

LAS PROPIEDADES FISICAS, LOS FACTORES FISICOS DE CRECIMIENTO Y LA PRODUCTIVIDAD DEL SUELO

W. M. Forsythe

Físico de Suelos

*Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA
Turrialba, Costa Rica*

El crecimiento de las cosechas depende de varios factores. Algunos han seleccionado el término "factores de crecimiento" para su descripción. La siguiente ecuación muestra el concepto:

$$C = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad 1)$$

en que C representa el crecimiento de la cosecha y $X_1 \dots X_n$ son factores de crecimiento (15).

Idealmente, los factores de crecimiento comprenden el número mínimo de factores, los cuales determinan completamente y de manera directa el crecimiento de la cosecha. Los factores son únicos y se encuentran con la experiencia y la experimentación. Con el fin de encontrar dichos factores, utilizamos aquéllos que son de nuestro mejor conocimiento.

Muchas veces, estos factores no son únicos sino compuestos e inclusive, pueden ser factores asociados con o que dependen de un factor único.

Jenny (6) expresó la relación en la ecuación 1] identificando los factores de crecimiento en términos generales que nos permite ordenar el problema:

$$R = f (cl, p, h, s, t) \quad 2]$$

en que R = rendimiento. Los factores de crecimiento en el lado derecho de la ecuación son, en realidad, factores compuestos que pueden dividirse para formar otros factores más básicos. Los símbolos en la ecuación son: cl = clima; p = planta; h = hombre; s = suelo y t = tiempo.

El factor clima podría considerarse como un compuesto de temperatura, lluvia, luz y viento; el factor planta, como variedad; el factor hombre, como las diversas prácticas de manejo tales como la arada, la fertilización y el control de plagas; el factor suelo, como los factores químicos y físicos del mismo y el factor tiempo permanece igual. La ecuación 2] se refiere a un sistema de producción que incluye el suelo como un factor compuesto de crecimiento. Si queremos pensar en la productividad de unos suelos, tenemos que considerarla bajo condiciones iguales de cl, p, h y t, como se representa en la siguiente ecuación:

$$R = f (s)cl, p, h, t \quad 3]$$

El factor compuesto suelo comprende a su vez varios factores. Hay factores químicos; tales como el pH, el contenido de sal, el contenido disponible de los diferentes elementos esenciales para el crecimiento de la planta y el contenido de los elementos tóxicos para la planta. Las propiedades químicas del suelo controlan los factores químicos, propiedades como la naturaleza de los minerales del suelo, el tipo de arcilla, la capacidad de intercambio de cationes y el análisis químico de las sales solubles e insolubles.

También, existen factores físicos como la aeración, la succión total, la temperatura y la resistencia mecánica al desarrollo de las raíces. Hay varias propiedades físicas del suelo que influyen en los factores físicos de crecimiento, tales como la posición fisiográfica, el relieve, la pendiente, el volumen, la profundidad de capas duras o de roca, la profundidad de la tabla de agua, la textura, la densidad aparente, la densidad de las partículas, las curvas de retención de agua, la succión osmótica de la solución del suelo, la penetrabilidad, la infiltración, la conductividad hidráulica y la temperatura. Muchas de estas propiedades están relacionadas con el clima afectando los factores de crecimiento. Por ejemplo, la infiltración, la conductividad hidráulica y la posición fisiográfica interaccionan con la lluvia para determinar el drenaje interno y así, la aeración del suelo.

Existen ciertas propiedades físicas del suelo que no están directamente vinculadas con los factores físicos de crecimiento sino con la preparación de la tierra y su manejo para lograr un estado físico que provea los valores óptimos de factores físicos. Tales factores son el límite inferior de plasticidad,

el punto adhesivo de suelo y su susceptibilidad a la compactación. Varias propiedades físicas del suelo influyen en cada factor físico de crecimiento. Por lo tanto, es conveniente considerar cada factor físico y las propiedades físicas del suelo que afectan a dicho factor.

La Succión Total

Los factores que la influyen están representados en la Figura 1. Las raíces de las plantas tienen que aplicar cierta fuerza para extraer y así, absorber el agua del complejo agua-suelo. Esto es necesario ya que ese complejo tiene una atracción para el agua que depende de la humedad del suelo, el tipo de arcilla en el suelo, la textura y la concentración de sales solubles en la solución del suelo. Generalmente, una arcilla montmorilonítica tiene mayor atracción que una caolinítica; un suelo más fino tiene mayor atracción que uno más grueso y el más seco tiene mayor atracción que uno más húmedo. Las curvas de retención de agua de un suelo son el resultado total de la atracción debida al tipo de arcilla, de la textura y de la humedad. Esta atracción se mide en términos de una presión negativa o una succión y se llama la succión matriz, porque es debida a la matriz del suelo.

