

Efecto de la deficiencia de humedad sobre el rendimiento del trigo en suelos regados del valle central. I. Determinación de la profundidad, tensión y estado de desarrollo crítico¹

Manuel José Gandarillas I.², Ramón García L.² y Hernán Tejada S.³

INTRODUCCION

La determinación de las necesidades de riego en el cultivo del trigo, es de especial importancia para la agricultura en el llano central, en la zona comprendida entre los paralelos 33 y 35 de latitud sur, ya que la precipitación es insuficiente para el normal desarrollo de la planta y maduración del grano. La práctica del riego es común en esta zona como consecuencia del déficit de precipitación pluvial. Diversos factores condicionan las necesidades de agua de un cultivo, los que se relacionan con características del suelo, la planta y el clima. Las plantas extraen humedad a diferentes profundidades del suelo, dependiendo de la distribución y actividad del sistema radicular, disponibilidad efectiva de agua en el suelo y de la demanda atmosférica. La disminución del rendimiento como resultado de una deficiencia de agua, depende principalmente de la intensidad de la deficiencia y estado de desarrollo de la planta.

Los objetivos del presente trabajo, han sido determinar para el cultivo del trigo: a) la tensión de la humedad en el suelo, dentro del rango definido como humedad aprovechable, que puede utilizarse como indicador del límite de disponibilidad; b) la profundidad a la cual es conveniente medir la tensión, y c) el estado de desarrollo del cultivo en el cual una deficiencia de humedad afecta el rendimiento con mayor intensidad.

REVISION DE LITERATURA

Una forma de expresar el grado de disponibilidad de agua para las plantas en el suelo, es mediante el valor de la tensión con que ésta está retenida. Existe una relación curvilínea negati-

va entre agua disponible y fuerza de retención (4). La cantidad máxima de agua utilizable por las plantas que el suelo puede retener, corresponde al remanente en el perfil luego que una lluvia o riego lo ha saturado y que ha drenado el agua de saturación. Este límite se denomina capacidad de campo (cc) y corresponde a una tensión entre 1/10 y 1/2 atm., según el suelo, tomándose como promedio el valor 1/3 atm., el que representa la tensión mínima a la cual el suelo retiene el agua aprovechable por las plantas (10).

Briggs y Schantz (3) encontraron que la tensión máxima a la cual las plantas pueden extraer agua del suelo es 15 atm. Este estado de la humedad se denomina marchitez permanente (MP) debido a que las plantas sometidas a esta tensión, o a una mayor, no son capaces de recobrar el turgor al ponerlas nuevamente en un ambiente saturado de humedad (3).

No existe un criterio uniforme acerca del grado de disponibilidad de la humedad retenida entre capacidad de campo y marchitez permanente (12). Veihmeyer y Hendrickson (17) sostienen que la humedad del suelo está igualmente disponible en todo el rango de tensión comprendido entre los límites de cc y MP. Contrariamente, Thornthwaite y Mather (16) piensan que el grado de disponibilidad disminuye en relación directa a la tensión con que la humedad está retenida. Otros autores han sostenido proposiciones intermedias (12).

Taylor (15) sugirió que la utilización de agua por las plantas no sólo depende de la disponibilidad en el suelo sino también de las condiciones atmosféricas, indicando que en un ambiente caluroso y seco las plantas pueden presentar síntomas de marchitez a tensiones bajas tales como una atmósfera o menos, mientras que en condiciones frías y húmedas, el crecimiento no se ve limitado por tensiones altas, aún cercanas a marchitez permanente.

El análisis teórico del flujo del agua desde el suelo hasta la atmósfera a través de la planta realizado por Philip (9) y Gardner (7), los llevó a formular un modelo matemático que permite entender mejor el fenómeno. El trabajo

¹Recepción manuscrito: 21 de abril de 1970.

²Ings. Agrs., Proyectos Leche-Carne-Lana y Cereales, respectivamente, Estación Experimental La Platina, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Casilla 5427, Santiago, Chile.

