

V DISCUSION

A. LAS FLUCTUACIONES FREATICAS Y LA PRODUCTIVIDAD EN BOCONÓ—MASPARRO.

El examen de los resultados obtenidos al aplicar el modelo agrofísico para estimar los efectos que los niveles freáticos, en el Sistema Boconó—Masparro, ejercen sobre los cultivos típicos de la zona revelan varios aspectos interesantes del problema. Parece claro, por ejemplo, que la producción de los cultivos se vé afectada por la profundidad de la napa freática. Los cálculos indican que la producción máxima de los cultivos estudiados se obtendrían a las siguientes profundidades:

- Para maíz a 146 centímetros, en suelos arcillosos.
- Para caraota a 83 centímetros en suelos francos.
- Para algodón a 184 centímetros en suelos arenosos.

Merece destacarse también que los resultados muestran una disminución en producción ya sea que aumente o disminuya la profundidad del nivel freático, respecto a los valores anteriores. Es decir, cada cultivo y suelo manifiesta la existencia de una profundidad "óptima" característica.

La disminución de la producción debido al ascenso de la napa freática se observa claramente en los valores calculados para el maíz, en el cual la producción es el 71 % de la máxima cuando el nivel freático se mantiene en un promedio de 62 centímetros, y se hace mínima, 21%, si el nivel freático permanece cerca de la superficie, a 35 centímetros.

Por el contrario, el descenso en producción como consecuencia del descenso del nivel freático por debajo del "óptimo", se puso de manifiesto en caraota y algodón.

Además, los resultados muestran hasta qué punto la relación entre el nivel freático y la producción depende de la fertilidad del suelo. Se observa que esta dependencia es mayor a medida que el nivel freático se acerca a su profundidad "óptima", llegando a depender totalmente de la fertilidad cuando la profundidad del nivel freático es la "óptima" como es el caso del maíz en la serie Boconó.

Los cálculos permiten apreciar también como la producción depende de las características del clima y del suelo. Así, en el caso de la caraota, Serie Fanfurria, aún cuando el nivel freático no es el "óptimo", se logra la producción máxima, gracias a las reservas hídricas del suelo y a los aportes de la precipitación atmosférica.

Por último, los resultados muestran que la relación nivel freático—producción, depende de la textura del suelo. Esto se deduce particularmente en el algodón. En efecto, en iguales condiciones climáticas, pedológicas e hidrológicas W , la producción calculada es mayor en la Serie Fanfurria textura franca que en la Serie Mendez textura arcillosa.

Un análisis de los resultados, considerados globalmente, insinúa que sería posible determinar la profundidad "óptima" de drenaje para condiciones de suelo y cultivo determinadas. Así, por ejemplo, para la Serie Boconó, se dedujo que la producción de maíz sería máxima si la napa freática se encontraría a una profundidad de 146 centímetros. Esto en razón de las exigencias de aereación en la zona de desarrollo radicular.

En el caso del algodón, un nivel freático mantenido a 184 centímetros de profundidad, permite satisfacer totalmente la demanda evaporadora, y por lo tanto, lograr la máxima producción.

La producción de caraota, si no se regara, se vería afectada por el déficit hídrico del suelo, debido a que la profundidad del nivel freático, no permitiría el aporte freático requerido para satisfacer este déficit.

En general, si se escogiera un nivel freático único a 180 centímetros de profundidad durante todo el año lo que sería posible mediante obras de drenaje, se mantendría inalterada la producción de maíz y algodón y se podría aumentar la producción de caraota mediante la irrigación.

Además, esta profundidad de drenaje, no resentirá la producción de caraota por demanda de aereación, ya que la profundidad final de desarrollo radicular de ese cultivo alcanza tan solo a 60 centímetros de profundi-

dad y el espesor de la zona de subaeración es pequeño por tratarse de un suelo arenoso

B. EL MODELO AGROFISICO ELABORADO: SUS LIMITACIONES Y SU UTILIDAD TECNICA.

En todo caso, las deducciones anteriores deben tomarse con mucha reserva. No solo los datos básicos para los cálculos no poseen la representatividad requerida, sino que también deben tenerse presentes ciertas limitaciones propias del procedimiento empleado y de las fórmulas aplicadas.

En efecto, no obstante haber elaborado una metodología general, capaz de cuantificar la relación nivel freático—producción en función de variables climatológicas, edáficas y de cultivo, es necesario indicar que en la deducción del modelo, no se han considerado algunos factores que podrían tener influencia sobre la relación estudiada, y que son los siguientes:

- a. El peligro de salinidad como consecuencia del ascenso capilar.
- b. La calidad de la producción.
- c. Las variaciones de los diferentes cultivos en cuanto a la tolerancia a la inundación.
- d. La posibilidad de que la fracción mínima de poros llenos de aire que garantice el desarrollo radicular, sea diferente del valor aquí considerado, 10% del espacio poroso, según las condiciones fisiológicas, climáticas y edáficas existentes. y
- e. Suposición del flujo permanente.

En cuanto a los dos primeros factores indicados, se sugiere considerarlos como nuevas hipótesis en trabajos posteriores.

En relación a la tolerancia a la inundación y a la fracción mínima de poros llenos de aire en el suelo es posible determinar con mayor precisión su influencia sobre el enraizamiento del cultivo por medio de un método empírico deducido del análisis, y que se propone a continuación:

Se ha logrado una relación de carácter general entre la producción relativa y la profundidad del nivel freático, descrita por la siguiente ecuación:

$$(47) \quad \ln(1 - P/P_x) = A - b \left(\frac{W}{W_x} \right)$$

en la cual, $A = \pm b' Y/W_x$

En particular, esta expresión es capaz de describir una gran gama de situaciones de tolerancia a la inundación, que se verán reflejadas en el valor del coeficiente **A**, el cual contiene el término **Y**, espesor de la zona sobre y bajo el nivel freático al cual dejan de ser funcionales las raíces.

El valor de **A** para un cultivo determinado, puede obtenerse de una representación como la figura 6, disponiendo los puntos experimentales de ese cultivo en o alrededor de una línea recta cuya pendiente sea igual a -3.44. El valor de **A** vendrá dado por el punto de intercepción entre esta línea y el eje de las ordenadas.

A partir de este valor es posible calcular "Y" por medio de la siguiente relación:

$$Y = \frac{W_x \ln(A)}{3.44}$$

De este modo se han calculado los valores de **Y** correspondientes a los cultivos considerados en la verifi-

cación experimental del modelo. Fue preciso determinar previamente los valores de W_x de las figuras 4 y 5. Como ya se indicó, W_x corresponde a W_{con} el cual $P = 0.968 P_x$. Los resultados se indican en el cuadro 18

CUADRO 18 Espesor de la zona de subaereación para los cultivos indicados.

Cultivo	A	Ln A	W_x	Y
Trigo	0.94	- 0.062	157	-3
Cebada	0.98	- 0.020	147	-1
Avena	1.10	0.090	139	4
Frijol	0.70	- 0.350	102	-11
Colza	0.90	- 0.105	110	-3
Remolacha Azucarera	0.90	- 0.105	127	-4
Trigo de invierno	1.02	0.020	190	1
Papa	1.10	0.095	105	3
Pastizales	1.55	0.440	113	14

De estos resultados y recordando que la profundidad de enraizamiento activo, Z , medida desde la superficie del suelo, está determinada por medio de la siguiente relación:

$$Z = W \pm Y$$

se desprende:

- que los valores negativos de Y indican una restricción del enraizamiento activo del cultivo por encima del nivel freático, y
- que los valores positivos de Y indican una capacidad del sistema radicular de desarrollarse hasta cierta profundidad por debajo del nivel freático.

Los cultivos listados en el cuadro 18 pueden entonces dividirse en dos grupos:

- los que tienen valores positivos de Y , comprendidos entre 1 y 14 centímetros, Estos son típicamente "cultivos de invierno" de regiones templadas.
- los que tienen valores negativos de Y , comprendidos entre -1 y -11 centímetros. Estos son cultivos que se desarrollan preferentemente durante la temporada calurosa primavera-verano de regiones templadas.

Finalmente, una aplicación que se deriva del presente estudio es el cálculo de la profundidad óptima de drenaje para condiciones particulares de suelo, clima y cultivo, según se esboza a continuación.

En realidad, la profundidad óptima del nivel freático se encuentra entre dos límites de profundidad que

pueden ser calculados por medio de las fórmulas derivadas del análisis detallado en el Capítulo III, Estos son:

- a. Un límite superior W_{x1} , (figura 13) fijado por la demanda de aereación del suelo, que puede ser estimado en función del desarrollo radicular del cultivo, D , de la atmósfera, E_x , mediante la siguiente expresión:

$$(56) \quad W_{x1} = D + Y$$

- b. Un límite inferior W_{x2} , (figura 13) determinado por la demanda hídrica del cultivo, que puede ser calculado a partir de la profundidad de enraizamiento, D , y del aporte freático requerido, F_x , utilizando la siguiente fórmula:

$$(57) \quad W_{x2} = D + {}^sW_x$$

Sobre esta base, es posible determinar la profundidad freática capaz de satisfacer las dos demandas adecuadamente, ya se trate de un cultivo en particular o de varios cultivos en rotación. Para ello se propone el siguiente procedimiento:

1. En general, en climas húmedos se deberá prestar mayor atención a la demanda de aereación, debido a que, por lo regular, no se requerirá un aporte freático. Luego en estas condiciones, el problema quedará resuelto al mantener el nivel freático a una profundidad igual o mayor que la calculada por la fórmula (56). Esta profundidad variará de acuerdo a la textura del suelo y al tipo de cultivo.
2. En climas áridos, se distinguirán dos casos generales:

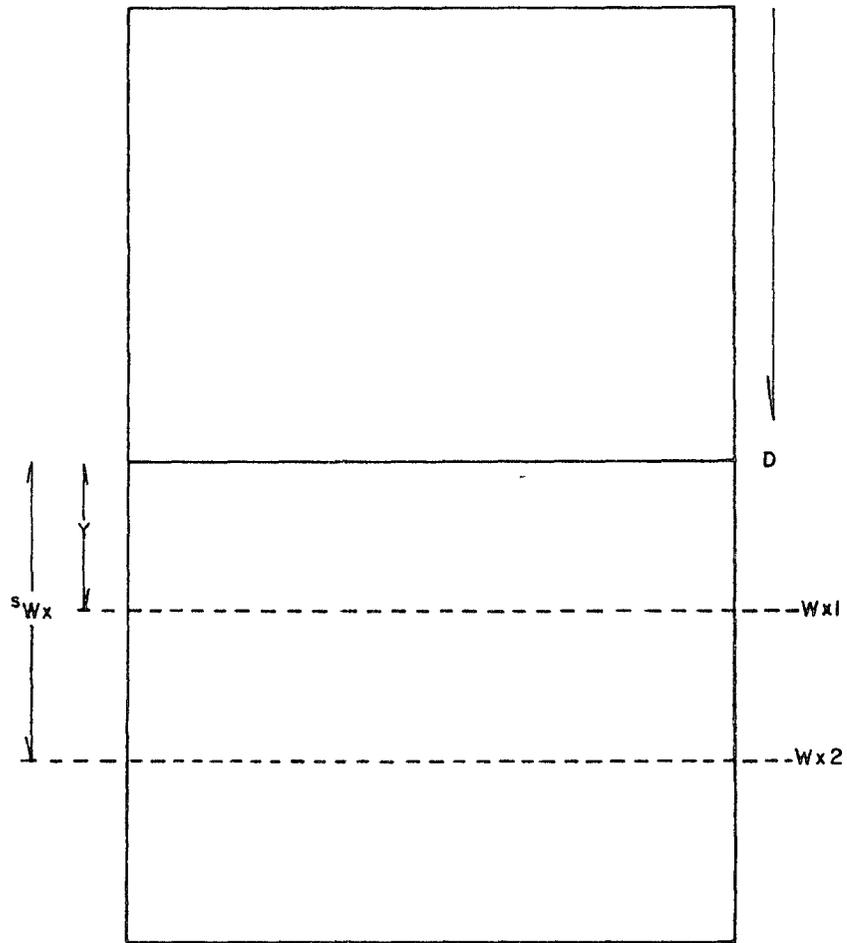
- a) Si existe posibilidad de riego, y éste es suficiente, se deberá considerar satisfacer la demanda de aereación, para lo cual se procederá de igual manera que en climas húmedos.
- b) En caso de no existir riego, se requiere considerar la napa freática como fuente de abastecimiento de agua y calcular el aporte freático requerido. Esto se logrará manteniendo la napa freática a una profundidad igual o menor que la calculada mediante la expresión (57).