Las raíces de las plantas tienen membranas semipermeables en sus células y por lo tanto, son sensibles a la presión osmótica. Preferimos aquí llamar a la presión negativa osmótica como succión osmótica. Esta fracción de la succión de la solución del suelo depende de la concentración molar de sales solubles. Desde el punto de vista de la planta, es necesario extraer el agua del suelo contra la succión matriz y también contra la succión osmótica. La suma de estas dos succiones se llama succión total y se ha encontrado que el rendimiento de la planta es afectado por la succión total del agua cuando se trata de su crecimiento (19). La succión es el concepto básico para describir el agua del suelo y no sólo la humedad. Diferentes suelos a diferentes humedades pueden proporcionar la misma succión, pero el efecto sería el mismo, a pesar de tener valores variables de humedad. Cuando la concentración de la sal en la solución del suelo es baja, la succión osmótica es poca y la succión total es casi igual a la succión matriz.

Varias cosechas extraen el agua del suelo contra la succión total con diferentes grados de facilidad. Por ejemplo, la caña de azúcar inicia un descenso significativo en su crecimiento si tiene que extraer agua de un suelo franco con la succión total mayor de 2 bars a una profundidad de 30 cm (9). En cambio, la alfalfa solamente pierde alrededor de un 20 por ciento de su rendimiento si extrae agua de un suelo franco a 15 cm de profundidad con la succión total mayor de 5,7 bars - calculado con los datos de Taylor (4, 13).

Se puede apreciar que cada cosecha tiene su propia habilidad de extraer agua del suelo y a su vez, cada suelo tiene su propia característica para proporcionar agua a varias succiones. Un ajuste entre estas dos características determinará el agua disponible en el suelo para un creci-

miento adecuado de la cosecha. Ya que la planta responde a la succión total del agua del suelo, la misma define en forma óptima el factor de crecimiento que representa el agua.

Se ha dado énfasis a la diferencia entre los factores físicos de crecimiento y las propiedades físicas que influyen en estos factores. La Figura 1 nos muestra cómo varias propiedades físicas y físico-químicas del suelo y del clima influyen en la succión total del agua del suelo. En la práctica se aprecia la ventaja de medir directamente la succión total del agua del suelo cuando se tiene como objetivo evaluar un ensayo de fertilización. La succión matriz se evalúa midiendo la humedad del suelo e identificando la succión correspondiente de la curva de retención de agua. También se puede usar un tensiómetro que mide la succión matriz 0 - 0,8 bars y bloques de yeso que miden la succión entre 1 - 15 bars. La succión osmótica se calcula de la concentración de sales solubles en la solución del suelo. La medición de la conductividad eléctrica de un extracto nos sirve para calcular la succión osmótica (16).

