

**INSTITUTO INTERAMERICANO DE COOPERACION PARA LA AGRICULTURA**  
**OFICINA EN LA REPUBLICA DOMINICANA**

**DETERMINACION DEL AGUA DEL SUELO: PROCEDIMIENTOS, EQUIPOS Y CALCULOS**

**Agustin A. Millar 1/**

**Santo Domingo, R.D.**  
**Julio 1985**

**1/, Ing. Agr., Ph.D, Especialista en Riego y Drenaje, IICA, Oficina en República Dominicana, Apartado 711, Santo Domingo, República Dominicana.**

## LISTA DE CONTENIDO

Página

### CAPITULO 2

2.1	DESCRIPCION DE LOS METODOS.....	1
2.1.1	Método Gravimétrico.....	1
2.1.2	Tensiómetros.....	2
2.1.3	Tensiómetro Osmótico.....	4
2.1.4	Bloques de Resistencia.....	4
2.1.5	Métodos Radioactivos.....	11
	a) Detección de Neutrones.....	11
	b) Atenuación de Rayos gama.....	17
2.1.6	Conducción de calor.....	17
2.1.7	Psicrómetros.....	19
	a) Construcción de Termopares.....	20
	b) Construcción de los Psicrómetros.....	25
	c) Calibración.....	28
	d) Circuito Eléctrico y Lecturas.....	28
2.2	EXPRESION DEL AGUA DEL SUELO.....	35
2.2.1	Porcentaje Base Seca.....	35
2.2.2	Contenido de Humedad en Volumen.....	35
2.2.3	Altura o Lámina de Agua.....	36
2.2.4	Lámina de Riego.....	36
2.2.5	Ejemplos conceptuales.....	37
2.3	CONCEPTO HIDRAULICO DEL AGUA EN EL SUELO.....	38
2.4	EJEMPLOS CONCEPTUALES.....	40
2.4.1	Carga hidráulica en un tensiómetro de investigación.....	40
2.4.2	Cargas hidráulicas en tensiómetros comerciales.....	42
2.5	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	43

## CAPITULO 2

### DETERMINACION DEL AGUA DEL SUELO: PROCEDIMIENTOS, EQUIPOS Y CALCULOS

Para conocer la cantidad de agua presente en el suelo se puede recurrir a varios métodos. La elección del método depende de la disponibilidad de material y de los requisitos de precisión.

Los métodos de medición pueden clasificarse en directos e indirectos.

#### Métodos directos

- a) Gravimétrico
- b) Tensiómetros (Comercial y de investigación)

#### Métodos indirectos

- c) Tensiómetro osmótico
- d) Bloques de resistencia
- e) Radioactivo (detección de neutrones, atenuación de radiación gama)
- f) Conducción de calor
- g) Psicrómetros (termopares, termistores)

De acuerdo a lo que se mide, los métodos se pueden agrupar de la siguiente manera:

#### Medida del contenido de agua del suelo

- a. Método Gravimétrico
- b. Método de la atenuación de rayos gama
- c. Método de la dispersión de neutrones
- d. Conducción de calor

#### Medida del potencial matricial (succión) o potencial de agua

- a. Equipo de olla a presión
- b. Tensiómetros
- c. Tensiómetro osmótico
- d. Psicrómetros
- e. Punto de congelamiento.

### 2.1 DESCRIPCION DE LOS METODOS

#### 2.1.1 Método Gravimétrico

Consiste en el secado de una muestra de suelo a 105 grados C durante 24 horas. La pérdida de peso después de secado corresponde al agua que contiene la muestra. Los valores así obtenidos se pueden expresar en porcentaje de humedad en base seca o húmeda.

Este es un método preciso pero laborioso que requiere de mucho

tiempo y muestreos. Se utiliza como un procedimiento standard para la calibración de algunos métodos directos.

### 2.1.2 Tensiómetros

Miden la tensión a la cual el agua es retenida por el suelo. Sólo son aplicables en el rango de 0 a 700 cm de agua. A mayores succiones, los gases disueltos en el agua penetran a través de la cápsula porosa interrumpiendo la columna de agua.

Este instrumento cubre solo una pequeña parte del rango de agua aprovechable de los suelos, especialmente en el caso de los de textura arcillosa. Actualmente es posible medir entre 0 y 15 bares con un tensiómetro osmótico que se describe más adelante.

En escala comercial se venden tensiómetros con vacuómetros, con escala en centibares, que son de utilidad en la programación del riego de cultivos, pero carecen de la precisión adecuada como para determinar cambios en las cargas hidráulicas tan bajas como 1 mb (Figura 2.1).

Para investigación, se requiere de tensiómetros de mayor precisión que los comerciales, los que deben ser construidos por el investigador. Este tipo de tensiómetros son de utilidad en todo tipo de estudios en que existe movimiento de agua como fenómeno preponderante como es el caso de balances de agua para conocer el flujo de agua que entra o sale de la zona radicular de los cultivos.

En tensiómetro sensitivo consiste de una cápsula porosa, un sistema de amplificación (reducción en el diámetro de tuberías) y un manómetro.

La cápsula porosa se conecta a la superficie del suelo a través de tubería nylon de 1/4 pulgada con un conector T que debe quedar 10 - 15 cm bajo la superficie. Del conector T debe salir 15 cm de tubería fuera de la superficie, a través de la cual se efectúa la limpieza (eliminación de aire) del tensiómetro. Desde el otro extremo del conector T se colocan 10 cm de tubería nylon de 1/4 pulgada, al extremo del cual se ubica un conector de reducción, para pasar de tubería de 1/4 a 1/8 pulgada. Este sistema se conecta a una cubeta de mercurio a través de la tubería de 1/8 de pulgada.

La ventaja de este sistema consiste en la facilidad de limpieza a través de la tubería de mayor diámetro, y el pequeño desplazamiento de agua por el alza del mercurio en la tubería de 1/8 de pulgada.