3. En regiones donde alternen claramente una época lluviosa y una época seca, y se siembra varios cultivos en el transcurso del año, es posible determinar también una profundidad freática tal que satisfaga los requerimientos de todos los cultivos. En estos casos, se propone el procedimiento siguiente:

- a) Para los cultivos que se desarrollaren en la época húmeda se fijará el nivel superior al cual puede encontrarse la napa freática sin perjudicar su producción, utilizando para ello la expresión (56).
- b) Para los cultivos que se desarrollaren en la época seca, se fijará el nivel inferior de la napa freática al cual se satisface el déficit hídrico, mediante la fórmula (57).
- c) Determinados a) y b) podrá escogerse la solución más conveniente, y que estará comprendida entre los dos límites anteriormente fijados, para satisfacer los requerimientos de todos y cada uno de los cultivos. Además, el modelo presentado puede servir de base a cálculos económicos, los cuales en último caso, serán los que determinen la profundidad de elegir.

De este modo será posible determinar la profundidad más conveniente de drenaje, en función de las características de clima, suelo y cultivo existente, permitiendo además, evaluar la instalación del sistema de drenaje.

FIGURA 13



Limites superior e inferior de la profundidad "optima"
de drenaje

VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Considerando la ecuación de flujo en condiciones permanentes insaturadas, y los principios agrófísicos referentes a la "humedad aprovechable" y a la relación entre la evaporación relativa y la producción de los cultivos, se elaboró un procedimiento para establecer la relación producción-nivel freático, cuando éste actúa como factor beneficioso.
2. Combinando los principios de "rendimientos decrecientes" de Mitscherlich y del "factor mínimo" de Liebig, y aceptando que solo son funcionales, a los efectos de absorción mineral, las raíces que no se encuentran inundadas, se obtuvo una expresión general que relaciona la producción con el nivel freático cuando éste actúa como factor perjudicial:

$$\frac{P_d}{P_x} = \frac{1 - (1 - P_d/P_x) \frac{\int_0^{t_c} \int_0^z r \rho Q dz dt}{\int_0^{t_c} \int_0^z \rho Q dz dt}}{P_d/P_x}$$

Donde P/P_d , es la relación entre la producción obtenida en presencia de una napa freática y en ausencia de la misma, P_d/P_x , es el nivel de fertilidad del suelo, r es la masa de raíces por unidad de volumen, Q es la masa disponible del elemento deficiente por unidad de peso de suelo, ρ es la densidad del suelo.

3. Para los casos de distribución uniforme de raíces y fertilidad en el perfil del suelo, se determinó fórmulas particulares:
 - a) Para un suelo fértil:

$$\frac{P}{P_x} = 1 - e^{-3.44 \left(\frac{\int_0^{t_c} Z dt}{\int_0^{t_c} D dt} \right)}$$

- b) Para un suelo infértil:

$$\frac{P}{P_d} = \frac{1 - (1 - P_d/P_x) \frac{\int_0^{t_c} Z dt}{\int_0^{t_c} D dt}}{P_d/P_x}$$

Donde los símbolos tienen el significado antes indicado.

4. Mediante las relaciones indicadas y considerando el balance hídrico del suelo, se elaboró un método general que permite analizar los efectos globales del nivel freático sobre la producción para condiciones particulares de clima, suelo y cultivo.
5. Aplicando este método a la evaluación de drenaje en el sistema Boconó-Masparro, se concluyó de manera preliminar:
 - a) Que existe un efecto deprimente del nivel freático sobre el cultivo de maíz sembrado en el mes de junio en las Series Mendez arcilloso; Fanfurria franco, y Boconó arenoso.
 - b) Que existe un efecto beneficioso de la napa freática sobre la producción de la cañota cuando no existe riego o este es insuficiente, en las Series Mendez arcilloso; Fanfurria franco y Boconó arenoso, cuando este cultivo es sembrado en el mes de noviembre
 - c) Que existe efecto favorable del nivel freático sobre el algodón cuando es sembrado en el mes de julio, en la Serie Boconó arenoso y efecto desfavorable en las Series Mendez arcilloso, y Fanfurria franco.

Se recomienda:

1. Investigar el efecto de otras variables, no consideradas aquí, sobre la producción de los cultivos, e introducirlas en el análisis para lograr una interpretación más completa del problema
2. Realizar experimentos de campo dedicados expresamente a evaluar la fórmula general presentada, bajo condiciones de nivel fluctuante y de distribución irregular de nutrientes y raíces en el perfil del suelo
3. Comprobar la validez de las fórmulas particulares indicadas mediante un mayor número de experiencias.

VII RESUMEN

El objeto principal de este trabajo fue estudiar las relaciones existentes entre el nivel freático y la producción de los cultivos desde el punto de vista agroecológico, es decir, como un problema de relación agua-suelo-planta-atmósfera.

Con este propósito se realizó un análisis teórico del problema basado en la suposición que el nivel freático influye fundamentalmente de dos maneras sobre la producción:

- a) Positivamente, por aportar agua para el desarrollo de los cultivos y
- b) Negativamente, por restringir la profundidad útil de enraizamiento y la absorción mineral.

Para determinar esta influencia se estudiaron y combinaron en detalle la ecuación del flujo de agua en condiciones permanentes insaturadas, aplicada al ascenso capilar desde una napa freática; las relaciones entre la humedad del suelo y la evaporación relativa de los cultivos; la relación entre esta última y la producción; y los principios del "factor mínimo" de Liebig y de los "rendimientos decrecientes" de Mitscherlich.

La integración de estos principios fundamentales condujo a una expresión general que pone de manifiesto la dependencia de la producción relativa en el nivel freático:

$$\frac{P_z}{P_d} = \frac{1 - (1 - P_d/P_x) \frac{\int_{z_0}^{z_{tc}} r \rho Q dz dt}{\int_{z_0}^{z_{tc}} r \rho Q dz dt}}{P_d/P_x}$$

en la cual:

P_z/P_x es la relación entre la producción obtenida cuando existe restricción de la profundidad útil del suelo por efecto de una napa freática y la producción que se obtendría en ausencia de dicha influencia.

P_d/P_x es el nivel de fertilidad del suelo.

r es la masa de raíces por unidad de volumen.

Q es la masa disponible del elemento deficiente por unidad de peso de suelo.

ρ es la densidad del suelo

Con el objeto de lograr expresiones más sencillas, que permita su aplicación en estudios generales de planificación, se realizaron algunas simplificaciones, con los siguientes resultados:

- a) En el caso de suelos fértiles,

$$P_z = 1 - e^{-3.44 \left(\frac{\int_0^{t_c} Z dt}{\int_0^{t_c} D dt} \right)}$$

b) En casos de suelos infértiles,

$$\frac{P_z}{P_d} = \frac{1 - \left(1 - \frac{P_d}{P_x} \right) \frac{\int_0^{t_c} Z dt}{\int_0^{t_c} D dt}}{\frac{P_d}{P_x}}$$

en las que:

- P_z/P_x es la producción relativa obtenida en presencia de una napa freática que limita la profundidad útil de enraizamiento y restringe el suministro mineral del suelo.
- Z es la profundidad de desarrollo radicular activo.
- D es la profundidad de enraizamiento en un suelo bien drenado

Además se estableció una relación única entre la profundidad relativa del nivel freático y la producción:

$$\frac{P}{P_x} = 1 - e^{-3.44 \left(\frac{W}{W_x} \right)}$$

en la cual:

- W es la profundidad natural del nivel freático.
- W_x es la profundidad "óptima" del nivel freático.

Se investigó la validez de estas fórmulas comprobando las predicciones derivadas del modelo así simplificado, con mediciones experimentales, demostrando que se justifica su utilización para efectos de estimar la producción de los cultivos en función del nivel freático.

Se aplicaron las expresiones desarrolladas a las condiciones imperantes en el sistema hidrológico Boconó—Masparro, escogiendo para ello tres cultivos típicos de la zona, y utilizando a los efectos la información climática, edafológica e hidrológica existente.

De esta aplicación se dedujo que la producción se ve afectada tanto favorablemente como desfavorablemente por los niveles fluctuantes y se comentó la posibilidad de determinar la profundidad óptima de drenaje que satisfaga los requerimientos de aereación y de humedad de los cultivos de la zona.

Se recomendó, investigar el efecto de otras variables no consideradas en el análisis sobre la relación nivel freático—producción, y realizar experimentos tendientes a comprobar la fórmula general indicada.

VIII BIBLIOGRAFIA

- Abreu, R. 1.966. *Estudio del desarrollo radicular de los cultivos maíz, frijol y caraota en la Serie Algodonal.* División de Edafología del M.O.P. Caracas Venezuela.
- Alvarez, R. 1.971 *Comportamiento agronómico del cultivo de algodón en la serie el cenizo.* División de Edafología del M.O.P. Caracas, Venezuela.
- Arkley, R. J. 1.963 *Relationships between plant growth and transpiration.* *Hilgardia*, 34: 559–584.
- Blake, G. R., and
J. B. Page 1.948 *Direct measurement of gaseous diffusion in soils.* *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 13: 37–42.
- Cannon, W. A. 1.925 *Physiological features of root with special reference to the relation of the soil.* Carnegie Inst., Washington. Pub 368.
- Chang, J.H. 1.968 *Climate and Agriculture.* Aldine Publishing Company. Chicago, U.S.A pp. 125–224.
- Chang, L. y
A. Cornejo 1.972 *Funciones de producción del agua de riego en los principales cultivos de la costa peruana.* Instituto para el desarrollo de los Recursos de Agua y Tierra (IDRAT) Lima, Perú. 31 pp.
- De Witt, C. T. 1.958 *Transpiration and crop yields.* Instituut voor Biologisch en Scheikundig Onderzoek van Landbougewassen. Wageningen, Mededeling. Num 59.
- Fox, R. L., and
R. C. Lipps. 1.955 *Subirrigation and plant nutrition. I. Alfalfa root distribution and soil properties.* *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 19: 468–477
- García, J.,
et al. 1.970 *Relaciones entre el balance de agua en el suelo y el rendimiento de a-
jonjolí.* *Agron. Trop.* 19 (4): 49-57
- Gardner, W. L. 1.958 *Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table.* *Soil Sci.* 85: 228–232.
- Gardner, W. L., and
M. Fireman. 1.958 *Laboratory studies of evaporation from soil columns in the presence of water tables on the yield of tall fescue, ladino clover and orchard-grass.* *Agron. J.*, 51: 547–550.
- Grassi, G. J. 1.969 *Manual de Drenaje Agrícola.* Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras (CIDIAT). Mérida, Venezuela. 186 pp.
- Groot, J. M. and
A. W. De Jaeger 1.969 *Yield depressions due to lowering of the water table on sandy soils in the Netherlands.* *Neth. J. Agr. Sci.* 17: 99–108.

