proceso se ve acelerado cuando se utilizan aguas de mala calidad para riego (De la Peña, 1981).

Los problemas de drenaje surgen en las grandes zonas de riego principalmente como resultado de la poca eficiencia en la conducción y en la aplicación del agua de riego. Además, el problema de drenaje puede adquirir mayor magnitud, cuando se utilizan grandes volúmenes de agua o "sobre-riego" requerido para el mejoramiento de los problemas de salinidad y alcalinidad.

Pizarro (1978) menciona que la eliminación de las sales solubles del suelo se consigue mediante la técnica del lavado, que consiste en hacer pasar a través del suelo una cierta cantidad de agua que arrastra consigo esas sales. Para que los lavados sean factibles se requiere que el suelo tenga un drenaje que permita que las aguas cargadas de sales sean eliminadas de la zona radicular. Aceves (1981) cita que los métodos hidrotécnicos de recuperación comprenden el lavado y el drenaje cuyo principio es muy simple: "las sales deben ser eliminadas de la capa superficial del perfil y posteriormente removidas del área afectada con el objeto de evitar su redistribución". Para que el lavado de un suelo en presencia de un elevado nivel freático u horizontes de baja permeabilidad sea efectivo se necesita construir drenaje artificial.

Reeve (citado por Velasco y Cárdenas, 1973) ha encontrado como regla general que para suelos altamente salinos una lámina de un pie de agua por cada pie de profundidad de suelo, generalmente abastece suficiente agua de lixiviación que permita a los cultivos desarrollarse satisfactoriamente.

Armenta y García (1983), en trabajos realizados en la parte norte de Tamaulipas, reportan que mediante la instalación de líneas de drenaje con una separación de 50 m en un lote que presentaba problemas de salinidad en diversos grados, obtuvieron una disminución de los valores de $CE \times 10^3$ de 12 a 6 y de 8.5 a 6.5 para profundidades de 0-60 y 60-120 cm, respectivamente, en el periodo de mayo de 1980 a septiembre de 1982, aun cuando no se había aplicado ninguna lámina de riego con fines de lavado.

Serrano y Velázquez (1984), con el fin de evaluar la efectividad de drenaje subterráneo, llevaron a cabo un experimento de campo que se desarrolló en el ex-lago de Texcoco, Méx., en un suelo altamente salino (con valores de conductividad eléctrica de 100 mmhos/cm a 25°C y un porcentaje de sodio intercambiable de 96). Se probaron espaciamientos de 15, 30 y 45 m entre drenes, además los niveles de 100, 150 y 250 cm de lámina total de lavado. Al concluir, la etapa de lavado había disminuido a un tercio del valor inicial, pero las condiciones eran todavía inapropiadas para el desarrollo del cultivo; el espaciamiento óptimo fue de 15 m y la lámina de lavado de 100 cm, aun cuando los espaciamientos de 30 y 45 m también dieron buenos resultados.

MATERIALES Y METODOS

El presente trabajo se desarrolló recabando primeramente la información pertinente y disponible en el Distrito de Riego 009 Valle de Juárez, Chih., en relación con las zonas que presentan problemas de manto freático elevado, así como condiciones de salinidad.

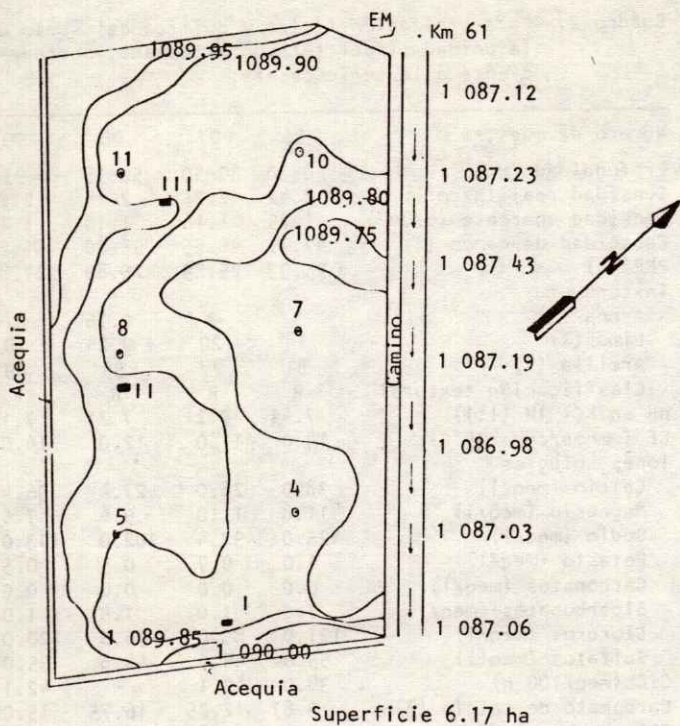
Una vez analizada la información y en base a lo anterior, se optó por llevar a cabo este estudio en la parcela escolar propiedad de la Escuela Secundaria Técnica No. 10, por considerar que es una zona representativa de la serie caseta, misma que presenta los mayores problemas de salinidad y drenaje en comparación con las demás series del valle.

El lugar de estudio se ubica en el entronque de la carretera Juárez-Porvenir y Porfirio Parra; corresponde al ejido Benito Juárez y Reforma, municipio de Guadalupe D.B. Cuenta con una superficie de 6.17 ha, mismas que mostraban niveles freáticos de 85 a 125 cm de profundidad, afloramientos salinos en la superficie y el cultivo del algodón en algunas partes no había podido prosperar, sólo manchas de hierbas tolerantes a las sales estaban presentes (Figura 1).

Se procedió a efectuar un levantamiento topográfico del predio, así como todos los detalles posibles por el método de "poligonales", se trazó una cuadrícula de 25 x 25 m y en cada vértice de la misma se tomó una lectura en el estadal por medio de un nivel montado para luego calcular las cotas de cada punto y así trazar las curvas a nivel. Además, esta cuadrícula sirvió de base para los estudios freamétricos y de salinidad.

Para llevar a cabo el estudio agrológico, se efectuaron recorridos por el campo y se realizaron sondeos previos para así definir el sitio en el cual serían ubicados los pozos agrológicos. Una vez ubicados los sitios de observación se procedió a la apertura, descripción y toma de muestras de los perfiles de tres calicatas. Para caracterizar los suelos se procedió a describir los perfiles de acuerdo con Cuanalo (1975). Las muestras de suelo colectadas en cada horizonte identificado fueron llevadas al laboratorio de Suelos para su posterior análisis físico-químico.

Dado el origen de los suelos y su gran variabilidad, se efectuaron 28 sondeos en forma sistemática (en cada vértice de una cuadrícula de 50 x 50 m) para comprobar la extensión lateral de cada perfil. En todos los sondeos y en cada horizonte se determinó textura al tacto, consistencia y reacción al HCl. Con esta información obtenida al ser comparada con la de los perfiles y complementarla con los análisis de laboratorio nos permite delimitar las unidades de suelos.



Simbología:

- EM Estación meteorológica
- ⊙ Pozo observación
- Calicatas
- → Dren

Escala: 1:2 000
Diciembre 1984

Figura 1. Plano topográfico del terreno estudiado.

A las muestras de suelo colectadas en cada perfil, después de haber sido secadas, molidas y tamizadas, en el laboratorio se le determinaron sus propiedades físico-químicas, utilizando los métodos expuestos en USDA, 1954.

Para realizar el estudio de salinidad se procedió de la siguiente manera: en cada vértice de una cuadrícula cuya equidistancia fue de 50 m y utilizando una barrena de tipo holandesa, se recolectaron muestras en las profundidades de 0-30, 30-60 y mayores de 60 cm hasta donde lo permitió el manto freático, obteniéndose un total de 84 muestras de aproximadamente 1 kg cada una, las que, debidamente etiquetadas, fueron secadas al aire, molidas y pasadas a través de un tamiz de 2 mm de diámetro.

De cada muestra se preparó una pasta saturada y luego, mediante la bomba de vacío, se obtuvo el extracto de suelo a saturación. En los extractos acuosos obtenidos fueron cuantificados los cationes solubles Ca, Mg y Na. Una vez obtenidos estos datos se calcularon los parámetros de RAS y PSI.

Posteriormente, se procedió a clasificar los suelos por salinidad utilizando la clasificación propuesta por el personal del Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos (USDA, 1954), para poder así elaborar los planos respectivos.

Para llevar a cabo el estudio freamétrico, se ubicaron los sitios en que serían perforados 12 pozos de observación, los que tendrían una equidistancia de 100 m entre sí. De éstos, seis fueron ubicados en la parcela cuestión de estudio y el resto en las parcelas contiguas con la finalidad de recabar mayor información para la elaboración de los planos correspondientes.

Una vez ubicados los sitios en los cuales serían instalados los pozos de observación se procedió a la apertura de los mismos mediante una barrena tipo "postera" hasta una profundidad de 2 metros.

Cuando el nivel freático se había estabilizado, mediante un flotador se determinó la profundidad del manto freático, asimismo, a cada pozo de observación se le determinó su cota correspondiente. Con esta información se elaboró el plano de niveles freáticos con respecto a la superficie del terreno (ISOBATAS) y el plano de niveles freáticos con respecto al nivel del mar (ISOHYPASAS).

De cada pozo de observación, se obtuvo una muestra de agua del manto freático de aproximadamente 0.750 l, los que fueron etiquetados y llevados al laboratorio para su posterior análisis.

Finalmente, a cada muestra se le efectuaron las siguientes determinaciones: conductividad eléctrica, pH, cationes y aniones solubles. Después fueron clasificadas estas aguas por su grado de salinidad y sodicidad.

Para completar el estudio y para fines de diseño del sistema de drenaje subterráneo se procedió a recabar la información de conductividad hidráulica, velocidad de infiltración, usos consuntivos de algunos cultivos, lámina de riego, frecuencia de riego, etc., de trabajos realizados en la zona por el personal del Distrito de Riego 009 y alumnos de la Escuela Superior de Agricultura "Hermanos Escobar".

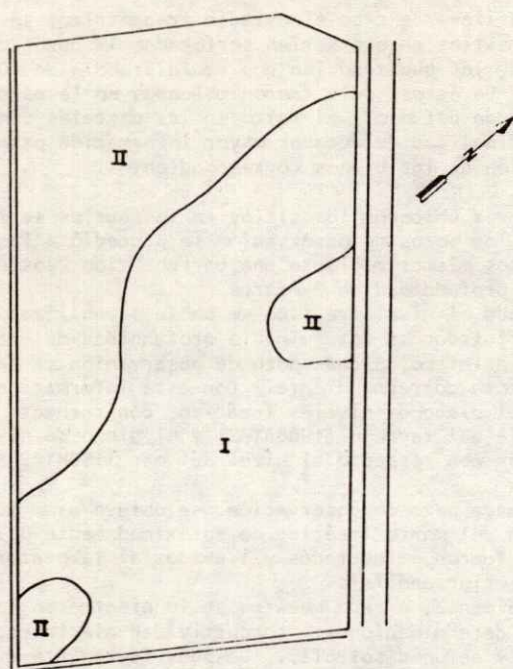
RESULTADOS

Con los análisis y la descripción de tres pozos agrológicos en la zona de estudio se delimitaron dos unidades de suelos distintas denominadas Unidad I y Unidad II, cuyas características se describen a continuación.

Unidad I. Los suelos de esta zona cubren una superficie de 2.60 ha, o sea un 42.1% de la zona total de estudio; presentan textura migajón arcillosa en los primeros horizontes descansando sobre un migajón arenoso. Tanto los valores de conductividad eléctrica como los de porcentaje de sodio intercambiable se consideran bajos, por lo que el cultivo del algodón se desarrolló mejor que en la Unidad II. El contenido de carbonato de calcio es bajo, lo mismo que los valores de capacidad de intercambio catiónico.

Unidad II. Estos suelos ocupan una superficie de 3.57 ha, o sea un 57.9% del total; presentan texturas arcillosas en todos los horizontes del perfil representativo. En esta unidad el cultivo del algodón se encontró menos desarrollado y en algunas partes su presencia fue nula, sólo plantas resistentes a la salinidad pudieron prosperar. Se encontraron los valores más altos de conductividad eléctrica y porcentaje de sodio intercambiable en esta unidad. Los valores de capacidad de intercambio catiónico son altos, así como el contenido de carbonato de calcio. Presentan una gran capacidad de retención de humedad (Figura 2).

Las propiedades físico-químicas más importantes de las unidades se indican en los Cuadros 1 y 2. Los resultados del análisis químico del agua de presentan en el Cuadro 3.



Unidad	Superficie
I	2.60 ha - 42.1%
II	3.57 ha - 57.9%
Total	6.17 ha - 100.0%

Figura 2. Plano agrológico del terreno estudiado.

Cuadro 1. Caracterización física y química del suelo de la Unidad I del terreno estudiado, perteneciente a la serie caseta.

Número de muestra	01	02	03	04	05
Profundidad (cm)	0-15	15-36	36-50	50-65	65-120
Densidad real (g/cm ³)	2.46	2.60	2.60	2.53	2.68
Densidad aparente	1.25	1.35	1.33	1.29	1.37
Capacidad de campo (%)	26.30	27.03	23.22	21.56	14.97
PMP (%)	14.29	14.69	12.62	11.72	8.13
Textura					
Arena (%)	33	33	43	35	67
Limo (%)	32	30	26	42	14
Arcilla (%)	35	37	31	23	19
Clasificación textural	MR	MR	MR	M	MA
pH en KCl 1M (1:1)	7.14	7.33	7.48	7.34	7.53
CE (mmhos/cm a 25°C)	1.1	2.2	2.0	2.4	2.8
Iones solubles					
Calcio (meq/l)	3.2	7.0	6.0	8.0	7.0
Magnesio (meq/l)	1.2	2.2	3.8	4.4	3.8
Sodio (meq/l)	7.6	13.0	13.0	17.4	15.2
Potasio (meq/l)	0.3	0.4	0.4	0.6	0.4
Carbonatos (meq/l)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Bicarbonatos (meq/l)	3.0	3.0	1.2	1.2	1.0
Cloruros (meq/l)	6.0	11.0	10.0	16.0	16.0
Sulfatos (meq/l)	2.9	8.1	12.3	13.8	10.0
CIC (meq/100 g)	20.4	14.9	6.8	8.2	9.5
Carbonato de calcio (%)	9.22	7.32	4.25	6.10	2.70
PSI	5.9	7.2	6.9	8.3	7.5
Clasificación	N ¹	N ¹	N ¹	N ¹	N ¹

¹ Suelos normales.

Fecha: 27 de septiembre de 1984.

Cuadro 2. Caracterización física y química del suelo de la Unidad II del terreno estudiado, perteneciente a la serie caseta.

Número de muestra	06	07	08	09
Profundidad (cm)	0-30	30-50	50-95	95
Densidad real (g/cm ³)	2.42	2.25	2.14	2.27
Densidad aparente (g/cm ³)	1.25	1.16	1.10	1.19
Capacidad de campo (%)	47.71	46.55	55.00	51.29
PMP (%)	25.93	25.29	29.89	27.87
Textura				
Arena (%)	5	3	0.76	1
Limo (%)	14	20	0.24	10
Arcilla (%)	81	77	99	89
Clasificación textural	R	R	R	R
pH en KCl 1M (1:1)	7.41	7.21	7.21	7.19
CE (mmhos/cm a 25°C)	14.0	11.0	12.0	14.0
Iones solubles				
Calcio (meq/l)	38.0	28.0	27.4	36.4
Magnesio (meq/l)	11.8	11.0	9.6	7.6
Sodio (meq/l)	125.0	92.4	102.0	113.0
Potasio (meq/l)	1.0	0.7	0.5	0.5
Carbonatos (meq/l)	0.0	0.0	0.0	0.0
Bicarbonatos (meq/l)	1.0	1.0	1.4	1.0
Cloruros (meq/l)	121.0	85.0	96.0	120.0
Sulfatos (meq/l)	55.0	45.0	44.6	35.0
CIC (meq/100 g)	38.0	42.1	-	42.1
Carbonato de calcio (%)	9.87	12.25	16.75	15.00
PSI	26.4	22.8	25.2	25.5
Clasificación	SS ¹	SS ¹	SS ¹	SS ¹

¹ Suelo salino-sódico.

Fecha: 27 de septiembre de 1984.

Con respecto a la salinidad y de acuerdo a la clasificación propuesta por el personal del Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos (USDA, 1954) se encontraron tres clases de suelo correspondientes a los normales, salinos y salino-sódicos en la capa de 0-30 cm de profundidad, predominando los salinos.

En relación a las profundidades de 0-30 cm y mayores de 60 cm, conforme aumentó ésta hasta acercarse al manto freático, la concentración de sales se incrementó teniendo suelos salinos en mayor proporción debido a la influencia del mismo (Figuras 3, 4 y 5).

De acuerdo al estudio freamétrico, se detectaron profundidades del manto freático que variaron entre 85 y 125 cm, encontrándose las profundidades mayores cercanas al dren a cielo abierto existente (Figura 6). Asimismo, mediante el plano de Isohypsas (Figura 7) se determinó que el dren existente no es suficiente para abatir el freático y que las líneas de flujo no están todas orientadas hacia él, lo que justifica la instalación de la red de drenaje (Figura 8).

Cuadro 3. Caracterización química del agua del manto freático del terreno estudiado, perteneciente a la serie caseta.

No. pozo	Prof. MF (cm)	CEx10 ⁶	pH	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Suma	CO ₃ ⁼	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	Suma	RAS	Clasificación
1	124	7,800	7.7	16.0	5.0	64.1	0.38	85.48	3.6	3.4	45.0	32.0	84.00	19.8	C5-S3
2	100	3,700	8.17	8.0	5.2	28.3	0.25	41.75	1.2	4.8	19.0	16.0	41.00	5.2	C4-S1
3	81	3,600	8.09	9.0	4.0	23.9	0.38	37.15	1.6	3.6	18.0	13.2	36.40	9.4	C4-S1
4	130	8,300	8.07	25.0	8.4	64.1	0.48	97.98	0.8	5.0	40.0	53.3	99.10	15.7	C5-S2
5	104	3,400	7.89	8.0	3.0	21.7	0.37	33.07	1.6	4.8	19.0	7.6	33.00	9.3	C4-S1
6	92	4,600	8.06	18.0	5.4	26.1	0.50	50.00	2.0	2.6	25.0	19.8	49.40	7.6	C4-S1
7	120	8,000	7.95	26.0	11.0	56.5	0.48	93.98	2.0	4.0	37.0	51.5	94.10	13.1	C5-S2
8	102	9,900	7.81	26.0	8.0	80.4	0.39	114.79	1.2	5.6	50.0	56.3	113.30	19.5	C5-S3
9	82	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	120	14,000	7.77	31.0	20.0	116.4	0.69	168.09	1.6	6.2	115.0	43.9	166.70	23.0	C5-S3
11	90	5,600	7.81	28.4	5.6	31.5	0.77	66.27	1.6	4.8	26.0	33.6	66.0	7.6	C5-S1
12	78	21,000	7.76	42.4	28.6	203.3	1.30	275.60	0.8	5.6	214.0	53.8	274.20	34.1	C5-S5
Dren	KM 61	13,000	7.73	26.8	4.2	100.0	0.33	131.33	2.0	4.4	110.0	14.9	131.30	25.4	C5-S3

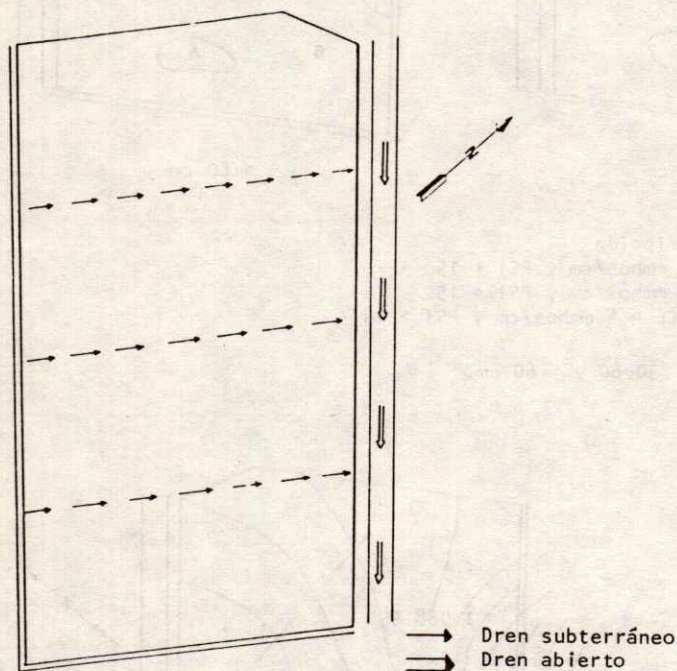


Figura 8. Proyecto de drenaje

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Es necesario el establecimiento del sistema de drenaje subterráneo para abatir el nivel del manto freático hasta una profundidad adecuada para el desarrollo de los cultivos como una primera etapa de recuperación.
- Una vez instalados dichos drenes y dependiendo de la evolución del status de salinidad y sodicidad, hacer la aplicación de mejoradores y láminas de lavado.
- Realizar estudios en áreas con problemas similares para determinar separaciones y profundidades óptimas desde el punto de vista económico, ya que el costo de instalación de drenes es muy elevado.

