

PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO QUE AFECTAN EL DESARROLLO VEGETAL

Daniel L. Martino*

1. INTRODUCCION

El suelo es el medio en el cual ocurre buena parte del intercambio de materia y energía de las plantas con su ambiente. Las raíces son los órganos especializados para realizar dicho intercambio, y de su proliferación depende la capacidad de las plantas para cosechar nutrientes y agua almacenados en el suelo.

De las innumerables propiedades físicas del suelo que podrían evaluarse, sólo cuatro (Letey, 1985) afectan directamente el crecimiento de las plantas: disponibilidad de agua, disponibilidad de oxígeno, temperatura, y resistencia mecánica al desarrollo de órganos subterráneos.

Otras propiedades comúnmente consideradas, tales como densidad aparente, estabilidad de agregados, textura, conductividad hidráulica, densidad de partícula, etc., afectan indirectamente el desarrollo vegetal a través de sus efectos sobre los cuatro parámetros fundamentales arriba mencionados.

La determinación de los niveles óptimos de estos factores es complicada por dos razones: a) existe fuerte interacción entre ellos, resultando difícil aislar los efectos de una de las variables de los efectos de las demás; y b) la variabilidad temporal y espacial de los mismos es muy marcada, aún en condiciones controladas, siendo la respuesta vegetal la integración de estas variaciones.

En las secciones siguientes se analiza, en forma esquemática, los mecanismos a través de los cuales dichos factores afectan el crecimiento y funcionamiento de las raíces.

2. DISPONIBILIDAD DE AGUA

El nivel de agua disponible es uno de los factores que mayor incidencia tiene sobre el desarrollo de los cultivos. Por otra parte, el contenido de agua del suelo afecta marcadamente la disponibilidad de oxígeno, la temperatura del suelo, y la resistencia mecánica al crecimiento de raíces.

El agua ocupa el espacio poroso del suelo, e interacciona eléctricamente con la matriz del suelo. Esta interacción determina que una planta, para absorber agua, deba aplicar una presión que supere la fuerza de retención de agua por la matriz del suelo. Dicha fuerza es mínima cuando el contenido de humedad es cercano a la saturación, y aumenta a medida que disminuye el contenido de agua del suelo. La razón de ello es que el agua menos fuertemente retenida por la matriz del suelo es la que llena los poros de mayor tamaño, que son los primeros en vaciarse cuando se seca el suelo. La relación entre contenido de humedad -expresado como porcentaje del volumen de suelo ocupado por agua- y el potencial de agua en el suelo -expresado como la presión con que se encuentra adsorbida a la matriz del suelo- es una propiedad fundamental de un suelo, y es conocida como la curva característica de retención de humedad (Hamblin, 1985; Hanks, 1992). Dado que esta curva depende de la distribución de tamaño de poros, la forma de la misma es función de la estructura del suelo (Gupta *et al.*, 1989).

No toda el agua contenida en un suelo puede ser extraída por las plantas. De acuerdo al concepto clásico, agua disponible es aquella que se encuentra entre dos límites: capacidad de campo y marchitez permanen-

te. Capacidad de campo es el contenido de humedad que se alcanza luego de que un suelo saturado se deja drenar hasta que el drenaje se reduce a un mínimo (Veihmeyer y Hendrickson, 1949), y generalmente corresponde a potenciales de matriz de -10 a -50 kPa (por convención, los potenciales de agua en el suelo se expresan con signo negativo). Marchitez permanente es el contenido mínimo al cual una planta puede crecer, y generalmente corresponde a potenciales cercanos a -1.5 MPa (Hillel, 1980).

En la realidad, estos límites son modificados por un número de factores, y en general, la cantidad de agua disponible es menor que la que marca la diferencia entre los mismos, lo cual llevó a Letey (1985) a definir el concepto de rango de agua disponible no limitado.

El concepto de capacidad de campo puede resultar invalidado en las siguientes situaciones: 1) dado que el proceso de drenaje luego de la saturación ocurre durante unas pocas horas (suelos livianos) a varios días (suelos pesados), durante dicho lapso el agua por encima de capacidad de campo puede estar disponible; 2) la presencia de horizontes impermeables por debajo del horizonte en cuestión puede determinar que el suelo no drene libremente, y el agua por encima de capacidad de campo también esté disponible. 3) en muchos suelos la disponibilidad de oxígeno para las raíces puede estar muy restringida a niveles de humedad aún inferiores a capacidad de campo, impidiendo la utilización del agua por las raíces.