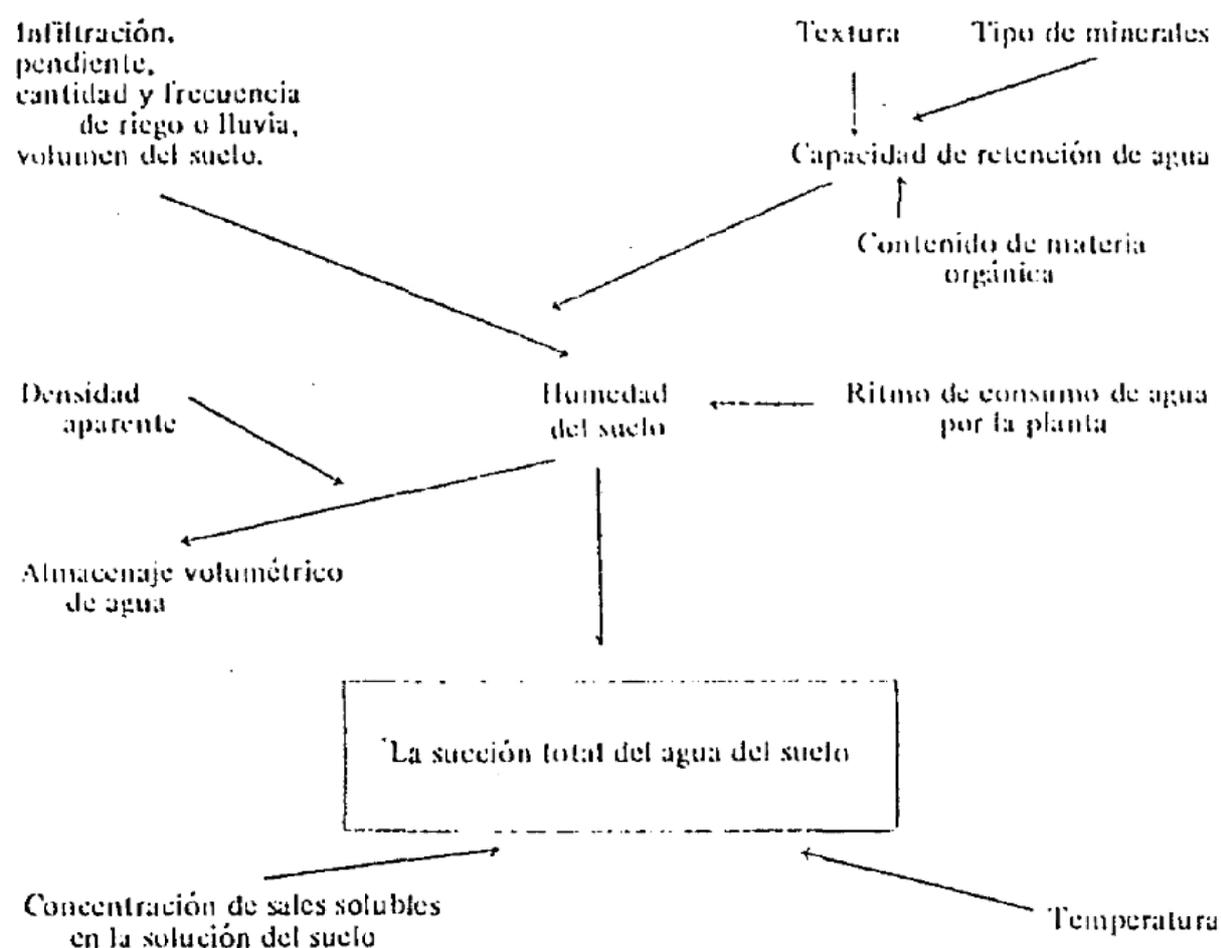


FIGURA 1. Relación entre las propiedades físicas y el factor de crecimiento, la succión total.

La Aeración

Sabemos que las raíces de las plantas necesitan oxígeno para respirar. Una planta tendrá buena aeración, cuando el suelo no restrinja el flujo requerido de oxígeno hacia las raíces, ni el flujo de CO_2 desde ellas. Se considera que el mecanismo más importante para el movimiento de gases dentro del suelo es por medio de la difusión, la cual es impulsada por la gradiente de concentración de los gases. Esta concentración es relativamente estable en la atmósfera encima del suelo, siendo 20,96 por ciento de O_2 (por volumen), 79,01 por ciento de N_2 y 0,03 por ciento de CO_2 . En cambio, en un suelo el porcentaje de O_2 y CO_2 , dependería de la profundidad, la actividad biológica o sea, el consumo de O_2 y la liberación de CO_2 y también la difusividad del suelo. En el suelo se encuentra una concentración de oxígeno menor que la de la atmósfera y por lo tanto, hay una difusión de oxígeno de la atmósfera hacia adentro del perfil. La concentración de CO_2 , en cambio, es mayor en el suelo y ocurre una difusión de CO_2 hacia la atmósfera.

Se puede considerar el requisito de aeración de una planta como el flujo de oxígeno requerido por ella. Este flujo ha sido medido directamente con células electropotenciales de concentración con electrodos de platino. El ritmo de flujo de oxígeno se ha designado como ritmo de difusión de oxígeno (RDO). Stolzy y Letey (11) estimaron que el RDO fuertemente limitante del crecimiento de las raíces es $0,2 \times 10^6$ g/cm²/minuto. El RDO se puede considerar como un factor de crecimiento de las plantas. Depende también de la especie de la planta y de las propiedades físicas del suelo.

Se puede apreciar que la planta misma tiene un ritmo de consumo de oxígeno y que si el suelo no impide la difusión, el RDO equivaldría al consumo de la planta. Sin embargo, si la difusividad del suelo es restringida, la gradiente de concentración del oxígeno tendría que aumentar para mantener el mismo RDO. Entonces, resultarán concentraciones menores de oxígeno y mayores de CO_2 en el suelo. Hay trabajos que demuestran este principio (3). Si la difusividad del suelo es bastante restringida será difícil que el suelo mantenga el RDO requerido por la planta por cambios en la gradiente de oxígeno, y la aeración será reducida.

Hay relaciones directas entre el espacio aéreo de un suelo y la difusividad (8, 12). Así, se puede utilizar el espacio aéreo como un índice de la difusividad del suelo. Se ha estudiado el efecto de este espacio aéreo sobre el crecimiento de algunas plantas, habiéndose encontrado que la *remolacha* necesita un mínimo de 8 por ciento de espacio aéreo para un buen rendimiento en un suelo arcilloso a 7,5 cm de profundidad (2) y que la caña de azúcar necesita un mínimo de 11 por ciento en un latosol bajo húmico (10). La Figura 2 muestra la relación entre las propiedades físicas del suelo y el factor físico de crecimiento, el RDO.