³Ing. Agr. MS, Centro de Apoyo Suelos, Estación Experimental Quilmapu, Instituto de Investigaciones Agropecuarias.

de estos autores ha permitido conciliar las diferentes hipótesis sobre la disponibilidad de agua en el suelo, demostrando que las condiciones aparentemente contradictorias obtenidas por diferentes investigadores se debían sólo a diferencias en las respectivas condiciones experimentales (12). Utilizando el modelo de Philip (9) y Gardner (7), y resultados experimentales, Denmead y Shaw (6) predijeron velocidades de transpiración en maíz para diferentes tensiones de humedad en el suelo y condiciones atmosféricas, encontrando buena correlación entre predicciones y observaciones.

Actualmente se acepta que para un cultivo dado, la disponibilidad de humedad del suelo es el resultado de la cantidad de agua retenida, tipo de suelo y demanda atmosférica (12). En el caso del trigo, Taylor, citado por Haise y Hagan (8), sugiere que la tensión máxima permisible del agua en el suelo, antes de regar el cultivo establecido, es de 8 a 12 atm., dependiendo de las condiciones atmosféricas.

Un riego eficiente implica una penetración mínima del agua bajo la zona radicular, por lo cual el conocimiento de la profundidad de arraigamiento es importante para el diseño y operación del sistema de riego (5). Sin embargo, aparentemente, la distribución de las raíces en el perfil es más importante que su máxima penetración. Weaver (18) ha demostrado que en general la profundidad de absorción de las raíces del trigo es de 1,50 m. o menos. En realidad, la mayor parte de las raíces se desarrolla cerca de la superficie (1). Del trabajo de diferentes autores citados por Danielson (5) se puede concluir que aún más importante que la distribución de las raíces es la actividad de ellas. Sugiere que al dividir la profundidad total de arraigamiento en 4 sectores iguales, la cuarta parte cercana a la superficie extrae el 40% del agua requerida para la transpiración, siendo de menor importancia las profundidades mayores.

Si no existen limitantes físicas en el perfil, el trigo puede desarrollar un sistema radicular profundo, capaz de extraer humedad hasta 2,0 - 2,5 m. de profundidad (11). En estas condiciones, resultaría difícil determinar el momento oportuno de regar por cuanto se debería medir y considerar la tensión de la humedad en diferentes sectores dentro del total de la profundidad radicular. Taylor (14) sugirió utilizar un valor integrado de la tensión de la humedad del suelo, determinada a varias profundidades, como expresión del grado de disponibilidad. Sin embargo, la necesidad de efectuar mediciones

a diferentes profundidades y dificultades en la interpretación han desacreditado el procedimiento, encontrándose por el contrario que mediciones realizadas a la profundidad de máxima actividad radicular son suficientes en el caso de cultivos bien fertilizados en suelos con baja cantidad de sales (8).

De acuerdo a varios autores citados por Robins *et al* (11), a pesar que el trigo puede tolerar condiciones de baja humedad durante la mayor parte de su ciclo, existe suficiente evidencia de que presenta un período crítico de aproximadamente dos semanas, antes de la polinización. La existencia de un período crítico, durante el cual el rendimiento es particularmente sensible a deficiencias de humedad, es especialmente evidente en cultivos cuya floración se concentra en una etapa determinada del desarrollo como es el caso de los cereales. En cultivos que desarrollan floraciones sucesivas durante cierto tiempo, la existencia de un período crítico no es tan evidente (13).

MATERIAL Y METODO

El trabajo experimental se realizó durante la temporada 1968-69, como una parte de las mediciones efectuadas en 26 ensayos de fertilización nitrogenada y fosfatada (NP) en trigo, ubicados en 16 series de suelo en las provincias comprendidas entre Aconcagua y Curicó. En todos los ensayos se sembró una variedad de trigo de pan típica de la zona central, siendo maíz el cultivo anterior dentro de la rotación.