El límite inferior de disponibilidad de agua coincide con el punto de marchitez permanente cuando hay una adecuada exploración del suelo por las raíces. Frecuentemente, la alta resistencia mecánica del suelo que se desarrolla a bajos contenidos de humedad hace que, efectivamente, este límite ocurra a potenciales mayores que -1.5 MPa. Cabe mencionar que la distancia desde la cual las raíces son capaces de extraer agua se reduce a unos pocos milímetros en suelo seco, debido a la baja conductividad hidráulica (Gardner, 1960), por lo que la extracción a bajos potenciales depende de la presencia de alta densidad de raíces.

3. DISPONIBILIDAD DE OXIGENO

Las raíces y microorganismos de la rizósfera utilizan principalmente oxígeno como aceptor final de electrones en el proceso respiratorio. La energía química acumulada en este proceso es fundamental para la absorción activa de ciertos minerales. El buen funcionamiento de un sistema de raíces depende entonces de un suministro sostenido de oxígeno, principalmente por difusión, desde la atmósfera.

Una molécula de oxígeno que se desplaza desde la atmósfera hasta su sitio de consumo en una raíz debe atravesar el espacio poroso del suelo, que contiene agua y gases. Debido a su baja solubilidad en agua (0.039 g/L), la difusividad del oxígeno es aproximadamente 10.000 veces mayor en aire que en agua. Esto implica que la utilización de oxígeno por las raíces depende de la presencia de un sistema continuo de poros del suelo libres de agua. La distribución del tamaño de poros es pues, una propiedad del suelo fundamental en la determinación del grado de aireación de las raíces. La posición topográfica, a través de su efecto sobre la capacidad de drenaje, es otro factor del suelo relacionado con el suministro de oxígeno a las raíces.

Comúnmente se considera que no existirían limitaciones en el suministro de oxígeno cuando la porosidad llena de aire es al menos 10% del volumen total de suelo (Grable, 1971). Sin embargo, este valor empírico sólo sería válido para suelos de texturas medias. Una forma más precisa de estimar el nivel de disponibilidad de oxígeno es a través de la tasa de difusión de oxígeno a un microelectrodo de platino ubicado dentro del suelo (Lemon y Erickson, 1952). Los valores críticos por debajo de los cuales el crecimiento de las raíces es afectado, oscilan entre 0.2 y 0.3 $\mu\text{g O}_2 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ (Stolzy y Letey, 1964; Erickson, 1982).

Cannell y Jackson (1981), y Drew y Stolzy (1991), revisaron las consecuencias de las deficiencias de aireación en los suelos, y los mecanismos de las plantas para evitarlas o tolerarlas. Entre éstos, se destaca la presencia de aerénquima (Thomson *et al.*, 1990) y la producción de raíces cerca de la superficie.

4. TEMPERATURA

La superficie del suelo recibe energía en forma de radiación solar (onda corta) y radiación de la atmósfera (onda larga), a la vez que emite radiación de onda larga en función de su temperatura. A su vez, parte de la energía solar es reflejada por la superficie. El balance de todos estos procesos, llamado radiación neta (Davies e Idso, 1979), es positivo durante las horas del día, y negativo durante la noche. La energía de radiación neta disponible es en parte almacenada como calor en el suelo; utilizada en procesos biológicos; disipada como calor por convección; y disipada como calor latente por evaporación de agua desde la superficie (Rosenberg *et al.*, 1983). A elevados contenidos de humedad en el suelo, la evaporación de agua es el proceso que consume mayor cantidad de energía, mientras que, cuando el suelo está seco, la mayor parte de la radiación neta se utiliza para calentar el suelo (Ross *et al.*, 1985), aunque este calor generalmente se pierde como radiación nocturna. La temperatura del suelo es entonces menor y menos variable en suelo húmedo que en suelo seco (Hanks, 1992).

La proporción de la radiación neta que se utiliza para almacenaje de calor en el suelo depende de la estructura del suelo, y la cantidad de agua que contiene. Debido al elevado calor específico del agua, los suelos húmedos son capaces de absorber importantes cantidades de calor sin causar mayores cambios en la temperatura. Dado que el movimiento de calor es causado por gradientes de temperatura, relativamente poco calor alcanza las capas profundas del perfil.

El efecto de la estructura del suelo se manifiesta en condiciones de suelos relativamente secos. El calor específico de los minerales del suelo es aproximadamente cinco veces menor que el del agua, por lo que fácilmente se generan gradientes de temperatura. Cuanto más numerosos son los puntos de contacto entre partículas, mayor es la capacidad del suelo de conducir calor. En general, suelos compactados, o de texturas livianas son los que presentan mayores difusividades térmicas.

