

Curso
RELACIÓN
SUELO
AGUA
PLANTA

EDUARDO SALGADO V.



EDICIONES UNIVERSITARIAS DE VALPARAÍSO
DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO

Quedan rigurosamente prohibidas, sin la autorización escrita de los titulares del «Copyright», bajo las sanciones establecidas en las leyes, la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo públicos.

© Eduardo Salgado, 2001
Inscripción N° 122.499

ISBN 956-17-0321-1

Tirada de 300 ejemplares

Derechos Reservados

Ediciones Universitarias de Valparaíso
de la Universidad Católica de Valparaíso
Calle 12 de Febrero 187, Valparaíso
Fono (32) 273087 - Fax (32) 273429
E.mail: euvs@ucv.cl
Web: www.ucv.cl/web/euv

Diseño Gráfico: Guido Olivares S.
Diagramación: Mauricio Guerra P.
Corrección de Pruebas: Osvaldo Oliva P.

Impreso en Salesianos S.A.
Bulnes 19, Santiago de Chile

HECHO EN CHILE

Al mejor uso del agua...

ÍNDICE

PRESENTACIÓN	Pág. 11
1. EL AGUA EN EL SUELO	13
1.1 Contenido de agua en el suelo	14
1.2 Medición del contenido de agua del suelo	16
1.3 Medición de la densidad aparente	20
1.4 ANEXO 1. Aspensor de neutrones	21
2. ESTADO ENERGÉTICO DEL AGUA DEL SUELO	27
2.1 Conceptos previos	27
2.2 El potencial hídrico del suelo	29
2.3 Expresión del potencial del agua del suelo	32
2.4 Medición del estado energético del agua en el suelo	33
2.5 ANEXO II. Los psicrómetros de termocuplas	40
3. CURVA CARACTERÍSTICA DE HUMEDAD	43
3.1 Métodos para determinar la curva característica de humedad	47
4. MOVIMIENTO DEL AGUA EN EL SUELO	49
4.1 La Ley de Darcy	49
4.2 Medición de la conductividad hidráulica saturada	53
4.3 Medición de la conductividad hidráulica insaturada	56
5. INFILTRACIÓN DEL AGUA EN EL SUELO	59
5.1 La velocidad de infiltración	61
5.2 Medición de la velocidad de infiltración	66
6. DRENAJE DE SUELOS AGRÍCOLAS	69

6.1	<i>Factores que afectan el drenaje</i>	70
6.1.1	<i>Formación y propiedades del suelo</i>	70
6.1.2	<i>Clima</i>	71
6.1.3	<i>Topografía</i>	71
6.1.4	<i>Profundidad del nivel freático</i>	72
6.2	<i>Estudios e investigaciones de drenaje</i>	72
6.2.1	<i>Objetivos de la investigación</i>	72
6.2.2	<i>Estudios e investigaciones relacionadas</i>	72
	• <i>Estudios topográficos</i>	73
	• <i>Estudios de suelo</i>	73
	• <i>Estudios geológicos</i>	73
	• <i>Uso actual de la tierra</i>	73
	• <i>Estudios de salinidad</i>	74
	• <i>Estudios de los niveles freáticos y piezométricos</i>	74
	• <i>Estudios de permeabilidad</i>	75
6.3	<i>Flujo de agua hacia el dren</i>	76
6.4	<i>Métodos de drenaje</i>	77
	<i>Drenes laterales</i>	78
	<i>Drenes paralelos</i>	78
	<i>Drenaje por bombeo</i>	79
7.	REDISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN EL SUELO	81
7.1	<i>Las constantes hídricas del suelo</i>	82
7.1.1	<i>Saturación</i>	82
7.1.2	<i>Capacidad de campo (C.C.)</i>	82
7.1.3	<i>Punto de Marchitez Permanente (P.M.P.)</i>	83
7.1.4	<i>Humedad Disponible (ha)</i>	84
8.	AGROMETEOROLOGÍA	87
8.1	<i>Estaciones agrometeorológicas</i>	88
8.1.1	<i>Emplazamiento de la Estación Agrometeorológica</i>	88
8.1.2	<i>Las observaciones</i>	89
8.1.3	<i>El instrumental</i>	89
9.	RADIACIÓN SOLAR	93
9.1	<i>Radiación solar extraterrestre</i>	93
9.1.1	<i>Angulo de la latitud, Φ</i>	95
9.1.2	<i>Angulo de declinación solar, δ</i>	96
9.1.3	<i>Angulo horario, h</i>	97
9.1.4	<i>Angulo de salida del sol, h_s</i>	98
9.1.5	<i>Radiación extraterrestre total, valor Angot, RA</i>	98
9.2	<i>Radiación solar sobre la superficie terrestre</i>	99