Con el objeto de medir la variación de la humedad del suelo durante toda la estación de crecimiento en cada localidad, se utilizaron unidades de resistencia eléctrica, del tipo revestido de plástico (2). En cada ensayo, una o varias unidades se enterraron en el perfil de la parcela correspondiente al tratamiento con una fertilización de 192 Kg/ha. de N y 240 Kg/ha. de P_2O_5 . Se eligió este tratamiento, que corresponde a una fertilización alta, de tal manera que en todos los sitios la disponibilidad de nitrógeno y fósforo para el trigo fuera alta. De esta manera se pretendió eliminar estos factores como fuente de variación del rendimiento entre localidades, lográndose así condiciones más favorables para poder detectar una eventual relación entre rendimiento y cantidad de humedad disponible. En suelos con más de 80 cm de profundidad, se instalaron tres resistencias a 20-40-75 cm, respectivamente. En suelos con profundidad entre 50 y 70 cm se instalaron dos resistencias, a 20 y 40 cm, respectivamente, y en suelos

Cuadro 1.- Coeficientes de correlación entre rendimiento (Y) y el número de días (X_{ijk}) que el trigo estuvo sometido a tensiones de humedad iguales o mayores que 8-10-12-14 atm., medidas a dos profundidades en diferentes períodos de desarrollo.

PROFUNDIDAD (j) CM	TENSION (i) ATM.	PERIODO DE DESARROLLO (x)				
		1 SIEMBRA MACOLLA	2 MACOLLA ENCAÑADO	3 ENCAÑADO ESPIGADURA	4 ESPIGADURA GRAMO LECHOSO	5 GRANO LECHOSO MADUREZ
20	8	0,209	-0,253	-0,196	-0,556**	-0,343
	10	0,175	-0,260	-0,289	-0,337	-0,215
	12	0,233	0,246	0,123	-0,749**	-0,068
	14	0,298	-0,093	-0,099	-0,597**	-0,215
45	8		-0,534***		-0,573**	-0,037
	10		-0,585***		-0,614**	-0,126
	12		-0,525***		-0,531**	-0,314
	14		-0,523***		-0,592**	-0,150

**Significativo al nivel de 0,01.

***Coeficientes correspondientes a la correlación entre rendimiento y días-tensión acumulados, comprendidos entre siembra y espigadura.

con menos de 50 cm de profundidad se instaló sólo una resistencia a 20 cm. Las lecturas se realizaron cada 15 días, comenzando en la siembra en el caso de la resistencia superficial y a partir del segundo mes en el caso de las dos restantes. Para medir la resistencia se utilizó un puente especialmente diseñado para este efecto por Soil Test Inc.¹

Mediante una curva de calibración se transformaron las lecturas de resistencia eléctrica a tensión de humedad en el suelo. La curva de calibración se construyó sometiendo muestras de los bloques de resistencia a tensiones de 1/3-1-3-6-8-10-14 atm. sucesivamente y leyendo la correspondiente resistencia². La relación obtenida se presenta en la Figura 1.

Para cada localidad se construyó un gráfico "tensión de humedad versus tiempo", en el cual se dibujaron las tensiones observadas a través de todo el ciclo del cultivo, para cada profundidad. En la Figura 2 se pueden observar los gráficos de las tensiones determinadas en uno de los experimentos para la profundidad de 20 cm. En lo sucesivo se considerarán dos profundidades (20 y 45 cm), por cuanto para las observaciones correspondientes a la tercera profundidad, no se contó con un número suficiente de observaciones y además, no mostraron nin-

guna relación con rendimiento a la simple observación directa, como para establecer comparaciones entre localidades. En la Figura 2, los ascensos verticales de la tensión de humedad hasta alcanzar el valor de 1/3 de atmósfera corresponden al efecto de los riegos, durante los cuales se restablece la condición de capacidad de campo. Se presumió una relación lineal al interpolar por medio de una línea recta la variación de la humedad entre dos observaciones, co-