Las temperaturas óptimas para el desarrollo

de raíces son algo menores que para el de órganos aéreos, y oscilan, para la mayoría de las especies, entre 20 y 25°C (Bowen, 1991).

5. RESISTENCIA MECANICA

Para crecer en un medio poroso como el suelo, las raíces deben superar la resistencia mecánica que éste impone, de dos formas posibles: a) penetrando poros o canales preexistentes, de diámetro igual o mayor al de las raíces (Wiersum, 1957); y b) deformando el suelo por deslizamiento con compresión (Barley y Greacen, 1967). La resistencia mecánica integra entonces, la proporción de poros de tamaño suficiente, con la susceptibilidad del suelo a ser deformado. Ésta depende de tres propiedades fundamentales: la cohesividad, el ángulo de fricción interna (que es una medida de la esfericidad y proximidad de las partículas de suelo) y la compresibilidad.

En suelo saturado, tanto la cohesividad, como el ángulo de fricción interna son mínimos, mientras que la compresibilidad es máxima, resultando en baja resistencia mecánica. A medida que el suelo se seca, la resistencia a la penetración se incrementa exponencialmente, siendo el efecto más marcado a altas densidades aparentes (Henderson *et al.*, 1988). Dado que, tanto el contenido de humedad como la densidad aparente son altamente variables en suelos agrícolas, es de esperar que las raíces de los cultivos sean sometidas a niveles muy variables de resistencia mecánica a lo largo de su ciclo de desarrollo.

La resistencia mecánica de los suelos es comúnmente medida con sondas metálicas de penetración estática, siendo el penetrómetro de cono la forma más difundida. Si bien, a los efectos de medir la resistencia del suelo al crecimiento de raíces, este método presenta algunas limitaciones, la medida obtenida con un penetrómetro no es empírica, y puede derivarse teóricamente (Farrell y Greacen, 1966). La relación entre resistencia a penetración de un cono y la de una raíz sí debe establecerse en forma empírica.

El crecimiento de las raíces es determinado por la presión de turgencia de las células

meristemáticas, a la que se opone en cierta medida la rigidez de las paredes celulares. La máxima presión que las raíces pueden ejercer oscila entre 0.7 y 1.3 MPa en la dirección axial, y entre 0.4 y 0.6 MPa en la dirección radial (Pfeffer, 1893, compilado por Gill y Bolt 1955; Misra *et al.*, 1986).

La resistencia a la penetración de un cono, también denominada índice del cono, ha sido relacionada con crecimiento de raíces en una gran variedad de situaciones. Taylor *et al.*, (1966) encontraron una única relación aplicable a varios suelos, en condiciones de laboratorio. Según la misma, la capacidad de desarrollo de las raíces decrecía gradualmente a medida que aumentaba el índice del cono, inhibiéndose completamente a 2 MPa. En condiciones de campo, para un amplio rango de tipos de suelo, especies, y técnicas experimentales, los valores críticos reportados oscilan entre 1.5 y 5.6 MPa (Gerard *et al.*, 1982; Grimes *et al.*, 1975). Esta variabilidad obedecería al hecho de que, en suelo indisturbado, la presencia de fracturas y biocanales permite a las raíces moverse aún cuando la resistencia mecánica de la matriz del suelo es elevada. Martino y Shaykewich (1994) verificaron que, aislando estos efectos, la relación de Taylor *et al.* (1966) también se aplicó en condiciones de campo para trigo y cebada en tres suelos contrastantes.