La Temperatura

Es bien conocido el efecto de la temperatura sobre las reacciones físicas y químicas, siendo 2 el Q_{10} de reacciones químicas y 1,3 el Q_{10} de reacciones físicas. Varias plantas se adaptan a diferentes temperaturas del

suelo. En muchos casos, se nota el aumento del crecimiento de la planta con un aumento de la temperatura. El ritmo de aumento de la temperatura del suelo juega un papel importante en la descongelación del suelo después del invierno y la preparación del suelo para mantener el crecimiento.

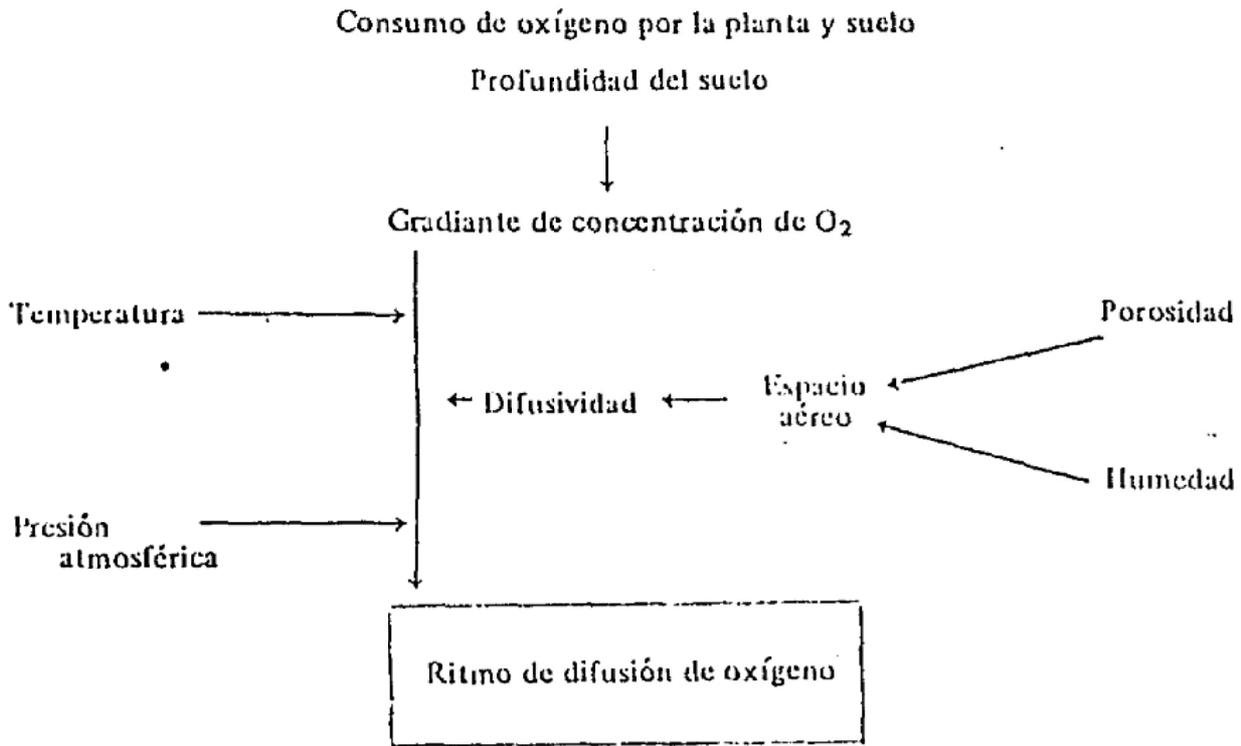


FIGURA 2. Relación entre las propiedades físicas y el factor de crecimiento, el RDO.

La superficie del suelo funciona como una fuente plana de calor o una salida plana de calor. Además de las características térmicas del suelo, la temperatura de éste depende de la cantidad de calor que entre o salga de su superficie. La fuente de calor es la radiación solar, la cual llega a la superficie del suelo, siendo absorbida la mayor parte por una capa muy delgada del suelo (2-3 mm) y la otra parte es reflejada por la superficie. La energía absorbida sirve para calentar el suelo y el aire sobre él y también para proporcionar el calor latente de evaporación del agua del suelo. La superficie del suelo también difunde radiación de onda larga.