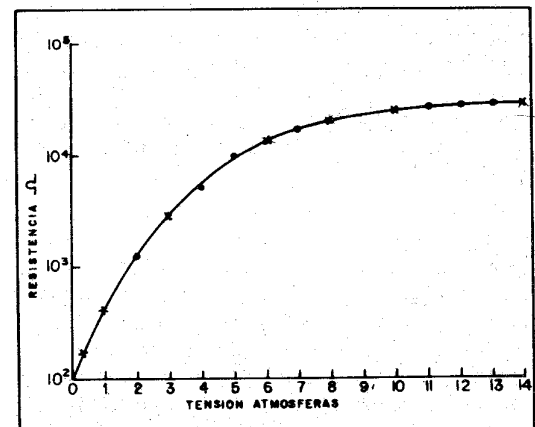


Figura 1.- Relación entre la medida de resistencia eléctrica (Ω) en bloques de bouyoucos y los valores de tensión de humedad (Atm).

¹ Soil Test Inc. Soil Moisture Meter. Model MC-300 A.

² La curva de calibración fue realizada por el Ingeniero Agrónomo Juan Tosso, Instituto de Investigaciones Agropecuarias.

mo también para la variación entre la tensión de 1/3 de atm. y la primera observación después del riego. Dada la dificultad de estar presente en todos los sitios al momento de comenzar el riego, para así medir la tensión máxima a la que fue sometido el cultivo antes de la aplicación del agua, este valor se obtuvo por extrapolación lineal y a valor constante de la tensión más allá del último valor observado antes del riego. La intercepción de esta prolongación con la vertical correspondiente al descenso de la tensión durante el riego corresponde al valor estimado de la tensión máxima.

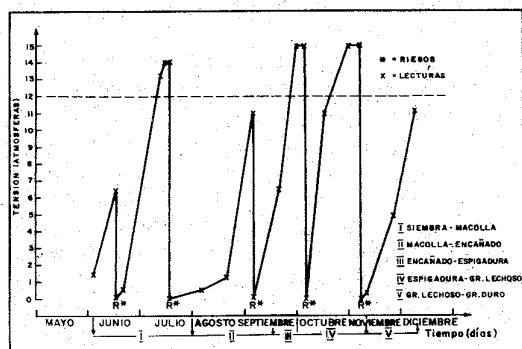


Figura 2.- Variación de la humedad del suelo en relación a diferentes periodos vegetativos del trigo en uno de los 26 ensayos.

Para analizar los datos experimentales, se presumió la existencia de una relación negativa entre rendimiento y el número de días que el cultivo estuvo sometido a tensiones iguales o mayores que cierto límite, relación que dependería del estado de desarrollo del cultivo y de la profundidad a la que se efectúa la medición de la tensión. El ciclo del cultivo se dividió en los siguientes periodos de desarrollo: 1 = siembra a macolla; 2 = macolla a encañado; 3 = encañado a espigadura; 4 = espigadura a grano lechoso; 5 = grano lechoso a madurez. La fecha de transición de un período al siguiente se determinó por observación directa en cada ensayo y se dibujó en forma de una línea vertical en el gráfico de tensión correspondiente. La Figura 2 muestra los periodos de desarrollo observados en uno de los experimentos. Por simple observación, dentro de cada período de desarrollo, en cada gráfico se determinó el número de días que el cultivo estuvo sometido a tensiones iguales o mayores que 8-10-12-14 atm. La cuenta se realizó separadamente para cada profundidad. Finalmente se calcularon los coeficien-

tes de correlación entre rendimiento de la parcela considerada, que se representa por la variable Y, y la variable X_{ijk} que representa el número de días que el cultivo estuvo sometido a la tensión i, medida a la profundidad j, durante el período de desarrollo k. Los subíndices i, j, k toman los siguientes valores: i = 8-10-12-14 atm.; j = 20-45 cm; k = 1-2-3-4-5.