AGRADECIMIENTOS

A la Escuela Superior de Agricultura "Hermanos Escobar" por el apoyo brindado para la elaboración de este trabajo y al Dr. Juan Fco. Pissani Z. por sus valiosos consejos para llevarlo a cabo.

LITERATURA CITADA

- Aceves N., L. 1981. Los terrenos ensalitrados y los métodos para su recuperación. Universidad Autónoma Chapingo, Méx.
- Armenta R., J.I. y J.L. García C. 1983. El drenaje subterráneo en la recuperación de suelos ensalitrados en el Distrito de Riego No. 025, Bajo Río Bravo, Tamaulipas. Revista Terra 2: pp 80-85.
- Cuanalo de la C., H. 1975. Manual para la descripción de perfiles de suelo en el campo. Colegio de Postgraduados, Chapingo, Méx.
- Peña, I. de la. 1981. Salinidad de los suelos agrícolas. SARH. Boletín Técnico No. 10.
- Pizarro F. 1978. Drenaje Agrícola y recuperación de suelos salinos. Editora Agrícola Española, S.A., Madrid, España.
- Serrano P., R. y A. Velázquez L. 1984. Evaluación de un sistema de drenaje subterráneo en suelos del Ex-Lago de Texcoco. Resúmenes XVII Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. pp 80.
- USDA. 1954. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Agric. Handbook 60. Trad. INIA. México.
- Velasco M., H.A. y Cárdenas B., R. 1973. Estudio analítico sobre recuperación de suelos altamente salinos del ejido "El Venado" de la región agrícola de Cuatro ciénegas, Coah. Memorias VI Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo, México.

EL MANEJO DE LA FERTILIZACION NITROGENADA Y SU EFECTO EN EL SUELO Y CULTIVO +

Núñez E., R.*
Etchevers B., J.D.
Cruz Z., V.M.
Gavi R., F.

RESUMEN

Se estableció un experimento de campo tendiente a maximizar la eficiencia de la fertilización nitrogenada en el cultivo de maíz de temporal en un Molisol profundo de pH 7.8. Se ensayaron dos fuentes de nitrógeno (urea y sulfato de amonio) bajo dos niveles (40 y 120 kg N/ha), dos profundidades (2 y 15 cm abajo del fondo del surco) y dos métodos de aplicación (en banda o mateado). El sulfato de amonio produjo rendimientos de grano 11.8% superiores a los obtenidos con urea. No se encontró efecto significativo de la profundidad o método de aplicación del fertilizante sobre el rendimiento de grano; sin embargo hubo una tendencia de la aplicación profunda del sulfato de amonio a elevar los rendimientos. Asimismo, la aplicación profunda de ambas fuentes de nitrógeno tendió a reducir los porcentajes de plantas estériles y las fallas de polinización en las mazorcas.

ABSTRACT

A field experiment with rainfed corn in a deep Mollisol, pH 7.8 was established with the purpose of maximizing nitrogen fertilizer efficiency. Variables under study were two nitrogen sources (Urea and ammonium sulphate) at two rates (40 and 120 kg N/ha), two placement depths (2 and 15 cm below furrow bottom) and two application methods (banded and hilled). Ammonium sulphate produced grain yields 11.8% higher than those obtained with urea. No significant effect on grain yield was detected attributable to depth or method of fertilizer application; however, there was a tendency of deeply placed ammonium sulphate to increase grain yields. Similarly, deep placement of both nitrogen sources tended to reduce percent of sterile plants and pollination fault on ears.

INTRODUCCION

El nitrógeno es el elemento más comúnmente deficiente en la agricultura de México. Anualmente se emplean en el país más de un millón de toneladas de este elemento para fertilizar los diversos cultivos agrícolas, lo que representa para los campesinos una erogación anual superior a los sesenta mil millones de pesos. Por otra parte, es sabido que un porcentaje importante del nitrógeno fertilizante aplicado al suelo, no logra ser absorbido por el cultivo, debido a pérdidas por volatilización o lixiviación. El porcentaje de utilización del nitrógeno fertilizante por cultivos anuales varía normalmente del 30 al 70 %, dependiendo de diversos factores como son la dosis y fuente utilizada; la profundidad, forma y oportunidad de su aplicación, el régimen de temperatura y humedad y el tipo de suelo y cultivo. La complejidad de los factores y sus interacciones sobre la dinámica del nitrógeno en el suelo, obliga a manejar el problema por medio de modelos de simulación cuya precisión se prueba y ajusta con datos directos de campo. El Colegio de Postgraduados ha venido desarrollando experimentos de campo con maíz de temporal para adaptar a las condiciones de Chapingo, el modelo de simulación que sobre dinámica del nitrógeno en el suelo fue generado por el Instituto de Investigación del Ministerio de Agricultura de Holanda y por el Technion de Israel. Dicho modelo se encuentra todavía en proceso de ajuste. En este reporte se presentan algunos de los re-

sultados obtenidos en el experimento desarrollado en Chapingo durante 1984, en el cual se ensayaron dos fuentes de nitrógeno (urea y sulfato de amonio) bajo dos dosis (40 y 120 kg de N/ha), dos profundidades (normal y profunda) y dos métodos de aplicación (en banda o mateado), evaluándose su efecto sobre la distribución del nitrógeno y de la humedad en el suelo, el desarrollo radicular, el rendimiento de grano y rastrojo y otras características del cultivo.

REVISION DE LITERATURA

Los diferentes fertilizantes nitrogenados pueden considerarse igualmente eficientes si se reconocen sus propiedades y se manejan adecuadamente (Tisdale y Nelson, 1975). Los diferentes ensayos realizados en México sobre distintos fertilizantes nitrogenados reportan resultados inconsistentes a favor de uno u otro de los materiales ensayados. El sulfato de amonio ha mostrado superioridad sobre la urea en el Valle de Toluca (Leyva, 1976) y en los suelos alcalinos deficientes en zinc de Ciudad Serdán, Puebla (Castro, 1978); en cambio, Aveldaño (1975) encontró tendencia a una superioridad de la urea sobre el sulfato de amonio como fertilizantes para cebada en varios sitios de Tlaxcala y Norte de Puebla.

+ Ponencia presentada en el XVIII Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo.

* Académicos del Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.

En cuanto a profundidades de aplicación del fertilizante, es bien conocido que las aplicaciones en la superficie del suelo pueden sufrir fuertes pérdidas de nitrógeno por volatilización (Ernst et al, 1960), por lo que invariablemente se recomienda la incorporación del fertilizante nitrogenado con el suelo. Bajo condiciones de limitación de lluvia, una fertilización en el estrato superficial del suelo puede no coincidir con la zona de máxima disponibilidad de agua, por lo que en esas condiciones la eficiencia de la fertilización nitrogenada puede mejorarse mediante una colocación profunda del fertilizante (Whitaker et al, 1978). Por otra parte, las aplicaciones de fertilizante nitrogenado en banda o mateadas, para cultivos en surcos, han resultado más efectivas que las aplicaciones al voleo, ya que el fertilizante queda más cercano a las raíces del cultivo y menos disponible a las malezas que se desarrollan entre los surcos; sin embargo, no se ha observado diferencia entre aplicaciones mateadas o en banda a lo largo del surco.

MATERIALES Y METODOS

Durante el ciclo primavera-verano de 1984 se desarrolló un experimento de campo en el lote X-6 de la Estación Agrícola Experimental de la Universidad Autónoma Chapingo. El suelo tiene una textura franca, con pH de 7,8, profundo, sin problema de salinidad, con 1,5% de materia orgánica, 0,09% de nitrógeno total, 19 ppm de nitrógeno nítrico y 7 ppm de nitrógeno amoniacal en el estrato de 0-30 cm, disminuyendo en contenido nutrimental en estratos inferiores. El Cuadro 1 muestra los 15 tratamientos ensayados, que involucran variables de dosificación de nitrógeno, tipo de fertilizante, profundidad y método de aplicación de fertilizante. Cada tratamiento se repitió cuatro veces en bloques al azar, con parcelas de siete surcos de 6 m de largo y 85 cm de anchura. Como planta indicadora se utilizó maíz H-28, a razón de dos plantas cada 50 cm, obteniéndose una población de 47 000 plantas por hectárea. Durante el período de desarrollo del cultivo se registró una precipitación total de 613,9 mm, adecuadamente distribuida, por lo que las plantas no llegaron a manifestar síntomas de marchitez.

Cuadro 1. Relación de tratamientos ensayados. Chapingo, Méx. 1984.

Tratamiento	N aplicado (kg/ha)	Fuente de N*	Aplicación de fertilizante Ubicación**	Método
1	0	Ninguna	-	-
2	40	S.A.	Normal	Banda
3	80	S.A.	Normal	Banda
4	120	S.A.	Normal	Banda
5	160	S.A.	Normal	Banda
6	40	S.A.	Profunda	Banda
7	120	S.A.	Profunda	Banda
8	40	S.A.	Normal	Mateado
9	120	S.A.	Normal	Mateado
10	40	S.A.	Profunda	Mateado
11	120	S.A.	Profunda	Mateado
12	40	Urea	Normal	Banda
13	120	Urea	Normal	Banda
14	40	Urea	Profunda	Banda
15	120	Urea	Profunda	Banda

* S.A. = sulfato de amonio.

** Normal = fertilizante mezclado con los 2 cm superiores de suelo del fondo del surco.

Profunda = 15 cm abajo del fondo del surco.

El fertilizante nitrogenado se aplicó en dos fracciones iguales. La primera mitad se aplicó al momento de la siembra en los tratamientos en banda y a la nacencia (18 días después) en los tratamientos mateados. La segunda mitad se aplicó a la segunda escarda (48 días después de la siembra) a profundidad normal en todos los tratamientos excepto el mateado profundo, que se hizo en la misma forma de la primera aplicación. Además de la fertilización nitrogenada, se hizo una aplicación uniforme y general de 50 kg de P_2O_5 /ha como superfosfato triple en banda al momento de la siembra. Durante el desarrollo del cultivo se hicieron once determinaciones de humedad del suelo con aspersor de neutrones a las profundidades de 14-44 y 44-74 cm en los tratamientos 1 al 7. El suelo de estos mismos tratamientos se muestreó en cuatro diferentes fechas para determinar su contenido de nitrógeno nítrico y amoniacal hasta 100 cm de profundidad.

Se hicieron tres muestreos de plantas de los tratamientos 1 al 7, coincidentes en fecha con los muestreos de suelo, a los 46, 106 (completo espigamiento) y 156 (madurez fisiológica) días después de la siembra, para determinación de peso seco, contenido de nitrógeno y distribución de raíces en el perfil del suelo. Esto último sólo en los tratamientos 2, 4, 6 y 7.

A la cosecha se registró el rendimiento de grano y rastrojo, así como el índice de falla de polinización en la mazorca, el porcentaje de plantas estériles y la cantidad de nitrógeno absorbido por las plantas.

RESULTADOS

Contenido de humedad del suelo

La Figura 1 muestra la variación en el contenido de humedad del suelo en su estrato de 14-44 cm, para siete tratamientos durante el desarrollo del cultivo. Puede apreciarse que después del 19 de junio las mayores diferencias en el contenido de humedad del suelo fueron del orden de 3,5% y los tratamientos 4 y 7 fueron los que mostraron los más bajos contenidos de humedad. Ambos tratamientos recibieron 120 kg N/ha como sulfato de amonio en banda, normal y profunda y ambos fueron también los más productivos en grano, rebasando 6 ton/ha, como se verá después. El más alto contenido de humedad del suelo en general correspondió al tratamiento testigo, que fue el menos rendidor tanto de grano como de rastrojo. Por lo anterior, se demuestra que el consumo de agua guardó relación con el desarrollo y rendimiento del cultivo.

Contenido de nitratos y amonio en el perfil del suelo

La Figura 2 muestra el contenido de nitrógeno nítrico y amoniacal del perfil del suelo en siete diferentes tratamientos 46 días después de la siembra. Se observa que el mínimo contenido de nitratos correspondió a los tratamientos 1, 2 y 6 que llevaron 0, 40 y 40 kg N/ha respectivamente; en cambio el máximo contenido de nitratos correspondió al tratamiento 7 que llevó 120 kg N/ha en banda profunda. El mínimo contenido de nitrógeno amoniacal en los dos estratos superiores correspondió al tratamiento testigo y el mayor a los tratamientos 5 y 7. El tratamiento 5 llevó la más alta dosis de nitrógeno (160 kg/ha) en banda normal y el 7 llevó 120 kg N/ha en banda profunda. Por lo tanto, se advierte correlación entre la fertilización y el contenido de nitrógeno en el suelo en esta fecha. En los muestreos subsiguientes no se encontró asociación entre los tratamientos y el contenido de ambas formas de nitrógeno en el perfil del suelo.

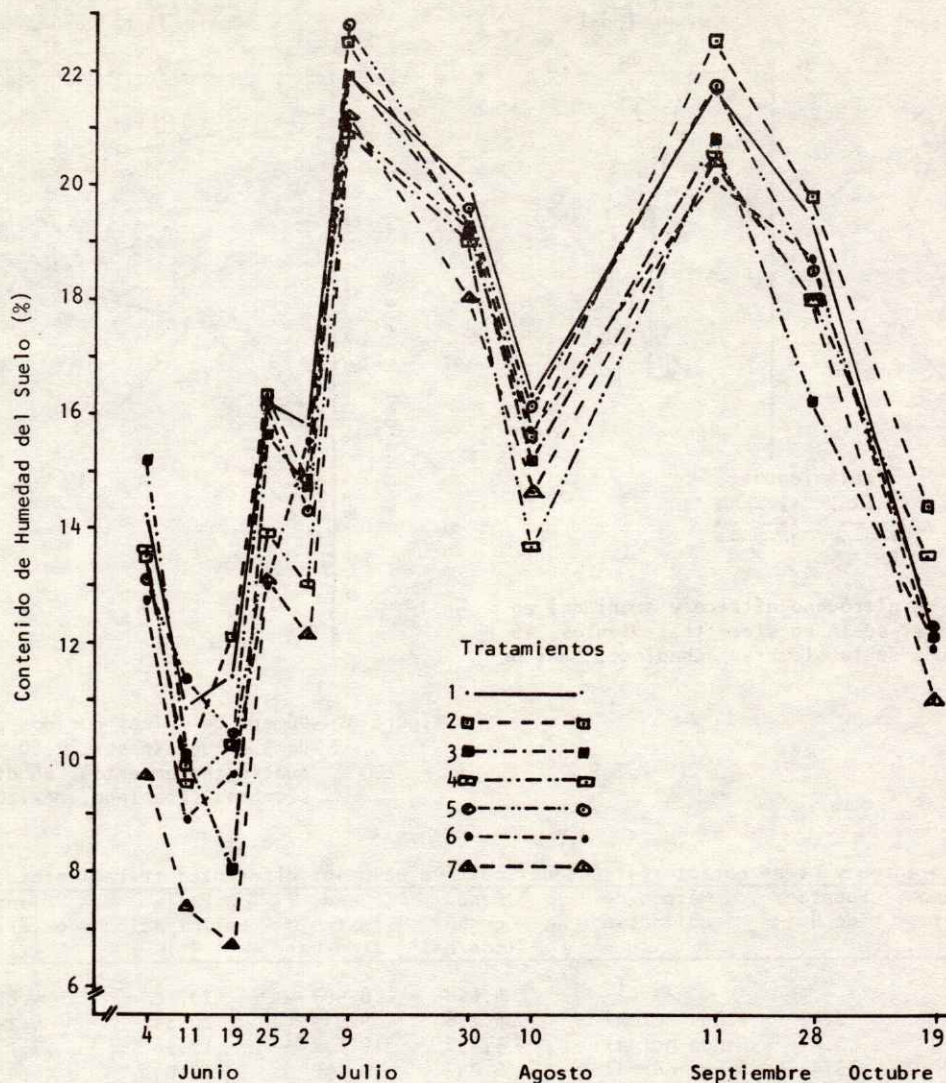


Figura 1. Contenido de humedad del suelo (% base seca) en la capa de 14-44 cm en siete tratamientos durante el desarrollo del cultivo. Chapingo, México, 1984.

Distribución de raíces en el perfil del suelo

En la Figura 3 se muestra la distribución de raíces en el perfil del suelo de cuatro tratamientos, 46 días después de la siembra. El patrón de distribución de raíces guarda concordancia con la colocación del fertilizante, pues la máxima densidad de raíces a 10 cm de profundidad correspondió al tratamiento 4, que llevó 120 kg N/ha en banda normal, en cambio a profundidades mayores de 18 cm la máxima densidad radical se registró en los tratamientos 6 y 7, que llevaron su nitrógeno aplicado en banda profunda. En general, este mismo patrón de distribución radical se observó en los muestreos subsecuentes.

Rendimiento de grano

Los rendimientos de grano variaron entre 4.658 y 6.126 ton/ha, como se muestra en el Cuadro 2. El efecto de

los tratamientos sobre el rendimiento de grano fue estadísticamente significativo al 1.1% de probabilidades. El alto rendimiento obtenido en el tratamiento testigo refleja el contenido relativamente alto de nitrógeno aprovechable del suelo al instalar el experimento; sin embargo hay un incremento consistente de los rendimientos con incrementos en la dosis de N hasta 120 kg/ha, con un abajamiento no significativo del rendimiento al elevarse la dosis de N hasta 160 kg/ha.

Al comparar la fertilización con sulfato de amonio (tratamientos 2, 4, 6 y 7) contra los correspondientes tratamientos con urea (números 12 al 15) se encuentra un promedio de 609 kg/ha más de grano con el uso de sulfato de amonio, como se aprecia en la Figura 4. Estos datos coinciden con los reportados por Leyva (1976) para el Valle de Toluca y con los de Castro (1978) para Ciudad Serdán, Puebla.

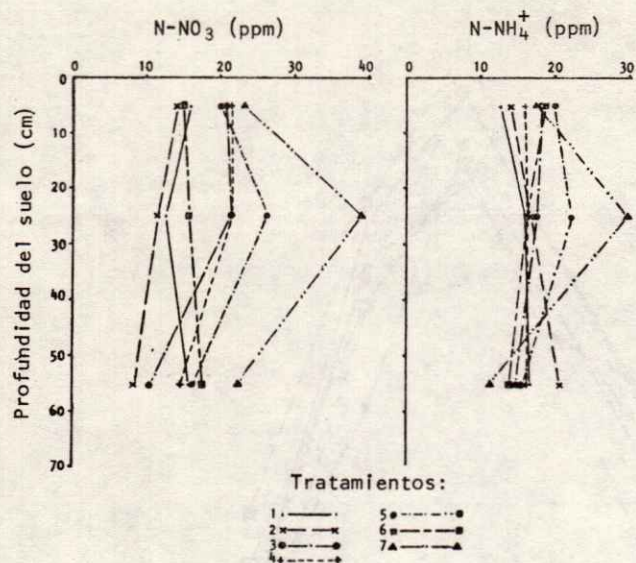


Figura 2. Contenido de nitrógeno nítrico y amoniacal en el perfil del suelo en siete tratamientos, 46 días después de la siembra. Chapingo, México 1984.

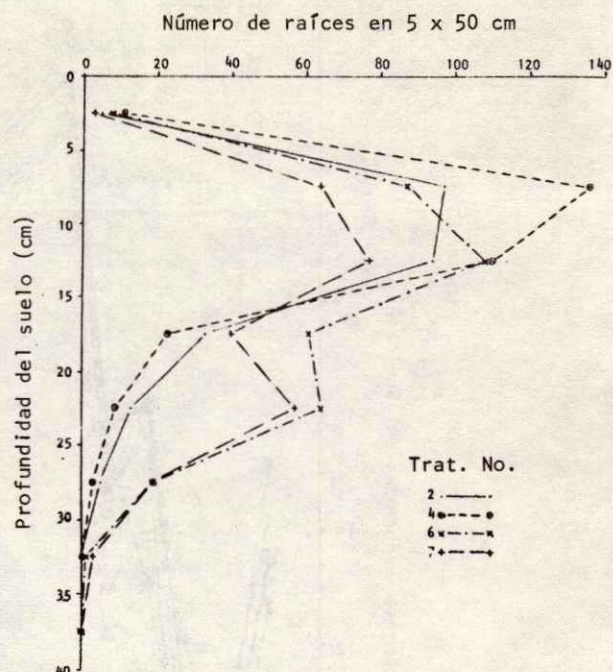


Figura 3. Número de raíces por dos plantas, en estratos de 5 cm de espesor, y 50 cm de ancho, para cuatro tratamientos, 46 días después de la siembra. Chapingo, México, 1984.

Cuadro 2. Rendimientos y otras características del cultivo bajo los diferentes tratamientos. Chapingo, Méx.