El calor utilizado para calentar el suelo es transmitido en el suelo por el proceso de conducción y la velocidad del flujo del calor depende de la gradiente de temperatura en el suelo y de la conductividad térmica del mismo. La temperatura del suelo depende del flujo de calor a través de él y su capacidad de calor. El estado de preparación del suelo puede afectar la evaporación de agua de la superficie del suelo y así, la temperatura de la misma. La arada puede aumentar la evaporación del suelo y también bajar la conductividad térmica de la capa trabajada. Un suelo con mayor humedad tiene mayor capacidad de calor, debido a la alta capacidad de calor del agua. Por lo tanto, un suelo mojado se calienta o se enfría con más intercambio de calor que un suelo seco.

La conductividad térmica de un suelo depende de su composición mineral, su porosidad y su humedad. Con mayor humedad, la conductividad térmica del suelo aumenta. El ritmo de cambio de la temperatura del suelo después de un cambio en aquélla del ambiente, depende de la capacidad de calor y de la conductividad térmica. El efecto de un cambio de humedad sobre el ritmo de cambio de temperatura de un suelo, depende de las magnitudes relativas de los cambios provocados por dicha variación de humedad en la capacidad de calor y en la conductividad térmica [(17) - Capítulos 4 y 7.]

Como se ha apreciado, la temperatura del suelo depende del clima y generalmente se nota una fluctuación diaria en la temperatura y otra fluctuación más gradual de ciclo anual o estacional. La amplitud de dichas variaciones se encuentra más reducida a mayor profundidad en el suelo. En la figura 3 apreciamos cómo varias propiedades del suelo y su ambiente influyen en la temperatura del suelo.