Para la profundidad de 45 cm, se consideraron los días acumulados durante los tres primeros periodos de desarrollo (X_{jk} , 45,1-3) debido al escaso efecto de la variación de la humedad a esta profundidad por el incipiente desarrollo radicular durante los primeros estados de crecimiento.

RESULTADO Y DISCUSION

En el Cuadro 1 se presentan los coeficientes de correlación entre rendimiento y el número de días en que la tensión del agua en el suelo fue igual o mayor que los límites indicados, para las dos profundidades y en los sucesivos periodos de desarrollo.

El número de días en que la humedad del suelo estuvo a tensiones iguales o mayores que 8-10-12-14 atm., medida a 20 cm de profundidad, en los periodos de desarrollo 1-2-3 anteriores a la espigadura, o durante el período 5, de endurecimiento y madurez del grano no presenta correlación significativa con el rendimiento. Sin embargo, durante el período de desarrollo 4, comprendido entre espigazón y grano lechoso, el rendimiento presenta una correlación negativa altamente significativa con el número de días en que el cultivo estuvo sometido a las tensiones mencionadas, a excepción de la tensión 10 atm. El más alto coeficiente de correlación se obtuvo al considerar la tensión de 12 atm. (Figura 3).

Al medir la tensión a 45 cm de profundidad, el rendimiento no correlaciona con los días-tensión ocurridos durante el período de desarro-

Cuadro 2.- Análisis de varianza para la diferencia de las sumas de cuadrado de regresión correspondiente a los modelos (1) y (2).

FUENTE DE VARIACION	G.L.	S.C.	C.M.	F.
SCR modelo 1	3	2627,416		
SCR modelo 2	1	2350,166		
Diferencia	2	277,250	138,625	1,348 ns
SCD modelo 1	22	2262,392	102,836	

ns = no significativo

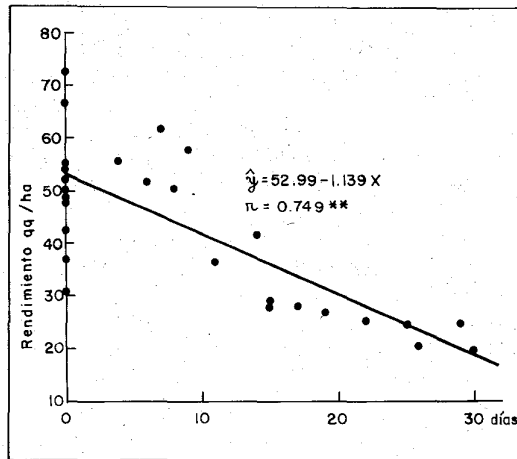


Figura 3.- Rendimiento vs días de déficit hídrico entre espigazón total y grano lechoso a 12 atmósferas de presión.

llo 5, presentando una correlación negativa altamente significativa con los días-tensión ocurridos durante el período 4 y período 1-3.

En base a los resultados del Cuadro 1 se eligió la tensión de 12 atm. como indicadora del límite de disponibilidad de humedad para el trigo, por cuanto el rendimiento presenta la más alta correlación negativa con el número de días en que la humedad del suelo estuvo a esa tensión o a una mayor. Sin embargo, no es posible deducir del Cuadro 1 la profundidad de diagnóstico más adecuada por cuanto los días-tensión medidos tanto a 20 como a 45 cm, correlacionan en forma altamente significativa con rendimiento. Otro tanto ocurre en relación a períodos de desarrollo, por cuanto a la profundidad de 45 cm no sólo los días-tensión ocurridos durante el período 4 correlacionan con rendimiento sino también los ocurridos en el período 1-3.

Considerando lo anterior, se pensó en la posibilidad de obtener una mejor relación entre rendimiento (Y) y deficiencia de humedad si se estimaba a éste como dependiendo simultáneamente del número de días con humedad a tensión igual o mayor que 12 atm. en el período 4 en las dos profundidades ($X_{12,20,4}$ y $X_{12,45,4}$) y del número de días a igual tensión en el período 1-3 en la profundidad de 45 cm ($X_{12,45,1-3}$).