9.3	Balance energético de onda corta	101
9.4	Balance energético de onda larga	102
9.5	Radiación neta	103
9.6	Principales leyes de la radiación	105
9.6.1	<i>Ley de Kirchoff</i>	105
9.6.2	<i>Ley de Stephan-Boltzmann</i>	105
9.6.3	<i>Ley del Desplazamiento de Wien</i>	105
10.	EL VIENTO	107
10.1	Variación diaria de la velocidad del viento	109
10.1.1	<i>Causas del viento</i>	109
10.1.2	<i>Escala planetaria</i>	110
10.1.3	<i>Escala local</i>	111
10.2	Velocidad del viento	112
10.3	Efecto del viento sobre los flujos hacia y desde la planta	115
11.	LA HUMEDAD EN LA FITOSFERA	117
11.1	Descripción del contenido de humedad del aire	117
11.1.1	<i>Humedad absoluta</i>	117
11.1.2	<i>Humedad específica</i>	118
11.1.3	<i>Presión parcial</i>	118
11.1.4	<i>Razón de mezcla</i>	119
11.1.5	<i>Punto o temperatura de rocío</i>	119
11.1.6	<i>Humedad relativa</i>	119
11.1.7	<i>Déficit de saturación de vapor</i>	120
11.2	Medición de la humedad atmosférica	120
12.	ALGUNAS RELACIONES HÍDRICAS DE LAS PLANTAS	123
12.1	Flujo de vapor de agua	124
12.2	Movimiento del agua en el xilema	125
12.2.1	<i>Tejido radical</i>	126
12.2.2	<i>Xilema</i>	126
12.3	El continuo suelo-planta-atmósfera	128
12.4	Efecto del déficit hídrico en el crecimiento de las plantas	130
13.	REQUERIMIENTOS HÍDRICOS DE LAS PLANTAS	133
13.1	Evapotranspiración (<i>ET</i>) y evapotranspiración potencial (<i>ET₀</i>)	134
13.1.1	<i>Evapotranspiración actual o del cultivo (ET_c)</i>	134

13.1.2	<i>Evapotranspiración de referencia (ET_r)</i>	135
13.1.3	<i>Precipitación efectiva, P_e</i>	135
13.2	Modelo simplificado de la evaporación	136
13.3	Determinación de la evapotranspiración	138
13.3.1	<i>Mediciones directas</i>	139
14.	MÉTODOS PARA ESTIMAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL	143
14.1	Método de la Radiación de Makkink (Modificado por Doorenbos y Pruitt)	144
14.2	Blannet y Criddle	151
14.3	Hargreaves	154
14.4	Penman	158
14.5	Evaporación de bandeja Clase A	163
15.	COEFICIENTE DE CULTIVO, K_c	169
15.1	Fases del período vegetativo para cultivos extensivos y hortalizas	171
16.	BIBLIOGRAFÍA	179

PRESENTACIÓN

El progreso de la ciencia y de sus aplicaciones tecnológicas hacen posible que el viejo arte de cultivar la tierra y producir vegetales, se convierta actualmente en una insustituible actividad económica que requiere de la más alta precisión. Esto último se refiere no sólo a los aspectos de productividad y calidad, tradicionales en la agricultura moderna, sino también a los nuevos requerimientos de conservación de los recursos, especialmente el suelo y el agua.

Conceptos tales como la hortifactoría, de alta productividad y estandarización, exigen el uso intensivo de los recursos y el empleo de enormes cantidades de elementos exógenos que manejados en forma imprecisa pueden provocar severos problemas de contaminación, destrucción de las propiedades del suelo y en general desbalances ecológicos difícilmente recuperables.

El presente texto es una compilación de los aspectos básicos que regulan la relación entre las plantas, el suelo y la atmósfera a través del agua. Su finalidad es constituirse en una introducción al estudio de estos complejos temas, que aquí se presentan en su forma más sencilla y accesible, pero ordenada de acuerdo a una secuencia específica que contribuye a dar los énfasis apropiados y destaca los aspectos prácticos y manejables por la ingeniería.