- Guilarte, J. y
R. Abrea 1.972 *Análisis de las características de retención de humedad en algunos suelos de los llanos Occidentales. División de Edafología del M.O.P. Caracas, Venezuela.*
- Harris, C. I.,
Ericson, H. T., Ellis,
M.K., and J.E. Larson
1.962 *Water level control in organic soils, as a related to subsidence rate, crop yield and response to nitrogen. Soil Sci 94: 158-161.*
- Heinicke, A. J. 1.932 *The effect of submerging the roots of apple trees at different seasons of the year. Proc. Amer. Soc. Hort. Sci. 29: 204-207*
- Holmes, P. 1.968 *Estudio Agrológico detallado del sistema Boconó-Masparro. División Edafología del M.O.P. Caracas, Venezuela.*
- Hooghoudt, S.B. 1952 *Tile drainage and subirrigation. Soil. Sci. 74: 35-47.*
- Kirkham, D. 1946 *Proposed method for field measurement of permeability of soil below the water table. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 10: 58-68.*
- Klastor, N. y N.
Whittlesey. 1971 *Production function analysis of irrigation water and fertilizer in wheat production. Wash Agric. Expt. Sta., Bull. 746. Washington. 8 pp.*
- Kramer, P. J. 1.951 *Causes of injury to plants resulting from flooding of the soil. Pl. Phys., 26: 722-736.*
- Letey, J., Stolzy, L. H.
and G. B. Blank 1.962 *Efect of duration and timing of low soil oxygen content on shoot and root growth. Agron. J., 54: 34-37.*
- Lipps, R. C., and
R. L. Fox 1.956 *Subirrigation and plant nutrition. II Utilization of phosphorus by alfalfa from the soil surface to the water table. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 20: 28-32.*
- Luthin, N.J. 1.967 *Drenaje de tierras agrícolas. Editorial Limusa Wiley, Mexico. pp. 410-571.*
- Norero, A 1.972 *La productividad de los cultivos y el suministro de agua del suelo bajo diversas condiciones climáticas. Dpto. de Edafología, Escuela de Agronomía, Universidad Católica. Santiago, Chile.*
- Norero, A. 1,973 *Relaciones Suelo-Agua-Planta, un enfoque agrofísico. Material de enseñanza. Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y tierras (CIDIAT). Mérida, Venezuela.*
- Norero, A. 1.973 *Fertilidad de suelos. Material de enseñanza. Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras (CIDIAT). Mérida, Venezuela.*
- Phillips, R. E. and
D. Kirkham. 1.962 *Mechanical impedance and corn seedling root growth. Soil Sci. Soc. Americana Proc., 26: 319-322.*

- Rai, S.D., Miller, D.H., and C.N. Hittle. 1.971 *Response of alfalfa varieties to different water table depths at various stages of growth. Agron. J., 63: 331-332.*
- Roe, N.B. 1.950 *Moisture requirements in agriculture from Irrigation. Mc Graw-Hill Book Co., New York.*
- Taylor, S. A. 1.949 *Oxygen diffusion in porous media as a measure of soil aeration. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 14: 55-61.*
- Tschapek, M. W. 1.966 *El agua en el suelo. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid. pp. 429-454.*
- Van den Berg, C., y W. C. Visser. 1.973 *Irrigation, drainage and salinity. Hutchinson Publ. Co. FAO. UNESCO.*
- Van der Goor, G. A. W. 1.973 *Plant growth in relation to drainage. En, Drainage principles and applications. International Institute for Land Reclamation on Improvement, 16 (1): 105-122. Wageningen, Holanda*
- Van Horn, J. W. 1.958 *Results of a groundwater level experimental field with arable crops on a clay soil. Neth. J. Agr. Sci., 6: 1-10*
- Van't Woudt, B. y R. Hagan. 1.967 *Respuesta de los cultivos a niveles excesivamente elevados de humedad del suelo. En drenaje de tierras agrícolas. Editorial Limusa, Wiley. Mexico. pp. 571-647.*
- Werner, H. O. 1.956 *The relation of rainfall distribution, soil moisture and crop rotation to the yield of potatoes. 17 th. Ann. Rep. Potato Improv Assoc. pp. 39-55.*
- Wesseling, J., and W. R. Van Wijk. 1.955 *Optimal depth of drainage. Neth. Jour. Agri. Sci., 3: 106-119*
- Wesseling, J. y W. R. Van Wijk. 1.967 *Condiciones físicas del suelo en relación con la profundidad de los drenes. En. Drenaje de tierras agrícolas. Editorial Limusa Wiley. Mexico. pp. 511-560.*
- Williamson, R. E. 1.964 *The effect of root aeration on plant growth. Soil Sci. Amer. Proc., 28: 86-90.*
- Willips, W.O. 1.960 *Evaporation from layered soils in the presence of a water table. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 24: 239-242.*
- Wind, G. P. 1.955 *A field experiment concerning capillary rise of moisture in a heavy clay soil. Neth. J. Agr. Sci. 3: 60-70.*
- Zylstra, G. y J. Lostao 1.969 *Efectos de la profundidad de la napa freática sobre la producción de los cultivos. En, II Curso Nacional de Drenaje de Tierras Agrícolas. Centro de Drenaje y Recuperación de Tierras (CENDRET). Lima Perú. pp. 2. 5/1-2. 5/10.*

Zylstra, G. y H. Y. Salinas 1.969 *Relaciones de humedad del suelo. En, II Curso Nacional de Drenaje de Tierras Agrícolas. Centro de Drenaje y Recuperación de Tierras (CENDRET). Lima, Perú. pp 2. 4/1–2. 4/15.*

* * * * *

IX APENDICE

ANEXO I: MATERIAL DE TRABAJO

FIGURA A.1.0

Relación entre la profundidad de la napa freática, la tensión hídrica del suelo y la intensidad de ascenso capilar para suelos de textura muy fina ($n=1.5$)

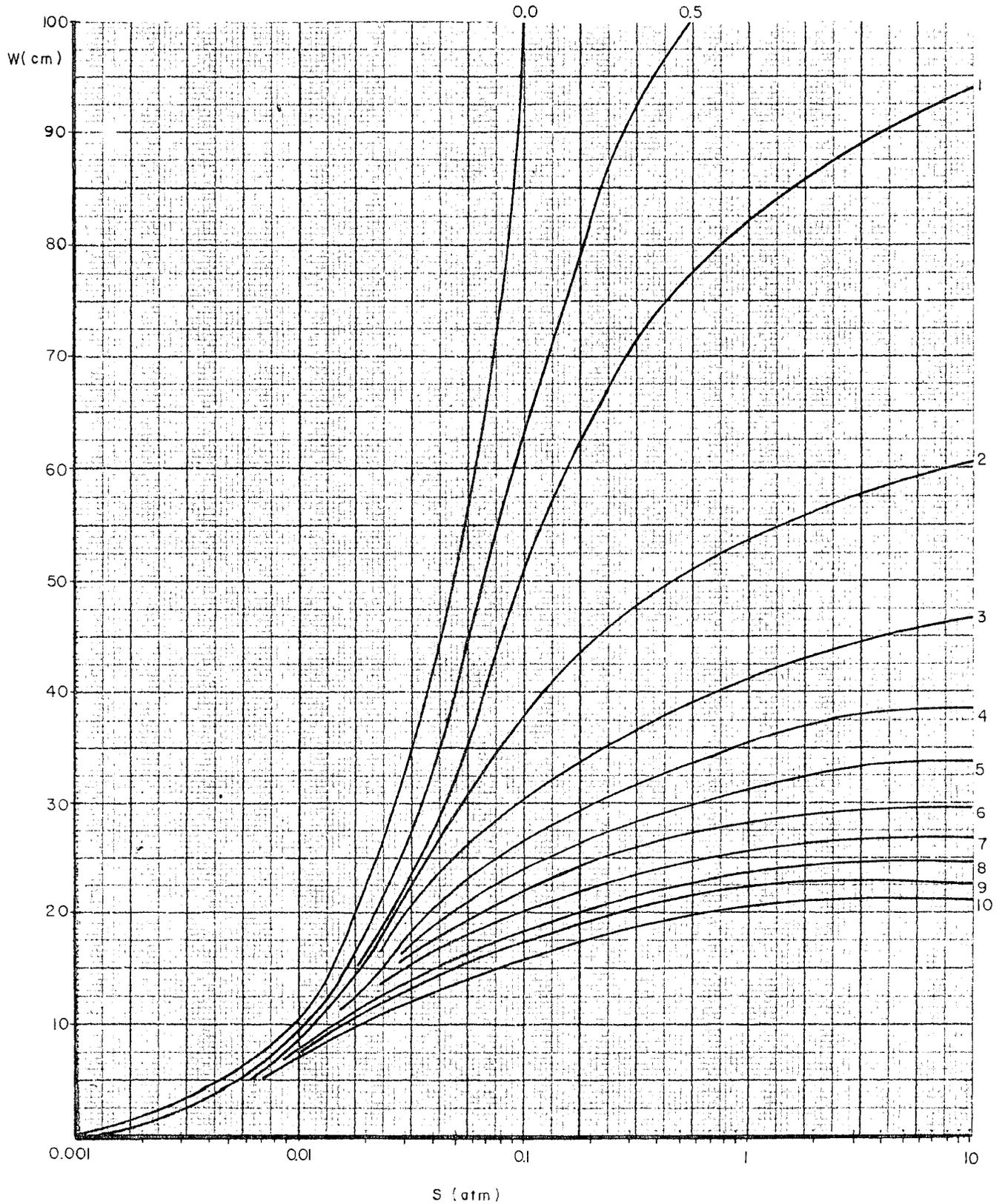


FIGURA A.1.1

Relación entre la profundidad de la napa freática, la tensión hídrica del suelo y la intensidad de ascenso capilar para suelos de textura fina. ($n = 2$)

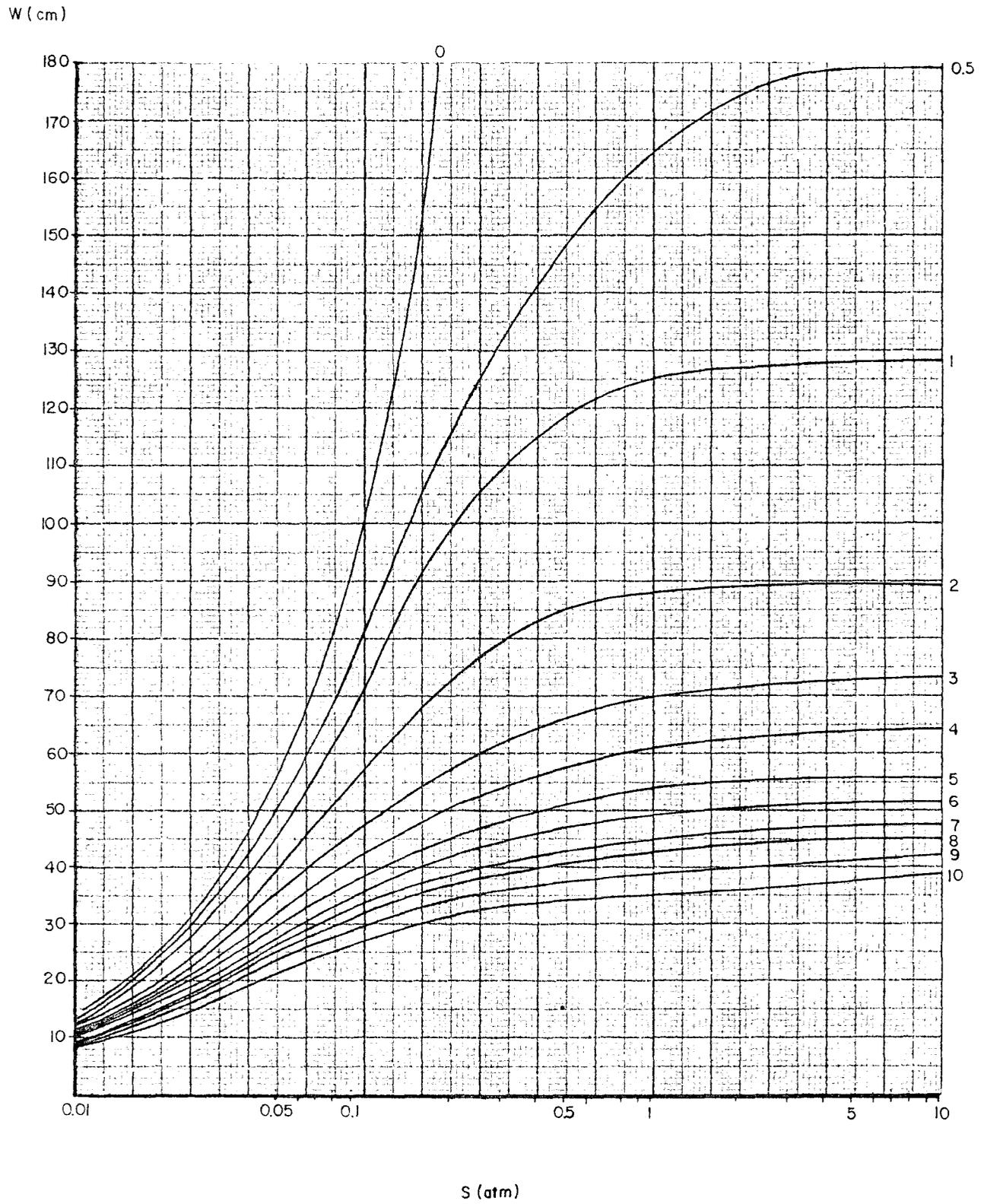


FIGURA A.1.2

Relacion entre la profundidad de la napa freática, la tensión hídrica del suelo
y la intensidad de ascenso capilar para suelos de textura media (n = 3)