Para probar esta hipótesis se consideró una relación lineal múltiple entre rendimiento y las tres variables, representada por el modelo de regresión:

$$Y = b_0 + b_1 X_{12,20,4} + b_2 X_{12,45,4} + b_3 X_{12,45,1-3} \quad (1)$$

al cual debería corresponder una suma de cuadrados significativamente mayor que la del modelo:

$$Y = b_0 + b_1 X_{12,20,4} \quad (2)$$

que considera al rendimiento como función de la variable $X_{12,20,4}$ solamente. A este último modelo correspondió el valor más alto de $r = 0,726$ en el Cuadro 1.

El Cuadro 2 presenta el análisis de varianza para la diferencia entre las sumas de cuadrados de regresión para los modelos (1) y (2).

La inclusión de $X_{12,45,4}$ y $X_{12,45,1-3}$ junto a $X_{12,20,4}$ en el modelo 1 no aumenta significativamente la suma de cuadrados de regresión en relación al modelo 2, lo que pudiera interpretarse en el sentido que las tres variables X_{ijk} no son independientes entre sí. Esto significaría que el número de días con humedad a tensión igual o mayor que 12 atm., a 20 cm de profundidad durante el período 4, está asociado al número correspondiente obtenido al considerar igual tensión a 45 cm de profundidad en el mismo período. Esta asociación puede atribuirse a gradientes de humedad a través de las dos profundidades que no serían independientes entre sí. La aparente asociación entre las variables $X_{12,20,4}$ y $X_{12,45,1-3}$ no sería explicable en base a los antecedentes disponibles.

De los resultados del Cuadro 2, provenientes de un año de experimentación, se puede deducir que mediciones a 20 cm de profundidad son adecuadas para evaluar la tensión de la humedad en el suelo en relación a las necesidades de agua del trigo. El período del cultivo en que el rendimiento presenta la mayor sensibilidad a la tensión de la humedad en el suelo es el comprendido entre los estados de espigadura y grano lechoso. Estos resultados, como también la mejor correlación obtenida al considerar la tensión de 12 atm. como límite de disponibilidad, concuerdan con lo indicado en la literatura (8) (11).

RESUMEN

Se estudió la asociación entre el número de días que la humedad del suelo estuvo a tensiones iguales o mayores que 8-10-12-14 atm. medida a 20-45-75 cm de profundidad, en cinco

diferentes períodos de desarrollo, y el rendimiento del trigo fertilizado con 192 Kg/ha. de N y 240 Kg/ha. de P_2O_5 en 26 ensayos ubicados entre Aconcagua y Curicó. La medición de la tensión se efectuó mediante lectura de la resistencia eléctrica enterrada a las profundidades mencionadas en el perfil del suelo bajo el trigo en cada sitio. Mediante una curva de calibración se transformaron las lecturas de resistencia a tensión de humedad en el suelo. Los períodos de crecimiento en que se dividió el ciclo del trigo, fueron los siguientes: 1 = siembra a macolla; 2 = macolla a encañado; 3 = encañado a espigadura; 4 = espigadura a grano lechoso, y 5 = grano lechoso a madurez.

La mejor correlación con rendimiento se obtuvo para el número de días que el cultivo estuvo sometido a tensiones de humedad en el suelo iguales o mayores que 12 atm, a 20 cm de profundidad durante el período de crecimiento comprendido entre espigadura y grano lechoso.

SUMMARY

The association among wheat grain yield and the number of days the soil moisture tension was equal or greater than 8, 10, 12, or 14 atm. was studied. Wheat yields corresponding to the 192 Kg/ha. of N and 240 Kg/ha. of P_2O_5 fertilizer treatment in 26 fertilizer experiments were used. The experiments were located within the Aconcagua and Curicó area. Soil moisture tension was estimated by measuring the electrical resistance with blocks buried in the plots at depths of 20, 45 and 75 cm and transforming the readings into soil moisture tension by using a calibration curve. Development of the crop was divided into five stages as follows: 1 = from seeding to tillering; 2 = from tillering to jointing; 3 = from jointing to heading; 4 = from heading to milky grain; and 5 = from milky grain to maturity.