La realización de este texto ha sido posible gracias a las contribuciones de varias generaciones de destacados y entusiastas colaboradores que pusieron su inteligencia y trabajo al servicio de la noble causa de enseñar. Entre ellos cabe señalar los nombres de T. Cantuarias, M. Ramdohr, M. Toro, A. Lazo y F. Saavedra. Vaya para ellos un afectuoso agradecimiento y el reconocimiento de la huella que dejaron.

Especial mención y agradecimiento merecen quienes con su aporte dieron la forma final a este libro. La ingeniero agrónomo S. Gandolfo que tuvo a su cargo la revisión de los contenidos y la bibliotecaria C. Cabezón que cuidadosamente depuró los textos.

Eduardo Salgado
Mayo, 2001

1. EL AGUA EN EL SUELO

El crecimiento y desarrollo de las plantas está necesariamente asociado a que se establezca un adecuado equilibrio entre los requerimientos que éstas poseen y las condiciones que su entorno edafoclimático puede ofrecerles. En tanto el rango de las propiedades del suelo y clima de un lugar determinado se aparte de las condiciones límites, un mayor número de especies se adapta o podrá ser adaptado para crecer y desarrollarse.

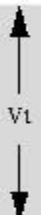
Entre las principales condiciones que el suelo, como constituyente del edafoclima, puede «ofrecer» para el crecimiento y desarrollo de las plantas, se encuentra su capacidad para el almacenamiento de agua. Exceptuando a las plantas que están naturalmente adaptadas o son forzadas a vivir en un ambiente hidropónico, la mayoría de ellas deben obtener el agua, como elemento fundamental de la vida, desde el suelo.

La idea anterior, enfocada desde un punto de vista agrícola, hace necesario reconocer las relaciones que se establecen entre el agua y el suelo, dónde y a través de qué mecanismos es almacenada, de qué factores depende el grado o nivel del almacenamiento, cómo es entregada a las plantas, cómo se mueve en el suelo y otros.

El conocimiento señalado, unido a otros, permitirá «operar» adecuadamente el sistema suelo-planta-agua y de este modo obtener los niveles de productividad necesarios y convenientes para cada situación silvoagropecuaria.

1.1 Contenido de agua en el suelo

El suelo está constituido por tres fases: sólida, líquida y gaseosa. La fase sólida se compone de partículas minerales y orgánicas. El espacio no ocupado por la fase sólida constituye el espacio poroso del suelo que es ocupado por las fases líquida y gaseosa.

	Volumen	Masa	Fracciones del suelo
	V_a	M_a	(aire)
	V_w	M_w	(agua)
V_t	V_s	M_s	Fase sólida (partículas)

donde:

- V_t Volumen total, L^3
- V_p Volumen de poros, L^3
- V_w Volumen de agua, L^3
- V_a Volumen de aire, L^3
- V_s Volumen de sólidos, L^3
- M_a Masa de aire = 0
- M_w Masa de agua, M
- M_s Masa de sólidos, M

Densidad real (D_r). Corresponde a la masa de las partículas por unidad de volumen de partículas (sólidos). Frecuentemente se asigna un valor promedio de 2.65 g cm^{-3} debido a que los constituyentes minerales del suelo cambian en un rango muy estrecho.

$$D_r = \frac{M_s}{V_s} \quad (1.1)$$

Densidad aparente (D_a). Corresponde a la masa de partículas secas contenida en una unidad de volumen de suelo (V_t), también llamado volumen aparente porque incluye no sólo el volumen de los sólidos sino también el que corresponde a los poros. Se calcula como el cuociente entre la masa de suelo seco (M_s) y el volumen de suelo (V_t). La densidad aparente es mayor en suelos compactados debido a la reducción de V_t .