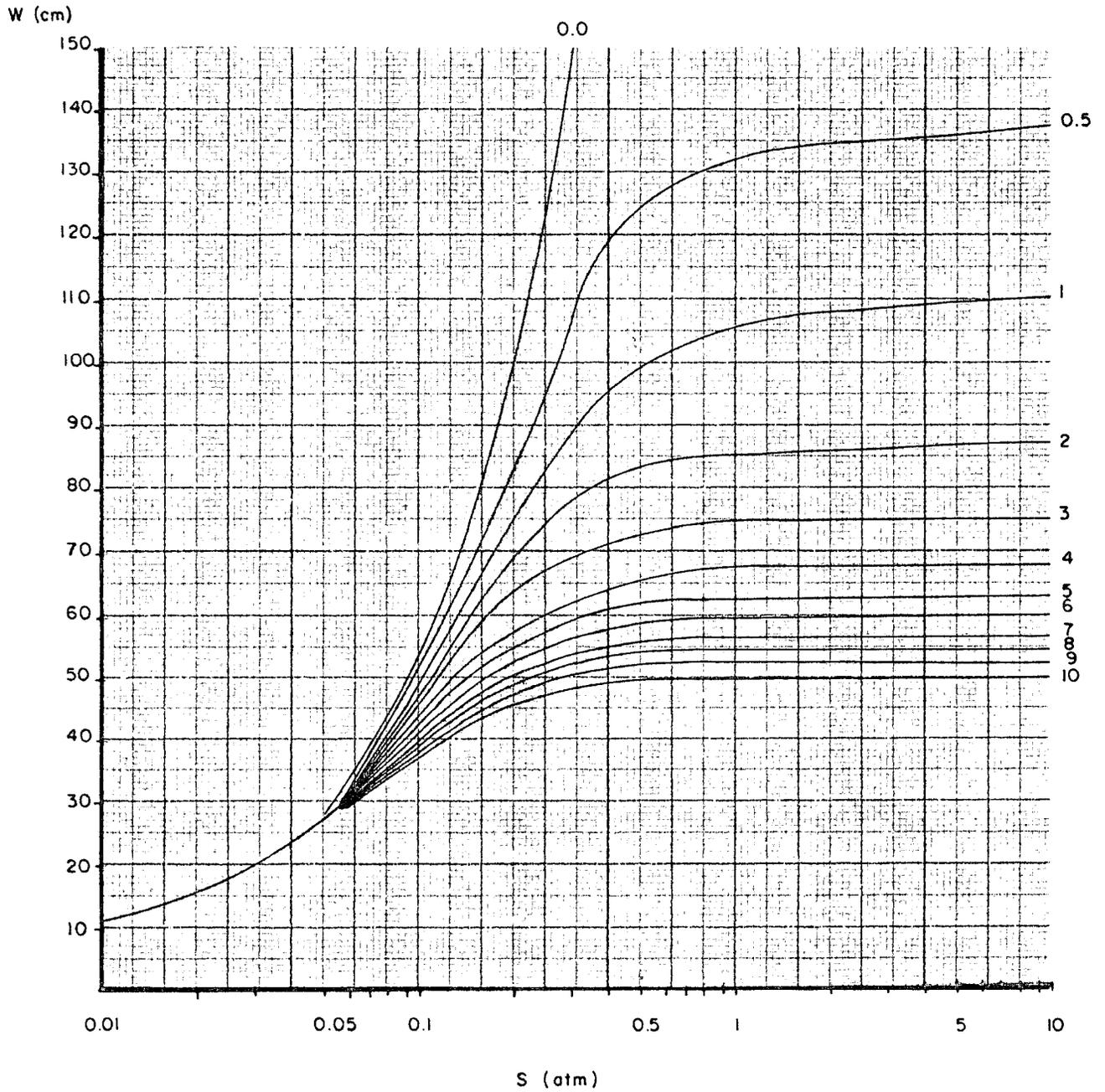


FIGURA A.1.3

Relacion entre la Profundidad de la napa freática, la tensión hídrica del suelo y la intensidad de ascenso capilar para suelos de textura gruesa ($n = 4$)

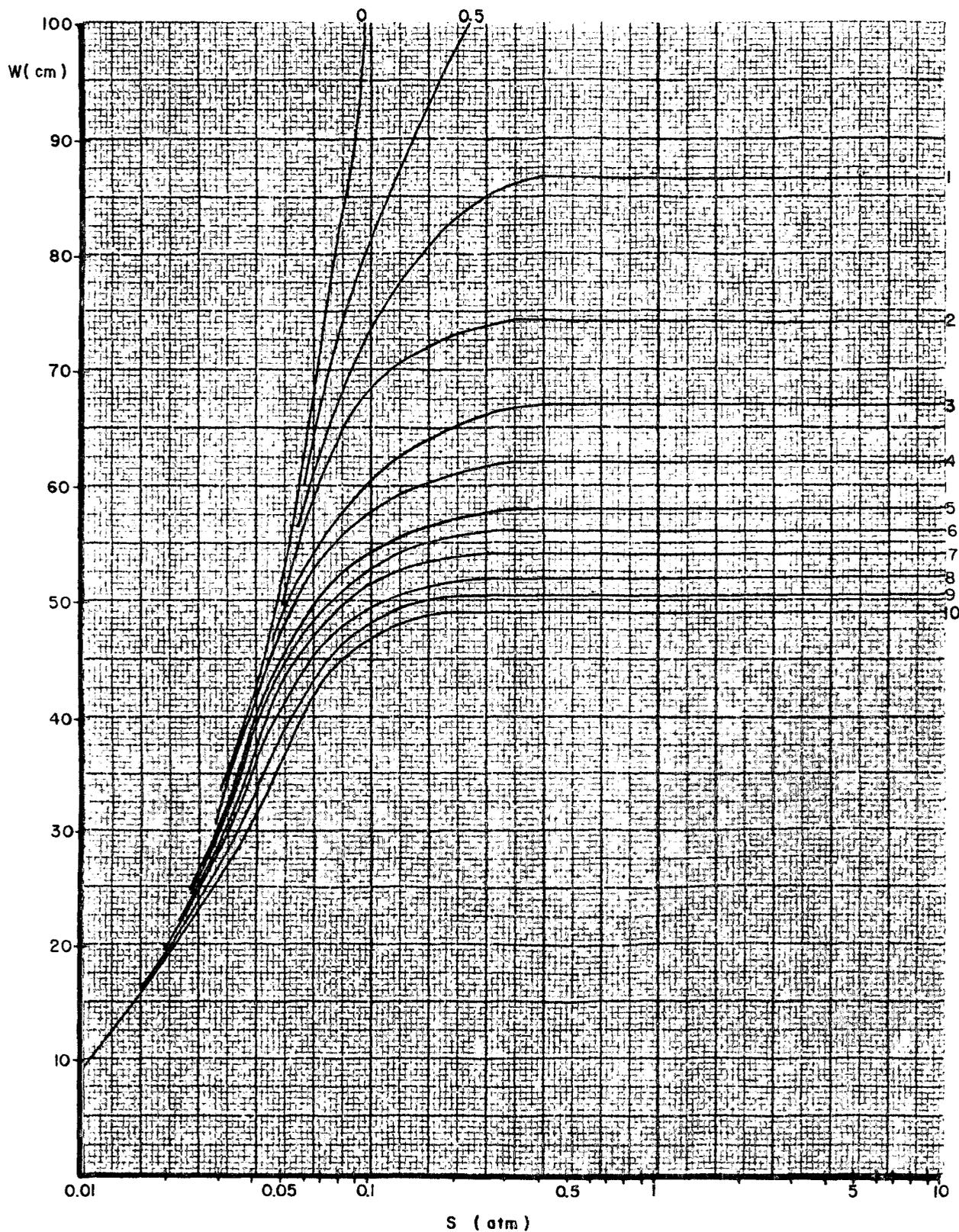
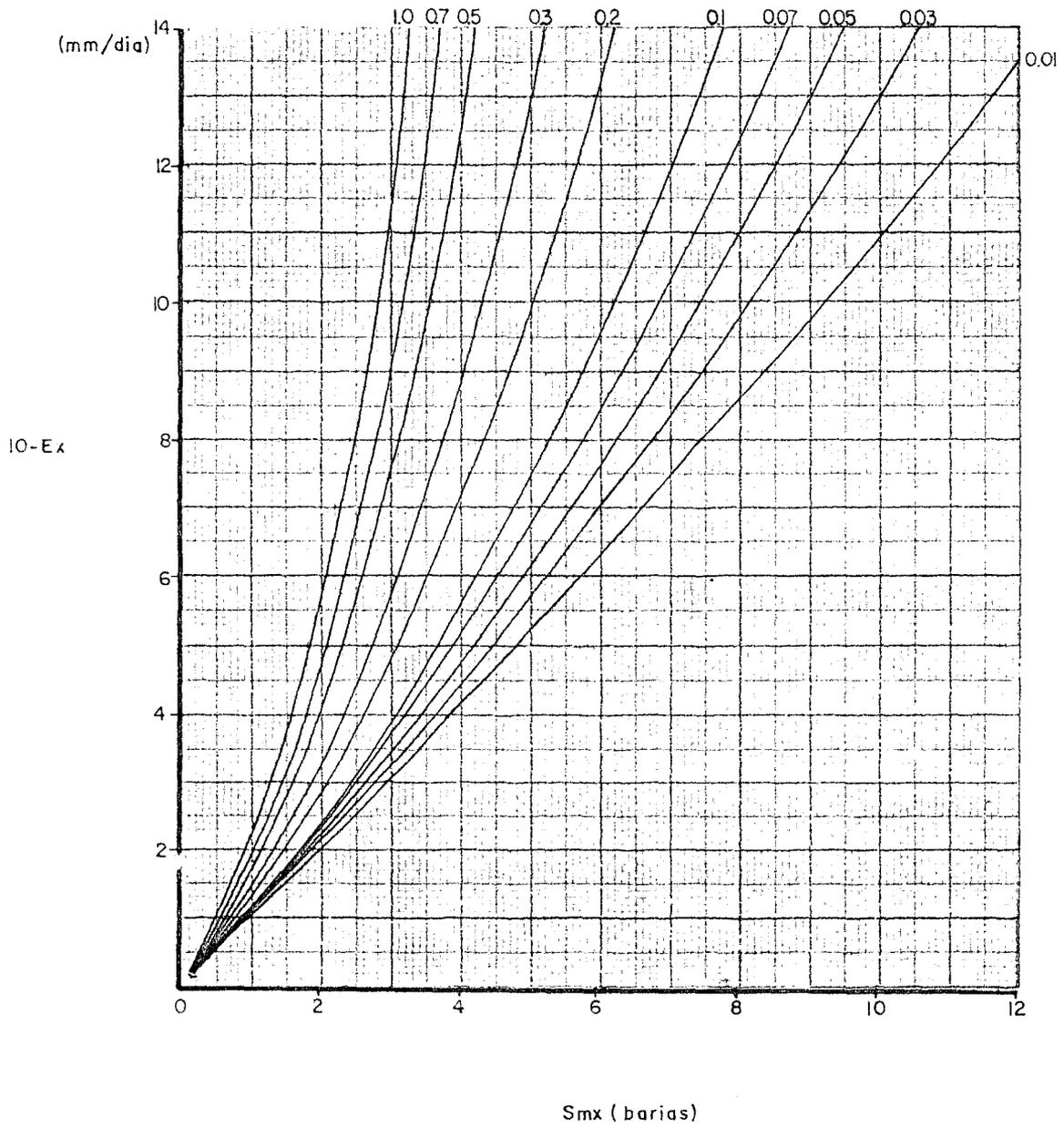