Este tipo de tensiómetro, cuando se utiliza en el campo, requiere un servicio de limpieza que debe realizarse por lo menos cada 7 días. La limpieza se realiza a través de una tubería de nylon, muy fina, que permanece en el sistema, verticalmente entre el extremo interior de la cápsula porosa y el extremo de la tubería de 1/4 pulgada en la superficie. Al efectuar la limpieza, se requiere un sello momentáneo entre la tubería de 1/4 de pulgada y la tubería fina. El agua de lavado, que debe ser previamente hervida para no introducir

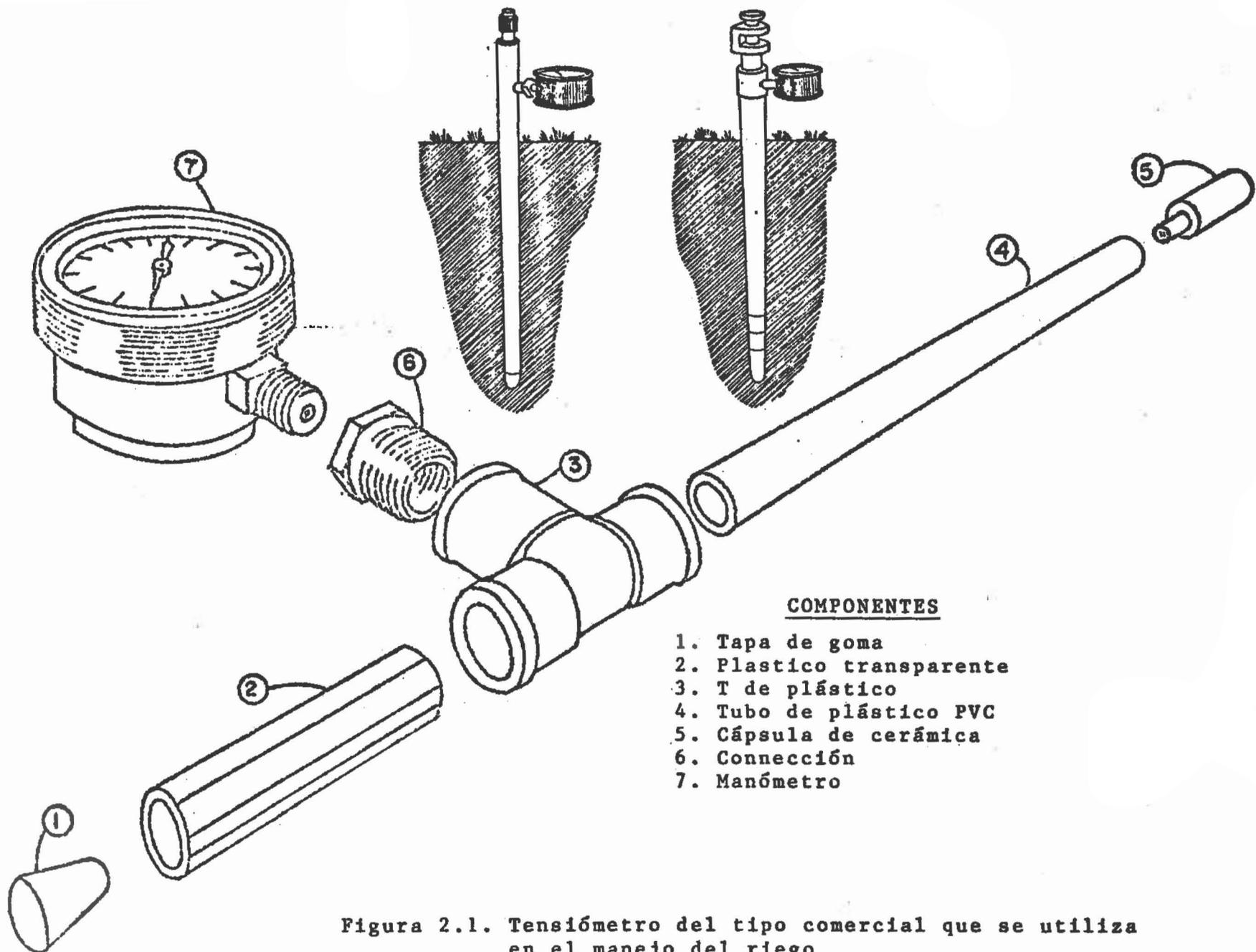


Figura 2.1. Tensiómetro del tipo comercial que se utiliza en el manejo del riego

aire, se coloca en el sistema mediante una jeringa hipodérmica conectada a la tubería fina, de tal manera que al introducir agua a presión en el fondo de la cápsula, el agua que desplaza las burbujas de aire burbujea en la cubeta de mercurio. Esta agua desplazada, que queda encima de la cubeta de mercurio, es fácilmente eliminada con la jeringa hipodérmica. La Figura 2.2 muestra el arreglo de los componentes de un tensiómetro del tipo anteriormente descrito.

Su empleo en estudios de balances de agua para determinar el componente de drenaje desde la zona radicular de algunos cultivos ha dado excelentes resultados (Black et al., 1969; Lambert, 1970; Millar, 1971; Millar et al., 1970).

### 2.1.3 Tensiómetro Osmótico

Este tensiómetro fue diseñado por Peck y Rabbidge (1969) en el CSIRO, Australia, para medir el potencial matricial del suelo. (Figura 2.3). El Tensiómetro osmótico hace uso del principio termodinámico que tanto la presión hidrostática como los solutos afectan el potencial de agua. Así una solución confinada en contacto con agua pura libre, a través de una membrana semipermeable alcanza equilibrio estático en el cual la presión hidrostática de la solución es su presión osmótica. Cuando el agua pura libre se cambia por un suelo húmedo, la presión de la solución disminuye en una cantidad igual al potencial de agua. La membrana que separa la solución confinada y el agua del suelo es altamente impermeable al soluto confinado (glicol polietileno, peso molecular 20.000), pero permite intercambio de moléculas y iones pequeños.