$$D_a = \frac{M_s}{V_t} \quad (1.2)$$

Porosidad (f). Corresponde a la fracción del volumen total (aparente) que está constituida por poros. Habitualmente ésta se expresa en porcentaje del volumen de poros respecto del volumen total del suelo:

$$f = \frac{V_p}{V_t} \quad (1.3)$$

Combinando las ecuaciones 1.1 con 1.2 se obtiene:

$$f = \left(1 - \frac{D_a}{D_r}\right) \quad (1.4)$$

El agua en el suelo puede estar en contenidos variables, ocupando fracciones del espacio poroso total. Cuando todo el espacio poroso está ocupado por agua, entonces se dice que el suelo está saturado y, consecuentemente, el contenido de agua del suelo es igual a su porosidad. La parte del espacio poroso que no está ocupada por agua, entonces lo está con aire. La experiencia práctica y la investigación detallada han demostrado la importancia de manejar adecuadamente este balance agua-aire, para proveer tanto a las necesidades de agua de las plantas como a las de aire en sus sistemas radicales. Ese importante balance, que posee implicancias sobre el crecimiento, desarrollo, enfermedades y otros, ocurre a nivel del sistema poroso del suelo. El contenido de humedad en el suelo puede ser expresado de varias maneras, en relación a:

(a) la masa de sólidos, y se le llama humedad gravimétrica (**v**):

$$v = \frac{M_w}{M_s} \quad (1.5)$$

(b) el volumen total, y se le llama humedad volumétrica (**q**):

$$q = \frac{V_w}{V_t} \quad (1.6)$$

EDUARDO SALGADO V.

Combinando las ecuaciones (1.5 y 1.6) se puede relacionar las humedades gravimétricas y volumétricas de la siguiente forma:

$$\mathbf{q} = \mathbf{D}_a \mathbf{v} \quad (1.7)$$

La fracción del espacio poroso ocupado por aire ($\mathbf{E}_a$), calculada respecto de $\mathbf{V}_t$:

$$\mathbf{E}_a = \mathbf{f} - \mathbf{q} \quad (1.8)$$

También esta fracción puede calcularse respecto de $\mathbf{V}_p$:

$$\mathbf{E}_a' = \mathbf{q}_s - \mathbf{q} \quad (1.9)$$

donde $\mathbf{q}_s$ representa el contenido de humedad volumétrico en saturación.

Con fines prácticos, muchas veces en riego la cantidad de agua que posea un suelo se expresa como una altura de agua, semejante a la forma como se expresa la precipitación:

$$\mathbf{L} = \mathbf{q} \mathbf{d} \quad (1.10)$$

donde $\mathbf{d}$ representa la profundidad (mm, cm o metros) hasta donde se desea conocer el contenido de humedad de un perfil de suelo.

1.2 Medición del contenido de agua del suelo

La obtención de muestras para la determinación del contenido de humedad se realiza extrayendo una cantidad de suelo con una pala, o más fácilmente, con barrenos. Las muestras deben ser obtenidas por estratas del suelo, registrando cuidadosamente las respectivas profundidades. Existen dos tipos de barrenos, el de taladro espiral «gusano» y el de cilindro. El primero tiene usualmente un diámetro de 3 cm, es liviano y fácil de llevar, pero debe tenerse la precaución de enterrarlo lentamente en suelos compactados, por temor a no poder extraerlo; esto no ocurre en el barreno de cilindro (diámetro de 5 a 10 cm), ya que una vez que se ha llenado el cilindro, deja de avanzar. Ambos barrenos pueden contaminarse con suelo de otra profundidad distinta a la muestreada, ya que sus costados son abiertos.

RELACIÓN SUELO AGUA PLANTA

(a) Resistencia del suelo a la penetración. Ha sido utilizada como un índice por los agricultores que conocen su terreno y han aprendido a interpretar el significado de la resistencia que presenta el suelo de acuerdo a su contenido de humedad, en términos de lo adecuado que puede ser para las plantas. Esto significa que cuando se hunde el taco del zapato, la pala o incluso una barra de hierro de 1 cm de diámetro sobre el terreno, éste estaría adecuadamente húmedo. Como se ha indicado, este es un método cuyo resultado está estrictamente asociado al grado de conocimiento de que disponga el usuario.

(b) Usando los sentidos de la *visión* y *tacto* para indicar el contenido de humedad. Una tabla generada por Hansen, Israelsen y Stringham (1980) puede ser útil como guía para juzgar cuanta agua ha sido removida del suelo (Tabla 1.1).

(c) Método gravimétrico. Es aceptado como el estándar para la medición del contenido de agua en el suelo. Implica pesar una muestra húmeda de suelo (200 g, aprox.), secarla a 105-110 °C y repesar la muestra. Generalmente se expresa como la relación entre la masa de agua perdida y la masa de suelo seco:

$$v = \frac{\text{peso suelo húmedo} - \text{peso suelo seco}}{\text{peso suelo seco}} \quad \text{igual a ecuación (1.8)}$$

donde w se refiere, como se ha señalado en el punto 1.1, al contenido de agua en base al peso seco del suelo.