FIGURA A.1.4

Cálculo de la succión máxima del suelo
(n = 2)

$8 E_x/D$



Cálculo de la succión máxima del suelo

FIGURA A.1.6

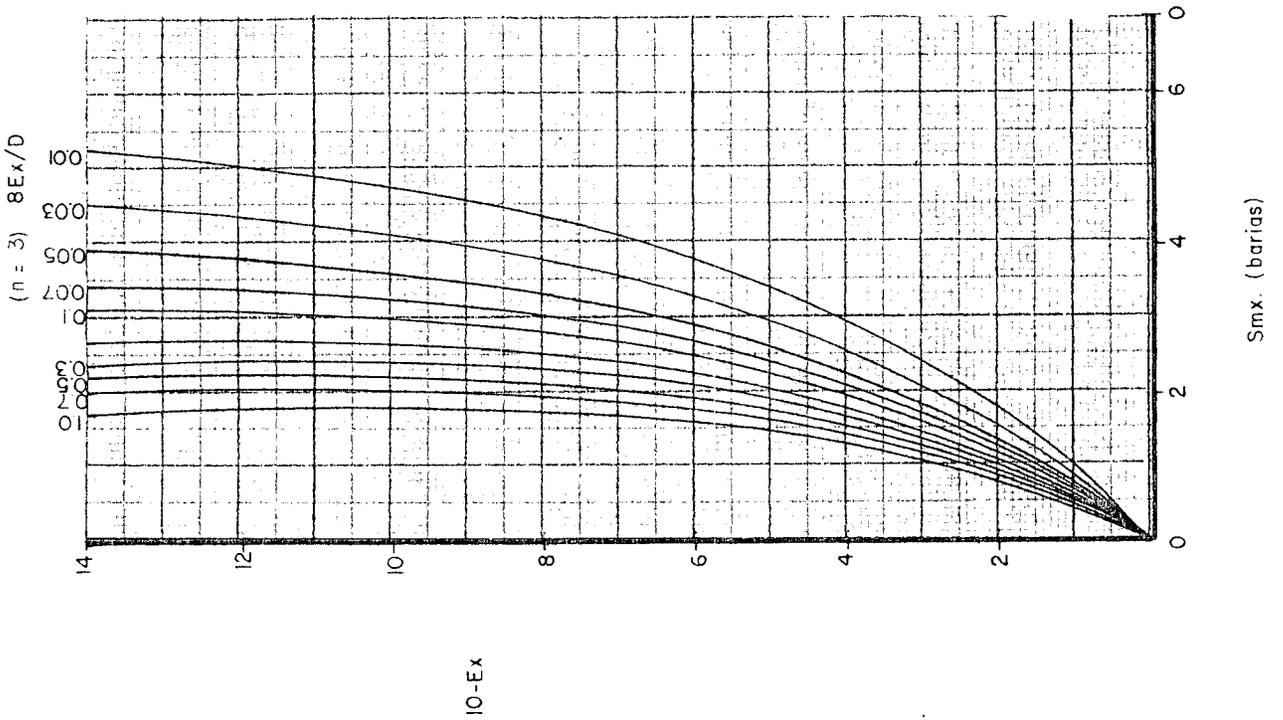


FIGURA A.1.5

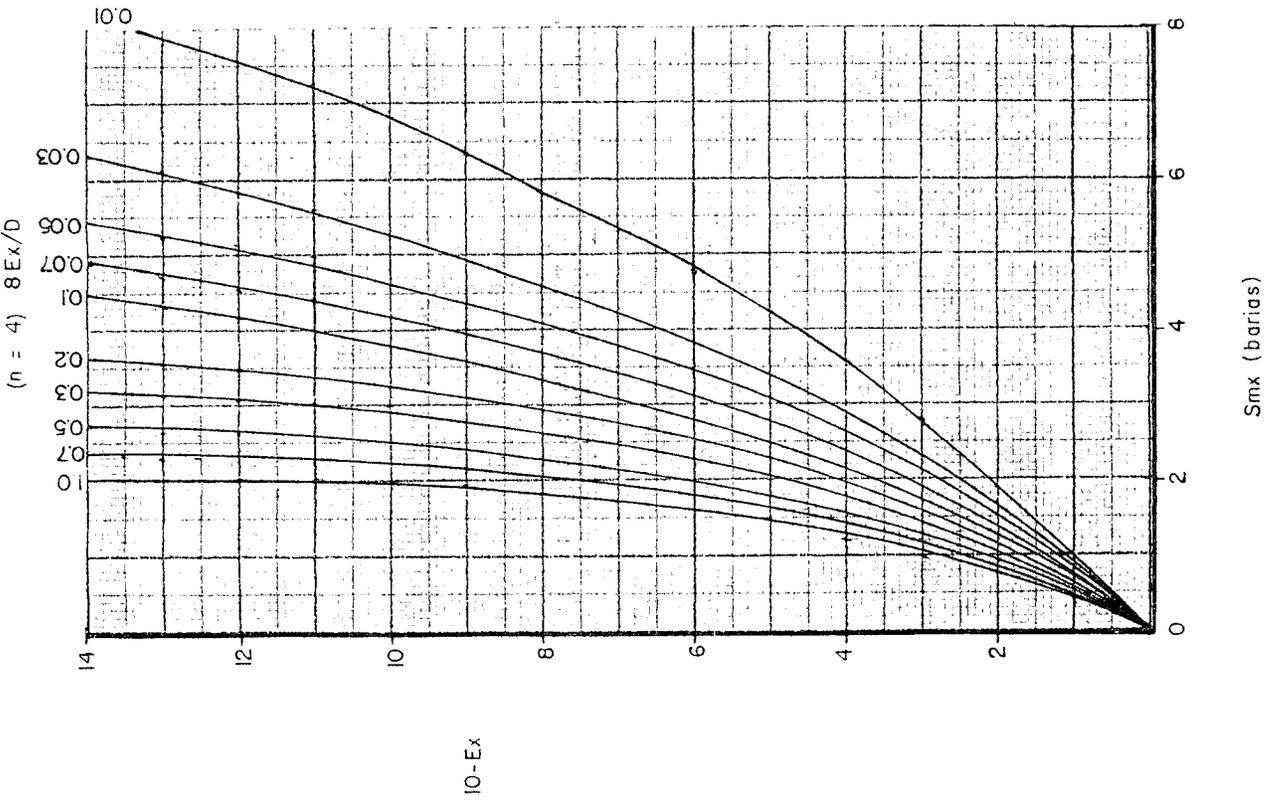
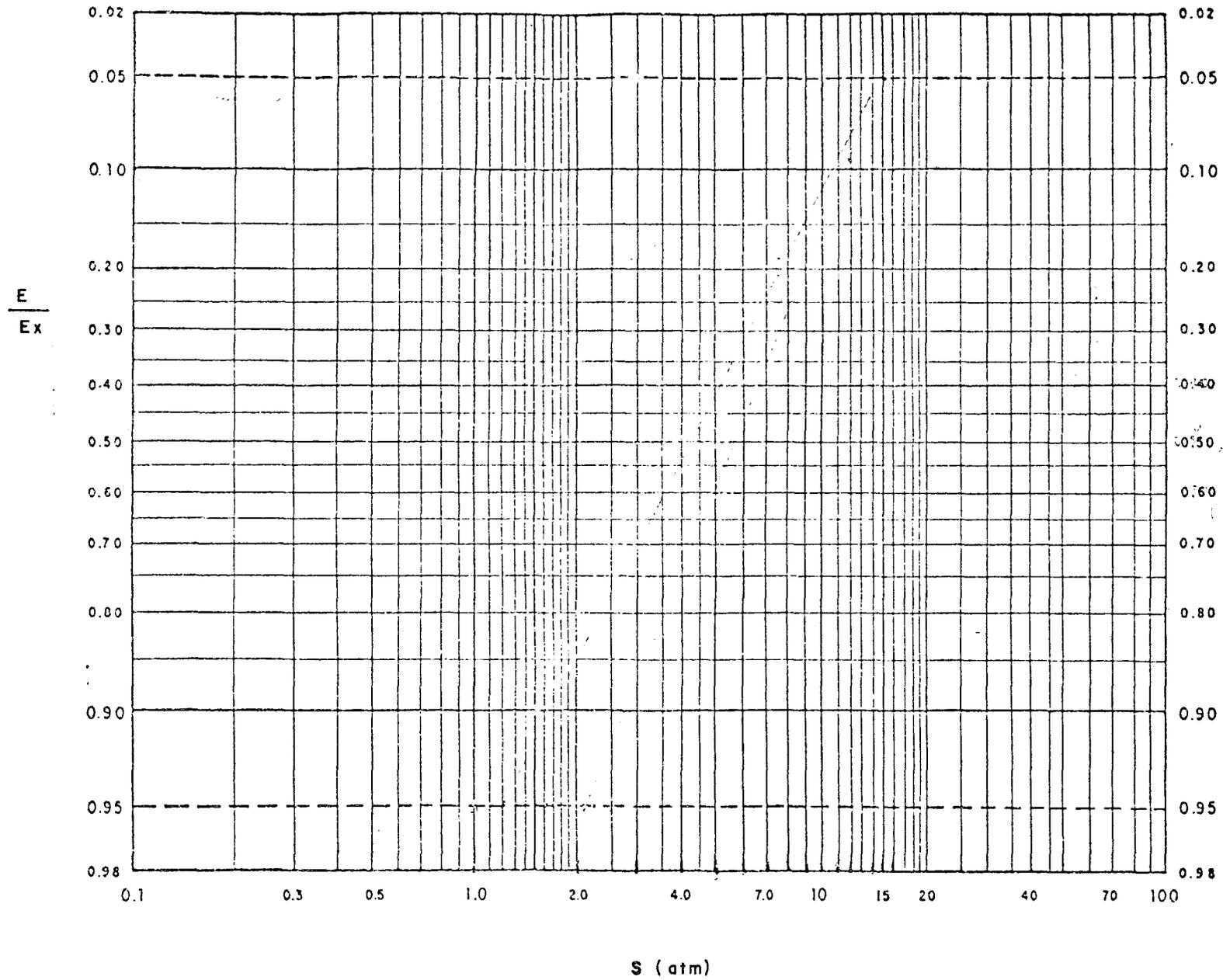


FIGURA A.1.7

Relación entre la evaporación relativa y la tensión hídrica del suelo según la fórmula (17)