Trat. No.	N aplicado (kg/ha)	Fuente de N	Método de aplicación	Rend. grano (ton/ha)	Rend. rastrojo (ton/ha)	Falla polinización (%)	Plantas estériles (%)	N absorbido (kg/ha)
1	0	-	-	4,658	6.907	20.18	4.8	106.32
2	40	S.A.	Banda normal	5,236	9.939	20.84	6.3	140.95
3	80	S.A.	Banda normal	5,430	10.172	17.78	7.1	142.39
4	120	S.A.	Banda normal	6.047	10.548	17.04	6.4	214.49
5	160	S.A.	Banda normal	5.177	9.254	21.31	10.7	216.18
6	40	S.A.	Banda profunda	5.721	10.109	14.72	4.7	122.13
7	120	S.A.	Banda profunda	6.126	9.710	14.36	3.6	205.51
8	40	S.A.	Mateado normal	5.280	8.712	17.21	8.3	
9	120	S.A.	Mateado normal	4.949	10.332	18.21	6.1	
10	40	S.A.	Mateado profundo	5.448	8.653	15.29	4.0	
11	120	S.A.	Mateado profundo	5.595	8.057	13.63	1.3	
12	40	Urea	Banda normal	5.263	10.894	13.14	9.5	
13	120	Urea	Banda normal	5.328	9.515	18.31	7.3	
14	40	Urea	Banda profunda	4.906	9.907	18.41	5.1	
15	120	Urea	Banda profunda	5.196	9.640	16.03	3.8	
C.V. (%)				9.39	12.67	28.02	67.7	19.0678
Probabilidad de F				0.011	0.003	0.356	0.17	0.0001
D.S.H. al 5%				1.281	3.060	12.19	10.31	73.065

El efecto de la profundidad de colocación del fertilizante se presenta en la Figura 5. Cuando se utilizó sulfato de amonio como fuente de nitrógeno, la colocación profunda del fertilizante dio invariablemente rendimientos más altos que los obtenidos con la colocación superficial normal; pero ocurrió lo contrario cuando se utilizó urea como fuente de nitrógeno. No obstante, las diferencias entre ambas profundidades de colocación del fertilizante no alcanzaron significancia estadística.

Al comparar la fertilización en banda contra la mateada, en la Figura 5 puede observarse en general cierta tendencia a una superioridad de la aplicación en banda sobre la mateada; sin embargo, en esta comparación se encuentra confundido el efecto de la fecha de la fertilización inicial, ya que la aplicación mateada se hizo 18 días después que la de banda.

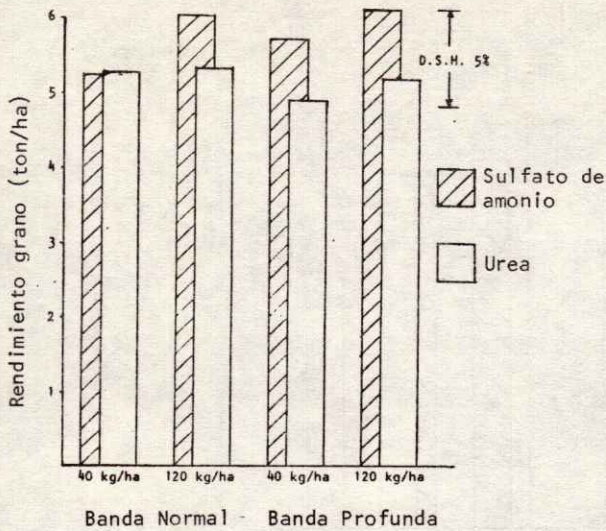


Figura 4. Rendimientos de grano de maíz fertilizado con sulfato de amonio o con urea, bajo dos niveles y dos métodos de aplicación. Chapingo, México, 1984.

Rendimiento de rastrojo

Los rendimientos de rastrojo variaron entre 6.907 y 10.894 ton/ha con diferencias altamente significativas entre tratamientos, como se muestra en el Cuadro 2. Al igual que el grano, los rendimientos de rastrojo se incrementaron consistentemente con incrementos en la dosis de nitrógeno hasta 120 kg/ha, sufriendo un abatimiento sobre la dosis de 160 kg/ha.

No se observaron diferencias significativas entre los rendimientos de rastrojo atribuibles a la fuente de nitrógeno o a la profundidad de su aplicación; sin embargo bajo la misma dosis y profundidad se obtuvieron consistentemente mayores rendimientos de rastrojo, no significativos estadísticamente, con la fertilización en banda sobre la mateada, como puede observarse en la Figura 6.

Falla de polinización

En el Cuadro 2 se reporta la falla de polinización de los diferentes tratamientos, expresada como el porcentaje del área del olote no cubierta por grano. Aunque las diferencias entre tratamientos no son significativas estadísticamente, en general los tratamientos con fertilización profunda muestran la tendencia a exhibir los más bajos porcentajes de falla de polinización, como puede apreciarse en la Figura 7.

Porcentaje de plantas estériles

A la cosecha se hizo un conteo de las plantas que no produjeron mazorca. Este valor, expresado en porcentaje del total de plantas por tratamiento, varió entre 1.3 y 10.7 %, según se reporta en el Cuadro 2. Aunque no hay diferencias significativas entre tratamientos para esta variable debido a su alto coeficiente de variación, el ma-

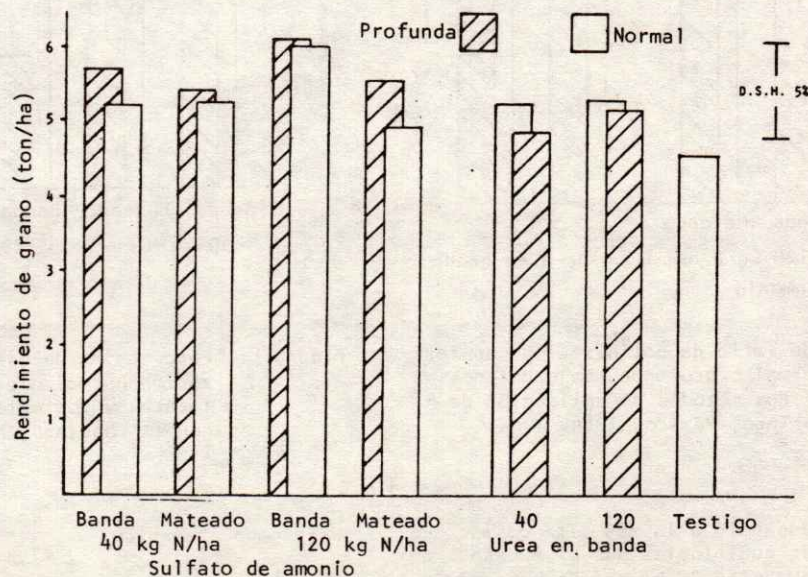


Figura 5. Rendimientos de grano de maíz obtenidos con fertilización profunda o normal, con dos fuentes, dos dosis y dos métodos de aplicación de nitrógeno. Chapingo, México, 1984.

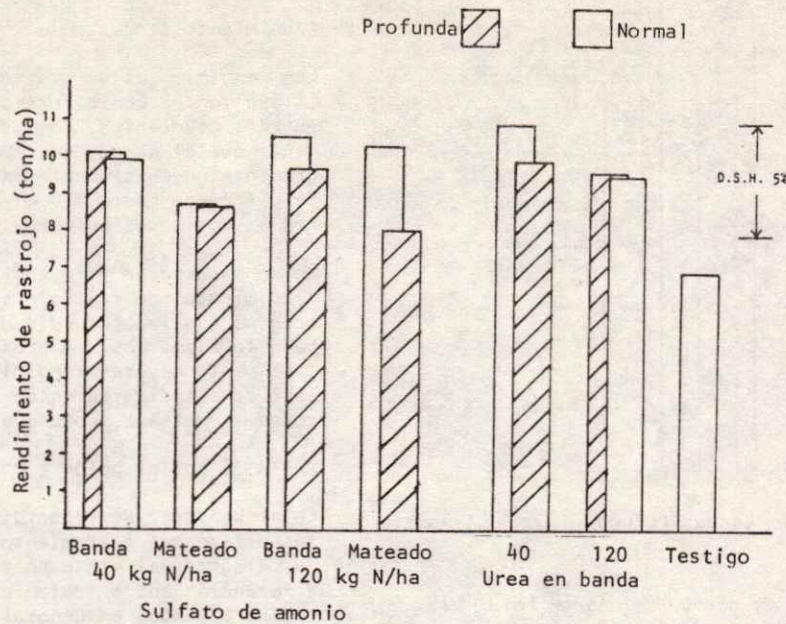


Figura 6. Rendimientos de rastrojo obtenidos con fertilización profunda o normal, con dos dosis, dos fuentes y dos métodos de aplicación de nitrógeno. Chapingo, México, 1984.

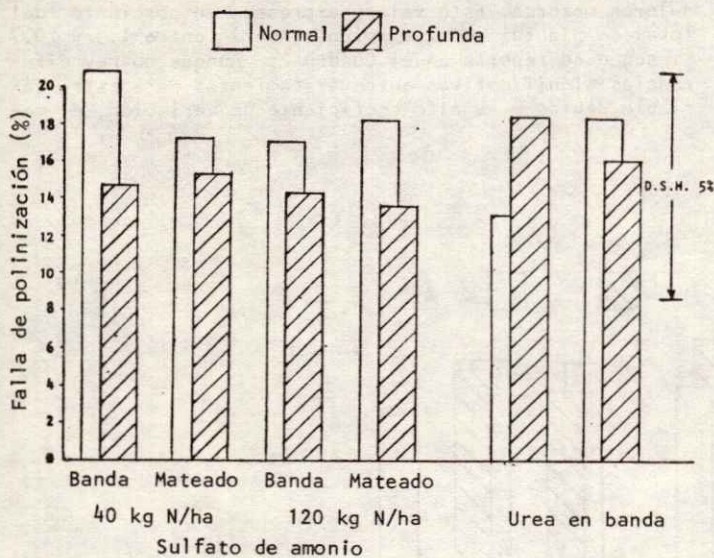


Figura 7. Porcentajes de falla de polinización con fertilización normal o profunda, bajo dos dosis, dos fuentes y dos métodos de aplicación de nitrógeno. Chapingo, México, 1984.

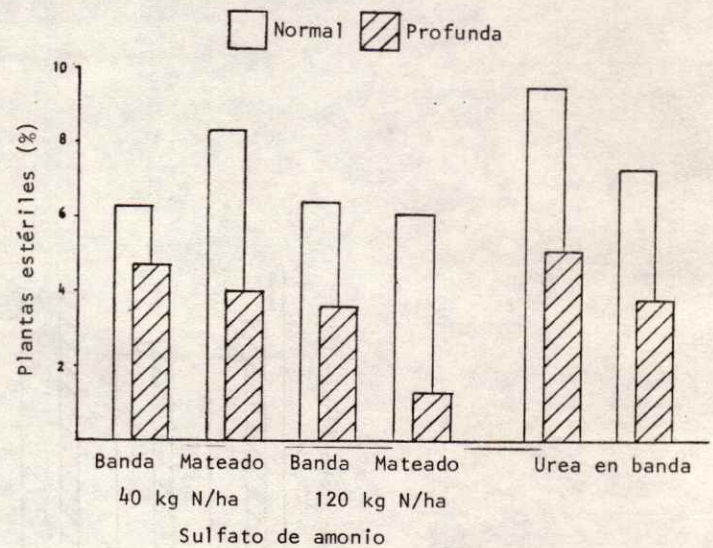


Figura 8. Porcentajes de plantas estériles con fertilización normal o profunda, bajo dos dosis, dos fuentes y dos métodos de aplicación de nitrógeno. Chapingo, México, 1984.

por valor numérico correspondió a la más alta dosis de nitrógeno (160 kg/ha), lo cual indica que el exceso de nitrógeno estimuló la formación de hijos que no produjeron grano. Los más bajos porcentajes de plantas estériles correspondieron a aquellos tratamientos con aplicación profunda de fertilizante (ver Figura 8), lo cual indica la tendencia de esta práctica a promover la formación de mazorcas.

Nitrógeno absorbido

Las plantas de los tratamientos 1 al 7 fueron muestreadas y analizadas en su contenido de nitrógeno total, para inferir la extracción de este nutrimento por las plantas. En el Cuadro 2 se reporta el nitrógeno absorbido por el cultivo en kg/ha a la madurez fisiológica. Dicha absorción aumentó consistentemente de 106.32 a 216.18 kg/

ha al elevarse la dosis de nitrógeno aplicado desde cero hasta 160 kg/ha. Al comparar dosis iguales de nitrógeno aplicado, no se encontraron diferencias significativas en nitrógeno absorbido atribuibles a la profundidad de aplicación del fertilizante.

CONCLUSIONES

A pesar del alto nivel inicial de nitrógeno en el suelo y de la bondad del temporal de lluvias durante el desarrollo del cultivo, se advierte la tendencia de la a-

plicación profunda del fertilizante nitrogenado a mostrar una mayor eficiencia sobre la aplicación normal superficial. Esta tendencia se observa tanto en el rendimiento de grano como en la formación y llenado de las mazorcas. Es de esperarse que en condiciones más limitadas de humedad se manifieste más claramente la mayor efectividad de la aplicación profunda del fertilizante nitrogenado, como ya ha sido observado por otros autores. Es necesario desarrollar este tipo de estudios en condiciones diferentes de suelo y clima para llegar a recomendaciones específicas. Se requiere también del diseño de implementos agrícolas que permitan la colocación profunda del fertilizante en el suelo, tanto con fines experimentales como comerciales.

LITERATURA CITADA

- Aveldaño S., R. 1975. Informe Anual de actividades del Programa de Suelos. CAEVAMEX, CIAMEC, INIA.
- Castro Z., R. 1978. La eficiencia de la urea con respecto al sulfato y nitrato de amonio en maíz de temporal. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Chapingo, Méx.
- Ernst, J.W. y H.F. Massey. 1960. The effects of several factors on volatilization of ammonia formed from urea in the soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 24:87-90
- Leyva, S., R. 1976. Respuesta del maíz a niveles de fertilización y densidad de población bajo condiciones de humedad residual normal en la región noroccidental del Estado de México. Tesis profesional. Escuela Nacional de Agricultura, Chapingo, Méx.
- Tisdale, S.L. y W.L. Nelson. 1975. *Soil Fertility and Fertilizers*. 3a. edición. Macmillan Publ. Co.
- Whitaker, F.D.; H.G. Heinemann y R.F. Burwell. 1978. Fertilizing corn adequately with less nitrogen. *J. Soil Sci. and Water Conserv.* 33:28-32.

PRODUCTIVIDAD DEL SUELO CON MAIZ Y LABRANZA MINIMA EN NAYARIT +

Trejo Sánchez M.*

RESUMEN

En el transcurso del ciclo agrícola de otoño-invierno 1982-83, se desarrolló en el Campo Agrícola Experimental "Santiago Ixcuintla", un trabajo de investigación agroeconómica, con la finalidad de conocer la productividad en dos sistemas de producción. Se estimaron: rendimientos, costos de producción, valores de la producción, las inversiones en los parámetros de comparación asociados en cada sistema, y finalmente la productividad comparativa en los dos sistemas de producción.

Los resultados de los análisis matemáticos efectuados, mostraron que las variables cuantificadas registraban diferencias significativas al 5 y 1% inclusive. Sin embargo, la diferencia en productividad fue pequeña (3.1%). Lo anterior permite registrar en primer lugar, una forma sencilla para estimar el concepto de productividad, y en segundo lugar, asentar que la diferencia en productividad permite seleccionar como la mejor alternativa en la producción de maíz a labranza mínima; esto, tomando en cuenta principalmente el riesgo económico de la inversión.

ABSTRACT

Minimum and traditional tillage methods were compared for maize on the experimental farm of Santiago Ixcuintla, Nayarit. Comparisons were made of yields, production cost, gross and net incomes.

Maize yield associated with minimum tillage methods was 3.1% higher than yield associated with traditional tillage, the small yield difference was statistically significant. Production costs and net incomes were better for minimum tillage.

INTRODUCCION

En México el maíz de temporal se cultiva en 7.0 millones de hectáreas aproximadamente, por lo que es uno de los cultivos más importantes en este aspecto; además, es utilizado por la población como uno de los alimentos básicos, esto es más bien por tradición que por valor nutritivo.

En el estado de Nayarit se siembra desde el nivel del mar hasta alturas superiores a los 1,500 m, por lo que su rango de adaptación es bastante amplio; sin embargo, en su producción actual se presentan algunos problemas de orden técnico y económico. En este último, se contempla principalmente el aumento constante de los costos de producción, acompañado de un menor incremento en los precios de garantía. En la actualidad, el productor lo cultiva más por tradición y como principal medio de vida, que por rentabilidad económica.

La labranza, entendida como cualquier remoción del suelo, abarca del 20 al 40% del costo de producción de este cultivo, en función a la técnica particular utilizada por el

agricultor. De acuerdo a lo anterior, los objetivos que se asentaron en el presente estudio fueron:

- 1) Conocer el rendimiento y los costos de producción del sistema convencional de labranza en la producción de maíz.
- 2) Conocer el rendimiento y los costos de producción de un sistema de labranza mínima en la producción de maíz.
- 3) Determinar si hay diferencias estadísticamente significativas, en los sistemas mencionados.
- 4) Determinar la productividad del suelo, en los dos sistemas de producción citados.

REVISION DE LITERATURA

Jethro Tull en 1731 fabricó la primera sembradora-cultivadora, también mencionó la necesidad y la forma de controlar las malezas; asimismo, indicó que el acceso de

+ Ponencia presentada en el XVI Congreso Nacional de la S.M.C.S.

* Investigador de Sistemas de Producción del INIA CIAPAN.

Los nutrimentos a la planta era a través de las bocas lactantes de las raíces, lo que conducía a la necesidad de pulverizar el suelo. En base a esta premisa central, se inicia la substitución paulatina de la coa, primero el arado jalado con animales y posteriormente con tractor. Sin embargo, la idea fue posteriormente desechada, pero la práctica de desmenuzar la tierra quedó fuertemente arraigada en la mentalidad del campesino.

Moreno en 1982, registró que en la década anterior a la actual, debido al descubrimiento de los herbicidas de contacto, se revisaron los conceptos de labranza, debido a los problemas de erosión que se han presentado en el presente siglo. Y que es así como se ha llegado a los sistemas de labranza de conservación definidos por Unger y McCalla (1981) como sistemas de manejo de residuos de la cosecha, en la superficie del suelo.

Kocher et al. en 1981 mencionaron que los objetivos de la labranza mínima son: 1) mantener en el suelo una capa de residuos la mayor parte del tiempo posible, para de esta forma reducir la erosión y controlar malezas por sombra; 2) reducir el uso de energía; 3) conservar el agua del suelo, y 4) incrementar la producción reduciendo el trabajo, capital y riego.

Unger y McCalla en 1981 asentaron que con el sistema de labranza mínima las pérdidas del suelo en ton/ha/año, se reducen en 2.3 y que de igual manera se reduce el escurrimiento en 0.5 cm. Los datos anteriores fueron obtenidos del análisis de un quinquenio (datos promedio).

MATERIALES Y METODOS

1. Sistemas de Producción

Se utilizaron dos sistemas, que son: a) labranza mínima, y b) labranza convencional. El primero consistió de lo siguiente: cero preparación del suelo, combate químico de malezas, siembra en la que hay nula remoción del terreno, aplicación de fertilizantes químicos, cero labores de cultivo, combate químico de malezas, plagas y enfermedades. El segundo sistema (convencional) consistió de lo siguiente: máxima preparación del suelo (un rasreo, un barbecho y dos rastras), siembra (normal) en la que hay bastante remoción del suelo, aplicación de fertilizantes químicos, dos labores de cultivo, combate manual de malezas, combate químico de plagas y enfermedades.

2. Caracterización biológica de los sistemas

La caracterización biológica de los dos sistemas de producción, se realizó de acuerdo a la cuantificación de las siguientes variables: 1) nitrógeno, 2) fósforo, 3) potasio, 4) densidad aparente, 5) arena (%), 6) limo (%), 7) arcilla (%), 8) conductividad eléctrica, 9) pH, y 10) materia orgánica. Lo anterior, se llevó a cabo al inicio y al final del ciclo agrícola.

3. Costos de producción.

Se asentaron los costos de producción de ambos sistemas, en relación a los aspectos de labranza en que difieren, como son: a) barbecho, b) rastra, c) combate de malezas antes de la siembra, d) siembra, y e) labores de cultivo.

4. Rendimiento

Los rendimientos en ton/ha fueron obtenidos de parcelas

experimentales de 5.0 m de ancho por 24.0 m de largo; utilizándose un nivel de muestreo mínimo de $n=8$ que se puede considerar suficiente, tomando en cuenta que el objetivo del muestreo, es hacer inferencias estadísticas sobre la población (conceptual) total.

5. Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza de acuerdo al diseño experimental "bloques al azar", en que fueron incluidos estos sistemas de producción (tratamientos).

6. Productividad del suelo

La productividad del suelo se estimó tomando en cuenta los siguientes aspectos: a) costos de producción, b) rendimientos, y c) cambios biológicos en las variables cuantificadas, de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

Labranza convencional:

$$\text{Productividad} = \left(\frac{\% \text{ de } \Delta \text{ de Rend.} \times 100}{\% \text{ de } \Delta \text{ de costos}} - 100 \right) \times \text{F.P.}$$

En donde:

% de Δ de Rend. Es el porcentaje en que se incrementa el rendimiento con labranza convencional, en relación a labranza mínima.

% de Δ de Costos Es el porcentaje en que se incrementa el costo de producción de labranza convencional, en relación a la labranza mínima.