Este instrumento utiliza un detector de presión (strain-gauge pressure transducer) que es uno de los brazos de un circuito de Wheatstone. Cuando cambia la presión en la cámara que contiene el soluto, debido a entrada o salida de agua a través de la placa porosa, cambia la resistencia del strain-gauge lo cual se detecta en términos de milivoltaje.

Este procedimiento constituye un método indirecto ya que el tensiómetro osmótico debe ser calibrado utilizando soluciones standard de NaCl. Los tensiómetros se suspenden 0,5 cm sobre la superficie de diferentes soluciones y se obtiene la curva de calibración en términos de milivoltaje versus potencial de agua (Figura 2.4).

La ventaja de este instrumento sobre el tensiómetro convencional radica en el hecho que se puede medir el potencial de agua entre -0 y -15 bares y a partir de 10 cm de profundidad del suelo.

### 2.1.4 Bloques de resistencia

Estos bloques pueden ser de varios tipos como yeso, nylon y lana de vidrio. Ellos consisten de dos electrodos cubiertos por el material antes indicado, el cual permite el flujo de agua establecién-

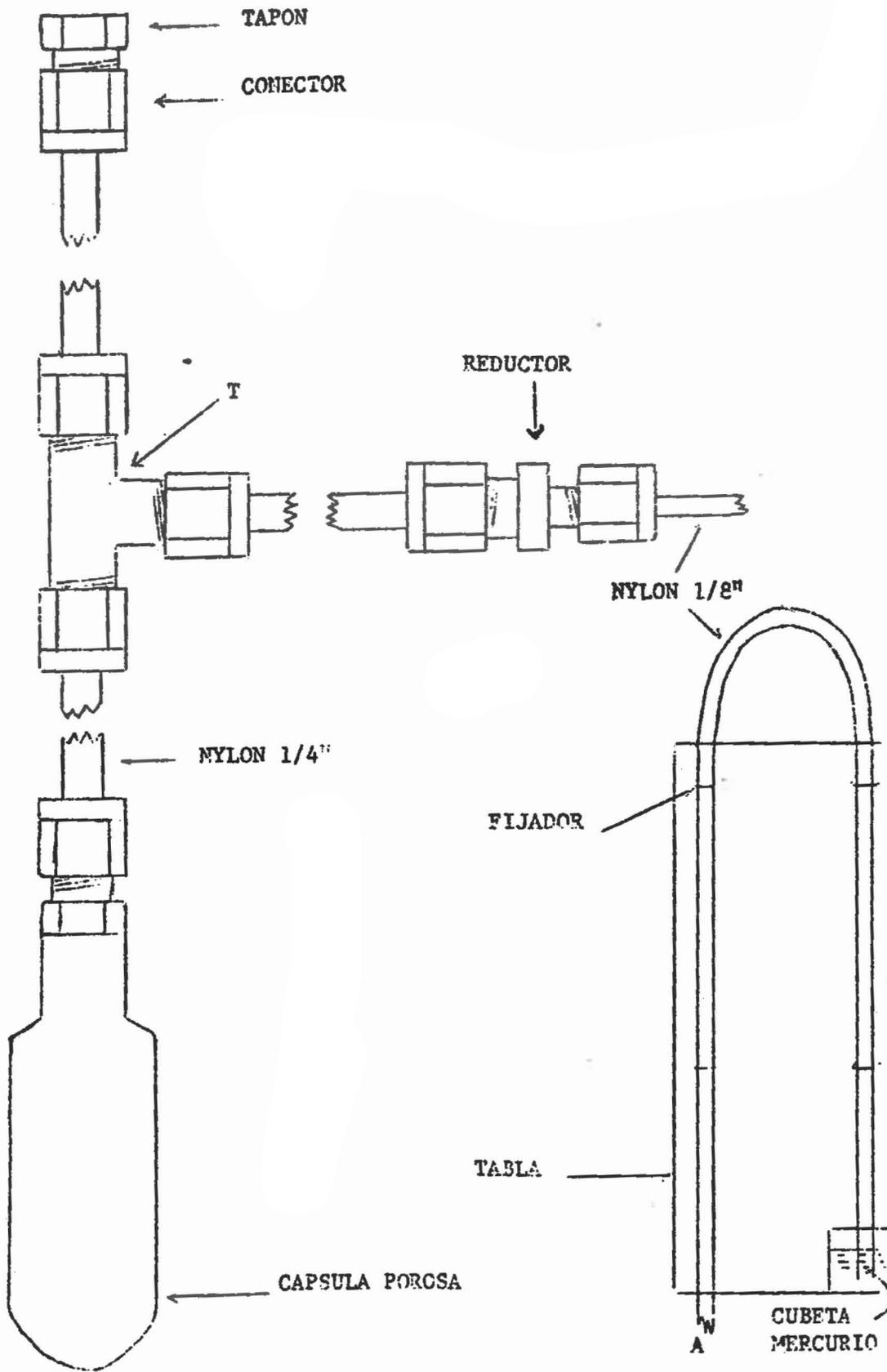


Figura 2.2 Componentes de un tensiómetro sensible para trabajos de investigación.