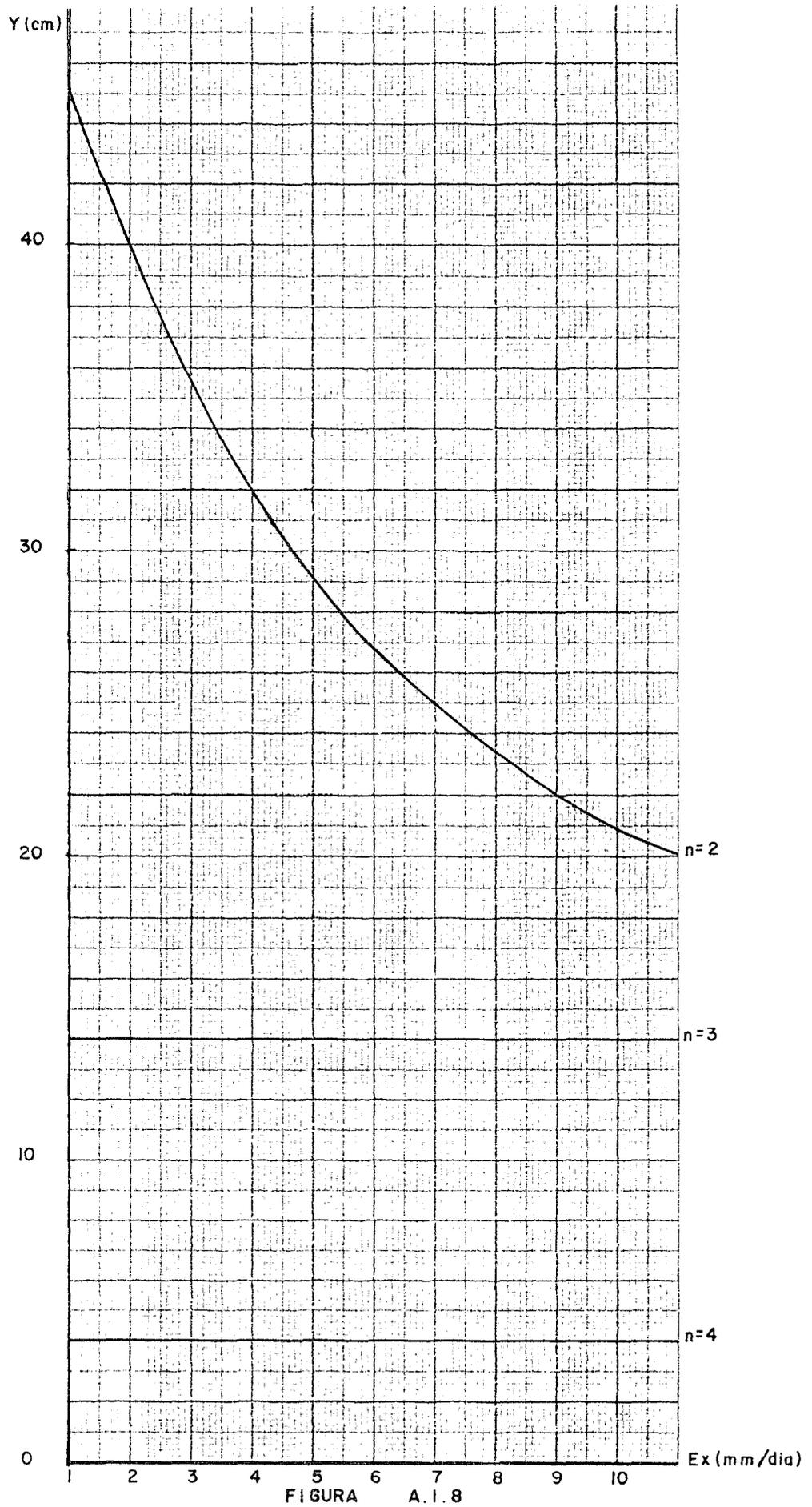
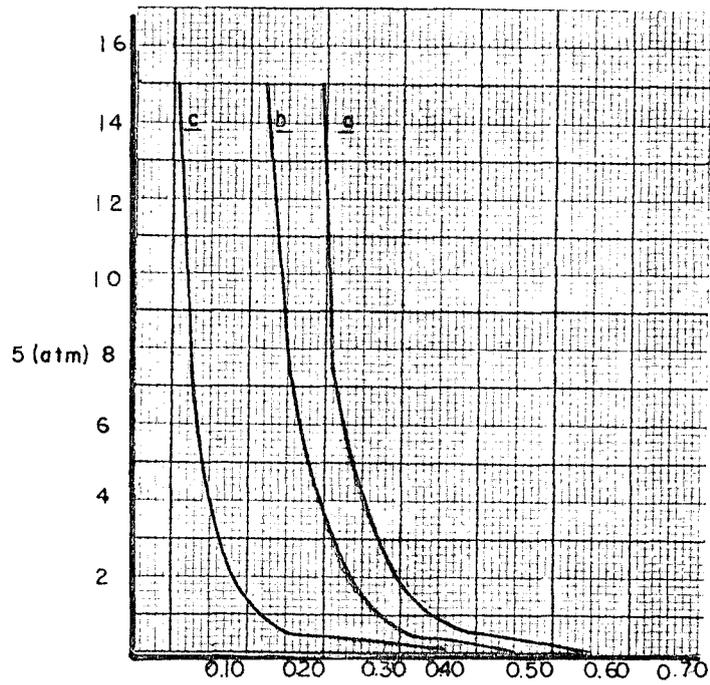


FIGURA A.1.8

Relación entre el espesor de la zona de subaeración,
la textura del suelo y la demanda evaporadora

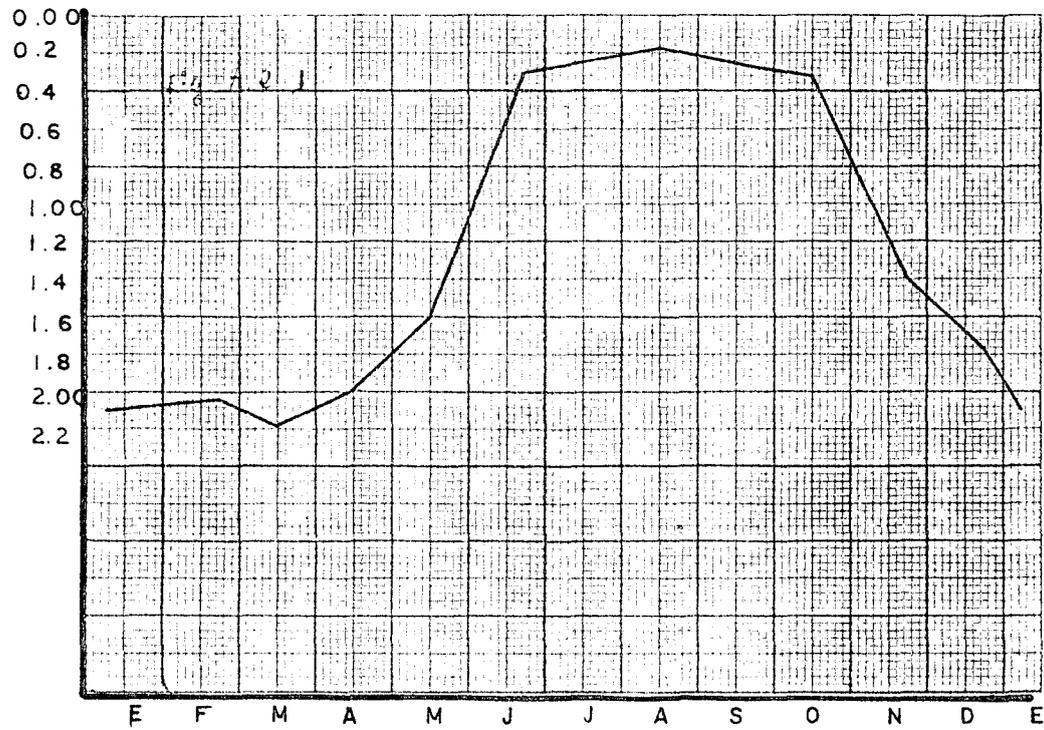
ANEXO 2: DATOS BO CONO-MASPARRO

ANEXO 3: CALCULOS BO CONO-MASPARRO



F I G U R A A.2.0

Curvas De Retención De Humedad



F I G U R A A.2.1.