F.P. Es un factor de ponderación que varía de 0.9 a 1.0, en relación al número de variables que varían del inicio al final del ciclo agrícola, en un porcentaje de incremento mayor o igual al 50%.

Labranza mínima:

$$\text{Productividad} = \left(\frac{\% \text{ de Rend. de Cost.} \times 100}{\% \text{ Rend. de Rend.}} - 100 \right) \times \text{F.P.}$$

En donde:

% de Rend. de Cost. Es el porcentaje en que se reduce el costo de producción de labranza mínima, en relación a labranza convencional.

% de Rend. de Rend. Es el porcentaje en que se reduce el rendimiento de labranza mínima, en relación a labranza convencional.

F.P. Es un factor de ponderación que varía de 0.9 a 1.0, en relación al número de variables que varían del inicio al final del ciclo agrícola, en un porcentaje de incremento mayor o igual al 50%.

RESULTADOS Y DISCUSION

1. Caracterización biológica de los sistemas

En el Cuadro 1 se presentan los valores obtenidos en cada una de las variables cuantificadas. Observándose que en la mayoría de variables la variación es pequeña, excepto en nitrógeno y potasio. En el primero se reduce el contenido en más del 50% en labranza convencional; en el segundo se incrementa su contenido en más del 50% en ambos sistemas.

Cuadro 1. Caracterización biológica de los sistemas de labranza, en relación a variables de suelo cuantificadas durante el ciclo 1982-83.

Variables	Labranza convencional		Labranza mínima	
	Inicio del ciclo	Final del ciclo	Inicio del ciclo	Final del ciclo
M.O. %	0.3	0.5	0.4	0.4
N-A	532.0	23.0	17.0	20.0
P kg/ha	94.0	96.0	86.0	93.0
K	264.0	2232.0	600.0	2400.0
C.E. 1:5	0.1	0.1	0.1	0.1
pH 1:2	7.0	6.8	7.0	6.8
AR	22.0	32.0	30.0	40.0
LI %	50.0	38.0	47.0	36.0
ARC	22.0	29.0	22.0	23.0
DA g/cm ²	1.5	1.4	1.3	1.5

Cuadro 2. Costos de producción de maíz en dos sistemas de labranza, durante el ciclo 1982-83.

Factores	Labranza convencional	Labranza mínima
LABRANZA \$/ha	11,500.00	5,700.00
Limpia	1,400.00	
Barbecho	2,800.00	
Rastreo (2)	2,800.00	
Taspanada	2,500.00	
Siembra		5,700.00
Escardas	1,000.00	
Aporques	1,000.00	
OTROS INSUMOS	18,500.00	18,500.00
Herbicidas		
Insecticidas		
Fungicidas		
Cosecha		
TOTAL	30,000.00	24,200.00

2. Costo de producción

En el Cuadro 2 se presentan los costos de producción de ambos sistemas. Observándose que éste es menor con labranza mínima en un 19.3%. Asimismo, labranza en el sistema convencional representa el 38.3% del costo de producción, y el 23.5% en el sistema de mínima labranza.

3. Rendimientos obtenidos

Los rendimientos que fueron obtenidos en los sistemas de producción citados, son los siguientes: 1) Labranza convencional, con 4.327 ton/ha en promedio; 2) Labranza mínima, con 3.517 ton/ha en promedio. Observándose que en este último la producción es menor en 18.7%.

4. Análisis estadístico

En el Cuadro 3 se presentan los resultados del análisis de varianza efectuado a los rendimientos obtenidos. Ob-

Cuadro 3. Resultados del análisis de varianza de dos sistemas de labranza en maíz, durante el ciclo 1982-83.

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	Fc	Ft	
					5%	1%
Repet.	7	6.52	0.93	0.53	3.79	7.00
Sistemas	1	15.21	15.21	8.79	5.50	12.25
Error	7	12.14	1.73			
T o t a l	15	33.87				

servándose que los sistemas son diferentes estadísticamente al 5%, y como el rendimiento mayor es el de labranza convencional, entonces este sistema sería el estadísticamente recomendable; sin embargo, es necesario tomar en cuenta las diferencias económicas y biológicas, para sugerir el sistema más adecuado.

5. Productividad del suelo

La productividad para cada uno de los sistemas fue la siguiente:

productividad en labranza convencional

$$\left(\frac{18.7 \times 100}{19.3} - 100 \right) \times 0.91 = -2.82$$

productividad en labranza mínima

$$\left(\frac{19.3 \times 100}{18.7} - 100 \right) \times 0.91 = 2.91$$

Se observa en los resultados anteriores, que la productividad del suelo con labranza mínima es positiva; en cambio, con labranza convencional es negativa; por lo que, es más conveniente utilizar el primer sistema.

CONCLUSIONES

- 1) Los sistemas de labranza estudiados son diferentes en relación a la producción que se obtiene en cada sistema.
- 2) El sistema de labranza mínima permite reducir el riesgo de la inversión, en mayor porcentaje que la reducción en rendimiento.
- 3) Con el sistema de labranza mínima se obtiene una mayor productividad del suelo, en relación al sistema de labranza convencional.
- 4) Para calcular la productividad de un suelo (sistema de producción); se deben tomar en cuenta los siguientes aspectos: a) diferencias estadísticas (de los rendimientos), b) diferencias económicas (de los costos de producción), y c) diferencias biológicas (de las variables que caracterizan al sistema).

LITERATURA CITADA

- Harold, L.L. and Edwards, W.M. 1974. No tillage reduces erosion from continuous corn water sheds. Transaction of the ASAE 17(3):414-416

Lal, R. (Edit.) 1977. Soil tillage and crop production. Prac. Series No. 2. Int. Inst. of Trop. Agric. Dyo Road Ibadan, Nigeria.

Muhtar, A.H. 1982. Economic impact of conservation tillage in Michigan. Summer Meeting ASAE Univ. of Wisconsin, Madison.

Pereira, H.C. 1975. Agricultural science and the tradition of tillage. Outlook on Agriculture. Vol. 8 Special Number.

Unger, P.W. and Phillips, R.E. 1973. Soil water evaporation and storage. Proc. of SCSA on conservation tillage systems to summer follow in southern Alberta. Can. J. Plant. Sci. 63: 631-638.

ESTUDIO EXPLORATORIO DE SEIS FACTORES DE LA PRODUCCION Y SU EFECTO EN EL CULTIVO DE LA PAPA DE RIEGO EN NOCHIXTLAN, OAXACA +

Sandoval, E. ¹
García Martínez, F. ¹
Castañeda Palomera, A. ²

RESUMEN

En junio de 1982, se estableció un experimento de papa en la localidad de San Andrés Sinaxtla, Distrito Judicial de Nochixtlán, Oaxaca, con la finalidad de conocer la adaptación de este cultivo y determinar su respuesta a diferentes dosis de fertilización química, adición de estiércol y densidad de siembra. El diseño experimental utilizado fue de acuerdo a la técnica de la matriz mixta (parcelas divididas); el diseño de tratamientos fue una matriz Plan Puebla I, con una Baconiana que formó cinco tratamientos adicionales. Los niveles de exploración utilizados en la fertilización química fueron: de 60 a 180 kg de nitrógeno/ha, de 80 a 200 kg de fósforo/ha y de 40 a 100 kg de potasio/ha, además en parcelas grandes se probó adición de estiércol (10 ton/ha).

Los tratamientos que constituyeron la matriz Baconiana fueron: las variedades de papa Alpha, Greta, Montzamba, distancia entre mata y un testigo. La variedad como factor de referencia fue la López. El tamaño de la parcela fue de cuatro surcos de 6 m de largo por una separación de 90 cm.

Los resultados obtenidos nos indican una buena respuesta a la adición de nitrógeno, los incrementos obtenidos con la adición de fósforo fueron bastante considerables y no existió una clara respuesta al potasio. Además de las cuatro variedades probadas, sobresalieron la Alpha y López.

ABSTRACT

A field experiment was carried out in Nochixtlán, Oaxaca, to determine the response of irrigated potatoes to N, P and K fertilizer and to the application of barnyard manure, using four potato varieties and two planting densities. The soil at the experimental site was a clay with a pH of 8.1 and organic matter content of 1.90 percent. Zero and ten tons of barnyard manure per hectare were assigned to the big plots of a "matriz mixta" experimental matrix. Sixty to 180 kg of N/ha, 80 to 200 kg of P₂O₅/ha and 40 to 100 kg of K₂O/ha were studied in the small plots, according to the Plan Puebla matrix. Alpha, Greta, Montzamba and Lopez genetic material of potatoes were included according to the Baconian matrix, also in the small plots.

Results show that the Lopez variety with the fertilizer treatment 100-120-40 is adequate for farmers with limited capital. When farmers have unlimited capital, the varieties recommended are Alpha and Greta, with the fertilizer treatment 140-200-80.

INTRODUCCION

En la región que comprende el "Plan Nochixtlán" desde el año de 1978 se han realizado una serie de trabajos experimentales tendientes a desarrollar tecnologías agrícolas de producción que complementen las ya existentes en la región y permitan aumentar la producción y productividad en los cultivos de maíz, trigo, frijol y alpiste e incrementar a la vez el ingreso neto de los agricultores. Actualmente, como en algunos de los cultivos antes mencionados se ha cumplido con el primer objetivo planteado y han surgido otros objetivos nuevos como el de generar conocimientos sobre nuevos cultivos que prosperen bajo las condiciones locales y presenten nuevas y eficaces alternativas para los productores de la región.

El cultivo de la papa es capaz de cumplir con el objetivo antes planteado y prospera en situaciones difíciles

tales como diversas altitudes, variados tipos de suelos; es sembrado por un grupo muy reducido de agricultores de la región asociándolo con el maíz, obteniendo así bajas producciones de este tubérculo que utilizan generalmente para el consumo familiar. Se considera a la papa como uno de los cultivos alternativos que pudieran prosperar mejor en la región.

Debido a lo antes mencionado y observando que la papa progresa bien aun en las condiciones en que es sembrada por los agricultores, se planea establecer un lote experimental dentro del Distrito de Nochixtlán, planteándose los objetivos de determinar el efecto de seis factores de la producción sobre el cultivo de papa de riego y de generar la primera aproximación tecnológica del cultivo bajo condiciones de riego en la región. Para ello fue necesario plantearse las siguientes hipótesis: (a) El cultivo de la papa responde significativamente a las aplicaciones

+ Ponencia presentada en el XVI Congreso Nacional de la SMCS.

¹ Investigador Asistente, Colegio de Postgraduados, Chapingo, Méx.

² Investigador Docente, Colegio de Postgraduados, Chapingo, Méx.

de nitrógeno, fósforo y abono orgánico. (b) Existe diferencia en rendimiento entre las variedades López, Greta, Alpha y Montzamba y la variedad más rendidora es la López. (c) Con la distancia entre matas de 70 cm se obtienen mayores rendimientos que con la de 40 cm.

REVISION DE LITERATURA

Características ecológicas

Las condiciones para el desarrollo del cultivo en la región pueden considerarse propicias pues se desarrolla con temperaturas óptimas de 16° a 20°C y el clima predominante en el área según DETENAL (1970) basada en la clasificación de Köppen es el BS₁ Kw(w) (i)g, que es un templado seco con temperaturas medias que van de 14° a 18°C, presentando lluvias de abril a octubre y con poca oscilación térmica (5°C y 7°C).

La papa, aunque prefiere los suelos ligeramente ácidos, puede adaptarse a diversos y variados tipos de suelo, siempre y cuando no sean demasiado húmedos porque la semilla se pudre (FAO, 1980).

Generalidades del cultivo

La papa puede considerarse después de la soya como el cultivo que proporciona mayor cantidad de proteínas por hectárea, pues si bien la soya tiene un elevado nivel proteico, la papa tiene una elevada producción de tubérculos. La papa puede considerarse un cultivo importante por el gran contenido alimenticio que posee, pues contiene carbohidratos, proteínas, minerales, celulosa y además las vitaminas A, C, G, con algún complejo de vitamina B. Este cultivo, además de ser un recurso alimenticio importante, puede destinarse a diversos usos en la industria. La papa se cultiva desde el nivel del mar hasta 3 500 m de altitud, estudiándose desde Baja California Norte hasta Chiapas.

FAO (1980) nos dice que este cultivo es moderadamente susceptible a la salinidad del suelo pudiendo disminuir el rendimiento en 50% con CE del suelo de 5.9 mmhos/cm. También nos dice que requiere de 500 a 700 mm de agua por ciclo, además de suelos con pH de 5 a 7. Narváez (1978), citando al Centro de Investigaciones Agropecuarias "Santa Elena", del Estado de México (GASSEM) sugiere una serie de recomendaciones fundamentales para el cultivo de la papa.

Narváez (1978), citando a la Oficina de Estudios Especiales (1956), dice que ésta llevó a cabo una serie de experimentos para estudiar la respuesta de la papa a los fertilizantes en cuatro localidades situadas en el área montañosa de México Central, estudiando los factores de nitrógeno, fósforo, potasio y estiércol; de estos estudios concluyeron que hubo respuesta al nitrógeno en todas las localidades, al fósforo en tres localidades y una leve respuesta al potasio en una localidad, el estiércol dio leves incrementos en dos localidades; se determinó que las fórmulas de fertilización fueron para estas áreas: 60-130-00, 40-130-60 y 60-120-00 kg/ha de nitrógeno, fósforo y potasio.

Ramírez y Laird (1959) establecieron 32 experimentos en la región de León, Gto. tendientes a determinar la fertilización adecuada para el cultivo de la papa y propusieron las siguientes recomendaciones: En suelos de la zona norte, que hace varios años han sido abonados con estiércol y fertilizantes, después del maíz utilizar la fórmula 70-80-0, después de la alfalfa la 50-80-0; en suelos de la parte sur, que en años anteriores han sido abonados con fertilizantes y estiércol, después de la alfalfa uti-

lizar la fórmula 50-120-40 y después del maíz la 70-120-40.

MATERIALES Y METODOS

Ubicación del sitio experimental

El trabajo fue establecido en el municipio de San Andrés Sinaxtla, Distrito de Nochixtlán, siendo localizado este trabajo dentro del Agrosistema que es representado por los suelos de riego ubicados en la región. Las características del sitio se presentan en el Cuadro 1.

Factores estudiados y diseño de tratamientos

Los factores estudiados con sus respectivos espacios de exploración fueron: nitrógeno de 60 a 80 kg/ha, fósforo de 80 a 200 kg/ha, potasio de 40 a 100 kg/ha; además en parcelas grandes se probó la adición de 10 toneladas de estiércol por hectárea y en parcelas chicas que fueron adicionales las variedades Alpha, Greta, Montzamba y distancia entre matas (40 cm). Los factores que se tomaron como referencia en el diseño de tratamientos son: la variedad de papa López, la distancia entre matas (70 cm), factores constantes, la distancia entre surcos (90 cm) y la fuente de fertilizante.

La matriz experimental utilizada para los factores N, P, K fue la matriz "Plan Puebla I" probando en parcelas adicionales las variedades Alpha, Greta y Montzamba, el testigo y la distancia entre matas a 40 cm lo cual hizo un total de 19 parcelas que constituyeron una parcela grande donde se probó en dos repeticiones la adición o no de estiércol.

Establecimiento y conducción del experimento

La preparación del terreno se efectuó con maquinaria agrícola, dando un barbecho profundo, un paso de rastra, una cruz y una nivelación del terreno.

Cuadro 1. Análisis químico y físico del suelo donde se ubicó el experimento.

Concepto	0 - 20	20 - 40 cm
Químicas		
pH	8.1	8.0
CE	0.2	0.16 mmhos/cm a 25°C
Materia orgánica	1.89	1.88 %
Nitrógeno	0.11	0.11 %
Fósforo	6.25	6.87 ppm
Calcio soluble	49.50	51.00 meq/100 g de suelo
Mg (intercambiable)	4.11	4.11 meq/100 g de suelo
Potasio (intercambiable)	1.15	0.92 meq/100 g de suelo
Sodio (intercambiable)	0.90	0.87 meq/100 g de suelo
Físicas		
Arena	25	25 %
Limo	32	33 %
Arcilla	43	42 %
Textura	Arcillosa	Arcillosa
D. ap.	1.24	1.20 g/cc

Una vez realizada la preparación del terreno, se procedió a surcar y a sembrar el lote experimental utilizando una semilla mediana o dos chicas de papa siendo tapadas con azadón; previo a esta actividad se fertilizaron los tratamientos de manera manual aplicando todo el fertilizante químico y orgánico al suelo, siendo mezclados inmediatamente con el mismo. La mezcla del fertilizante y la tapa de la semilla se realizó utilizando azadones; estas actividades se desarrollaron en el día 17 de junio de 1982 y fueron utilizadas como fuentes de fertilizantes químicos: sulfato de amonio (20.5-0-0), superfosfato de calcio simple (0-20-0), cloruro de potasio (0-0-60) y estiércol de caprino como abono orgánico. A los 30 días después de sembrado se realizó un aporque y a la vez se dio un deshierbe manual y 23 días después se realizó con maquinaria un segundo aporque.

Durante el desarrollo del cultivo la presencia de plagas y/o enfermedades no se detectó, pues para prevenir el ataque de estos patógenos fue necesario aplicar Volatón al suelo previo al momento de la siembra, además de realizar aplicaciones intercaladas de Manzate con Folimat a los 45, 51, 65 y 75 días; además de las fumigaciones de Zineb con Furadan a los 58 y 83 días.

Debido a que el cultivo requiere bastante agua, los riegos se distribuyeron de acuerdo a la humedad existente en el terreno, por las lluvias, de la siguiente forma: el primero se aplicó después de la siembra, 24 días después se dio el segundo riego, haciéndose necesario aplicar el tercero a los 53 días después de sembrado y el último se realizó a los 81 días después de haber dado el primero.

Otras actividades previas a la cosecha que se realizaron fue el corte de flores a los 81 días después de sembrado el cultivo, además se cortó el follaje 15 días antes de cosechar el cultivo.

La cosecha de este lote experimental fue realizada una vez que se contaron las plantas y haber cortado el follaje de las mismas, utilizando para ello azadones.

Análisis

Para la realización de los análisis correspondientes, los rendimientos obtenidos experimentalmente fueron castigados con un 20% para reducirlos a un nivel comercial. En primer lugar se efectuó el análisis de varianza o prueba de F para medir los efectos entre tratamientos, repeticiones y error experimental. Una vez realizado el análisis de varianza, se procedió a realizar el análisis económico utilizando el método gráfico estadístico modificado por Turrent (1978).

RESULTADOS Y DISCUSION

En el Cuadro 2 se observan los rendimientos de papa ajustados a nivel comercial viendo que la mayor parte de los tratamientos superan al testigo con más del 100%; encontramos también que los mejores rendimientos se obtuvieron al utilizar las variedades Alpha y Greta, superando la primera de estas variedades por más de 7 toneladas al mejor tratamiento de la variedad López; la variedad que obtuvo más bajos rendimientos fue la Montzamba pudiendo observarse que todos los tratamientos, a excepción del testigo, lo superan en rendimiento. Existe también una diferencia entre los rendimientos obtenidos al sembrar las plantas a 40 cm, pues comparando el tratamiento No. 18 contra el No. 8 se observa que el primero supera al segundo por más de 2.5 toneladas.

Cuadro 2. Rendimientos medios de la papa de riego de San Andrés Sinaxtla. P-V 82/82.

No. de trat.	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Variedad	D ¹⁾ cm	Estiérc.(ton/ha)		Media kg/ha
						10 kg/ha	0	
1	100	120	60	López	70	16,927	15,162	16,045
2	100	120	80	López	70	16,919	17,212	17,066
3	100	160	60	López	70	18,502	17,857	18,180
4	100	160	80	López	70	20,232	15,410	17,821
5	140	120	60	López	70	18,518	21,478	19,998
6	140	120	80	López	70	19,312	18,618	18,965
7	140	160	60	López	70	16,918	21,561	19,240
8	140	160	80	López	70	21,479	18,289	19,884
9	60	120	60	López	70	19,102	14,219	16,661
10	180	160	80	López	70	23,502	17,766	20,664
11	100	80	60	López	70	15,530	14,435	14,983
12	140	200	80	López	70	22,126	25,761	23,944
13	100	120	40	López	70	20,585	17,196	18,892
14	140	160	100	López	70	16,522	20,652	18,587
15	140	160	80	Greta	70	24,955	25,628	25,291
16	140	160	80	Alpha	70	28,439	33,746	31,092
17	140	160	80	Montzamba	70	10,065	15,344	12,704
18	140	160	80	López	40	24,835	20,707	22,771
Total						354,468	351,041	
Media						19,692	19,502	19,597
Test.	0	0	0	López	70	8,102	7,623	7,862

1) Distancia entre matas.

Al observar las medias de las parcelas sin estiércol y con 10 ton de estiércol, se aprecia que existe una muy ligera diferencia a favor de la parcela estercolada (190 kg) con la cual no se paga la adición de estiércol.