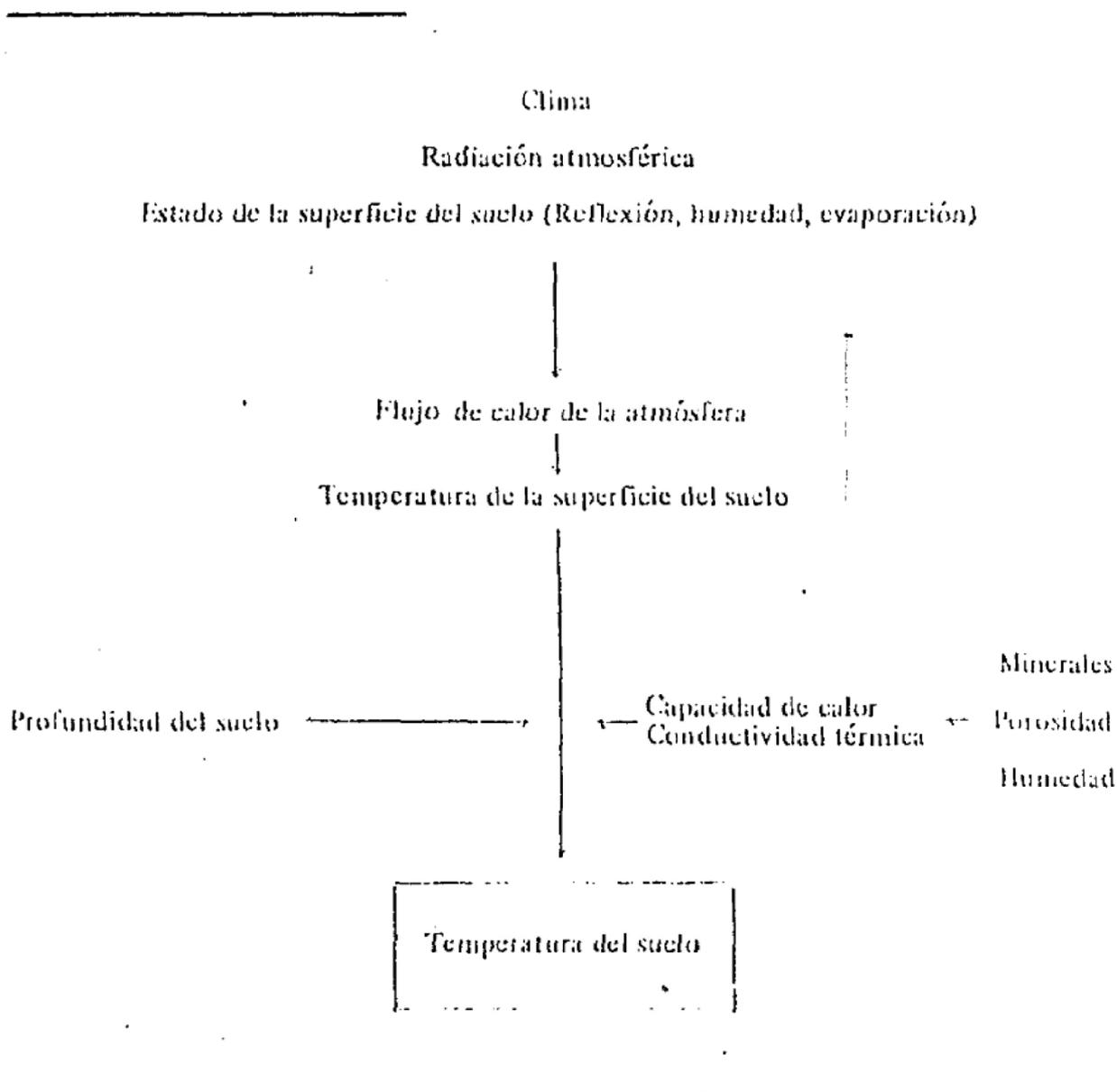


FIGURA 3. Relación entre las propiedades físicas y el factor de crecimiento, la temperatura.

Resistencia Mecánica

Las observaciones en el campo siempre nos han dejado ver que la compactación del suelo restringe el crecimiento de las raíces y por lo tanto, de las plantas. Veihmeyer y Hendrickson (18) encontraron en girasol que ninguna raíz penetró ningún suelo con una densidad aparente de 1,9 g/ml o mayor. En algunos suelos los valores limitantes fueron 1,7 a 1,8, pero en arcillas, los valores fueron 1,6 - 1,7. En la arcilla Aiken (suelo latosólico) el valor crítico fue 1,46. Sin embargo, la densidad aparente depende del valor de la densidad de los sólidos la cual varía según el suelo. Se ha notado también que el estado de empaquetamiento y la historia previa del suelo influyen mucho en la resistencia del suelo a un penetrómetro y por lo tanto, la densidad aparente es un índice de resistencia con muchas fallas (7).

El trabajo de Pfeffer (5) logró medir las presiones mecánicas que aplican las raíces a una barrera mecánica. Barley (1) correlacionó la elongación de las raíces seminales de maíz con la resistencia al penetrómetro. Taylor y Gardner (14) encontraron una relación estrecha entre la penetración del suelo por las raíces del algodón y la resistencia al penetrómetro.

La resistencia de un suelo al penetrómetro es una medida cuyo uso tiene un buen porvenir por ser la medida que representa la resistencia mecánica que experimenta una raíz. Dicha resistencia depende, en gran parte, de la humedad del suelo además de otros factores antes mencionados. El penetrómetro es un aparato sencillo y portátil que se podría utilizar para caracterizar la resistencia mecánica de un suelo en trabajos de rutina. La Figura 4 nos muestra la relación que existe entre las propiedades físicas del suelo y la resistencia mecánica.

Método para tratar propiedades físicas y la importancia de su consideración en ensayos de productividad

La fertilidad y el ambiente químico del suelo se pueden cambiar mediante la aplicación de fertilizantes y enmiendas químicas. La factibilidad de dichos cambios depende de consideraciones económicas. El cambio en las propiedades físicas es más difícil. La arada es la forma más común de cambiar la porosidad de la capa superficial del suelo; sin embargo, además de tratar de cambiar las propiedades físicas, se debería procurar el desarrollo del uso y manejo del suelo con el fin de lograr proporcionar valores más adecuados de los factores físicos de crecimiento para el cultivo en cuestión. La interacción entre el clima y las propiedades físicas del suelo tiene gran importancia en este caso. Hay varias combinaciones de propiedades físicas del suelo y del ambiente que puede resultar en el mismo valor de un factor físico de crecimiento en el suelo. Por ejemplo, para un cultivo con un consumo diario de agua dado, existe la posibilidad de absorber una cantidad determinada de agua con la misma succión promedio, tanto de un suelo con gran retención de agua y poca frecuencia de lluvia o riego, como de otro con poca retención de agua pero con mayor frecuencia de lluvia o riego.