Fluctuaciones. Del Nivel Freatico, Pozo F10

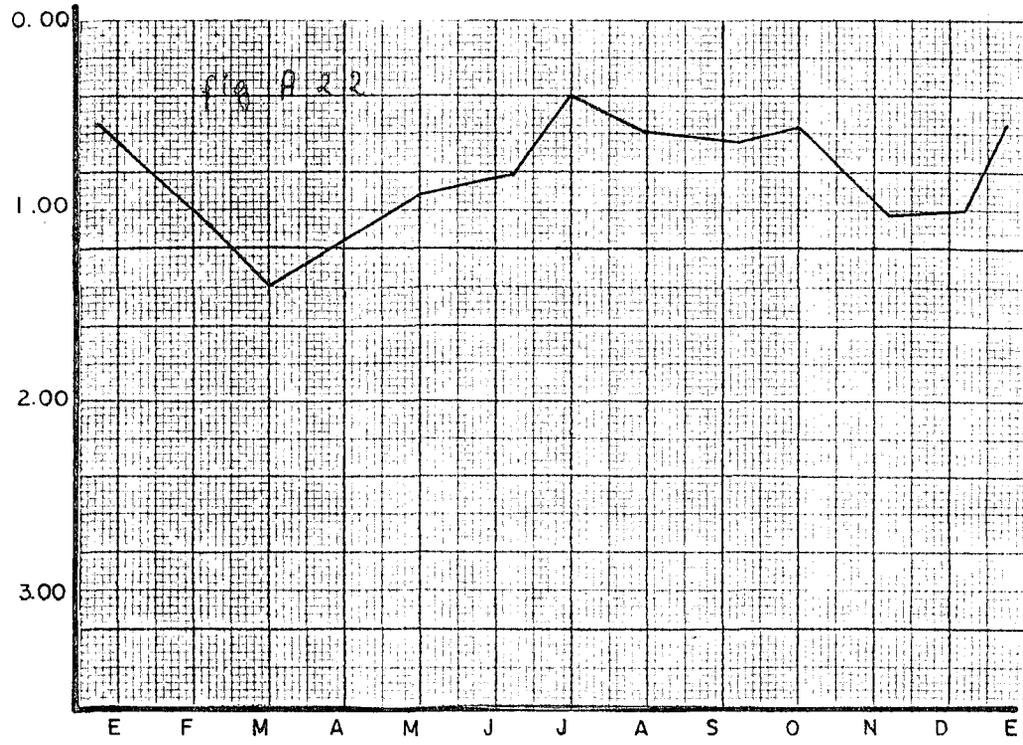


FIGURA A.2.2
Fluctuaciones Del Nivel Freático, Pozo 18+400

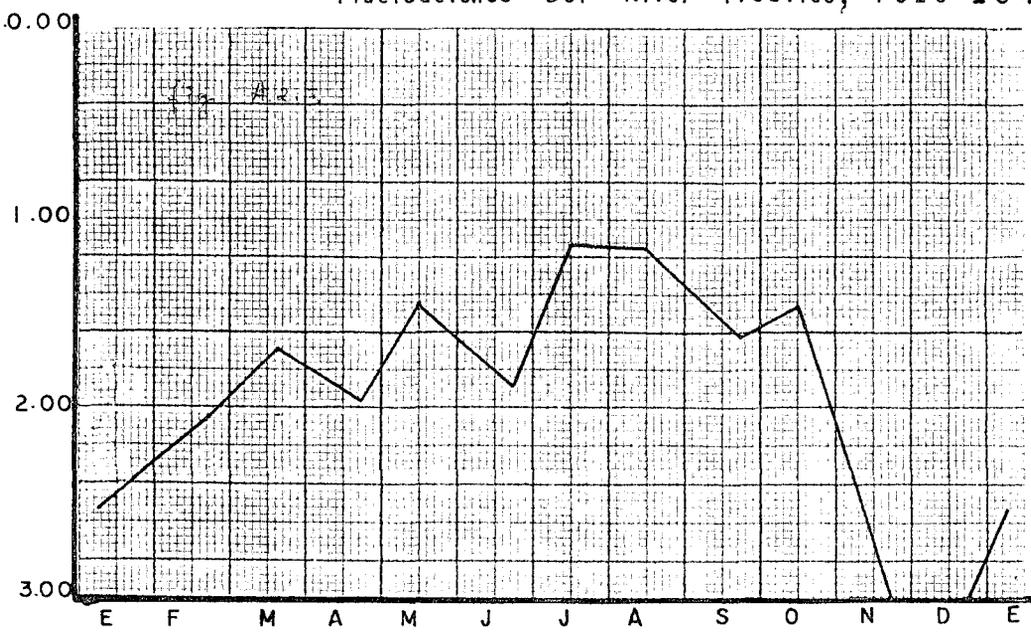
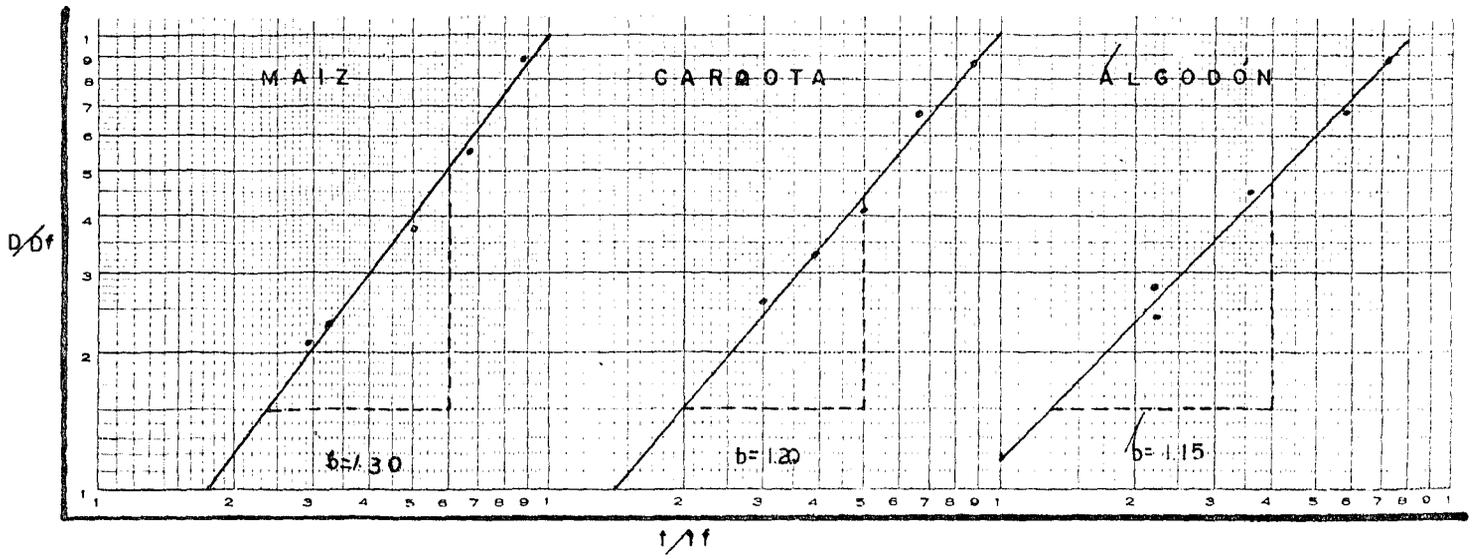


FIGURA A.2.3
Fluctuaciones Del Nivel Freático, Pozo G-8



F I G U R A A.2.4

Datos De Desarrollo Radicular

CUADRO A. 2. 0.

DATOS CLIMATOLOGICOS ESTACION "LA MARQUESEÑA HDA".

M E S	p	Eo
Enero	36.6	6.50
Febrero	29.9	7.60
Marzo	4.4	8.10
Abril	144.9	6.00
Mayo	81.5	5.10
Junio	333.0	4.40
Julio	176.2	4.20
Agosto	262.7	4.50
Septiembre	77.6	5.30
Octubre	134.4	4.80
Noviembre	53.8	4.90
Diciembre	75.5	5.40

p Totales mensuales de precipitación en milímetros.

Eo Evaporación diaria promedio en milímetros por día..

Cálculo de desarrollo radicular

según[48]: $D = Df (t/tf)^b$

Cultivo: maíz.

Df = 150 cm.

tf = 60 días

b = 1.30 (figura A.2.4)

CUADRO A. 3.0.

Mes	t	$(t/t_f)^b$	D	\bar{D}
Jun.	30	0.41	61	28
Jul	60	1.00	150	102
Ago	90		150	150
Set	120		150	150

Cultivo: caña de azúcar

Df = 60 cm.

tf = 50 días

b = 1.20 (figura A.2.4)

CUADRO A. 3. 1.

Mes	t	$(t/t_f)^b$	D	\bar{D}
Nov	30	0.54	32	16
Dic	60		60	50
Ene	90		60	60

Cultivo: algodón

Df = 120 cm.

tf = 120 días

b = 1.15 (figura A.2.4.)

CUADRO A. 3. 2.

Mes	t	$(t/t_f)^b$	D	\bar{D}
Jul	30	0.20	24	10
Ago	60	0.45	54	38
Set	90	0.72	86	70
Oct	120		120	102
Nov	150		120	120
Dic	180		120	120

Calculo de los valores mensuales de evaporación máxima, Ex

Segun [49] y [50].

$$Ex = Eo \left(0.3 + 0.6 (F/Fx) \right)$$

$$F/Fx = 0.5 \operatorname{erf} (4t/tc - 2) + 0.5$$

Cultivo: Maíz

tc = 120 días

Eo, según cuadro A.2.0.

CUADRO A. 3. 3.

Mes	4t/tc	erf (4t/tc - 2)	F/Fx	Eo	0.6 (F/fx)	Ex
Jun	1	-0.84	0.08	4.4	0.05	1.54
Jul	2	0.00	0.50	4.2	0.30	2.52
Ago	3	0.84	0.92	4.5	0.55	3.84
Set	4	0.99	1.00	5.3	0.60	4.77

Cultivo: caraota

tc = 90 días

Eo, según cuadro A.2.0.

CUADRO A. 3. 4.

Mes	4t/tc	erf (4t/tc - 2)	F/Fx	Eo	0.6(F/Fx)	Ex
Nov	1.33	-0.64	0.18	4.90	0.11	2.0
Dic	2.67	0.68	0.84	5.40	0.50	4.3
Ene	4.00	0.99	1.00	6.5	0.60	6.1

Cultivo: algodón
 $T_c = 180$ días
 E_o , según cuadro A.2. 0.

CUADRO A.3.5.

Mes	$4t/t_c$	$\text{erf}(4t/t_c - 2)$	F/F_x	E_o	$0.6 (F/F_x)$	E_x
Jul	0.67	- 0.94	0.03	4.20	0.02	1.34
Ago	1.33	-0.65	0.18	5.50	0.11	1.84
Set	2.00	0.00	0.50	5.30	0.30	3.20
Oct	2.67	0.65	0.82	4.80	0.49	3.80
Nov	3.30	0.94	0.97	4.90	0.58	4.30
Dic	4.00	, 1.00	1.00	5.40	0.60	4.90

CALCULO A.3.0.

Ilustración de los cálculos correspondientes a la condición I

Caso: 1

Período: junio

1. $E_o = 4.4$ mm/día (cuadro A.2.0.)
2. $E_x = 1.5$ mm/día (cuadro A.3.3.)
3. $\bar{D} = 28$ cm. (cuadro A.3.0.)
4. $\bar{W} = 70$ cm. (figura A.2.1.)
5. $S_{mx} = 3.5$ atm. (entrando figura A.1.4, con $8 E_x/D = 0.44$ y $10 - E_x = 8.5$)
6. ${}^sW_x = 105$ cm. (entrando figura A.1.1., con $S_{mx} = 3.5$ y $E_x = 1.5$)
7. ${}^cW_x = 133$ cm. (${}^cW_x = {}^sW_x + D = 105 + 28 = 133$)
8. $Y = 38$ cm. (entrando figura A.1.8, con $n = 2$ y $E_x = 1.5$)
9. $\bar{Z} = 28$ cm. (figura 7)
10. condición = I (cuadro 3)

CALCULO A.3.1.

Ilustración de los cálculos correspondientes a la condición II

Caso: 9

Cultivo: algodón

Serie: Boconó

Período: setiembre

1. $E_o = 5.3 \text{ mm/día}$ (cuadro A.2.0.)
2. $E_x = 3.2 \text{ mm/día}$ (cuadro A.3.5.)
3. $\bar{D} = 70 \text{ cm.}$ (cuadro A.3.2.)
4. $\bar{W} = 144 \text{ cm.}$ (figura A. 2.3)
5. $S_{mx} = 2.0 \text{ atm.}$ (entrando figura A.1.6, con $8 E_x/D = 0.37$ y $10 - E_x = 6.8$)
6. ${}^S W_x = 66 \text{ cm.}$ (entrando figura A.1.3. con $S_{mx} = 2 \text{ atm.}$ y $E_x = 3.2$)
7. ${}^C W_x = 136 \text{ cm.}$ (igual que en el cálculo A.3.0.)
Efecto = positivo (figura 12)
11. $p = 77 \text{ mm.}$ (cuadro A.2.0.)
12. $E_x = 96 \text{ mm.}$ ($E_x = E_x N = (3.2) (30) = 96$)
13. $h_{cc} = 0.22$ (figura A.2.0, con $n = 4$)
14. $h_{mx} = 0.125$ (figura A. 2.0, con $S_{mx} = 2$)
15. $s = 67 \text{ mm.}$ ($s_x = \bar{D} (h_{cc} - h_{mx}) = 67$)
16. $p + s = 144 \text{ mm.}$ ($p + s = 77 + 67 = 144$).
10. condición = II (cuadro 3)

CALCULO A.3.2.

Ilustración de los cálculos correspondientes a la condición III

Caso: 5

Período: enero

1. $E_o = 6.5 \text{ mm/día}$ (cuadro A.2.0.)
2. $E_x = 6.1 \text{ mm/día}$ (cuadro A.3.4.)
3. $\bar{D} = 60 \text{ cm.}$ (cuadro A.3.1.)
4. $\bar{W} = 72 \text{ cm.}$ (figura A.2.2.)
5. $S_{mx} = 1.4 \text{ atm.}$ (entrando figura A.1.5, con $8 E_x/D = 0.81$ y $10 - E_x = 3.9$)
6. ${}^S W_x = 58 \text{ cm.}$ (entrando figura A.1.2, con $S_{mx} = 1.4$ y $E_x = 6.1 \text{ mm.}$)
7. ${}^C W_x = 118 \text{ cm.}$ (igual que en el cálculo A.3.0.)
Efecto = positivo (figura 9)
8. $Y = 14 \text{ cm.}$ (entrando figura A.1.8, con $n = 3$ y $E_x = 6.1 \text{ mm.}$).

- | | | |
|-----|----------------------------|--|
| 11. | $p = 37 \text{ mm.}$ | (Cuadro A. 2 0.) |
| 12. | $Ex = 189 \text{ mm.}$ | (igual que en el calculo A. 3 1) |
| 13. | $hcc = 0.40$ | (figura A. 2 0, con $n = 3$) |
| 14. | $hmx = 0.285$ | (figura A. 2 0, con $n = 3$ y $Smx = 1 4$) |
| 15. | $s = 69 \text{ mm.}$ | (igual que en el calculo A. 3 1) |
| 16. | $s + p = 106 \text{ mm.}$ | (igual que en el calculo A. 3 1) |
| 17. | $\sum Fx = 83 \text{ mm.}$ | ($\sum Fx = \sum Ex - s - p = 189 - 69 - 37$) |
| 18. | $Fx = 2.7 \text{ mm/día}$ | ($Fx = Fx/N = 83/31 = 2.7$) |
| 19. | ${}^sW = 12 \text{ cm.}$ | (${}^sW = W - D = 72 - 60 = 12$) |
| 20. | $F = 2.7 \text{ mm/día}$ | (figura A. 1 2) |
| 21. | $\sum E = 189 \text{ mm.}$ | ($\sum E = \sum F + p + s = 83 + 67 + 37 = 189$) |
| 22. | $\sum E / \sum Ex = 1$ | ($189/189 = 1$) |

CALCULO A. 3. 3.