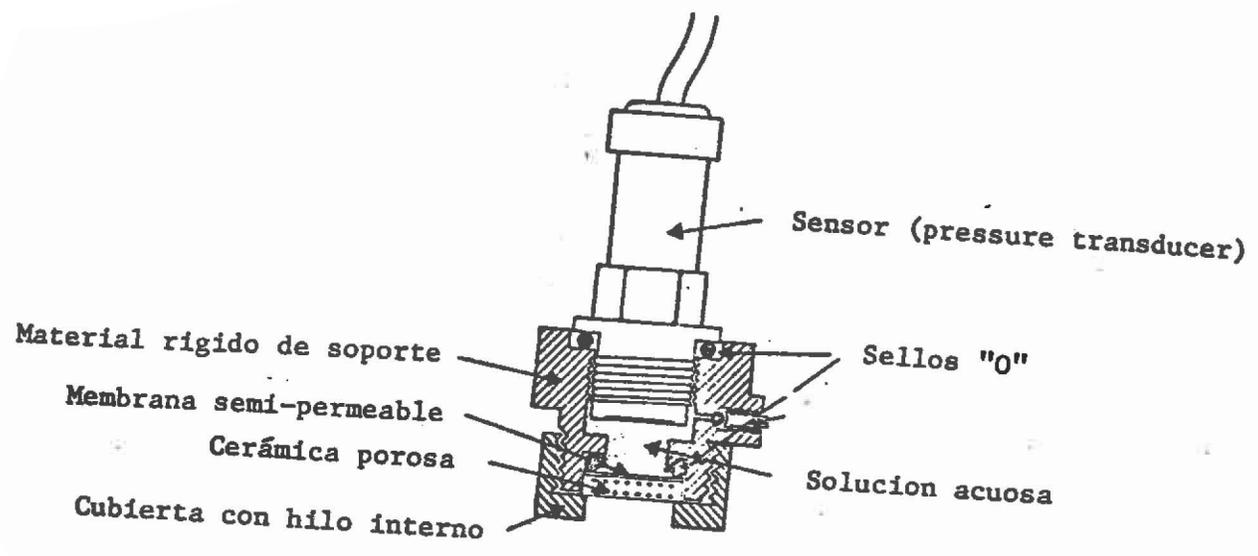


Figura 2.3. Esquema de tensiometro osmótico (Peck and Rabbidge, 1966).

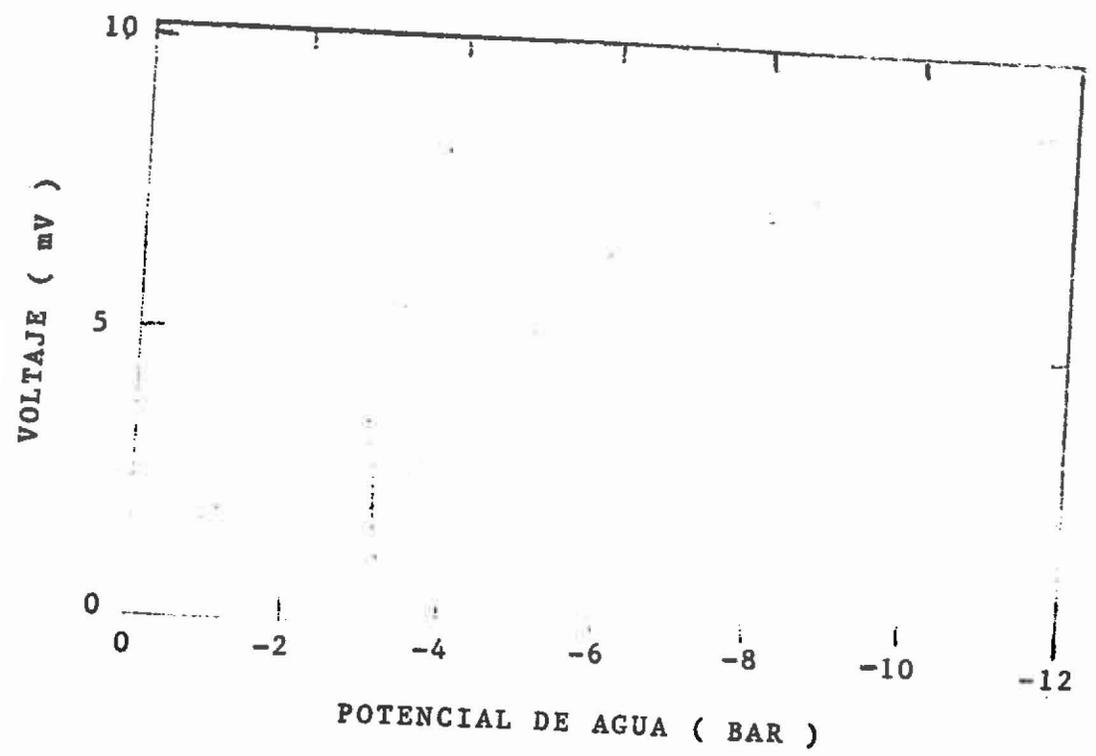


Figura 2.4. Curva de calibración del tensiómetro osmótico.

dose un equilibrio con el suelo que lo rodea. En las Figuras 2.5 y 2.6 se muestra un esquema de los dos tipos de bloques de mayor uso y medidor portátil, respectivamente.

La resistencia entre los electrodos depende del porcentaje de humedad en el bloque, a mayor humedad menor resistencia, el cual depende a su vez de:

- La afinidad del suelo y material poroso por el agua
- La cantidad de agua presente
- La velocidad de transferencia del agua desde un material al otro
- La conductividad eléctrica del agua o solución que está dentro del área de influencia de los electrodos.

Los bloques deben ser calibrados para cada suelo en particular y las curvas de calibración se pueden obtener como:

- Porcentaje de humedad versus Resistencia (Ohms)
- Porcentaje de humedad versus Humedad aprovechable

Lo más recomendable es calibrarlos en términos de Potencial Matricial (succión) versus Resistencia, utilizando el equipo de olla a presión.

En la Figura 2.7 se muestran curvas de calibración típicas, en términos de porcentaje de humedad, entregada por la fábrica para diferentes suelos de California. En la Figura 2.8 se presentan curvas de calibración típicas, en términos de potencial matricial, para diferentes tipos de bloques.

#### Ventajas

- Método que no causa destrucción y que permite medidas continuas en el mismo punto del suelo.
- Unidades de costo reducido
- Permite efectuar medidas en el rango más seco del suelo, donde no pueden utilizarse tensiómetros.
- Se puede utilizar para obtener potenciales matriciales con resultados aceptables.

#### Desventajas

- Sólo se pueden utilizar en suelos no salinos ya que son muy sensibles a la presencia de electrólitos.
- Debido a lo anterior y también con el uso, la calibración no permanece constante.