El tiempo de secado debe extenderse hasta obtener peso constante en la muestra. Este depende de la textura y humedad del suelo, el tamaño de la muestra, el tipo de horno y otros factores. Usualmente bastan 24 horas para llegar a un peso constante. Por su parte, la temperatura de secado no debe exceder los 105-110 °C debido a que se puede quemar la materia orgánica, aumentando la pérdida de peso por este concepto y no por la disminución del contenido de humedad.

(d) Aspersión de neutrones. Los neutrones ubicados en el núcleo de los átomos no tienen cargas eléctricas. Al liberar neutrones desde una fuente apropiada, éstos son despedidos a alta velocidad (energía cinética). Si estos neutrones chocan con núcleos de otros átomos, pierden energía en forma proporcional al tamaño de su núcleo, reduciendo su velocidad y liberando calor (neutrones termalizados).

Luego, el método consiste en liberar neutrones rápidos de una fuente apropiada y detectar cuántos de éstos rebotan en núcleos de hidrógeno. Si son detectados muchos neutrones que han chocado con núcleos de hidrógeno, entonces el suelo o posee un alto contenido de humedad o es muy rico en materia orgánica. Los equipos disponibles en el mercado están calibrados para suelos de tipo mineral con contenidos bajos de materia orgánica. Para otros suelos será necesario desarrollar una curva de calibración previo a su uso. Este es un método para estimar la cantidad de agua en el suelo, que tiene algunas ventajas sobre los anteriores, dadas las repetidas mediciones que pueden realizarse en el mismo lugar y profundidad, minimizando el efecto de variabilidad de los suelos. La desventaja es el alto costo en la inversión inicial del equipo y otros detalles técnicos que escapan a estas notas. (Para mayor información se sugiere ver Grismer, M. E., Bali, K. M. y Robinson, F. E. 1995. Field-scaled neutron probe calibration and variance analysis for clay soil. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* Sep-Oct:354-362).

(e) TDR (*Time domain reflectometry*). Este convierte el tiempo de viaje de un pulso electromagnético de alta frecuencia a través del suelo, en su contenido de humedad volumétrico. El aparato genera un pulso y lo envía a la velocidad de la luz a través de una línea de transmisión consistente de dos guías de ondas paralelas que son insertadas en el suelo. La velocidad de propagación de esta energía de alta frecuencia en el rango de 3 GHz, está determinada principalmente por el contenido de humedad del suelo. La onda es reflejada desde las aberturas de las guías, volviendo a su punto de origen. Usando un microprocesador directamente se calcula la constante dieléctrica del suelo con ese contenido de humedad.

(f) Atenuación de rayos gamma. Ha sido utilizada en laboratorio y en equipos comerciales. Se pasa un rayo de intensidad conocida a través de una columna de suelo, y se mide la disminución en la intensidad del rayo. La atenuación está relacionada con la masa del material por el cual pasa el rayo. Si la densidad de la masa de suelo (D_s) permanece constante, o varía en forma conocida, puede inferirse el contenido de agua. La principal ventaja del método es que permite la estimación no-disruptiva dentro de un estrecho rango de profundidad, en oposición al método por aspersión de neutrones donde se mide un amplio volumen de suelo (Jensen, 1981).

RELACIÓN SUELO AGUA PLANTA

Tabla 1.1. Guía práctica para juzgar cuanta agua disponible ha sido removida del suelo.