Ilustración de los cálculos correspondientes a la condición IV

Caso : 8

Período : enero

- | | | |
|----|---------------------------------|--|
| 1. | $Eo = 6.5 \text{ mm/día}$ | (igual que el calculo A. 3 2) |
| 2. | $\bar{Ex} = 6.1 \text{ mm/día}$ | (igual que en el calculo A. 3 2.) |
| 3. | $D = 60 \text{ cm.}$ | (igual que en el calculo A. 3 2.) |
| 4. | $\bar{W} = 260 \text{ cm.}$ | (figura A. 2 3.) |
| 5. | $Smx = 1.3 \text{ atm.}$ | (entrando figura A. 1. 6, con $8 Ex/D = 0.81$ y $10 - Ex = 3.9$) |
| 6. | ${}^sWx = 56 \text{ cm}$ | (entrando figura A. 1 3 con $Smx = 1.3$ y $Ex = 6.1$) |
| 7. | ${}^cWx = 116 \text{ cm.}$ | (igual que en el calculo A. 3 0.) |
| 8. | $Y = 4 \text{ cm.}$ | (entrando figura A. 1. 8, con $n = 4$ y $Ex = 6.1$) |

Efecto Positivo

- | | | |
|-----|-----------------------------|--|
| 11. | $p = 37 \text{ mm.}$ | (igual que el calculo A. 3 2) |
| 12. | $\sum Ex = 189 \text{ mm.}$ | (igual que en el calculo A. 3 2) |
| 13. | $hcc = 0.22$ | (figura A. 2 0, con $n = 4$) |
| 14. | $hmx = 0.14$ | (figura A. 2 0, con $n = 4$ y $Smx = 1.3$) |
| 15. | $s = 48 \text{ mm}$ | (igual que en el calculo A. 3 1) |
| 16. | $s + p = 85 \text{ mm.}$ | (igual que en el calculo A. 3 1) |
| 17. | $\sum Fx = 104 \text{ mm.}$ | (igual que en el calculo A. 3 2) |
| 18. | $Fx = 3.4 \text{ mm/día}$ | (igual que en el calculo A. 3 2) |
| 19. | ${}^sW = 200 \text{ cm.}$ | (igual que en el calculo A. 3 2) |
| 20. | $F = 0 \text{ mm/día}$ | (figura A. 1. 3) |
| 21. | $\sum E = 85 \text{ mm.}$ | ($\sum E = s + p = 85 \text{ mm}$) |
| 22. | $\sum E / \sum Ex = 0,45$ | ($85/189 = 0.45$) |

CALCULO A. 3. 4.

Ilustración de los cálculos correspondientes a la condición V

Caso : 2

Período : enero

1. $E_o = 6.5 \text{ mm/día}$ (igual que en el cálculo A. 3. 2)
2. $E_x = 6.1 \text{ mm/día}$ (igual que en el cálculo A. 3. 2)
3. $\bar{D} = 60 \text{ cm.}$ (igual que en el cálculo A. 3. 2)
4. $\bar{W} = 206 \text{ cm.}$ (figura A. 2. 1)
5. $S_{mx} = 1.6 \text{ atm.}$ (entrando figura A. 1. 4, = con $8 E_x/D$ 0,81 y $E_x - 10 = \underline{6.1}$)
6. $^s W_x = 49 \text{ cm.}$ (entrando figura A. 1. 1, con $S_{max} = 1,6$ y $E_x = 6.1$)
7. $^c W_x = 109 \text{ cm.}$ (igual que en el cálculo A. 3. 0)
8. Efecto Positivo
11. $p = 37 \text{ mm.}$ (igual que en el caso A. 3. 2)
12. $E_x = 189 \text{ mm.}$ (igual que en el cálculo A. 3. 2)
13. $h_{cc} = 0.46$ (figura A. 2. 0, con $n = 2$)
14. $h_{mx} = 0.35$ (Figura A. 2. 0, con $S_{mx} = 1.6$)
15. $s = 66 \text{ mm.}$ (igual que en el cálculo A. 3. 1)
16. $s + p = 103 \text{ mm.}$ (igual que en el cálculo A. 3. 1)
17. $\sum F_x = 86 \text{ mm.}$ (igual que en el cálculo A. 3. 1)
18. $F_x = 2.8 \text{ mm/día}$ (igual que en el cálculo A. 3. 2)
19. $^s W = 146 \text{ cm.}$ (igual que en el cálculo A. 3. 2)
20. $F = 0.7 \text{ mm/día}$ (iteración figuras A. 1. 1 y A. 1. 7)
21. $\sum E = 125 \text{ mm.}$ (igual que en el cálculo A. 3. 2)
22. $\sum E / \sum E_x = 0.66$ ($125/189 = 0.66$).

ANEXO 4: ANALISIS DE CORRELACION

ANEXO 5: PRUEBA ESTADISTICA

ANALISIS DE CORRELACION

CUADRO A. 4. 0.

Wwx	(1-P/Px)	$\ln(1-P/Px)$	x^2	y^2	XY
0.21	0.48	- 0.734	0.0441	0.539	- 0.154
0.25	0.41	- 0.891	0.0625	0.794	- 0.223
0.27	0.43	- 0.844	0.0729	0.712	- 0.228
0.29	0.45	- 0.798	0.0841	0.637	- 0.231
0.31	0.33	- 1.108	0.0961	1.227	- 0.344
0.31	0.29	- 1.238	0.0961	1.533	- 0.384
0.35	0.44	- 0.821	0.1225	0.674	- 0.287
0.36	0.26	- 1.347	0.1296	1.814	- 0.485
0.38	0.24	- 1.427	0.1444	2.036	- 0.542
0.38	0.35	- 1.050	0.1444	1.103	- 0.399
0.39	0.17	- 1.772	0.1521	3.140	- 0.691
0.41	0.22	- 1.514	0.1681	2.292	- 0.621
0.43	0.22	- 1.514	0.1849	2.292	- 0.651
0.47	0.23	- 1.470	0.2209	2.161	- 0.691
0.47	0.16	- 1.832	0.2209	3.356	- 0.861
0.55	0.11	- 2.210	0.3025	4.884	- 1.216
0.57	0.14	- 1.966	0.3249	3.865	- 1.120
0.57	0.18	- 1.715	0.3249	2.941	- 0.978
0.58	0.21	- 1.560	0.3364	2.434	- 0.905
0.59	0.10	- 2.303	0.3481	5.304	- 1.359
0.61	0.14	- 1.966	0.3721	3.865	- 1.200
0.63	0.11	- 2.210	0.3969	4.884	- 1.392
0.65	0.13	- 2.040	0.4225	4.162	- 1.326
0.71	0.08	- 2.526	0.5041	6.380	- 1.793
0.77	0.07	- 2.660	0.5929	7.076	- 2.050
0.82	0.07	- 2.660	0.6724	7.076	- 2.180
0.82	0.06	- 2.813	0.6724	7.913	- 2.307
0.84	0.09	- 2.410	0.7056	5.808	- 2.024
0.86	0.05	- 2.996	0.7396	8.976	- 2.578
0.88	0.04	- 3.219	0.7744	10.362	- 2.832
15.73		-53.614	9.4333	110.240	-32.052

$$n = 30$$

$$\bar{x} = 15.73$$

$$\bar{y} = -53.61$$

$$\sum xy = -32.05$$

$$\sum x^2 = 9.43$$

$$\sum y^2 = 110.24$$

$$(\sum x)^2 = 247.43$$

$$(\sum y)^2 = 2874.03$$

$$SC_x = \sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n} = 1.18$$

$$SC_y = \sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n} = 14.44$$

$$SP = \sum xy - \frac{(\sum x)(\sum y)}{n} = -3.94$$

$$b = \frac{SP}{SC_x} = -3.33 \quad \text{coeficiente de regresión}$$

$$r = \frac{SP}{\sqrt{(SC_x)(SC_y)}} = -0.954 \quad \text{coeficiente de correlación.}$$

Prueba estadística de la hipótesis de identidad entre el coeficiente de regresión teórico y el calculado.

$$b \quad \text{teórico} = 3.44$$

$$b \quad \text{calculado} = bc = 3.33$$

$$\text{Hipótesis nula : } b_t = b_c$$

$$\text{Hipótesis alterna : } b_t \neq b_c$$

$$SC \text{ regresión} = \frac{SP^2}{SC_x} = 13.16$$

$$SC \text{ residual} = SC_y - SC \text{ regresión} = 1.28$$

$$S^2_{yx} = \frac{SC \text{ residual}}{n-2} = 0.046$$

$$t = \frac{b_t - b_c}{\frac{S^2_{yx}}{SC_x}} = 0.55 = t \text{ calculado}$$

t tabulado (n = 28, e = 0.05) = 2.05

t tabulado > t calculado, luego el coeficiente de regresión calculado, no difiere significativamente del teórico.

X LISTA DE SIMBOLOS

- F**, flujo ascendente desde una napa freática
- K**, conductividad capilar.
- K**, constante de proporcionalidad en fórmula (31)
- K**, constante consolidada en fórmula (43)
- O**, potencial hídrico total del agua del suelo
- S**, potencial mátrico
- S**, succión o tensión hídrica del suelo
- z**, potencial gravitatorio en fórmula (2)
- z**, distancia vertical desde la superficie del suelo
- z**, profundidad de enraizamiento activo, medida desde la superficie del suelo.
- a, b, c, C, k**, constantes empíricas
- ∞ , constante consolidada
- β , constante consolidada
- W**, profundidad del nivel freático medido desde la superficie del suelo.
- s**, como prefijo hace referencia al suelo
- s**, en el balance hídrico representa el aporte total de agua del suelo a la evapotranspiración durante un período;
- sx**, disponibilidad total de agua en la zona de enraizamiento para asegurar la máxima intensidad evaporadora.
- Ex**, evaporatividad atmosférica, intensidad máxima de evaporación de una superficie de suelo descubierta o de un terreno cultivado.
- ^sWx**, profundidad del nivel freático, **W**, para que ocurra un flujo ascendente, **F**, igual a la evaporación máxima, **Ex**, desde la superficie de un suelo descubierta.
- N F**, nivel freático
- D**, profundidad máxima de enraizamiento, cuando no interfiere una napa freática.
- E**, evaporación de un suelo descubierta o de un terreno cultivado.
- \bar{S} , succión promedio de la zona de enraizamiento
- c**, como prefijo hace referencia al cultivo.
- ^cWx**, profundidad del nivel freático, **W**, desde el cual asciende un flujo, **F**, igual a la evaporatividad atmosférica, **Ex**, medida desde la superficie de un terreno cultivado.
- Sd**, succión del suelo a la profundidad de enraizamiento.
- P**, producción vegetal cuando existe un factor limitante
- Px**, producción vegetal máxima, cuando se suprime el factor limitante.
- hcrit**, fracción volumétrica límite de humedad del suelo para el desarrollo o actividad radicular.
- hsat**, fracción porosa total del suelo, en volumen, igual a la fracción volumétrica de humedad en suelo saturado.

- A**, constante consolidada en la fórmula (47)
- A**, absorción total de un elemento esencial deficitario
- A_x**, absorción total necesaria de un elemento esencial para subsanar la deficiencia.
- A_d**, absorción total de un elemento esencial deficitario cuando el cultivo no experimenta restricción en su enraizamiento.
- A_z**, absorción total de un elemento esencial deficitario cuando el cultivo experimenta restricción redicular a causa de un nivel freático alto.
- P_d**, producción vegetal obtenida con la absorción de **A** unidades del elemento esencial deficitario, sin restricción radicular
- P_z**, producción vegetal obtenida con la absorción de **A_z** unidades de elemento esencial deficitario, con restricción redicular debida a una napa freática.
- m**, intensidad de absorción de un elemento esencial
- r**, concentración de raíces de un fragmento vertical del perfil
- ρ**, densidad del suelo
- Q**, concentración de un elemento en un fragmento vertical del perfil
- A' d**, intensidad de extracción de un elemento esencial deficitario del perfil hasta una profundidad de enraizamiento no restringida por napa freática
- A' z**, intensidad de extracción de un elemento esencial deficitario del perfil hasta una profundidad restringida por una napa freática
- M**, elemento químico esencial a los cultivos en condición deficitaria en el suelo
- Σ F**, aporte freático total a la evapotranspiración de un terreno no cultivado durante un determinado período de tiempo
- Σ E**, evapotranspiración total de un terreno cultivado durante un determinado período de tiempo
- P**, precipitación total en un período determinado
- E_o**, evaporación de tina en milímetros por día
- h**, humedad del suelo (fracción volumétrica)
- h_{cc}**, humedad del suelo a capacidad de campo
- h_{mx}**, umbral crítico de humedad correspondiente a un marchitamiento incipiente