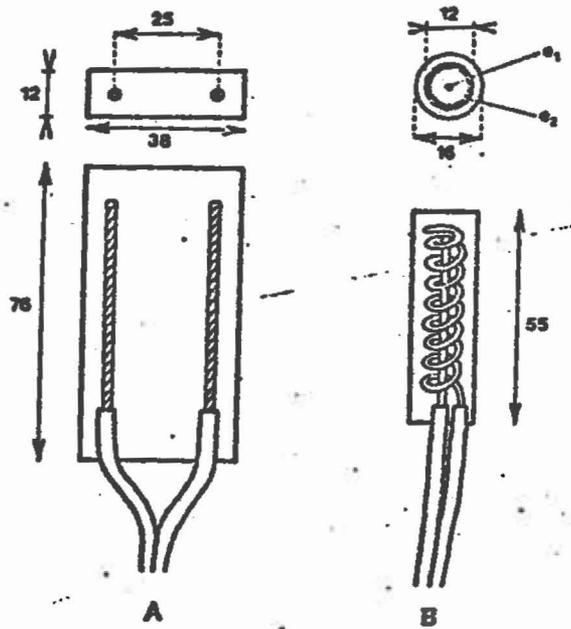


Figura 2.5. Tipos de bloques de yeso de mayor uso para determinar la humedad del suelo.