Análisis de varianza

En el Cuadro 3 se presenta el análisis de varianza realizado para el factorial 2³; se puede apreciar que existió significancia entre repeticiones mas no para tratamientos siendo esto posiblemente por una heterogeneidad en el terreno, ya que el coeficiente de variación para este análisis resultó poco elevado (23.04%). El Cuadro 4 nos muestra el análisis de varianza global de los tratamientos que constituyen la matriz "Plan Puebla I"; se puede observar que no existió respuesta alguna en parcelas grandes, repeticiones ni en tratamientos de parcelas chicas, observando que únicamente la interacción TPG y TPC capta una diferencia significativa al 5% diferencia posible a la heterogeneidad del terreno antes mencionado y no por la adición de estiércol, ya que si observamos los rendimientos obtenidos con o sin estiércol, podemos apreciar que éstas son muy similares.

Respuesta a la fertilización

Al observar la respuesta al nitrógeno en la curva N-120-60 se aprecia un ligero decremento en el rendimiento al pasar de 60 a 100 kg de nitrógeno, pero al incrementar el nivel de N a 140 kg/ha se eleva también la producción con más de 3 ton, en la curva N-160-80 puede detectarse un incremento de 2 ton al pasar de 100 a 140 kg N/ha y al aumentar 40 kg de N el rendimiento gana 780 kg más. En la gráfica correspondiente al fósforo se aprecia una marcada respuesta a este elemento, observando en la curva 100-P-60 que al pasar de 80 a 120 kg de fósforo por hectárea se gana un poco más de una tonelada ya al aplicar 40 kg más el rendimiento se incrementa 2 ton más.

Cuadro 3. Análisis de varianza del factorial 2³ de la matriz Plan Puebla I en la papa de riego de Sinaxtla.

FV	GL	SCM	CM	fc	5%	1%
Repeticiones	3	219.788	73.26	4.06	3.07	4.87
Tratamientos	7	44.377	6.34	0.35	2.49	3.65
Error	21	379.142	18.05			
Total	31	643.307				

CV = 23.04%.

Cuadro 4. Análisis de varianza global de la matriz Plan Puebla I de papa de riego de Sinaxtla.

Factor	GL	SC	CM	fc	5%	1%
Parcela grande	1	8.151	8.151	0.60	161	
Repeticiones	1	127.84	127.84	9.30	161	
Error A	1	13.651	13.65			
Trat.de parc.Ch.13	13	24.271	1.867	0.14	2.13	2.91
Interacción	13	389.095	29.930	2.29	2.13	2.91
Error B	26	339.048	13.04			
Total	55	902,026				

CV = 19.08%.

En la curva 140-P-80 se observa que el incremento en la producción al pasar de 120 a 160 kg de fósforo es de 919 kg; mas sin embargo, el aumento en rendimiento es bastante considerable al adicionar 200 kg de fósforo, pues se ganan cerca de 4 toneladas.

La respuesta al potasio se puede apreciar mediante el método gráfico en la curva 100-120-K, que los rendimientos más altos se obtienen con la menor dosis de potasio (40 kg); mientras tanto el tratamiento que logró los mayores rendimientos fue de 140-160-80 con 19.8 ton, tendiendo a disminuir al incrementar nuevamente la dosis de potasio con 20 kg más (Fig. 1).

Análisis económico

Para la realización de este análisis se consideraron únicamente los costos variables de fertilizante, pues todos los demás costos como el de semilla (1.5 ton) \$22,000.00, preparación de suelos \$4,000.00, labores de cultivo \$2,200.00, control de plagas y enfermedades \$6,915.00, cosecha \$9,900.00 y riegos \$6,000.00 fueron considerados como costos fijos dando un total de \$51,015.00. Para los costos variables se consideró el precio por tonelada de papa a \$10,000.00, el kilogramo de nitrógeno a \$22.47, el de fósforo a \$22.48 y el de potasio a \$10.00; después de obtener los efectos factoriales medios (Cuadro 5) se compararon contra el efecto mínimo significativo para detectar si existió o no respuesta a algún factor siendo esto negativo al no superar ningún efecto factorial medio al efecto mínimo significativo procediendo a promediar los rendimientos de los tratamientos correspondientes al factorial 2³. Después se calculó la diferencia mínima significativa siendo comparada ésta con el resto de los tratamientos y superada únicamente por los tratamientos No. 12, 15 y 16, detectando así una clara respuesta al fósforo en las prolongaciones; al seleccionar la dosis óptima económica para capital limitado se consideró al tratamiento 100-120-40 con la variedad López por ser el que posee la mayor tasa de

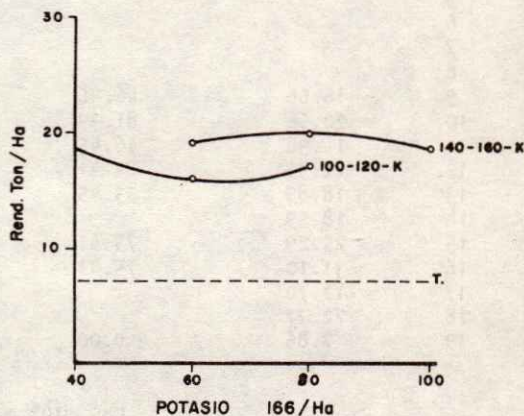
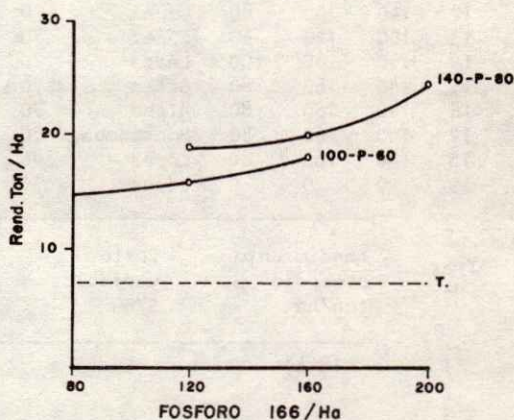
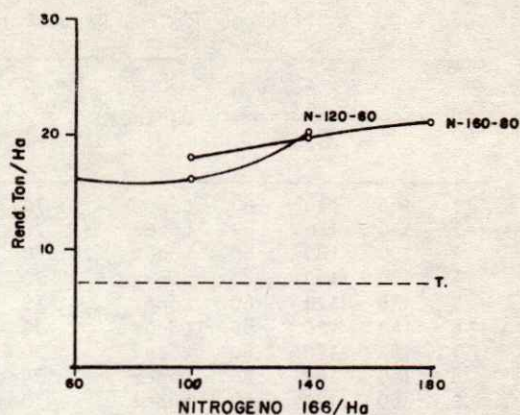


Figura 1. Respuesta de la papa a las aplicaciones de fertilizantes. Sitio Sinaxtla.

retorno al capital dentro de los tratamientos que constuyen la matriz Plan Puebla I.

Para la dosis económica de capital ilimitado se seleccionó el tratamiento 140-200-80 por ser el que obtiene los mayores ingresos netos más costos fijos; pueden seleccionarse también los tratamientos 140-160-80 con las variedades Alpha y Greta por haber sido las que proporcionan mayores ganancias, pero dado que en este trabajo únicamente se probaron como tratamientos exploratorios adicionales se cree conveniente que en futuras investigaciones se trabaje también con estas variedades como tratamientos de referencia.

Cuadro 5. Análisis económico. Papa de riego, Sinaxtla, Agrosistema VIII. P-V 82/82.

Trat. No.	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Variedad	D ¹⁾ cm	Rendim. totales ton.	Columnas de Yates			Div.	EFM ton/ha	
							I	II	III			
1	100	120	60	López	70	64.18	132.45	276.45	582.99	32	18.218	M
2	100	120	80	López	70	68.27	144.00	306.54	- 4.83	16	- 0.30	K
3	100	160	60	López	70	72.72	156.00	+ 2.65	+ 6.09	16	+ 0.38	P
4	100	160	80	López	70	71.28	150.54	- 7.48	- 5.01	16	- 0.313	PK
5	140	120	60	López	70	80.00	+ 4.09	+ 11.55	+ 30.09	16	+ 1.88	N
6	140	120	80	López	70	76.00	- 1.44	- 5.46	- 10.13	16	- 0.63	NK
7	140	160	60	López	70	77.01	- 4.00	- 5.53	- 17.01	16	- 1.06	NP
8	140	160	80	López	70	73.53	- 3.48	+ 0.52	+ 6.05	16	+ 0.38	MPK
9	60	120	60	López	70	66.64				EMS 10%= 2.55		
10	180	160	80	López	70	82.66						
11	100	80	60	López	70	59.93						
12	140	200	80	López	70	95.78						
13	100	120	40	López	70	75.56						
14	140	160	100	López	70	74.34						
15	140	160	80	Greta	70							
16	140	160	80	Alpha	70							
17	140	160	80	Montzamba	70							
18	140	160	80	López	40							
19	0	0	0	López	70							

Trat. No.	Rendimiento promedio ton/ha	Costos variables \$/ha	Ingreso neto + costos fijos	Incremento rendimiento ton/ha	Δ IN \$/ha	TRCV Δ IN CV
1	18.41	55.45	178,635	10.55	100,035	18.04
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9	16.66	46.46	161,954	8.8	88,000	18.94
10	20.66	81.39	198,161	12.8	128,000	15.16
11	14.98	46.45				
12	22.95	84.41	221,059**	16.09	160,900	19.86
13	18.89	53.45	183,555	11.03	110,300	20.67*
14	18.59					
15	25.29	75.41	245,359**	17.43	174,300	23.11*
16	31.10	75.41	303,459**	23.24	232,150	30.79*
17	12.70					
18	22.77					
19	7.86	0.00	78,600			

$$\text{EMS } 10\% = 1.721 \sqrt{\frac{18.054}{21(4)}} = 2.55$$

$$\text{DMS } 10\% = 1.706 \sqrt{\frac{13.04 \times 2}{4}} = 4.356$$

100 - 120-40 DOECL *

$$\text{DMS } 10\% = 1.706 \sqrt{13.04 \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{32}\right)} = 3.26$$

140 - 200-80 DOECL **

1) Distancia entre matas.

CONCLUSIONES

- En relación a la primera hipótesis planteada, se rechaza parcialmente al encontrarse que no hubo respuesta significativa a las aplicaciones de nitrógeno y potasio pero en cambio sí existió a las aplicaciones de fósforo.

- La segunda hipótesis no se rechaza ya que las variedades estudiadas presentaron diferencias significativas; en orden decreciente tenemos que el comportamiento fue el siguiente: Alpha, Greta, López y Montzamba; sin embargo, rechazamos la hipótesis de que la variedad López superaba a las otras tres.

- En relación a la tercera hipótesis, de que con la distancia entre matas de 70 cm se obtiene más rendimiento de papa que con la de 40 cm, se rechaza ya que no se encontró diferencia entre las dos densidades estudiadas.

RECOMENDACIONES

Las recomendaciones para el año de estudio fueron las siguientes:

- Aplicar la fórmula 100-120-40 utilizando la variedad López para los agricultores que trabajen con capital limitado.
- Utilizar la fórmula 140-200-80 con la variedad López para la dosis económica de capital ilimitado, pudiendo

utilizarse además las variedades de papa Alpha y Greta que presentaron muy buena adaptación en la región.

- La fertilización debe realizarse al momento de la siembra, utilizando como fuentes sulfato de amonio, superfosfato de calcio simple y cloruro de potasio.
- Deben realizarse aplicaciones de Zineb, Manzate, Nemacurt y Folimat para prevenir y combatir la presencia de enfermedades y plagas.

En posteriores trabajos es necesario ampliar los espacios de exploración para fósforo y reducir los de potasio, además de emplear un diseño experimental que nos permita evaluar con mayores repeticiones la variedad de papa Alpha y Greta. Además de hacer un estudio en la región para detectar la aceptabilidad de cultivar la papa y de las variedades que tengan mayor mercado dentro de la región.

LITERATURA CITADA

DETENAL. 1970. Cartas de Climas. SPP. México, DF.

FAO. 1980. Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Riego y Drenaje. Estudios FAO No. 33. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia.

Narváez, L. 1978. Determinación para la dosis óptima económica de nitrógeno, fósforo y potasio para el cul-

tivo de la papa (*Solanum tuberosum* L.) en la región occidental del Estado de México. Tesis de Licenciatura. Chapingo, Méx.

Ramírez, R. y R.J.Laird. 1959. La fertilización de la papa en la región de León, Gto. SAG, Méx.

Turrent F., A. 1978. El método gráfico estadístico para la interpretación de experimentos conducidos con la matriz "Plan Puebla I". Colegio de Postgraduados, Chapingo, Méx.

EVALUACION ECONOMICA DE DOS ENFOQUES DE GENERACION DE TECNOLOGIAS DE PRODUCCION AGRICOLA, EN EL ESTADO DE TLAXCALA +

Ornelas Rodríguez, F. *
Rebolledo Robles, H.H. **
Volke Haller, V. ***

RESUMEN

Mediante un criterio económico basado en el ingreso neto que percibirían los agricultores, y usando la información de 24 experimentos de respuesta del maíz a los insumos nitrógeno, fósforo y densidad de plantas, realizados en la región sur del estado de Tlaxcala, se evaluó la bondad de dos enfoques de generación de tecnologías de producción agrícola; el de recomendación general y el de recomendaciones específicas para agrosistemas.

Se encontró que en el 62.5% de los sitios experimentales, el enfoque de recomendaciones específicas para agrosistemas superó en ingreso neto por hectárea, al de recomendación general. A nivel regional, se estimó que el enfoque de recomendaciones específicas para agrosistemas superó en 13.5 millones de pesos en ingreso neto, en el cultivo de maíz, al de recomendaciones general.

ABSTRACT

Incorporating economic criteria based on the net income which farmers would receive, and using the information from 24 experiments on the response of maize to nitrogen, phosphorus and plant density carried out in the Southern region of Tlaxcala State, the merits of two methods of technology generation for agricultural production were evaluated: a method of general recommendations and one of specific recommendations for systems.

It was found that in 62.5% of the experimental sites, the specific-recommendation method gave a higher net return per hectare compared to the general-recommendation method. At regional level, it was estimated that the specific-recommendation method for maize gave an increased net return of 13.5 million pesos compared to the general-recommendation method.

INTRODUCCION

Uno de los objetivos principales de la investigación de cultivos en el campo, es el de formular recomendaciones sobre el uso de insumos y mejorar las prácticas de manejo que realizan los agricultores, de tal forma de lograr un uso más eficiente de los recursos, obtener una mayor productividad y como consecuencia mayores ingresos.

Los investigadores siempre tratan que sus recomendaciones sean lo más precisas posibles, esto significa que la diferencia entre lo que se debiera recomendar y lo que se recomienda, sea mínima.

En este esfuerzo por mejorar la precisión, se han ido adoptando diversos enfoques para generar recomendaciones de tecnologías mejoradas de cultivos a los agricultores; entre ellos están el enfoque de recomendación general y el de recomendaciones específicas para agrosistemas.

La evaluación de la bondad de cada uno de estos enfoques se ha hecho en base a las discrepancias entre la recomendación estimada por ellos y las recomendaciones de los sitios experimentales respectivos. A dichas discrepan-

cias se les estima su media y su desviación estándar; de tal forma que aquel enfoque que origine un menor valor de estos estadísticos, es considerado mejor y más preciso.

Se ha supuesto que aquel enfoque que es mejor en base a las discrepancias, lo es también desde el punto de vista económico; sin embargo, no hemos encontrado ningún trabajo donde se haga una evaluación económica.

Los antecedentes que existen en México acerca de evaluaciones comparativas de la bondad de los diferentes modelos de recomendaciones, muestran que en la mayoría de los casos, el modelo por agrosistemas ha resultado superior desde el punto de vista de la precisión de sus recomendaciones.

Todos los trabajos de evaluación de enfoques de recomendaciones consultados, han tomado como criterio a la media y la desviación estándar de las diferencias, entre los valores estimados por los enfoques en cuestión, y

+ Ponencia presentada en el XVII Congreso Nacional de la S.M.C.S.

* Ing. Agrónomo Especialista en Suelos. Universidad Autónoma Chapingo.

** Profesor Investigador del Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo.

*** Profesor Investigador del Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados. Chapingo, Méx.

los valores obtenidos de la información de los sitios experimentales respectivos.

Se ha supuesto que el enfoque que resulta mejor con dicho criterio, lo es también desde el punto de vista económico. Sin embargo, no hemos encontrado ningún trabajo que apoye o refute dicha suposición. De ahí la inquietud de realizar la presente investigación, que pretende hacer una evaluación económica en base a los ingresos netos que obtendrían los agricultores que adopten su recomendación.

El objetivo principal de este trabajo es determinar, para la zona de estudio, cuál de los dos enfoques de generación de tecnología de producción agrícola es mejor, desde el punto de vista de los ingresos netos que obtienen los agricultores, al adoptar las recomendaciones generadas por uno y otro enfoque.

REVISION DE LITERATURA

1. Enfoque para la generación de tecnologías de producción agrícola.

Según Laird (1977), existen los siguientes enfoques para generar tecnologías de producción agrícola: a) extrapolación de experiencias de otras regiones; b) recomendaciones basadas en análisis de muestras de suelos; c) recomendaciones a partir de una función generalizada de producción; d) recomendación general y e) recomendaciones específicas para agrosistemas.

El enfoque de recomendación general, denominado también agrupación indiscriminada (Castañeda, 1980), básicamente consiste en realizar ensayos de campo en sitios dentro de la región y definir una sola recomendación media general basada en las respuestas del cultivo obtenidas en los sitios experimentales.

Castañeda (1980), considera que la utilidad de la recomendación general será mayor, mientras menor sea la variabilidad de los factores de producción de la región.

Volke (1977), agrega que este enfoque es de menor nivel de precisión y, aunque puede ser muy simple y de menor costo, no resulta apropiado para muchas zonas de temporal, en las cuales se observan variaciones importantes, principalmente de suelo y clima.

El enfoque de agrosistemas para la generación de tecnologías de producción, se basa en la suposición que, dado que la mayoría de los factores de producción varían en forma continua, para fines prácticos se puede dividir el espectro de valores de cada factor en unos pocos grupos de valores, considerando el valor constante dentro de cada grupo. Posteriormente se clasifican los grupos de valores para todos los factores más importantes de producción, en un pequeño número de agrosistemas, para una región dada. Finalmente, se generan recomendaciones específicas para cada agrosistema, al promediar los niveles óptimos de las prácticas de producción estimados para los sitios experimentales distribuidos dentro de cada agrosistema. Mayor información sobre el concepto de agrosistema se encuentra en el trabajo publicado por Turrent (1980).

El primer uso del enfoque de agrosistemas en México, lo hicieron Arvizu y Laird (1958), en un estudio sobre fertilización del trigo realizado en el Valle del Yaquí, Sonora, en 1955, donde definieron ocho agrosistemas.

En el primer año del Plan Puebla (CIMMYT, 1974) se dio una recomendación general para toda el área, es decir se consideró el área total (117 mil ha) como un solo agrosistema. En el año de 1972 se contaba con recomendaciones específicas sobre prácticas de producción para 16 agrosistemas, con diferencias en las características de los suelos, la fecha de siembra, la altura sobre el nivel del mar y el cultivo anterior.

Posteriormente, investigadores como Villalpando (1975), Cortés (1975), Zárate (1976), Volke (1977), Solano (1979), Castañeda (1980) y Rojo (1980) han trabajado el concepto de agrosistemas, y corroborado su superioridad en cuanto a precisión de las recomendaciones sobre el modelo de recomendación general.

2. Metodología para evaluar la bondad de los diferentes enfoques de generación de tecnologías de producción agrícola.

La metodología que comúnmente se ha empleado para evaluar la bondad de los diferentes enfoques de generación de tecnologías, consiste en cuantificar las diferencias entre los valores de los parámetros agronómicos de interés, obtenidos en base a la información de los sitios experimentales, los cuales se consideran como los "verdaderos" y los valores estimados a partir de alguno de los enfoques en cuestión, los cuales se les ha llamado "calculados". Por lo tanto, se tendrán tantas diferencias como sitios experimentales. A continuación se les estima a dichas diferencias, la media y la desviación estándar.

Finalmente para decidir cual de los enfoques que entraron en la comparación es el más preciso, se comparan las medias y las desviaciones estándar de las diferencias; y será más preciso aquel enfoque que reporte valores menores para dichos parámetros.

MATERIALES Y METODOS

La región de estudio comprendió la parte sur del Estado de Tlaxcala. El área total del estudio es de 88 040 ha; el área cultivada es de 44 699 ha; finalmente el área que se cultiva con maíz son 28 208 ha.

El clima según la clasificación de Köppen, modificada, corresponde a templado. En esta región se presenta un promedio anual de 800 mm de precipitación que se distribuyen entre los meses de mayo a octubre, las variaciones que este promedio ha presentado van desde 500 mm en año considerado como seco, hasta 1 200 mm. La temperatura promedio anual es de 18°C la temperatura media mínima y máxima mensual es de 10°C y de 26°C, respectivamente.

Se identifican tres agrupaciones de suelos, con diferencias muy marcadas entre ellos (Volke et al., 1972):

- 1) Suelos que se encuentran en posición baja y presentan una topografía plana. Se trata de suelos profundos (más de 0.8 m), de textura que varía de franco a franco arenoso en el horizonte A.
- 2) Estos suelos están ubicados en las laderas del volcán La Malinche, son profundos (más de 0.8 m) y sus texturas varían de arena francosa a franco arenosa en los horizontes A y B.
- 3) Suelos ubicados en lomeríos, poco profundos (menor a 0.5 m) y sus texturas varían de franco arenoso a arena francosa en los horizontes A y B.