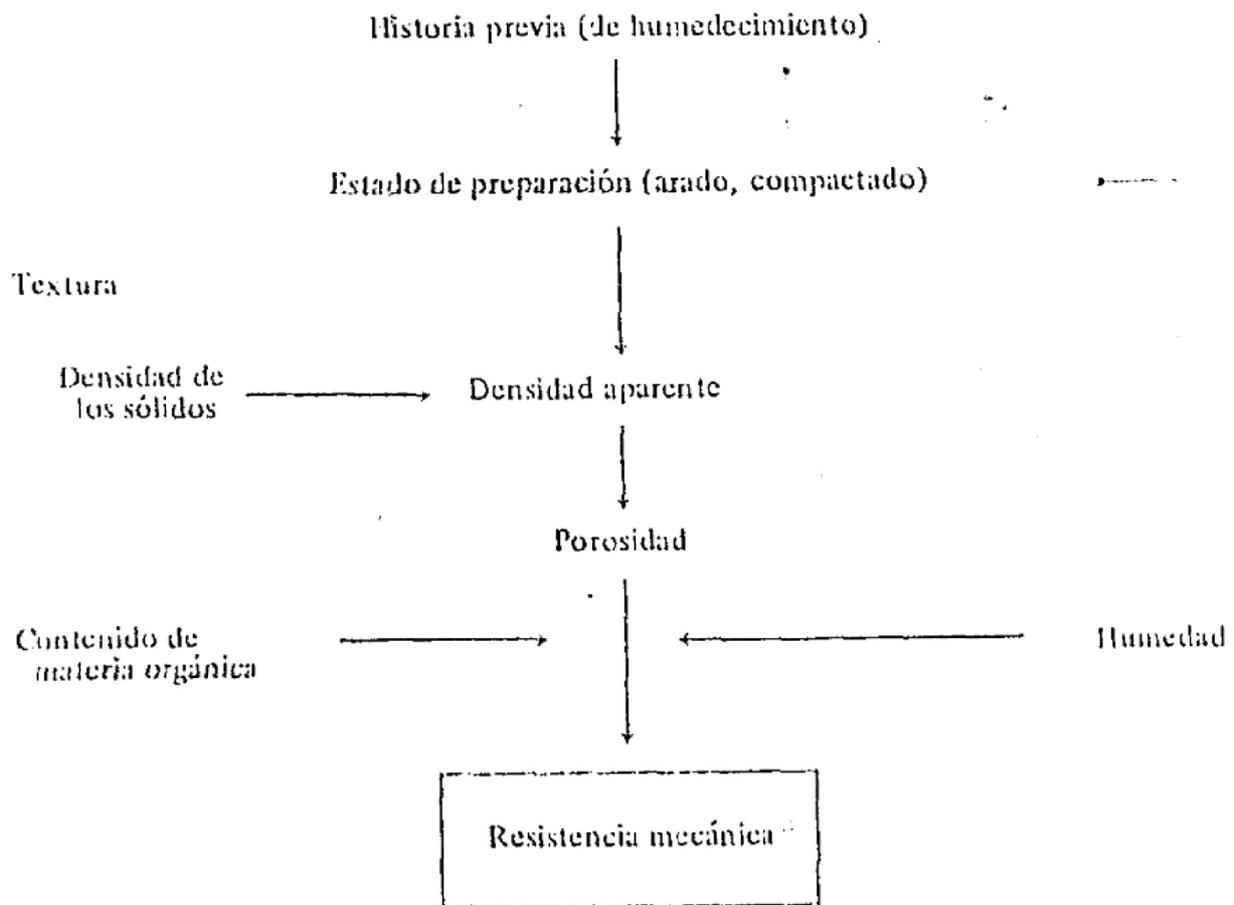


FIGURA 4. Relación entre las propiedades físicas y el factor de crecimiento, la resistencia mecánica.

El manejo del suelo puede ser determinado por la selección previa de un terreno para un cultivo dado, según el clima actual y las necesidades del cultivo (4). Existe la necesidad de caracterizar numéricamente los requisitos físicos del crecimiento de las plantas, así como las propiedades físicas del suelo. Un concepto como la estructura del suelo es difícil de expresar en números, pero, considerando varios procesos físicos en el suelo, una buena estructura tiene distintos sentidos. En la aeración del suelo puede ser alta porosidad; en el flujo de agua en el suelo puede ser alta conductividad hidráulica; en la erosión, puede ser una estabilidad de agregados; para la arada, puede ser poca resistencia cortante y para el crecimiento de las raíces, puede ser poca resistencia a la penetración. Es posible expresar dichos sentidos específicos del concepto estructura en términos numéricos, y por lo tanto, nos conviene considerar estos componentes de la estructura.

En un ensayo de fertilización es importante dar información general sobre todos los factores posibles que intervienen. La variabilidad de clima y suelo hace muy difícil la aplicación de resultados de un lugar a otro, pero muy a menudo se experimenta la obligación de interpolar y extrapolar los resultados de un ensayo. Teniendo la información completa

sobre el clima y el suelo, se facilitaría mucho esta labor. Las propiedades físicas del suelo comprenden un sector importante de información necesaria para obtener mejores correlaciones de rendimientos de un lugar a otro.

COMPENDIO

Se ha destacado la diferencia entre las propiedades físicas del suelo y los factores físicos de crecimiento de las plantas en el suelo. Las propiedades físicas influyen en los factores físicos de crecimiento, los cuales son la succión total del agua, el ritmo de difusión de oxígeno, la temperatura y la resistencia mecánica a la penetración por las raíces. Todos estos factores de crecimiento influyen directamente en el crecimiento de las plantas.