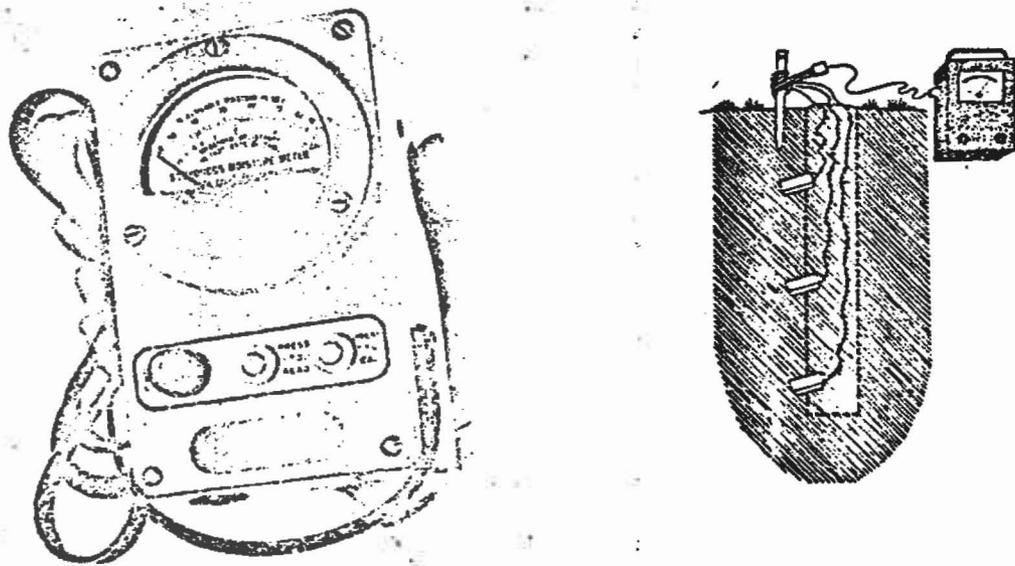


Figura 2.6. Medidor portátil para uso con los bloques de yeso

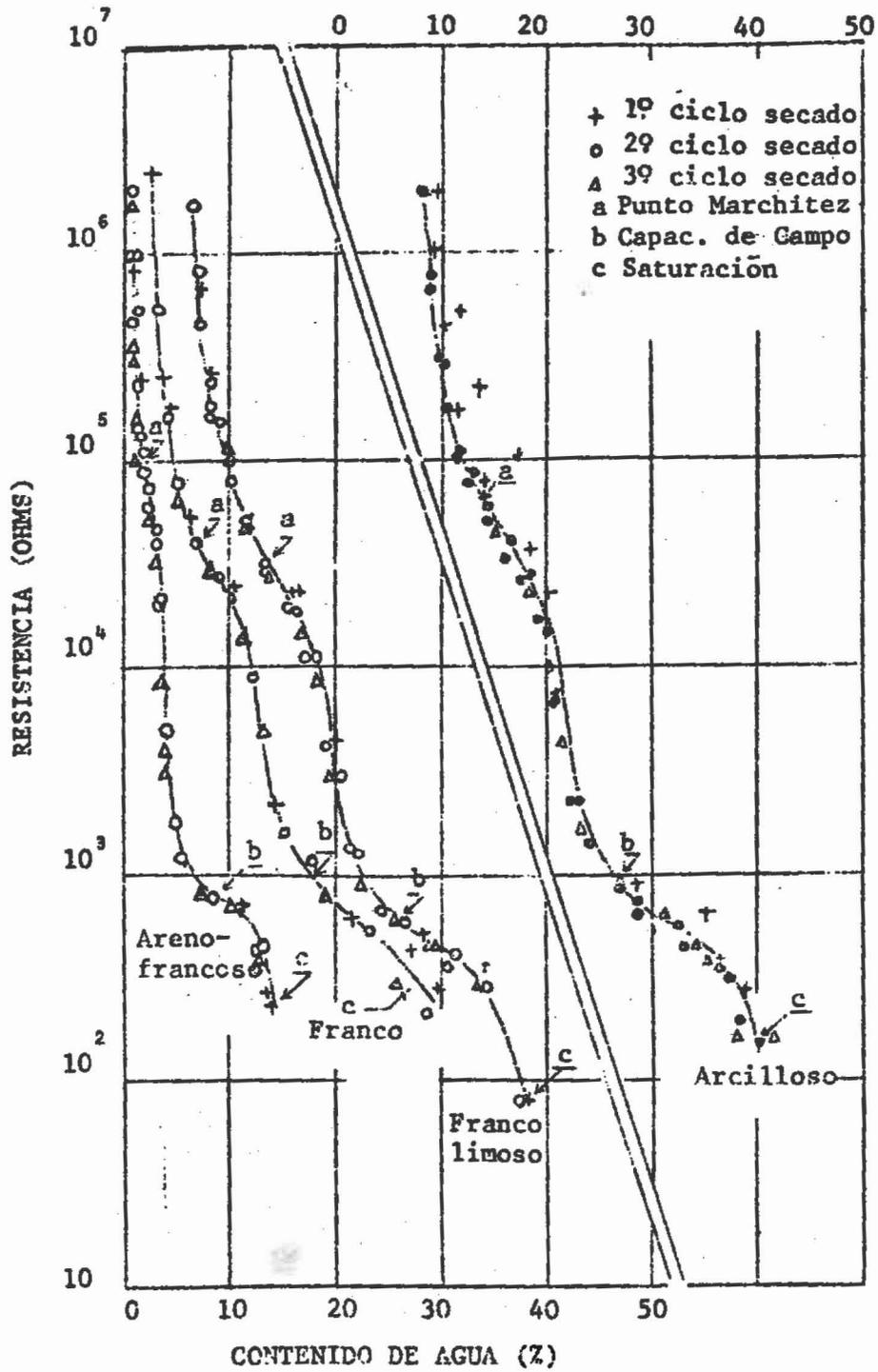


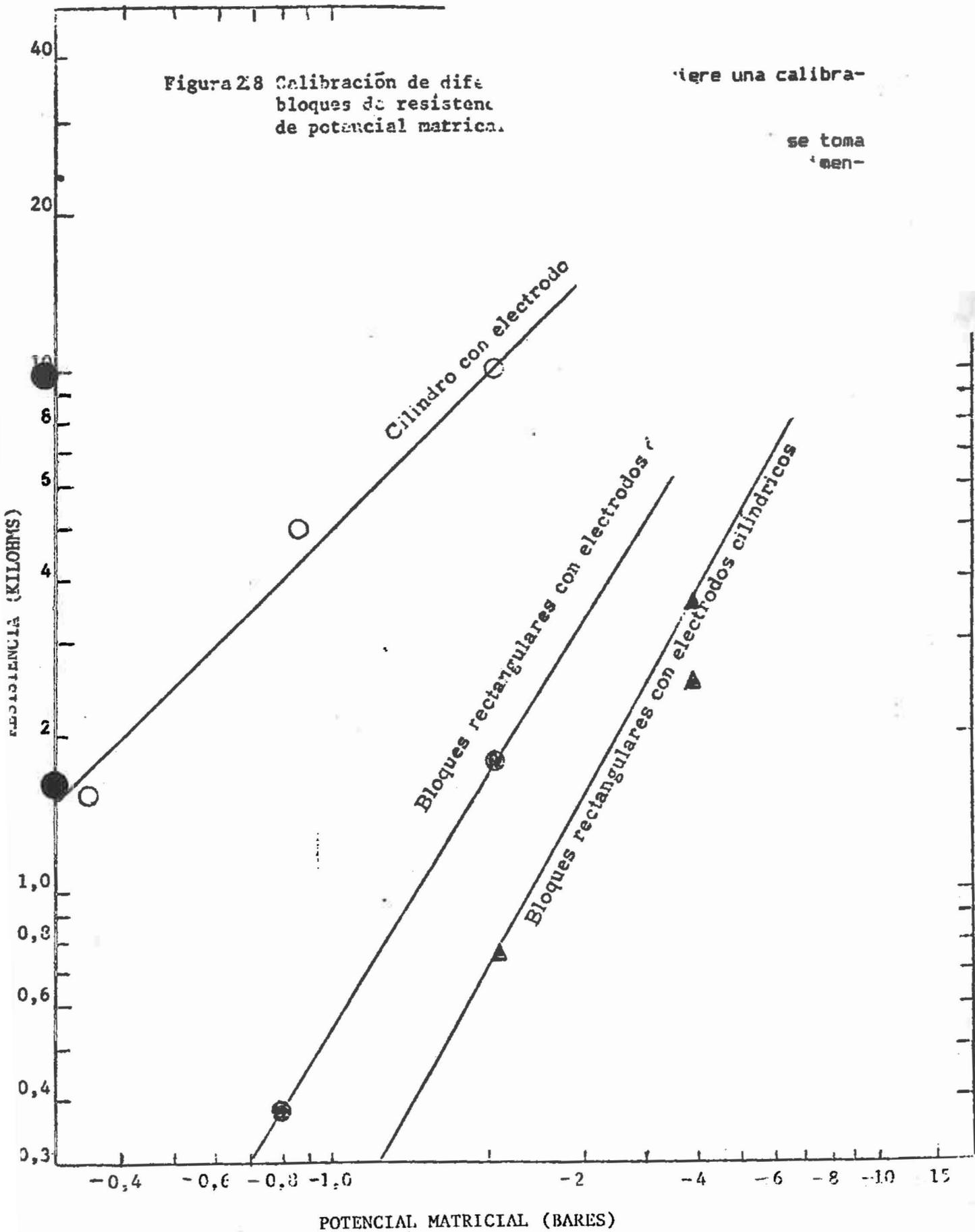
Figura 2.7 Curvas de calibración típicas de bloques de resistencia en términos de porcentaje de humedad, dadas por la fábrica, para 3 suelos de California.

humedad y lectura de los blo-

Figura 28 Calibración de dife  
bloques de resistenc  
de potencial matricial.

iere una calibra-

se toma  
men-



-Relación pobre entre el contenido de humedad y lectura de los bloques

-Gran variabilidad entre unidades por lo que se requiere una calibración individual.

A pesar de las limitantes anteriormente mencionadas, si se toma el debido cuidado, pueden servir para el control de ciertos experimentos de riego.

Taylor et al. (1961) presentan información adecuada sobre diseño, construcción y calibración de diferentes tipos de bloques de resistencia.

### 2.1.5 Métodos Radioactivos

#### a. Detección de neutrones

Los componentes básicos son una fuente radioactiva y un detector de la radiación.