Los agrosistemas para el área de estudio fueron definidos mediante el criterio económico y para el cultivo de maíz por Volke et al. (1972) y son los siguientes:

Agrosistema I. Siembras de marzo y abril bajo humedad permanente. Estas siembras se realizan en suelos que se encuentran ubicados en posición baja y presentan una topografía plana. Se trata de suelos profundos (más de 0.8 m).

Agrosistema II. Siembras de marzo y abril bajo humedad residual. La presencia de humedad residual en este suelo, depende de la textura y el laboreo que el agricultor realice en él, puesto que si éste no es adecuado la humedad puede perderse. Las siembras generalmente se inician a fines de marzo prolongándose hasta la primera quincena de abril. La información obtenida durante 1971 mostró que en este agrosistema los rendimientos observados en el área norte del mismo, eran inferiores a los del área sur. Esto dio lugar a que al iniciarse la investigación en el año de 1972 para completar la información del año anterior, se reconociera una subdivisión, Agrosistema II área norte y Agrosistema II área sur.

Agrosistema III. Siembras de mayo y junio bajo temporal. Estas siembras se realizan en suelos en que no se puede conservar la humedad residual del ciclo anterior, debido a que normalmente se trata de suelos delgados con profundidades menores de 0.5 m, están ubicados en lomerías. Las siembras se inician específicamente cuando el temporal se establece.

Se utilizará la información de 24 experimentos de respuesta del maíz a los factores nitrógeno, fósforo y densidad de plantas, realizados durante los años de 1971 y 1972 en la región sur del estado de Tlaxcala.

A cada uno de los experimentos se les hará un análisis de varianza, para ver si existe efecto significativo de los tratamientos estudiados, sobre el rendimiento del maíz. Posteriormente, se les estimará a cada uno el mejor modelo de regresión. Para seleccionar las variables se utilizará el procedimiento de regresión máximo incremento en el coeficiente de regresión múltiple ($MAXR^2$) del SAS y como criterio de bondad para elegir al mejor modelo, el mínimo cuadrado medio de desviaciones de la regresión (CMDR).

A cada experimento se les estimarán las dosis óptimas económicas (DOE) de nitrógeno, fósforo y densidad de plantas, para lo cual se utilizará el procedimiento desarrollado por Martínez (1972), que consiste en calcular en base a la ecuación de regresión de cada experimento, el rendimiento de cierto número de combinaciones de interés de los insumos, dentro de sus espacios estudiados; al contar con el rendimiento se calcula el ingreso neto, en base al ingreso y costos totales, siendo los óptimos la combinación que dé el mayor ingreso neto. El criterio económico que se usará para la determinación de la (DOE) será el de capital ilimitado.

Obtención de Recomendaciones

Recomendación General. Para obtener la fórmula de producción que contiene los factores nitrógeno, fósforo y densidad de población, mediante este enfoque, se promedian los valores obtenidos para estos insumos en los 24 sitios experimentales con que se realiza el estudio.

Recomendaciones específicas para agrosistemas. En este caso también se obtiene el promedio de los factores nitrógeno, fósforo y densidad de plantas, pero después de agrupar los experimentos por agrosistemas, es decir, se obtienen tantas recomendaciones como agrosistemas están definidos por el área, promediando las DOE de los insumos entre los experimentos que están ubicados dentro de cada uno de los agrosistemas.

Estimación del Rendimiento de cada Sitio Experimental.

Recomendación general. Los modelos de regresión, de cada uno de los 24 experimentos de la región, se alimentarán con las dosis de nitrógeno, fósforo y densidad de plantas por hectárea calculadas con el enfoque de recomendación general, con lo cual se obtendrá una estimación del rendimiento de maíz para cada sitio, utilizando dicha recomendación.

Recomendaciones Específicas para Agrosistemas. Los modelos de regresión de los experimentos dentro de cada agrosistema, se alimentarán con la recomendación de nitrógeno, fósforo y densidad de plantas obtenida específicamente para ese agrosistema, con lo cual se obtendrán las estimaciones del rendimiento de maíz para los 24 sitios experimentales, pero ahora utilizando las recomendaciones de cada uno de los agrosistemas.

Análisis Económico

Este análisis se hace con el fin, primero, de obtener el ingreso neto por hectárea, que percibirían los agricultores, al adoptar las diferentes recomendaciones; segundo, de conocer además el ingreso neto general para la región, partiendo del conocimiento del área total cultivada con maíz y el área que le corresponde a cada agrosistema.

Recomendación General. Para este análisis se parte del conocimiento del rendimiento estimado en cada sitio experimental con la recomendación general, con el cual podrá ser obtenido el ingreso total, al multiplicarlo por el precio del producto. Se conoce también el costo fijo para la zona de estudio; con los precios de los insumos nitrógeno, fósforo y densidad de plantas se obtiene el costo variable. Sumando los costos variable y fijo se obtiene el costo total. El ingreso neto por hectárea se obtendrá al restarle al ingreso total, el costo total que se generaría en la zona de estudio al usar la recomendación general.

Teniendo los 24 ingresos netos que se obtienen por hectárea, se calculará el promedio de ellos, que multiplicado por el área total cultivada con maíz, se obtendrá el ingreso neto total que se generaría en la zona de estudio al usar la recomendación general.

Recomendaciones Específicas para Agrosistemas. Con la misma metodología ya descrita, pero usando los rendimientos de cada sitio experimental obtenidos con las recomendaciones por agrosistemas, se calculará el ingreso neto por hectárea. Para el análisis económico a nivel regional, primero se obtendrá el ingreso neto medio por hectárea para cada agrosistema.

En base al conocimiento del ingreso neto obtenido por hectárea, en cada sitio, y la ubicación de estos dentro de los agrosistemas, se hará un análisis de varianza para estimar si existe diferencia estadística significativa entre los ingresos netos, al estar agrupados por agrosistemas.

Al conocer los ingresos netos por hectárea de cada sitio experimental, obtenidos con ambos enfoques de generación de tecnologías, será posible realizar un análisis de varianza, para estimar si existe diferencia significativa estadística, entre los IN/ha obtenidos con los dos enfoques.

RESULTADOS Y DISCUSION

Recomendaciones Generales y Específicas.

En 23 de los sitios experimentales los tratamientos estudiados fueron significativamente diferentes (1%) y en el sitio restante al 5%.

Como se mencionó anteriormente, a cada sitio se le estimó un modelo de regresión. Los valores de R^2 obtenidos variaron de 0.59 a 0.91 y 14 valores fueron mayores que 0.80.

En el Cuadro 1 se presentan las DOE para N, P, D y rendimientos óptimos económicos (ROE), estimados para cada uno de los 24 sitios experimentales, mediante el mejor modelo de regresión de cada experimento. Se observa que para nitrógeno las DOE se encuentran entre 90 y 189 kilos por hectárea; para el fósforo entre 0 y 90 kilos por hectárea; y para densidad de plantas entre 27 y 75 mil plantas por hectárea.

En el Cuadro 2 se muestran las recomendaciones de nitrógeno, fósforo y densidad de plantas generadas con cada enfoque de recomendación para la zona de estudio.

Cuadro 1. Dosis óptimas económicas de nitrógeno (N), fósforo (P_2O_5) y densidad de plantas (D) y el rendimiento óptimo económico (ROE), obtenidos con el modelo de regresión final de cada uno de los 24 sitios experimentales.

No. de Sitio	Dosis Óptimas Económicas			ROE (kg/ha)
	N (kg/ha)	P_2O_5 (kg/ha)	D (Mil pl/ha)	
0172	130	63	63	5548
0272	162	00	61	6189
0571	90	00	30	3374
0772	147	60	60	6100
0872	182	66	75	7815
0972	174	87	63	7384
1172	180	90	74	6680
1271	150	51	58	6824
1571	144	00	31	5693
1572	189	90	31	5595
1771	93	00	49	5546
1772	147	39	56	7006
1972	141	60	45	4084
2072	162	54	30	3574
2171	129	00	38	5815
2371	105	57	56	3728
2571	156	33	58	6597
2771	144	60	45	4763
2772	177	00	59	7829
2871	108	60	49	1817
2971	108	09	40	2307
3071	111	00	27	3306
3172	129	66	57	6700
3372	129	00	51	5354

Cuadro 2. Dosis de nitrógeno (N), fósforo (P_2O_5) y densidad de plantas (D), generadas por cada enfoque de recomendación para la zona de estudio

Enfoque de recomendación	Dosis		
	N (kg/ha)	P_2O_5 (kg/ha)	D (Mil pl/ha)
Recomendación general	140	40	50
Recomendación para agrosistemas:			
Agrosistema I	145	30	50
Agrosistema II Norte	130	40	50
Agrosistema II Sur	165	55	55
Agrosistema III	120	25	45

Los valores de rendimiento de maíz obtenidos, en cada sitio, con la recomendación general se muestran en el Cuadro 3, y es posible observar que fluctúan entre 1636 y 7787 kg/ha, siendo el rendimiento promedio de 4 872 kg/ha.

También en el Cuadro 3 se muestran los rendimientos de maíz estimados, para cada sitio experimental, con el enfoque de agrosistemas. Se observa que el agrosistema II área sur, es el que presenta mayores rendimientos en sus sitios experimentales, siendo la media de 6 225 kg/ha; le sigue el agrosistema I con un rendimiento medio de 5 787 kg/ha, a continuación se tiene el agrosistema II área norte con un promedio de 3 972 kg/ha; y finalmente el agrosistema III fue el que obtuvo el rendimiento promedio más bajo con 3 384 kg/ha.

Cuadro 3. Rendimientos de grano de maíz, estimados con los modelos de regresión de cada sitio experimental, que se obtendrían al adoptar la recomendación general o las recomendaciones específicas por agrosistemas.

No. de Sitio	Rendimiento Estimado kg/ha	
	Recomendación General	Recomendación por Agrosistemas
0172	4634	4633
1272	5801	5700
1571	3313	3409
1772	5815	6110
0872	6664	7188
0972	5973	6208
1172	5198	5761
1271	5399	6776
1571	5287	5962
1572	4344	4745
1771	5688	5539
1772	6181	7034
1971	3851	3713
2072	3221	3103
2171	5831	5972
2371	3120	3273
2571	6138	6224
2771	4239	3882
2772	6787	6896
2871	1636	1070
2971	2551	2423
3071	3518	3249
3172	5853	5030
3372	5486	5148

Análisis económico a nivel de cada sitio experimental.

En el Cuadro 4 se presenta, para cada sitio experimental, el ingreso total (IT), que se obtiene al multiplicar el rendimiento estimado de maíz por su precio; el costo total (CT), resultante de sumar los costos variables (CV) y los costos fijos (CF). El IN/ha resultó de restarle al IT de cada sitio el CT correspondiente. Se observa que en los diferentes sitios experimentales, los ingresos netos por hectárea al adoptar la recomendación general varían entre 3 166 y 106 443 pesos; y al promediar los valores de los 24 sitios, se obtuvo el Ingreso neto por hectárea promedio para la región, que es de 68 048 pesos

En el Cuadro 4 se presentan, para cada sitio experimental, el IT, CT e IN/ha obtenidos con enfoques de agrosistemas. Los sitios están agrupados en sus respectivos agrosistemas. Se observa que los IN/ha varían desde un valor negativo de - 5 602 pesos a 108 999 pesos. En el mismo cuadro se presentan los IN/ha promedios para cada agrosistema. Al comparar los ingresos netos por hectárea obtenidos, en cada sitio experimental, con ambos enfoques de generación de tecnología es posible observar que en 15 sitios (62.5% del total) se obtuvo un mayor IN/ha al adoptar la recomendación por agrosistema que al adoptar la recomendación general. En esos 15 sitios se obtienen ingresos netos superiores por hectárea que van de 13 a 24 728 pesos.

Por otro lado, hubo 9 sitios experimentales (37.5% del total), en los cuales los ingresos netos por hectárea mayores se obtuvieron al adoptar la recomendación general. En estos 9 sitios los ingresos netos superiores por hectárea variaron de 1 402 a 13 922 pesos.

De acuerdo al análisis de varianza de los ingresos netos obtenidos por hectárea con el cultivo de maíz, al usar las recomendaciones específicas por agrosistemas se obtuvo que estos eran significativamente diferentes al 5%, lo que nos señala que los agrosistemas fueron bien definidos en la región.

Análisis económico a nivel de la región de estudio.

En el Cuadro 5 se muestran los ingresos netos por hectárea obtenidos con la recomendación general y por agrosistemas, además se señala para cada enfoque de recomendación, a nivel regional, el ingreso neto que obtendrían los agricultores al usar uno u otro. Al comparar dichos ingresos netos, se observa una diferencia de aproximadamente 13.5 millones de pesos a favor del enfoque de agrosistemas.

Se dividió la diferencia obtenida entre los dos enfoques de recomendación, entre el número de hectáreas de la zona de estudio. Para obtener el ingreso neto con que supera el enfoque de agrosistemas, al de la media general por hectárea y resultó ser de 479 pesos.

Cuadro 4. Análisis económico a nivel de sitio experimental. Ingreso total (IT); costo total (CT) e ingreso neto (IN) por ha. Para cada enfoque de recomendación; diferencia en IN/ha de los dos enfoques en estudio.

No. de Sitio	Recomendación general				Recomendación por Agrosistema			Diferencia en IN/ha	
	IT/ha	CT/ha	IN/ha		Agros.	IT/ha	CT/ha	IN/ha	Recom. Gral.
0972	119756	29636	90123	I	124470	29266	95205		5082
1771	114044	29636	84408	I	111057	29266	81791	2617	
2171	116912	29636	87276	I	119739	29266	90473		3197
2571	123067	29636	93431	I	124791	29266	95525		2094
2771	84992	29636	55356	I	77834	29266	48568	6788	
2772	136079	29636	106443	I	138265	29266	108999		2556
					IN MEDIO/ha				
0172	92912	29636	63276	II NTE	92892	29013	63879		603
0272	116310	29636	86674	II NTE	114285	29013	85272	1402	
0571	66426	29636	36790	II NTE	68350	29013	39337		2547
1971	77213	29636	47577	II NTE	74446	29013	45433	2144	
2072	64581	29636	34945	II NTE	62215	29013	33202	1743	
2371	62556	29636	32920	II NTE	65624	29013	36611		3691
					IN MEDIO/ha				
0772	116591	29636	86955	II SUR	122506	32527	89979		3024
0872	133613	29636	103977	II SUR	114119	32527	111592		7615
1172	104220	29636	74584	II SUR	115508	32527	82981		8397
1271	108250	29636	78614	II SUR	135859	32527	103332		24718
1571	106004	29636	76368	II SUR	119538	32527	87011		10643
1572	87097	29636	57461	II SUR	95137	32527	62610		5149
1772	131949	29636	102313	II SUR	141032	32527	108505		6192
					IN MEDIO/ha = 92287				
2871	32802	29636	3166	III	21454	27056	-5602	8768	
2971	51148	29636	21512	III	48581	27056	21525		13
3071	70536	29636	40900	III	65142	27056	38086	2814	
3172	117353	29636	87717	III	100852	27056	73796	13922	
3372	109994	29636	80358	III	103217	27056	76161	4197	
					IN MEDIO/ha = 60048				
					IN MEDIO/ha = 40793				

Cuadro 5. Análisis económico a nivel regional. Ingreso neto medio por hectárea (IN/HA); superficie comprendida e ingreso neto total (In total) para cada enfoque de recomendación.

Enfoque de recomendación	IN/HA (pesos)	Superficie (ha)	In total (millones pesos)
Recomendación general	68 048	28 208	1919.498
Recomendación para agrosistemas:			
Agrosistema I	86 760	4 910	425.9916
Agrosistema II norte	50 622	5 163	261.36139
Agrosistema II sur	92 287	9 824	906.62749
Agrosistema III	40 793	8 311	339.03062
Subtotal		28 208	1933.0111
Diferencia en ingreso neto regional a favor del enfoque de recomendaciones específicas para agrosistemas			13.5131

En base al conocimiento de los ingresos netos por hectárea (IN/ha), provenientes del cultivo del maíz, obtenidos con ambos enfoques de generación de tecnologías, se realizó un análisis de varianza para estimar si las diferencias en IN/ha de los dos enfoques son significativamente diferentes.

El análisis mostró que no hubo diferencia significativa entre los ingresos netos por hectárea generados por ambos

enfoques; esto posiblemente se debió, en parte, a la poca extensión del área de estudio, lo que puede ocasionar una relativa homogeneidad ambiental, ya que también se utilizó información experimental de sólo dos años, lo que impidió capturar, en toda su dimensión, la variación climática de la región.

CONCLUSIONES

- 1) Al estimar los ingresos netos por ha de cada uno de los 24 sitios experimentales distribuidos en la región de estudio, con las recomendaciones de cada enfoque de generación de tecnología; se observó que en 15 de ellos se obtuvieron mayores ingresos al adoptar las recomendaciones específicas para agrosistemas y sólo en los 9 restantes se obtuvieron mayores ingresos netos al adoptar la recomendación general.
- 2) Al estimar el ingreso neto regional, que se obtendría con el cultivo de maíz, se observó que al adoptar las recomendaciones por agrosistemas se obtuvo un ingreso neto superior en 13.5 millones de pesos al obtenido con la recomendación general.
- 3) Al estimar el ingreso neto por hectárea, se observó que este fue 479 pesos superior al adoptar la recomendación para agrosistemas, que con la recomendación general, esta diferencia no resultó ser estadísticamente significativa.
- 4) Los resultados obtenidos, en la región de estudio, no muestran evidencias, desde un punto de vista económico, que el enfoque de agrosistemas definido mediante el criterio agronómico, sea superior al de recomendación general.

LITERATURA CITADA

- Arvizu, R.S. y Laird, R.J. 1958. Fertilización del trigo en el Valle del Yaqui, México. Oficina de Estudios Especiales, S.A.G. Folleto Técnico 26.
- Castañeda, P.A. 1980. Generación de tecnología en el cultivo único de maíz en hilera, en el Plan Mixteca Alta Oaxaca. Tesis de Maestro en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Chapingo, Méx.
- Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. (CIMMYT), 1974. El Plan Puebla. Siete años de experiencias. 1967-1973. El Batán, México.
- Cortés, F. J.I. 1975. Diseño de recomendaciones prácticas de fertilización y densidad de población en maíz de temporal para varias condiciones de producción en la Sierra Tarasca. Tesis de Maestro en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Chapingo, Méx.
- Laird, R.J. 1977. Investigación agronómica para el desarrollo de la agricultura tradicional Escuela Nacional de Agricultura. Colegio de Postgraduados, Chapingo, Méx.
- Martínez, G.A. 1972. Aspectos económicos del diseño y análisis de experimentos. Centro de Estadística y Cálculo. Colegio de Postgraduados, Chapingo, Méx.
- Rojó, S. J. V. 1980. Evaluación de cinco metodologías para generación de recomendaciones sobre fertilización y densidad de población del maíz de temporal en los Valles Centrales de Oaxaca. Tesis de Maestro en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Chapingo, Méx.
- Solano, R. V. D. 1979. Recomendaciones sobre prácticas de producción de maíz y frijol en la sierra de Chiuhuahua. Tesis de Maestro en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Méx.
- Turrent, F.A. 1968. Empirical relationships between yield of experimentally grown corn and some environmental factors in Iowa. Unpublished Ph.D. Thesis Iowa State University. Ames.
- Turrent, F.A. 1980. El agrosistema, un concepto útil dentro de la disciplina de productividad. Escritos sobre la metodología de la investigación en productividad de agrosistemas número 3. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Méx.
- Villalpando, I.J.F. 1975. Desarrollo de un método para obtener ecuaciones empíricas generalizadas del rendimiento de una región agrícola, para uso de diagnóstico. Tesis de Maestro en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Méx.

- Volke, H.V., Mejía, H., Morales, A., Turrent, F.A. 1972. Resultados de la investigación agronómica en maíz desarrollada en la parte sur del estado de Tlaxcala (Plan Tlaxcala) durante 1971 y 1972. Centro Internacional de Mejoramiento del Maíz y el Trigo. México, D.F. Mimeografiado.
- Volke, H.V. 1977. Generación de tecnologías para agricultura de temporal y subsistencia. El caso del maíz en la región del Plan Puebla. Tesis de Doctor en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Méx.
- Zárate, R.R. 1976. Una modificación al método de tres etapas para obtener la ecuación empírica generalizada del rendimiento del maíz para la región sur del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca. Tesis de Maestro en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Méx.

RECOMENDACION DE DOSIS OPTIMAS ECONOMICAS DE N Y P PARA MAIZ DE TEMPORAL CON BASE EN ANALISIS DE SUELO Y OTRAS VARIABLES +

Rebolledo Robles, H.H. *
Volke Haller, V. **
Etchevers Barra, J.D. **

RESUMEN

El análisis de suelo, como herramienta para formular recomendaciones de fertilización de cultivos, no ha tenido resultados satisfactorios en México.