Deficiencia de humedad del suelo, %	Sensación o apariencia de la deficiencia de humedad del suelo			
	Textura gruesa	Moderadamente gruesa	Media	Textura fina y muy fina
0 Capacidad de Campo	Al apretarlo con la mano no escurre agua libre, sin embargo, la mano queda húmeda.	Al apretarlo con la mano no escurre agua libre, sin embargo, la mano queda húmeda.	Al apretarlo con la mano no escurre agua libre, sin embargo, la mano queda húmeda.	Al apretarlo con la mano no escurre agua libre, sin embargo, la mano queda húmeda.
0 - 25	Tiende a pegarse ligeramente. A veces forma un bolo muy poco resistente a la presión.	Forma un bolo débil que se rompe con facilidad. No se pega.	Forma un bolo friable, es pegajoso si la textura es rica en arcilla.	Se siente como plástico entre los dedos, es pegajoso.
25 - 50	Tiene aspecto seco y no formará un bolo al presionarlo.	Tiende a formar un bolo bajo presión, pero rara vez se mantendrá.	Forma un bolo algo plástico. Algunas veces será ligeramente pegajoso.	Forma un bolo que escurre plásticamente entre los dedos.
50 - 75	Tiene aspecto seco y no formará un bolo al presionarlo.	Tiene aspecto seco y no formará un bolo al presionarlo.	Al apretarlo permanece formando un bolo, pero algo quebradizo.	Forma un bolo friable cuando se le aprieta.
75 - 100	Seco, suelto, granos individuales, fluye a través de los dedos.	Seco, suelto fluye a través de los dedos.	Polvoroso, seco, a veces friable, quebradizo. Se rompe fácilmente en polvo.	Duro, amasado, quebradizo, suelto.

Fuente: Hansen, Israelsen y Stringham (1980)

(g) Otros métodos más rápidos han sido propuestos para la medición del agua del suelo, que incluyen quemar con alcohol, evaporación a partir de una mezcla de suelo y aceites no volátiles, extracción de agua con alcohol metílico, etc., pero no se han extendido en su uso a pesar de su relativa buena aproximación con el método gravimétrico (Jensen, 1981).

1.3 Medición de la densidad aparente

La densidad aparente se define como el peso seco (al utilizar *peso* en la llamada densidad es en realidad un peso específico), de un volumen determinado de suelo tal como éste se presenta en el campo. Puede medirse secando a 105 °C y pesando un volumen conocido de suelo.

(a) Cilindro de densidad aparente. Se trata de un barreno de metal que posee un doble cilindro (Figura 1.1). Este debe ser introducido en el suelo, extrayendo una porción de agregados desde una profundidad determinada. Estos agregados de suelo son secados a 105 °C y pesados. La densidad aparente es el peso de ese suelo seco dividido por el volumen conocido del anillo central del cilindro. Las muestras pueden ser tomadas a profundidades sucesivas utilizando un barreno de tala-dro y forzando el cilindro muestreador contra el fondo del orificio (Jensen, 1981).

(b) Es posible utilizar un método directo de campo que no disturba la muestra. Se hace un hoyo de 15x15 cm a la profundidad requerida, cuidando de poner en un recipiente la totalidad del suelo extraído, el que se guardará para pesarlo cuidadosamente. Luego se pone una bolsa de plástico más grande en el interior del hoyo abierto, que se llenará de agua hasta alcanzar el nivel antes ocupado por suelo. El volumen de agua será medido cuidadosamente.

(c) Se extrae del suelo en el campo un terrón (o varios para hacer repeticiones), y se seca al horno. Dicho terrón una vez seco se pesa. Luego se introduce el terrón, atado de un hilo delgado, por pocos instantes en esperma de vela líquida para recubrirlo de una delgada lámina impermeable. Seca la cobertura se introduce en un volumen aforado de agua (en una sonda). El volumen del terrón corresponde al desplazamiento del agua del interior de la sonda.

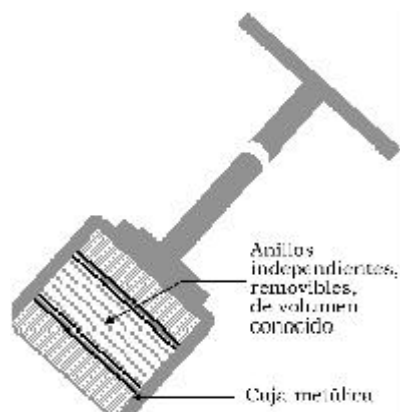


Figura 1.1. Esquema de un barreno muestreador para densidad aparente.

1.4 ANEXO 1. Aspersor de neutrones

Los neutrones no tienen cargas eléctricas y pueden perder energía sólo por interacciones con núcleos. Esta interacción es en forma de colisiones y sigue la Ley de Conservación de la Energía o Momentum. En cada colisión los neutrones transfieren parte de su energía cinética al núcleo chocado.