El método consiste en colocar la fuente radioactiva (Am-Be, Ra-Be) a la profundidad deseada en el perfil de suelo. La fuente emite neutrones de alta velocidad, los cuales son atenuados por los protones (iones H+) del agua existente en el suelo. Estos neutrones son atenuados al chocar con los protones de la molécula de agua y devueltos a baja velocidad y contados por un detector.

Otras sustancias que contengan protones pueden causar el mismo efecto atenuador, siendo necesaria una corrección cuando se encuentran en gran cantidad.

Para utilizar este equipo es necesario colocar tubos de acceso en el campo, los cuales pueden ser de cualquier material (aluminio, acero, fierro galvanizado, cobre, etc.) excepto aquellos que provoquen absorción de los protones, como es el caso de los tubos PVC.

Es extremadamente importante que el tubo de acceso quede en íntimo contacto con el suelo, por lo cual generalmente su instalación se hace a presión, retirando con un barreno de gusano el suelo que queda en su interior. El tubo se entierra 15 cm y luego se retira el suelo del interior con el barreno. Luego se entierra otros 15 cm y se barrenea nuevamente. De esta manera, introduciendo el tubo y barreando se continua hasta llegar a la profundidad deseada (Figura 2.9).

La compañía vendedora del instrumento provee una calibración absoluta (Número de conteo versus contenido de agua en volumen). Para trabajo de campo, es preferible calibrar el instrumento en forma relativa para cada suelo en particular. Lo anterior implica tener un "conteo standard" y este normalmente se toma con la fuente radioactiva en su posición de almacenaje. Esta lectura debe tomarse al inicio y término de una serie de medidas, y todas las lecturas tomadas en el

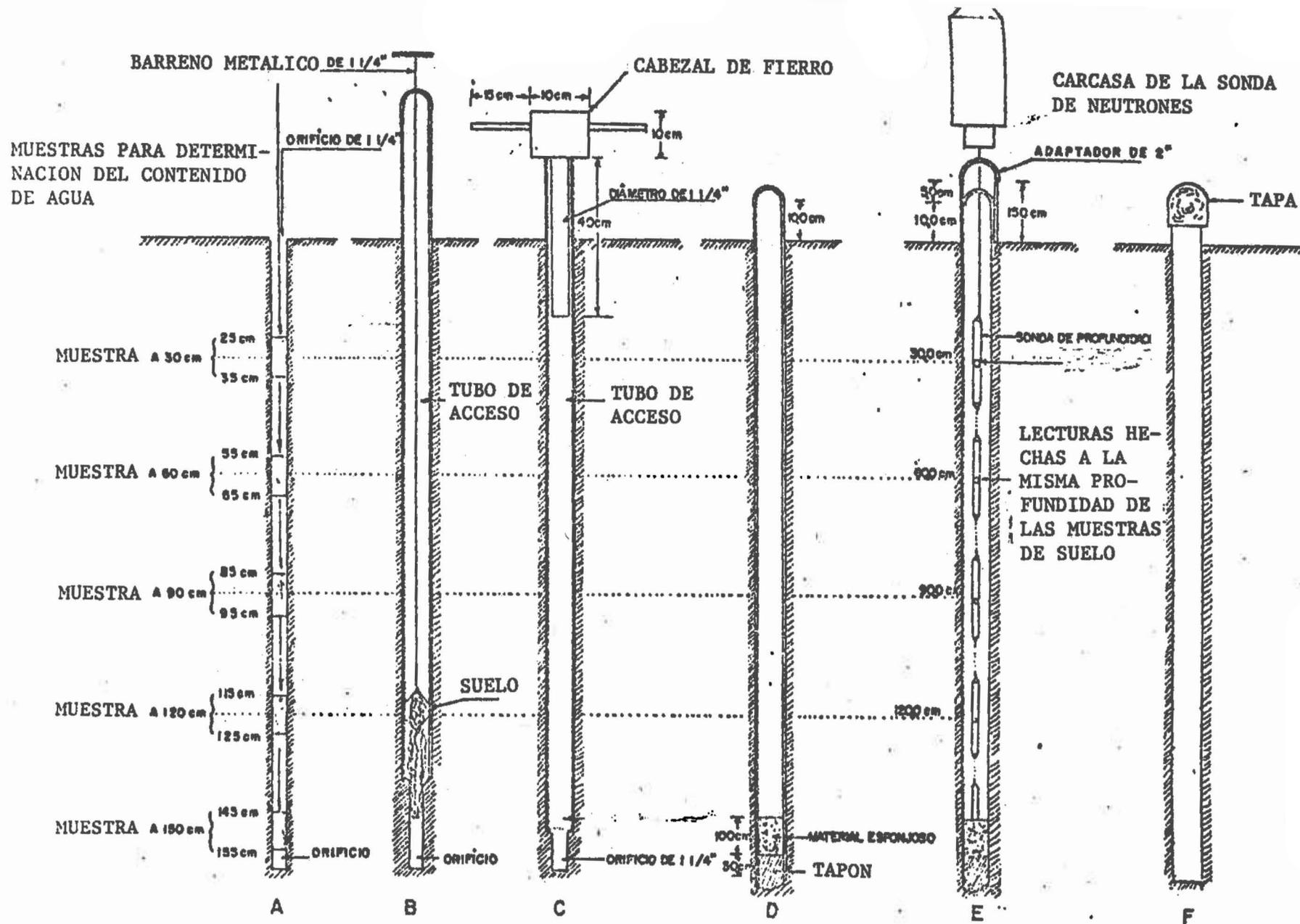


Figura 2.9. Diagrama esquemático de instalación de tubos de acceso, tomas de muestras de suelo y lecturas por el método de la sonda de neutrones.

suelo se expresan en relación al "conteo standard". Entonces, la calibración resulta entre la relación conteo en el suelo/conteo standard y el contenido de humedad en volumen. Este tipo de calibración elimina cualquier error en el número de conteo debido a cambios de temperatura, humedad, poder de la fuente, u otros factores al momento de realizar las lecturas. En la Figura 2.10 se muestran los dos tipos de curvas de calibración, del fabricante y del usuario, para un suelo arenoso, utilizando una sonda Troxler 1257.