BIBLIOGRAFIA CITADA

- BARLEY, K.P.; GREACEN, E.L.** 1967. Mechanical resistance as a soil factor influencing the growth of root and underground shoots. *Adv. Agron.* 19:1-43.
- BOWEN, G.D.** 1991. Soil temperature, root growth, and plant function. In: Waisel, Y.; Eshel, A.; Kafkafi, U., ed. *Plant roots, the hidden half.* New York, Marcel Dekker. p. 309-330.
- CANNELL, R.Q.; JACKSON, M.B.** 1981. Alleviating aeration stress. In: *Modifying the root environment to reduce crop stress.* Madison, ASA. Monograph No. 4. p. 139-192.
- DAVIES, J.A.; IDSO, S.B.** 1979. Estimating the surface radiation balance and its components. In: Barfield, B.J.; Gerber, J.F., ed. *Modification of the aerial environment of plants.* St. Joseph, MI, ASAE. p. 183-210.
- DREW, M.C.; STOLZY, L.H.** 1991. Growth under oxygen stress. In: Waisel, Y.; Eshel, A.; Kafkafi, U., ed. *Plant roots, the hidden half.* New York, Marcel Dekker. p. 331-350.
- ERICKSON, A.E.** 1982. Tillage effects on soil aeration. In: *Predicting tillage effects on soil physical properties and processes.* Madison, WI, ASA. Sp. Publ. N° 44. p. 91-104.
- FARRELL, D.A.; GREACEN, E.L.** 1966. Resistance to penetration of fine metal probes in compressible soil. *Aust. J. Soil Res.* 4:1-17.
- GARDNER, W.R.** 1960. Dynamic aspects of water availability to plants. *Soil Sci.* 89:63-73.
- GERARD, C.J.; SEXTON, P.; SHAW, G.** 1982. Physical factors influencing soil strength and root growth. *Agron. J.* 74:875-879.
- GILL, W.R.; BOLT, G.H.** 1955. Pfeffer's studies of the root growth pressures exerted by plants. *Agron. J.* 47:166-168.
- GRABLE, A.R.** 1971. Effects of compaction in content and transmission of air in soils. In: ASAE. *Compaction of agricultural soils.* St. Joseph, MI, ASAE. p. 154-164.
- GRIMES, D.W.; MILLER, R.J.; WILEY, P.L.** 1975. Cotton and corn root development in two field soils of different strength characteristics. *Agron. J.* 67:519-523.
- GUPTA, S.C.; SHARMA, P.D.; DEFRANCHI, S.A.** 1989. Compaction effects on soil structure. *Adv. Agron.* 42:311-338.
- HAMBLIN, A.P.** 1985. The influence of soil structure on water movement, crop root growth, and water uptake. *Adv. Agron.* 38:95-157.
- HANKS, R.J.** 1992. *Applied soil physics. Soil and water temperature applications.* 2nd. ed. New York, Springer. 176 p.
- HENDERSON, C.; LEVEETT, A.; LISLE, D.** 1988. The effects of soil water content and bulk density on the compactibility and soil penetration resistance of some western Australian sandy soils. *Aust. J. Soil Res.* 26:391-400.
- HILLEL, D.** 1980. *Fundamentals of soil physics.* New York, Academic Press. 413 p.
- LEMON, E.R.; ERICKSON, A.E.** 1952. The

- measurement of oxygen diffusion in the soil with a platinum microelectrode. *Soil Sci. Soc. AM. Proc.* 16:160-163.
- LETEY, J.** 1985. Relationship between soil properties and crop production. *Adv. Soil Sci.* 1:273-294.
- MARTINO, D.L.; SHAYKEWICH, C.F.** 1994. Root density profiles of wheat and barley as affected by soil penetration resistance in field conditions. *Can. J. Soil Sci. En prensa.*
- MISRA, R.K.; DEXTER, A.R.; ALSTON, A.M.** 1986. Maximum axial and radial growth pressures of plant roots. *Plant and Soil* 95:315-326.
- ROSENBERG, N.J.; BLAD, B.L.; VERMA, S.B.** 1983. *Microclimate: the biological environment.* 2nd. ed. New York, Wiley. 495 p.
- ROSS, P.J.; WILLIAMS, J.; MCCOWN, R.L.** 1985. Soil temperature and the energy balance of vegetative mulch in the semi-arid tropics. II. Dynamic analysis of the total energy balance. *Aust. J. Soil Res.* 23:515-532.
- STOLZY, L.H.; LETEY, J.** 1964. Correlation of plant responses to soil oxygen diffusion rates. *Hilgardia* 35:567-576.
- TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M.; PARKER, J.J.** 1966. Soil strength-root penetration relations for medium-to-coarse-textured soil materials. *Soil Sci.* 102:18-22.
- THOMSON, C.J.; ARMSTRONG, W.; WATERS, I.; GREENWAY, H.** 1990. Aerenchyma formation and associated oxygen movement in seminal and nodal roots of wheat. *Plant Cell Environ.* 13:395-403.
- VEIHMEYER, F.J.; HENDRICKSON, A.H.** 1949. Methods of measuring field capacity and wilting percentages of soils. *Soil Sci.* 68:75-94.
- WIERSUM, L.K.** 1957. The relationship of the size and structural rigidity of pores to their penetration by roots. *Plant and Soil* 9:75-85.