Cuando una fuente radiactiva emite neutrones de alta energía en un medio con gran cantidad de núcleos, las colisiones le van reduciendo su energía, quedando transformados en neutrones lentos. A este proceso se le llama «termalización de neutrones», por la conversión de la energía cinética (velocidad) en energía térmica (calor) que tiene lugar en dicho proceso.

Se define, entonces, como neutrones rápidos a aquellos que tienen alta energía, de 0.1 a 15 M.E.V. (millón de electrón volt), y alcanzan velocidades de hasta 1600 km/s. Neutrones lentos, por otro lado, son aquellos termalizados cuya energía es del orden de 0 a 1000 electrón volt.

Hay dos factores importantes en este proceso:

- Transferencia de electrones en cada colisión.
- Probabilidad estadística que ocurra cada colisión.

La transferencia de energía depende del número de colisiones y la masa atómica del núcleo chocado. Un neutrón rápido pierde mayor cantidad de energía en cada colisión mientras menor sea la masa atómica del núcleo que ha chocado. Es así como un neutrón requiere de 18 colisiones con protones (H^+) para reducir su energía a niveles térmicos (baja energía), mientras que para lograr ese objetivo requiere hacerlo 67 veces con átomos de litio, 114 con carbono y 150 con oxígeno.

La probabilidad estadística de que se produzca una colisión está relacionada con el concepto de «sección transversal de dispersión» (STD). La STD de un núcleo es su área proporcional a la probabilidad de colisión entre él y el neutrón.

El hidrógeno es el elemento que presenta una mayor STD, debido a su reducido tamaño. En un volumen dado presenta una mayor cantidad de núcleos que cualquier otro elemento y, por lo tanto, la probabilidad de colisión con neutrones es muy alta. Otros elementos con STD significativa, pero siempre menores a la del H^+ , son el carbono, nitrógeno, oxígeno y berilio.

De lo anterior se desprende la marcada propiedad de los núcleos de H^+ para termalizar neutrones. Esto se aprovecha para determinar indirectamente el contenido de humedad del suelo.

Aplicación a la determinación del contenido de humedad del suelo:

La cantidad de H^+ en los suelos depende de su naturaleza mineralógica, sobre todo del contenido y tipos de arcillas, de la materia orgánica y del contenido de agua (H_2O). De éstos el elemento más dinámico es, sin embargo, el contenido de agua, pues el hidrógeno de la red cristalina y de la materia orgánica (salvo niveles altos), es poco variable. El hidrógeno que contiene una arena gruesa seca es casi cero, y puede ser de alrededor de 8% en suelos de textura fina con 50% de agua aprovechable.

Cuando una fuente de neutrones rápidos se coloca en el suelo, se forma una nube de neutrones termalizados, cuya densidad representa un equilibrio entre la cantidad de neutrones rápidos emitidos, los termalizados y los absorbidos por algunos núcleos. Entre los elementos presentes en el suelo con propiedades para absorber neutrones están: boro, cloro, litio, manganeso, entre otros. La cantidad de neutrones termalizados está directamente relacionada con el contenido de agua en el suelo a través de una curva de calibración.

RELACIÓN SUELO AGUA PLANTA

Los instrumentos para realizar las mediciones constan de:

- Una fuente radiactiva de neutrones rápidos.
- Un detector, sensible sólo a neutrones lentos.

La fuente radiactiva debe emitir alrededor de 10 neutrones por segundo. Se ha usado radio-berilio hasta hace poco, debido a su larga vida. Tiene el inconveniente de producir un remanente de rayos gamma que es nocivo para el operador en concentraciones que exceden cierto nivel.

Los detectores, sensibles sólo a neutrones lentos, se basan en la reacción nuclear que produce un neutrón lento con el trifluoruro de B gaseoso. El boro de este gas corresponde a isótopos B^{10} y B^{11} que absorben neutrones lentos con gran facilidad, provocando una ionización del gas que resulta en un impulso eléctrico. Estos impulsos son de un rango de 1 a 25 mvolt, por lo que deben ser amplificados para detectarlos en un escalímetro.

Los equipos comerciales, como el Troxler o el de la Cía. Nucler de Chicago, traen una sonda emisora-detectora y un escalímetro. La sonda es un cilindro metálico de 40 cm de alto y 3,8 cm de diámetro, que se mantiene dentro de un escudo de plomo y parafina sólida. La fuente radiactiva colocada en medio de la sonda mide 7 x 7.5 mm. El escudo, además de envase de la sonda, sirve para probar el sistema, emitiendo neutrones rápidos dentro de él y midiendo los termalizados, lo que es posible debido a que la parafina es rica en H^+ .