Grain yield presented the highest correlation with the number of days the soil moisture tension was 12 atm. at a depth of 20 cm during the heading to milky grain stage.

LITERATURA CITADA

1. BLOODWORTH, M. E., BARLESON, C. A. and COWLEY, W. R. Root distribution of some irrigated crops using undisturbed soil cores. *Agronomy Journal* 50: 317-320. 1958.
2. BOUYOUCOS, G. J., Soil moisture measurement improved. *Agricultural Engineering*, March 1961: 136-138. 1961.
3. BRIGGS, L. J. and SCHANTZ, H. L. The wilting coefficient for different plants and its indirect determination. *USDA, Bureau of Plant Industry. Bull.* 230. 1912. 31 pp.
4. BUCKMAN, H. O. and BRADY, N. C. The nature and properties of soils. The Macmillan Company. 7 th ed. 1969. pp. 161-173.
5. DANIELSON, R. E. Root system in relation to irrigation. *In Hagan M. R. et al, eds. Irrigation of Agricultural Lands. American Society of Agronomy Publisher. Madison, Wisconsin. 1967. pp. 390-424.*
6. DENMEAD, D. T. and SHAW, R. H. Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. *Agronomy Journal* 45: 385-390, 1962.
7. GARDNER, W. R. Dynamic aspects of water availability to plants. *Soil Science* 89: 63-73. 1960.
8. HAISE, H. R. and HAGAN, R. M. Soil plant and evaporative measurements as criteria for scheduling irrigation. *In Hagan, R. M. et al, eds. Irrigation of Agricultural Lands. American Society of Agronomy Publisher, Madison, Wisconsin. 1967. pp. 390-424.*
9. PHILIP, J. R. The physical principles of soil water movement during the irrigation cycles. 3th. *International Congress of Irrigation and Drainage. Proc.* 8: 125-154. 1957.
10. RICHARDS, L. A. and RICHARDS, S. J. Soil Moisture. *In Soils: The 1957 Yearbook of Agriculture. Government Printing Office, Washington. 1957. pp. 49-60.*
11. ROBINS, J. S., MUSICK, J. T., FINROCK, D. C. and RHOADES, H. F. Grain and field crops. *In Hagan, R. M. et al, eds. Irrigation of Agricultural Lands. American Society of Agronomy Publisher. Madison, Wisconsin. 1967. pp. 622-639.*
12. SHAW, R. H. and BURROWS, W. C. Water supply, water use and water requirement. *In Pierre, W. H. et al, eds. Advances in Corn production. The Iowa State University Press. Ames, Iowa. 1966. pp. 121-142.*
13. ——— and LAING, D. R. Moisture stress and plant response. *In Pierre W. H. et al, eds. Plant environment and efficient water use. American Society of Agronomy Publisher. Madison, Wisconsin. 1966. pp. 73-94.*
14. TAYLOR, S. A. Use of mean soil moisture tension to evaluate the effects of soil moisture on crops yields. *Soil Science* 74: 217-226. 1952.

15. —. Use of moisture by plants. *In* Soil: The 1937 Yearbook of Agriculture. Government Printing Office. Washington. pp. 61-66. 1957.
16. THORNTHWAITE, C. W. and MATHER, J. R. The water budget and its use in irrigation. *In* Water: The 1955 Yearbook of Agriculture. Government Printing Office. Washington 1955. pp. 346-358.
17. VEIHMEYER, F. J. and HENDRICKSON, A. H. Does transpiration decrease as the soil moisture decrease? Transaction American Geographic Union 36: 425-448. 1955.
18. WEAVER, J. E. Root development of yield crops. McGraw-Hills Company. 1926. pp. 291.