Hay otras propiedades físicas del suelo que no influyen en los factores físicos de crecimiento pero que son importantes en la preparación y manejo del suelo, por ejemplo, el límite inferior de plasticidad. Es difícil cambiar las propiedades físicas del suelo y se ha dado énfasis a la importancia de obtener los valores adecuados de los factores físicos para un cultivo por el manejo de un suelo con propiedades dadas y con la selección previa de suelos adecuados.

El clima interacciona directamente con el suelo, afectando sus propiedades y factores físicos. La variabilidad del clima hace muy difícil la aplicación de resultados de un ensayo de fertilización de un lugar a otro, pero muy a menudo se hace necesario extrapolar o interpolar los resultados de un ensayo. Teniendo información completa sobre el clima y el suelo, se facilita mucho esta labor. Las propiedades físicas del suelo, comprenden un sector importante de información para la obtención de mejores correlaciones de rendimientos de un lugar a otro.

Summary

The difference between soil physical properties and physical plant growth factors of the soil has been pointed out. Physical properties affect the physical growth factors, total suction, oxygen diffusion rate, temperature and mechanical resistance to root penetration. All these growth factors affect directly plant growth.

There are other soil physical properties that do not influence the physical growth factors but they are quite important, in soil preparation and management. I.e.: The lower plastic limit. It is difficult to change the

physical properties of the soil and emphasis has been placed on the importance of obtaining suitable values of the physical growth factors of a crop through management of a soil with given physical properties and the previous selection of suitable soils.

Climate interacts directly with the soil to affect its physical properties and the physical growth factors. Soil and climate variability makes difficult the application of results of fertilizer trials from one location to another. However, it is often necessary to extrapolate or interpolate the results of a trial. This task is aided by having complete information on climate and soil. Soil physical properties form an important part of the information needed to obtain better yield correlations from one place to another.

EWAD

LITERATURA CITADA

1. BARLEY, K. P. 1962 The effects of mechanical stress on growth of roots. *J. Exp. Bot.* 13:95-110.
2. BAVER, L. D. y R. B. FARNSWORTH. 1940. Soil structure in the growth of sugar beets. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 5:45-48.
3. BOYNTON, D. y O. C. COMPTON. 1944. Normal seasonal changes of oxygen and carbon dioxide percentages in gas from the larger pores of three orchard subsoils. *Soil Science* 57:107-117.
4. FORSYTHE, W. M., J. AGUAYO y C. GUERRERO. 1967. Uso de medidas físicas de suelos arenosos para evaluar en ellos el manejo del complejo agua-aire-planta. *Fitotecnia Latinoamericana* 4:81-94.
5. GILL, W. R. y G. H. BOLT. 1955. Pfeffer's studies of the root growth pressures exerted by plants. *Agron. J.* 47:166-168.
6. JENNY, H. 1941. *Factors of soil formation*. McGraw-Hill. 281 p.
7. PEARSON, R. W. 1966. Soil environment and root development. In *Plant Environment and Efficient Water Use*. 295 p. Am. Soc. of Agronomy, Madison.
8. PENMAN, H. L. 1940. Gas and vapour movements in soils. I. The diffusion of vapours through porous solids. *J. Ag. Sci.* 30:437-462.
9. ROBINSON, F. E. 1963. Soil moisture tension, sugar cane stalk elongation and irrigation control. *Agron. Journ.* 55:481-483.
10. ROBINSON, F. E. 1964. Required percentage air space for normal growth of sugar cane. *Soil Science* 98:206-207.
11. STOLZY, L. H. y J. LETEY. 1964. Characterizing soil oxygen conditions with platinum microelectrodes. *Advances in Agronomy* 16:249-280.
12. TAYLOR, S. A. 1949. Oxygen diffusion in porous media as a measure of soil aeration. *Soil Science Soc. Amer. Proc.* 14:55-61.
13. TAYLOR, S. A. 1952. Use of mean soil moisture tension to evaluate the effect of soil moisture crop yields. *Soil Sci.* 74:217-226.
14. TAYLOR, H. M. y H. R. GARDNER. 1963. Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content, and strength of soil. *Soil Sci.* 96:153-156.

16. U. S. D. A. 1954. Diagnostics and improvement of saline and alkali soils. Handbook No. 60. 160 p.
17. VAN WIJK, W. R. (Editor). 1963. Physics of plant environment. North-Holland. Amsterdam. 382 p.
18. VEHMEYER, F. J. y A. H. HENDRICKSON. 1948. Soil density and root penetration. Soil Sci. 65:487-493.
19. WADLEIGH, C. H. 1946. The integrated soil moisture stress upon a root system in a large container of saline soil. Soil Science 61:225-238.