En este trabajo se muestra que la disponibilidad de un nutrimento en el suelo, es sólo uno de los factores que influyen en el rendimiento y poco se ha avanzado en incluir otras variables, ya sean de suelo, clima o manejo, que modifican la respuesta del cultivo a los fertilizantes y sus recomendaciones.

Se utilizó la información de 92 experimentos de respuesta del maíz a la fertilización de N y P, realizados en la región del Plan Puebla entre los años 1967 a 1973. A cada uno de los experimentos se les estimó su mejor modelo de regresión, con los cuales se generó una dosis óptima económica (DOE) de N y P para cada sitio, las que se consideraron como DOE observadas o verdaderas.

Posteriormente estas DOE se asociaron con las variables de sitio (de suelo, clima y manejo), lo que permitió, mediante técnicas de regresión, seleccionar dos conjuntos de variables asociados a las DOE de N y P; quienes integraron dos modelos de regresión que permiten estimar DOE de nitrógeno y fósforo para la región del Plan Puebla.

ABSTRACT

Soil testing has not been quite successful in Mexico to produce fertilizer recommendations. In the present paper is shown that availability of a soil nutrient, as determined by soil testing, is only one of the factors affecting final crop yield. Little has been studied on the way that other variables like soil climate, and management modify the crop response to the fertilizers and the fertilizer recommendations. Data from 92 N and P corn response experiment conducted in the Plan Puebla region between 1967 and 1973 were reanalyzed. The best regression model was determined for each experiment and the economic optimum rate (DOE) calculated. This rate was assumed as the true DOE. DOE were then associated to site variable (soil, climate and management) and a group of them selected to formulate a regression model to estimate DOE for N and P, valid for the whole region.

INTRODUCCION

Las variaciones de los contenidos de nutrimentos en los suelos, determinan variaciones en las cantidades de fertilizantes que hay que agregar a un cultivo para lograr rendimientos económicamente aceptables. Puesto que la aplicación de estos productos constituye una proporción importante de los costos de producción, ha existido y existe preocupación por realizar sus recomendaciones con la mayor precisión posible. En la actualidad se dispone de varias metodologías para generar recomendaciones, entre ellas, el análisis químico del suelo o análisis del suelo. A su vez las técnicas químicas que se emplean para realizar los análisis de suelos, con el objeto de determinar el contenido de nutrimentos disponibles para las plantas, son en general numerosas, lo que obliga a una cuidadosa selección para cada suelo o situación.

El uso de los análisis de suelos con propósitos de diagnóstico y recomendación de fertilizantes, implica la ejecución previa de dos etapas que son: a) la correlación

de métodos analíticos, para determinar el grado de asociación, entre la cantidad de nutriente extraída por el extractante químico y la extraída por las plantas; esto permite al investigador seleccionar el mejor método analítico, que será aquel que presente el mayor grado de asociación; y b) la calibración del método seleccionado, que permite asociar los rendimientos en terreno con la respuesta a la aplicación de fertilizantes.

El análisis químico de suelos, debería constituir una herramienta esencial para formular recomendaciones de fertilización, sin embargo, diversas limitantes, inciden de manera adversa en la bondad de su utilización.

Laird (1977), afirma que el uso de análisis de suelos, se basa en la suposición de que las necesidades de un nutrimento son inversamente proporcionales a las cantidades de ese nutrimento presentes en el suelo en forma aprovechable. No hay duda de que esta suposición es en

+ Trabajo presentado en el XVII Congreso Nacional de la S.M.C.S.

* Profesor Investigador, Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Méx.

** Profesor Investigador Titular, Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Chapingo, Méx.

gran medida cierta; sin embargo, existe amplia evidencia de que la cantidad de un elemento nutritivo en el suelo, es sólo uno de los factores que determinan el rendimiento de un cultivo y que hay muchos otros factores que interactúan con los nutrientes, que modifican la respuesta del cultivo a las aplicaciones de fertilizantes. Lo anterior ocasiona, que la recomendación de fertilización, basada sólo en la cantidad de nutrimento aprovechable en el suelo, determinada mediante un análisis químico, ignora una diversidad de factores que influyen en el rendimiento, y en consecuencia pudiera ser imprecisa.

El hecho que un cultivo responda en forma diferente a las aplicaciones de un nutrimento, en suelos que tienen el mismo valor del análisis químico, ha sido una de las causas fundamentales del poco éxito de las calibraciones confirmando el hecho de que existen muchos factores que afectan a la dosis de fertilización. Entre ellos están los factores de suelo, clima y manejo.

En muchos países, entre ellos México, se ha pretendido usar las pruebas químicas como el único parámetro para estimar una recomendación de fertilizante. En varios se han utilizado procedimientos poco apropiados, y no se ha avanzado mucho en la inclusión de otras variables, que modifican la respuesta de los cultivos a los fertilizantes.

El objetivo de este trabajo es presentar una metodología para generar recomendaciones de fertilización de cosechas en base a la utilización de análisis químico de suelos y de otras variables del suelo, clima y manejo. El procedimiento cuantitativo propuesto, se empleó para generar recomendaciones de nitrógeno y fósforo para maíz de temporal de la zona del Plan Puebla, y se basa en la asociación de las dosis óptimas económicas de estos nutrientes con los contenidos nutricionales del suelo, estimados mediante análisis químico y la inclusión en el modelo de estimación de variables de suelo, clima y manejo.

MATERIALES Y METODOS

Area de estudio.

La presente investigación se realizó con datos generados en experimentos conducidos en el área del Plan Puebla. Este Plan ocupa la parte occidental del estado de Puebla y tiene una superficie total de 151,169 ha, de las cuales 116,800 ha son cultivables. Esta región se ubica en una gran parte del valle drenado por el río Atoyac, y amplias extensiones localizadas entre los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl al oeste, y La Malinche al norte y al este.

La mayor parte del área tiene una altura que fluctúa entre los 2,150 y 2,700 m.s.n.m. El clima de la región según la clasificación de Köppen, corresponde al tipo CW, templado, con inviernos secos y con lluvias en verano. Las temperaturas medias mensuales durante el ciclo de crecimiento del maíz, varían de 18.6°C en mayo a 16.1°C en octubre (CIMMYT, 1974).

De acuerdo con Turrent (1974), los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl y La Malinche han tenido un papel fundamental en el proceso de formación de los suelos del área del Plan Puebla, ya que el material parental predominante proviene de erupciones volcánicas. Este material varía en tamaño, desde cenizas muy finas hasta partículas pómez de varios centímetros de diámetro. Los materiales más gruesos se encuentran en las pendientes altas de los volcanes y los más finos hacia el centro del valle.

Método Experimental.

Se utilizó la información de 92 experimentos de respuesta del maíz a los factores nitrógeno (N), fósforo (P) y densidad de plantas (DP), conducidos en la región del Plan Puebla entre los años 1967 a 1973. Los experimentos se realizaron en parcelas de los agricultores, usando el sistema de manejo propio de ellos.

En cada sitio experimental se tomó una muestra compuesta de suelo de la capa arable (1 a 18 cm), se describió el perfil del suelo y se midió la precipitación. En las muestras de suelo de la capa arable se determinaron diversas propiedades químicas, además de la textura. En el Cuadro 1 se indican las características determinadas y el método de análisis utilizado.

Durante el ciclo de desarrollo del cultivo, se tomaron datos sobre: a) fechas en que se efectuaron las labores; b) fechas fenológicas; c) la respuesta vegetativa a los tratamientos experimentales; d) daño debido a heladas, granizos, vientos, exceso de agua, enfermedades; y e) efectos de sequía. A la cosecha se contó la población real de plantas y se tomaron observaciones sobre granos podridos.

Los factores considerados en la estimación de las dosis óptimas económicas (DOE) de nitrógeno y fósforo, se presentan en el Cuadro 2.

La finalidad de generar el mejor modelo de regresión a nivel de experimentos, fue la de estimar las DOE para N y P de cada sitio. Para ello se determinó la mejor ecuación de regresión para cada uno de los 92 experimentos considerados, esto se hizo utilizando como procedimiento de selección de variables el máximo incremento de R^2 (MAXR) del SAS (Barr y Goodnight, 1979), y el mínimo cuadrado medio de desviaciones de la regresión* (CMDR), como criterio de bondad para seleccionar el mejor modelo.

Cuadro 1. Características determinadas en la muestra de suelo de la capa arable de cada sitio experimental y el método de análisis

Propiedad ^{1/}	Método de análisis
Reacción, pH	Potenciométrico con electrodo de vidrio y calomel, en relación suelo-agua de 1:2.
Conductividad eléctrica	Puente Wheatstone, en extracto de saturación.
Nitrógeno total	Macro Kjeldahl, método de Kjeldahl-Gumming (AOAC, 1970).
Materia orgánica	Combustión húmeda, método Walkley-Black (Allison, 1965).
Fósforo disponible	Bray -1 (Olsen y Dean, 1965).
Potasio intercambiable	Peech-Morgan (Peech y English, 1944)
Calcio intercambiable	Peech-Morgan (Peech y English, 1944)
Magnesio intercambiable	Peech-Morgan (Peech y English, 1944)
Textura	Bouyoucos con solución Calgón como dispersante (Day, 1965)

^{1/} La conductividad eléctrica, el nitrógeno total, la materia orgánica, el fósforo extraíble, y el potasio, calcio y magnesio extraíble se determinaron en el Laboratorio de Suelos del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. La textura se determinó en el Laboratorio de Pedología del Colegio de Postgraduados de Chapingo. La reacción pH y la materia orgánica se determinaron en ambos laboratorios (Volke, 1977).

Cuadro 2. Factores de Parcela y de Sitio y sus Unidades de Medición.

Factores	Unidades de Medición
<u>De parcela</u>	
N, P ₂ O ₅ , K y Mg aplicados	kg/ha
Densidad de plantas	Miles plantas/ha
N aplicado siembra	kg/ha
N aplicado en la 1a. y 2a labor	kg/ha y días
Pudrición mazorca	%
<u>De sitio</u>	
pH (0-18 cm)	-
Nitrógeno total (0-18 cm)	%
Materia orgánica (0-18 cm)	%
P, K, Ca y Mg extraíbles (0-18 cm)	ppm
Arena, limo y arcilla de 0-60 y de 0-120 cm	%
Pedregosidad (part. mm diam)	%
Espesor horizonte A y Ap	cm
Pendiente	%
Tipo suelo; friables, con horizonte compactado, arcillosos	Var. muda 0, 1 y -1
Presencia de alófono	Var. muda 0 y 1
Fecha siembra	días
Distancia entre surcos	m
Variedad: potencial de rdto. largo ciclo desarrollo	0.70 y 1.05 días
Altura sobre nivel mar	m
Lluvias quincenales y mensuales durante desarrollo cultivo	mm
Exceso de humedad y heladas durante ciclo de desarrollo	Notas de 0 a 2
Granizo antes y después de inicio floración masculina	% daño
Acame antes y después de inicio floración masculina	Notas de 0 a 4
Malezas	Notas de 0 a 4
Plagas y enfermedades	Notas de 0 a 10
Achaparramiento	%
Sequía	Notas de 0 a 4

Con el mejor modelo de regresión de cada experimento, fue posible estimar las DOE de N y P para cada sitio. Esto se hizo mediante una computadora, utilizando el procedimiento desarrollado por Martínez (1972), que consiste en calcular, en base a la ecuación de regresión, el rendimiento de cierto número de combinaciones de interés de los insumos, dentro de sus espacios de exploración estudiados. Al contar con el rendimiento, se calcula el ingreso neto en base a ingresos y costos totales, siendo los óptimos la combinación de insumos que origine el mayor ingreso neto.

El criterio económico usado para la determinación de las DOE, fue el de capital ilimitado, con una tasa de retorno al capital que se consideró aceptable desde el punto de vista de la inversión (Volke, 1982).

La relación de precio insumo/precio producto para N y P se estimó en 4 y 3, respectivamente, con precios de julio de 1984. Estas relaciones, se incrementaron en un 75% para el fósforo y en 100% para el nitrógeno, ya que éste tiene mayor riesgo de lixiviarse con la lluvia; de tal forma que las relaciones de precios insumo/producto utilizadas para N y P fueron de 8 y 6, respectivamente.

Estas DOE, que se consideraron como verdaderas y más precisas, se utilizaron para compararlas con aquellas, que también para cada sitio, se estimaron basadas en los datos de análisis químico de suelos y variables de suelo, clima y manejo. Mientras menor fue la diferencia entre ambas DOE, en cada sitio, más precisa se consideró la recomendación generada en base a la metodología propuesta en este trabajo.

Los valores de las dosis óptimas económicas para N y P estimadas con el mejor modelo de regresión de cada sitio experimental, se graficaron contra todos los factores de sitio (variables de suelo, clima y manejo), incluidos allí los niveles de nitrógeno y fósforo determinados mediante análisis químico.

Esto permitió generar un conjunto de variables potenciales asociadas a las DOE de N y P. Así por ejemplo, si las dosis óptimas económicas para N (DOEN), al graficarlas contra el factor nitrógeno total del suelo, sugiere una curva de tipo raíz cuadrada, se crearon las variables nitrógeno total del suelo con exponente raíz cuadrada ($n^{.5}$), y la variable nitrógeno total del suelo lineal (n); en cambio, si la gráfica sugiere una curva de tipo cuadrática, se crearon las variables nitrógeno total del suelo lineal y nitrógeno total del suelo cuadrática (n^2).

Cuando los puntos de la gráfica no sugirieron ninguna asociación clara, pero se sospechó que algún factor pudiera estar influyendo en las DOE, el factor en cuestión fue de todos modos introducido como una variable potencial en su forma lineal.

Cabe señalar, que el análisis de las gráficas no permite discriminar con certeza entre diferentes tipos de modelos. Las variables así estimadas y supuestamente asociadas con las DOE, fueron posteriormente probadas mediante regresión, donde la DOE respectiva fue la variable dependiente y las variables potencialmente asociadas actuaron como variables independientes.

Para probar el grado de asociación entre las DOE de N y P, generadas con el mejor modelo de cada sitio, con sus respectivas variables simples, estimadas del análisis de las gráficas, se usó la técnica de regresión máximo incremento de R^2 (MAXR), usando como criterio de bondad el mínimo cuadrado medio de desviaciones de la regresión (CMDR) y la condición de que las variables no presentarán signos contrarios a los esperados desde el punto de vista agronómico.

Las variables de sitio, en su forma simple, que se asociaron con las DOE de N y P, pasaron a formar parte del conjunto de variables que se usaron en la siguiente etapa, con el objeto de ir mejorando el grado de asociación del modelo con las DOE de N y P generadas en cada sitio experimental.

Para determinar las variables que constituirían el grupo final en el modelo, se siguieron los criterios siguientes:

a) Se seleccionó el conjunto de variables simples de suelo, clima y manejo de cada sitio experimental, asociadas con las respectivas DOE, según la forma de respuesta sugerida por las gráficas.

b) Se probaron las interacciones entre estas variables simples, haciendo interaccionar aquellas variables que primero entraron al modelo con las restantes.

c) Para proponer las interacciones, se utilizó el criterio agronómico.

d) Cuando en el modelo apareció una variable con signo contrario al esperado, ésta se correlacionó con las demás, para observar multicolinealidad. De aquellas variables que presentaron un coeficiente de correlación (r) igual o mayor a 0.80, se eliminó la más compleja o con menor significado agronómico.

RESULTADOS

Con el conjunto final de variables se generaron dos modelos de regresión para estimar dosis óptimas económicas de nitrógeno (DOEN) y de fósforo (DOEP), los cuales se muestran en los Cuadros 3 y 4, respectivamente.

Para el nitrógeno el R^2 obtenido fue 0.76, y quedaron incluidas en el modelo, además del nitrógeno total del suelo determinado mediante análisis químico de suelos, otras variables entre las que se destacan la lluvia en diferentes épocas, porcentaje de arena, sequía, enfermedades, profundidad del horizonte A, fecha de siembra, entre otras.

Respecto al fósforo, el R^2 obtenido fue 0.73, y además del fósforo extraíble del suelo con el extractante Bray-1, resultaron incluidas en el modelo otras variables como tipo de suelos (suelo pumicítico), textura (suelo arcilloso), porcentaje de materia orgánica, lluvia y fecha de siembra.

Cuadro 3. Modelo de regresión para estimar dosis óptimas económicas de nitrógeno (DOEN), en la región del Plan Puebla.

Variables independientes	Coefficientes de regresión
Ordenada en el origen	132.56
$n \cdot 5$	- 778.21
q^2	- 13.35
b^2	0.075
b^3	0.00067
$mg \cdot 5$	- 2.93
ma	- 21.78
z	- 36.67
u	- 8.29
pl	- 47.89
$n \cdot 5 q^2$	43.17
$l_3 \cdot 5$	3.85
l_8^2	- 0.00678
D pa	0.04611
D b ³	- 0.000002
$n \cdot 5 l_8^2$	0.03069
$n \cdot 5 u$	35.15
b f ²	0.0000099

$$R^2 = 0.76$$

donde:

- n : Nitrógeno total del suelo (%)
- q : Sequía
- b : Arena horizonte B (%)
- mg: Magnesio extraíble del suelo (ppm)
- ma: Malezas (0-4)
- z : Achaparramiento (%)
- u : Pudrición mazorca (%)
- pl: Plagas y enfermedades (%)
- l_3 : Lluvia 2o. mes anterior 75% floración femenina (mm)
- l_8 : Lluvia 1er. mes después siembra (mm)
- D : Densidad plantas (milpl/ha)
- pa: Profundidad horizonte A (cm)
- f : Fecha siembra (días desde 1o. marzo)

Cuadro 4. Modelo de regresión para estimar dosis óptimas económicas de fósforo (DOEP) en la región del Plan Puebla:

Variables independientes	Coefficientes de regresión
Ordenada al origen	211.72
$p \cdot 25$	- 148.81
p	3.79
s	98.79
a	- 123.26
m	94.05
$l_3 \cdot 5$	5.56
f^2	- 0.00675
$m f^2$	- 0.00345
$p \cdot 25 s$	- 42.76
$p \cdot 25 a$	61.75
$p \cdot 25 m$	- 30.54
$p \cdot 25 l_3 \cdot 5$	- 2.54
$p \cdot 25 f^2$	0.00412

$$R^2 = 0.73$$

donde:

- p : Fósforo extraíble del suelo por Bray-1 (ppm)
- s : Suelo pumicítico (var mudas)
- a : Suelo arcilloso (var. mudas)
- m : Materia orgánica (%)
- l_3 : Lluvia 2o. mes anterior 75% floración femenina (mm)
- f : Fecha siembra (días del 1o. marzo)

La capacidad predictiva de las dosis óptimas económicas de N y P para cada sitio, que tuvo el modelo generado se investigó en el siguiente paso. Los modelos de regresión de las dosis óptimas económicas del nitrógeno y fósforo, como función de las variables de sitio (presentados en los Cuadros 3 y 4), se alimentaron con las variables correspondientes a cada sitio experimental. Las DOE para N y P así estimadas se compararon con las generadas mediante el mejor modelo de cada experimento, que se consideró como la dosis observada o verdadera, y se obtuvieron las diferencias entre ambas DOE. Mientras menores fueron las diferencias, mejor se consideró la capacidad del modelo para estimar dosis óptimas económicas para nitrógeno y fósforo.

Los intervalos de magnitud de las diferencias entre ambas DOE estimadas en cada sitio, y sus frecuencias, para los casos de nitrógeno y fósforo se muestran en las Figs. 1 y 2, respectivamente.

Se puede observar que en el 30.5% de los sitios, las diferencias entre las DOE de nitrógeno observadas y estimadas fluctuaron entre 0 y 10 kg/ha de N, diferencias que se pueden considerar aceptables dada su pequeña magnitud. En aproximadamente el 60% de los sitios, se obtuvieron diferencias entre 0 y 20 kg/ha de N. Diferencias grandes, entre 50 y 80 kg/ha de N, sólo se obtuvieron en el 4% de los sitios, mientras que hubo un 36% de sitios con diferencias entre 20 y 50 kg/ha de N. Creemos necesario señalar, que el nitrógeno total del suelo nunca ha sido un buen índice de su disponibilidad, dado la dinámica del nitrógeno en el suelo y a que en más de un noventa por ciento se encuentra en forma orgánica no disponible para el cultivo; sin embargo, cuando se emplea junto a otras variables influyentes sobre el rendimiento, como ocurrió en este trabajo, su uso ofrece mayores posibilidades.