Los aparatos comerciales traen curvas de calibración estándar que, en general, son adecuadas para una gran variedad de suelos minerales. Cuando se requiere una medición en extremo precisa (con errores menores al 5%), se debe establecer una curva de calibración particular del suelo, haciendo mediciones y simultáneamente obteniendo muestras para la determinación de la humedad gravimétrica. Esto es particularmente necesario en suelos con contenidos altos de materia orgánica (rica en H^+).

Las curvas relacionan los conteos de neutrones lentos en el escalímetro con el contenido gravimétrico o volumétrico de agua.

Los factores que afectan la calibración son:

- Contenidos de materia orgánica mayores al 5 %.
- Presencia de sales con altos contenidos de B, Li, Cl y Fe.

Para estos casos, debe hacerse nuevas curvas de calibración que representan estas condiciones particulares.

Otro factor que puede afectar la calibración son mediciones a menos de 18 cm de la superficie, pues debido a la discontinuidad aire-suelo, algunos neutrones pueden escapar y no son registrados. En este caso pueden usarse sondas especiales, o bien la misma pero bajo una cubierta de polietileno.

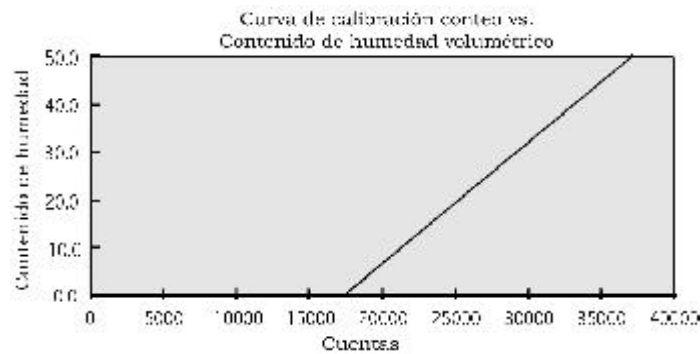


Figura 1.2. Curva de calibración.

Determinación en terreno

Se debe hacer un hoyo en el suelo, con barreno, en el cual se coloca un tubo de Al, Cu o Fe de 1,5" de diámetro. Su objetivo es proteger la sonda y tiene la ventaja que se puede hacer mediciones en el mismo lugar a lo largo del tiempo, ya que no se altera el volumen de suelo medido.

Para obtener el contenido de agua del perfil se deben hacer mediciones a diferentes profundidades, para lo cual se coloca la sonda y escudo en el extremo del tubo, que debe sobresalir algunos cm del suelo, y se hace descender la sonda hasta la profundidad deseada.

El radio de influencia, o sea, la distancia en que se puede encontrar una densidad significativa de neutrones termalizados varía según el contenido de agua en el suelo adyacente al punto de medición. En suelos con humedades cercanas a Capacidad de Campo, el radio de

RELACIÓN SUELO AGUA PLANTA

influencia es de 15 cm aproximadamente, variando a 60 cm en suelos secos (cercaños a PMP). Por lo tanto, el contenido de agua en el suelo medido en un punto dado corresponde al del volumen de una esfera de suelo de entre 15 y 60 cm de radio.

La densidad del suelo no afecta la curva de calibración. Tampoco la afecta la presión ni la temperatura, ya que la detección de neutrones lentos se produce por reacción nuclear. La existencia de piedras y espacios de aire producen disminuciones en el conteo de neutrones lentos y afecta el valor obtenido de la curva de calibración. Para estos casos, si el contenido de piedras es importante, se deben desarrollar las curvas de calibración correspondientes.

Para determinaciones de la cantidad de agua promedio en una extensión determinada de suelo, se deben hacer mediciones en varios lugares del área de estudio. Por la heterogeneidad del suelo, el error con que se puede estimar la humedad del suelo con este método alcanza entre 5 y 10 %, lo que es bastante bueno comparado con otros métodos.

La mayor desventaja del empleo de este procedimiento es el alto costo del equipo. Sin embargo, al ser usado en forma intensiva resulta rentable, debido a su larga vida útil y al mayor número de puntos de observación y profundidades de medición con un solo instrumento.