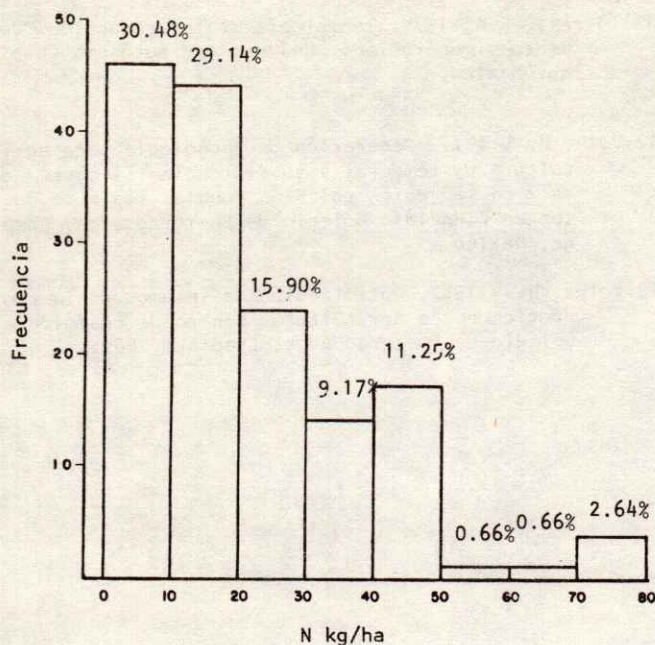


Figura 1. Intervalos y frecuencias de las discrepancias entre las dosis óptimas económicas de nitrógeno observadas y estimadas.

Para el caso del fósforo, se puede observar que en un 64% de los sitios las diferencias fluctuaron entre 0 y 10 kg/ha de P_2O_5 , lo que revela que el modelo tiene una mejor capacidad para estimar DOE de P que de N, lo que se reafirma al considerar que en un 85% de los sitios las diferencias fueron sólo entre 0 y 20 kg/ha de P_2O_5 ; y en apenas el 1% de los sitios las diferencias fueron grandes, pues fluctuaron entre 50 y 60 kg/ha de P_2O_5 . Cabe destacar que la determinación del fósforo del suelo mediante análisis químico, ha funcionado mejor que para el nitrógeno, lo que confirma que la evaluación del fósforo mediante análisis químico de muestras de suelos un buen estimador de su disponibilidad, lo que fue confirmado por Anzastiga (1984) quien en la región del Plan Puebla obtuvo una alta asociación entre el rendimiento testigo y el fósforo determinado por el método Bray-1.

El análisis de suelos, como herramienta para formular recomendaciones de fertilización de cultivos, no ha tenido resultados satisfactorios en México, y es poco probable que con el estado actual de desarrollo de las técnicas

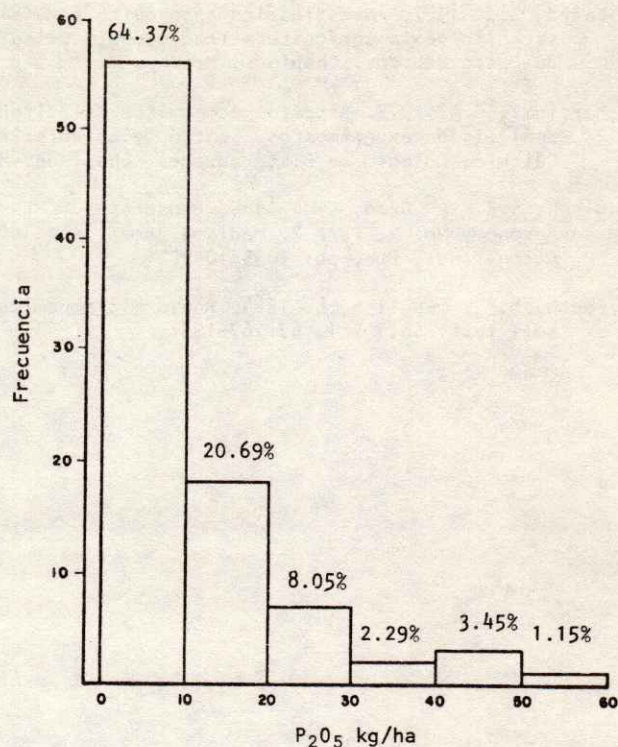


Figura 2. Intervalos y frecuencias de las discrepancias entre las dosis óptimas económicas de fósforo observadas y estimadas.

analíticas y las facilidades existentes, pueda llegarse a un uso extensivo para resolver el problema de las recomendaciones de fertilizantes específicas para cada sitio.

En este trabajo se muestra que la disponibilidad de un nutrimento en el suelo, es sólo uno de los factores que influyen en el rendimiento y poco se ha avanzado en incluir otras variables, ya sean del suelo, clima o manejo, que modifican la respuesta del cultivo a los fertilizantes y sus recomendaciones.

El manejo de modelos multivariados, como el que aquí se presenta, es relativamente complejo y no resuelve el problema anterior, pero sin embargo, señala la posibilidad de estratificar las variables con el objeto de simplificar su empleo, de tal forma que con algunos datos que se mantuvieran constantes para ciertas áreas, se pudiera alcanzar la meta de tener recomendaciones más específicas.

LITERATURA CITADA

- Allison, L.E. 1965. Organic carbon. En: Agronomy No. 9, Part. 2. Madison, Amer. Soc. of Agron. Inc. Pub. pp. 1367-1378.
- Association of Official Agricultural Chemist (AOAC). 1970. Official methods of analysis. Eleventh Ed. Washington, ADAC.
- Anzastiga, A.P. 1984. Correlación y calibración de métodos químicos para la determinación de fósforo disponible en suelos del estado de Puebla. Tesis de licenciatura en química. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, Méx.
- Barr, J.A. y Goodnight, J.H. 1979. SAS: a user's guide to the Statistical Analysis System. Raleigh North Carolina State University.
- Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT). 1974. El Plan Puebla. Siete años de experiencia: 1967-1973. El Batán. México, CIMMYT.
- Day, P.R. 1965. Particle fractionation and particle size analysis. En: Agronomy No. 9 Part. 1. Madison, Amer. Soc. of Agron., Inc., Pub. pp. 545-567.

- 7) Laird, R.J. 1977. Investigación agronómica para el desarrollo de la agricultura tradicional. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Méx.
- 8) Martínez, G.A. 1972. Aspectos económicos del diseño y análisis de experimentos. Centro de Estadística y Cálculo. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Méx.
- 9) Olsen, S.R. y Dean, L.H. 1965. Phosphorus. En: Agronomy No. 9, Part 2. Madison. Amer. Soc. of Agron. Inc., Pub. pp. 1035-1049.
- 10) Peech, M. y English, L. 1944. Rapid microchemical soil test. Soil Sci. 67:167-195.
- 11) Turrent, F.A. 1974. Tecnología de la producción. Documento mimeografiado. Universidad Autónoma Chapingo, México.
- 12) Volke H.,V.1977. Generación de tecnología para agricultura de temporal y subsistencia. El caso del maíz en la región del Plan Puebla. Tesis de Doctor en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- 13) Volke, H.,V.1982. Optimización de insumos de la producción en la agricultura. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Chapingo, Méx.

FORMACION DE PROFESORES EN EDUCACION AGRICOLA, EL CASO DEL ITAO +

Becerril Toral, H.R. *
Contreras Carranza, M. *

RESUMEN

La Dirección General de Educación Tecnológica Agropecuaria de la SEP, involucra 200 planteles con 3 500 profesores y alrededor de 70 000 alumnos. Esta magna empresa educativa obviamente requiere de la formación, actualización y superación constante de sus cuadros académicos.

Para contribuir a esta labor educativa, el Instituto Agropecuario de Oaxaca, ITAO, cuenta con dos programas, básicos (1) programa de actualización profesional continua y (2) programa de maestría en ciencias. El primer programa se realiza mediante cursos de verano que son congruentes con los programas académicos de los CBTAS y los ITA'S del país. Dichos cursos cubren los siguientes tópicos: hidroponía, sistemas de producción agrícola, pecuaria y forestal, cómputo, investigación en operaciones, economía y administración agrícolas, maquinaria agrícola, fisiología animal, genotecnia animal y pedagogía. El programa de maestría en ciencias cubre tres especialidades: (a) técnicas de producción agrícola, pecuaria y forestal, (b) métodos cuantitativos y (c) organización agropecuaria.

ABSTRACT

The "Dirección General de Educación Tecnológica Agropecuaria" from the Ministry of Public Education involves 200 training centers, 3 500 teaching staff members and some 70 000 students. There is an obvious requirement for the development and upgrading of the academic staff. The "Instituto Tecnológico Agropecuario de Oaxaca", ITAO, participates in this enterprise through two basic programs (a) continuous professional upgrading and (b) master of sciences. Summer courses on 12 subjects are taught to students from medium and college levels. Three specialities are covered in the master of science level (a) production techniques for crops, animals and forestry, (b) quantitative methods and (c) organization of production units.

INTRODUCCION

El Instituto Tecnológico Agropecuario de Oaxaca, creado el jueves 26 de noviembre de 1981, mediante el decreto número 58 de la quincuagésima primera Legislatura del Gobierno del Estado de Oaxaca, tiene entre sus propósitos la creación del Centro de Graduados (entidad colegiada) responsable de la creación de maestrías, doctorados, especialidades y otros estudios posteriores a la Licenciatura, orientados hacia el desarrollo rural así como a la formación de cuadros que respondan a cierto tipo de necesidades que presenta la educación agrícola superior de México, pero en particular se intenta responder con congruencia a los requerimientos de la D.G.E.T.A., organismo que ha venido desarrollando diversos programas, docentes y productivos hecho por el cual en la actualidad, cualitativa y cuantitativamente ocupa un lugar preponderante en el concierto de la Educación Agrícola en sus niveles medio superior y superior del país.

Así, este organismo cuenta con 200 planteles y 3 500 profesores en los que se atienden a poco más de 70 000 alumnos, teniendo una amplia y diversa cobertura geográfica en el medio rural de todas las entidades del país.

Estas cifras sugieren abordar el tema de la formación, actualización y superación constante de profesores, a

fin de que éstos puedan dar respuesta a los problemas tecnológicos, científicos, pedagógicos y sociales que presenta una realidad de cambio exacerbado además de sumamente compleja.

Ante esto, conviene preguntarse:

¿ Están definidas las áreas para actualizar a los cuadros magisteriales que el país requiere?

Lo anterior es sólo una de la serie de cuestionamientos que habrán de hacerse para poder arribar a conclusiones de utilidad para la Educación Agrícola, y que contribuyan a definir políticas para formar cuadros docentes.

Es claro que la respuesta a este tipo de cuestionamiento incluye por necesidad, a la estrategia del desarrollo agrícola que se ha venido configurando, así como clarificar el papel que a la educación oficial se le asigne dentro de este complejo modelo.

Ante esto, los estudios de maestría en ciencias en productividad agropecuaria que ofrece el ITAO son sólo una contribución parcial y escueta de la Dirección General de Educación Tecnológica Agropecuaria para fortalecer un programa de formación de cuadros directivos y de conductores de procesos productivos para que posteriormente se

+ Ponencia presentada en el XVI Congreso Nacional de la S.M.C.S.

* Profesor Investigador del Instituto Tecnológico Agropecuario de Oaxaca. SEP.

destaque aún más en los planteles el esquema enseñanza - investigación - producción.

Lo que la Dirección General de Educación Tecnológica Agropecuaria requiere es formar maestros, investigadores, directivos y supervisores que sean capaces de entender y ejecutar correctamente las políticas emanadas de ella misma, y siguiendo un proceso de concretización progresiva, planear las distintas actividades inherentes a los planteles o áreas de responsabilidad, para después ejecutar las acciones de manera directa, trabajando en grupos interdisciplinarios con la adecuada distribución del trabajo para que, finalmente, se evalúe el proceso coparticipativo de donde se derive información sistematizada misma que será utilizada dentro y fuera del plantel. Este debe ser el camino para conducir la tríada producción investigación y enseñanza que pretende consolidar el primer proyecto de maestría de este Instituto.

Por otra parte, debemos entender que la formación de este tipo de cuadros fortalecerá la planeación que emana del nivel central, reduciéndose así la improvisación que aún existe en ciertas áreas y por último algo muy importante, la Dirección General de Educación Tecnológica Agropecuaria se basará en una fuerte retrospectiva, hecho que le permitirá meterse de lleno en el luminoso torrente de la prospectiva; así se cumplirán de manera simultánea los objetivos de elevar la calidad de la enseñanza con el fortalecimiento de una administración pública que haga todo lo antes descrito.

DISCUSION . El caso del I.T.A.O.

El campo de la información de profesionales de la educación agrícola del país resulta ser muy amplio; por ello sólo presentamos a continuación nuestro caso; el cual presenta dos fases a saber:

1. Programa de actualización profesional continua.
2. Programa de maestría en ciencias.

El programa de actualización profesional continua plantea la necesidad de utilizar los períodos de verano (julio y parte de agosto de cada año) para impartir cursos de temas diversos, observando congruencia con los planes de estudio vigentes en los CBTAS e ITAS del país.

Por otra parte, es necesario identificar las necesidades de investigación de los planteles a efecto de tratar de responder también a esta necesidad, aunque sea de manera parcial.

Por último se desea obtener la característica de módulo al ofrecer cursos que tengan seriación en el tiempo en una perspectiva de dos o más años, buscándose una mayor profundidad en el grado de conocimientos y habilidades del docente.

Así, en la actualidad se manejan cursos en los temas siguientes:

- a) Hidroponía
- b) Sistemas de producción agrícola
- c) Sistemas de producción pecuaria
- d) Sistemas de producción forestal
- e) Cómputo
- f) Investigación de operaciones
- g) Economía agrícola

- h) Administración agrícola
- i) Maquinaria agrícola
- j) Fisiología animal
- k) Genotecnia animal
- l) Pedagogía

Estos cursos se administran a través de un sistema de becas para el personal docente de la Dirección General de Educación Tecnológica Agropecuaria, pero también se reciben profesores de otros sistemas educativos mediante convenios o acuerdos especiales.

Programa de maestría en ciencias.

Este programa presenta características de sistema escolarizado, tiene una duración de dos años y su objetivo es formar profesionales que sean capaces de asumir la planeación y conducción tanto de unidades de producción agrícola, pecuaria y forestal como de coordinar programas de desarrollo para instituciones del Sector Público. Para conseguir ese objetivo, se pretende capacitar a los estudiantes en tres áreas básicas. A saber:

- a) Técnicas de producción agrícola, pecuaria y forestal
- b) Métodos cuantitativos
- c) Organización agropecuaria

PERFIL DEL EGRESADO

De acuerdo con los objetivos planteados, en las líneas precedentes, los alumnos que ingresen al programa deben ser individuos con una buena formación en agronomía o ciencias afines, y con interés fuerte en métodos cuantitativos, así como interesados en el impacto social de su ejercicio profesional.

El candidato a ingresar al programa debe tener conocimientos especializados en al menos una de las secciones que se han establecido en el área de técnicas modernas de producción agrícola, pecuaria y forestal. De preferencia los cursos de esa área los tomará en sólo una de las secciones; ya sea producción agrícola, producción pecuaria o producción forestal. Por otra parte, los cursos del área de métodos cuantitativos le darán la capacidad de planear investigaciones auxiliado por técnicas modernas en el diseño de experimentos, muestreo probabilístico, técnicas de regresión e investigación de operaciones.

Finalmente, la selección de cursos de la última área (organización agropecuaria) le permitirá evaluar el impacto económico y social de sus programas, tanto de producción como de investigación.

Resumiendo, se pretende que el egresado sea un técnico capacitado para la producción, cuantificación y evaluación de programas de desarrollo, con una clara conciencia social y con un compromiso sólido con los productores agropecuarios del país y del estado. Que sea un colaborador eficaz de los productores y de las entidades oficiales en la tarea nacional prioritaria que es la producción de alimentos.

Con este perfil debería ser claro que el egresado encontrará su campo de trabajo en empresas de producción agropecuaria y forestal o en producción o investigación silvícolas; pero más frecuentemente dentro de programas de investigación y desarrollo conducidos por las instancias correspondientes del gobierno federal. Por otra parte,

es claro que un profesional con estas características podría ser un valioso elemento para reforzar los cuerpos académicos a nivel de licenciatura y de maestría en el sistema de enseñanza agrícola nacional y en particular podría integrarse a los programas de enseñanza a cargo de la D.G.E.T.A.

REQUISITOS DE ADMISION

La admisión de un estudiante al programa de maestría es ta sujeta a la aprobación del comité académico. Para que un estudiante sea considerado por dicho comité, deberá obtener una solicitud de admisión en el Departamento de Registros Académicos del ITAO y proporcionar a éste los documentos que allí le serán requeridos.

Requisitos para la obtención del grado.

Para completar el programa de maestría se exige un mínimo de créditos en cursos obligatorios, y otras actividades, según se indica a continuación:

a) Mínimo de créditos.

Cursos a nivel 1000	42
Seminarios	1
Investigación	<u>4</u>
	47

b) Cursos obligatorios

El estudiante deberá completar un mínimo de créditos obligatorios en cada uno de los siguientes grupos de cursos:

GRUPO I. 21 Créditos obligatorios.

Clave	Materia	Créditos
1100	Estadística	3
1101	Métodos estadísticos	3
1104	Investigación de operaciones	3
1200	Teoría microeconómica	3
1201	Teoría macroeconómica	3
1202	Política agropecuaria y forestal	3
1203	Economía de la producción	3
1204	Formulación y evaluación de proyectos	3
1207	La organización campesina en el desarrollo rural	3

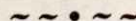
Cinco cursos del área de técnicas de producción agrícola pecuaria o forestal.

Clave	Materia	Créditos
1300	Agroquímica y contaminación	3
1301	Técnicas de riego	3
1302	Fisiología vegetal aplicada	3
1303	Cultivos intensivos y extensivos	3
1304	Maquinaria agrícola	3
1320	Nutrición y alimentación animal	3
1321	Fisiología de la reproducción	3
1322	Bovinos de leche	3

1323	Genotecnia animal	3
1324	Producción, manejo y conservación de forrajes	3
1340	Sistemas silvícolas avanzados	3
1341	Mejoramiento de plantaciones	3
1342	Ecosistemas forestales	3
1343	Sistemas de abastecimiento de trocería y leñas	3
1344	Manejo de recursos forestales	3

GRUPO II. 6 Créditos obligatorios.

Clave	Materia	Créditos
1102	Diseños experimentales	3
1103	Muestreo probabilístico	3
1205	Análisis de programas de desarrollo rural	3
1206	Planeación económica y organización forestal	3
1208	Mercados y análisis de precios de productos agrícolas	3



CUERPOS ACADEMICOS DEL PROGRAMA

Para garantizar el buen funcionamiento de todas las actividades del programa, se han creado cuerpos colegiados cuya estructura y funcionamiento se describen someramente a continuación.

1. Comité Académico. La máxima autoridad académica en el programa de maestría en productividad agropecuaria y forestal es su comité académico, que tiene la responsabilidad de mantener un alto nivel académico en las actividades de docencia, investigación y servicio.

Está constituido por el Director del I.T.A.O. quien funge como presidente, y por cuatro profesores investigadores, quienes fungen como vocales, al menos uno por cada área que integra la maestría.

2. Consejos Particulares. El consejo particular es el órgano asesor del estudiante. Es responsable de formular los planes de estudio, de dirigir los trabajos de investigación y de vigilar el desarrollo de las actividades del estudiante. Está integrado por un mínimo de dos miembros: uno funge como consejero y debe ser profesor investigador del programa, los demás son asesores.

3. Comité de Investigación. Este cuerpo colegiado tiene como funciones el promover, aprobar, coordinar y publicar los proyectos de investigación que se desarrollen en el programa de maestría.

Está compuesto por un coordinador y cuatro vocales, todos ellos profesores-investigadores designados por el comité académico.

El funcionamiento detallado de los diferentes cuerpos académicos se encuentra descrito en el reglamento correspondiente.

CONCLUSIONES

1. La formación y actualización de docentes es un problema complejo, que reclama la participación unificada de las autoridades de los distintos organismos y sistemas que imparten educación agrícola media superior del país.
2. Este tipo de programas deberían ser tan importantes como lo son los diseños curriculares existentes en el país.
3. La actualización profesional actúa como un puente entre educación y necesidades de la producción a través del tiempo.
4. El programa de maestría en ciencias en productividad constituye un intento para crear profesionales de la educación agrícola en un marco de síntesis interdisciplinaria: a condición de mostrar superar los severos problemas de planeación, ejecución y evaluación tan necesarios en el desarrollo de la enseñanza, la investigación y la producción.

Condiciones actuales de salinidad y drenaje de una zona representativa de la serie caseta del distrito de riego 009, Valle de Juárez, Chih.

O. RODRIGUEZ C. 73

El Manejo de la fertilización nitrogenada y su efecto en el suelo y cultivo.

**R. NUÑEZ E., J.D. ETCHEVERS B., V.M.
CRUZ Z. Y F. GAVI R.** 79

Productividad del suelo con maíz y labranza mínima en Nayarit.

M. TREJO S. 86

Estudio exploratorio de seis factores de la producción y su efecto en el cultivo de la papa de riego en Nochixtlán, Oaxaca.

**E. SANDOVAL, F. GARCIA M. Y A. CASTA-
ÑEDA P.** 90

Evaluación económica de dos enfoques de generación de tecnologías de producción agrícola, en el estado de Tlaxcala.

**F. ORNELAS R., H.H. REBOLLEDO R. Y
V. VOLKE H.** 96

Recomendación de dosis óptimas económicas de N y P para maíz de temporal con base en análisis de suelo y otras variables.

**H.H. REBOLLEDO R., V. VOLKE H. Y J.D.
ETCHEVERS B.** 103

Formación de profesores en educación agrícola, el caso del itao.

**H.R. BECERRIL T. Y M. CONTRERAS
C.** 109