En la Figura 2.11 se muestra una curva de calibración de un suelo arenoso obtenida con un equipo Nuclear-Chicago P-19 (Millar et al., 1971)

En la Figura 2.12 se muestra una calibración absoluta obtenida con neutrómetros Troxler (McHenry and Gill, 1967). La Figura 2.13 es una curva de calibración obtenida a 76 cm de profundidad en diferentes tipos de suelos (Taylor et al. 1961), y en la Fig.2.13a para dos tipos de tubos.

La curva de calibración de un suelo, servirá como su standard siempre que se mantengan las mismas condiciones iniciales, es decir, mismo equipo, mismo tipo de tubos de acceso, mismo método de instalación de los tubos y la misma simetría para el "conteo standard" o de referencia.

En principio, la zona de influencia de un "neutrómetro" es infinita, pero en la práctica es limitada. Existe una zona dentro de la cual ocurre el 90-95% de las interacciones de los neutrones detectados. Para un medidor neutrométrico introducido en el suelo, Van Bavel et al, (1956) sugirieron que el diámetro efectivo de la zona de influencia podía obtenerse con la siguiente relación.

$$D = 30 \sqrt{\frac{100}{\theta}} \quad (2.1)$$

donde D es el diámetro de la esfera cuyo centro se encuentra en la fuente radioactiva, y  $\theta$  es el porcentaje de humedad en volumen.

#### Ventajas

- Método no destructivo que permite determinar humedad en el mismo lugar del perfil de suelo.
- Permite medir humedad a gran profundidad siendo el largo del tubo de acceso y presencia de aguas freáticas las únicas limitantes.
- Rapidez de la medición.
- Representatividad de las mediciones. Una medida con el "neutrómetro" equivale a 7 determinaciones gravimétricas.

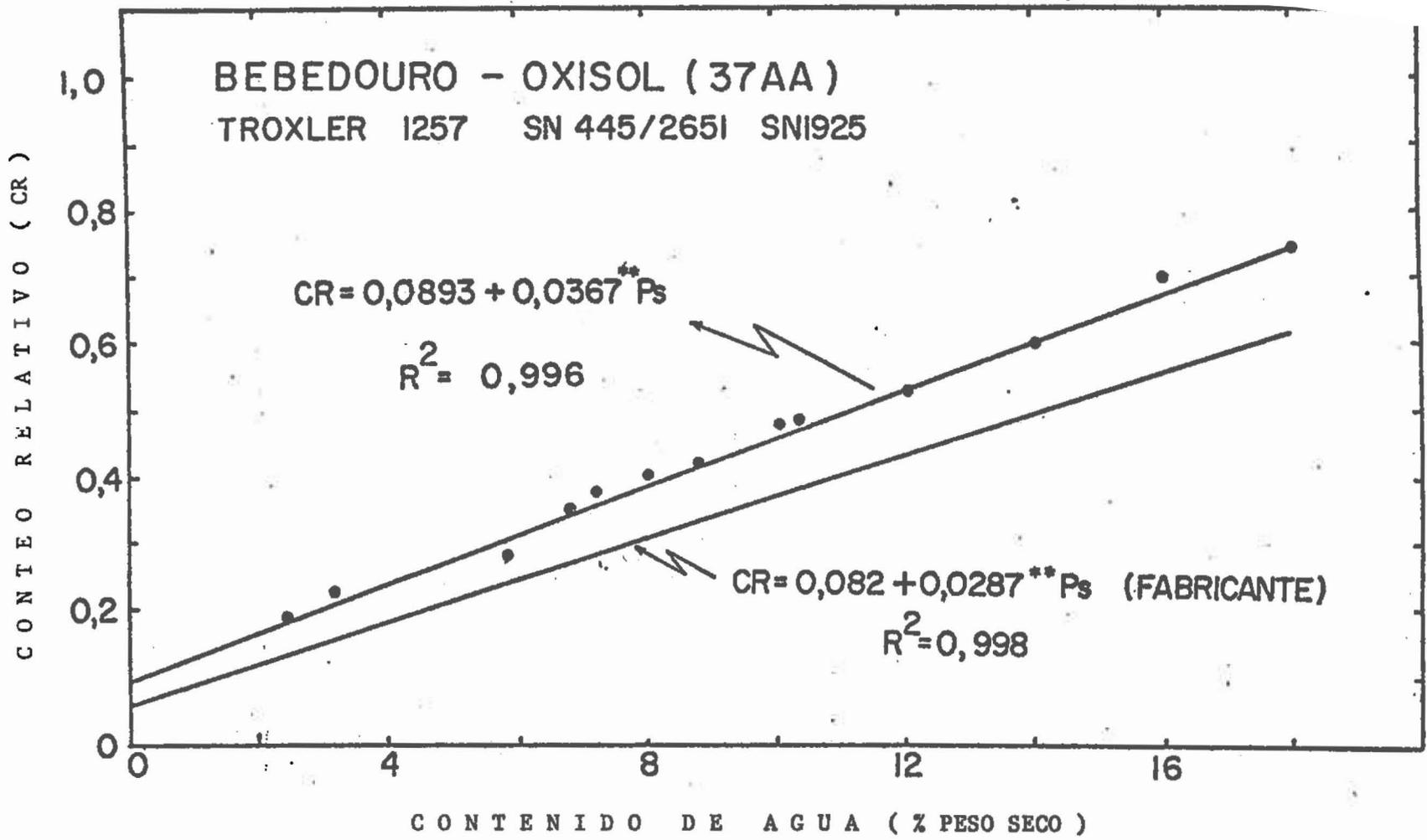


Figura 2.10. Curva de calibración relativa de la sonda de neutrones en un oxisol.

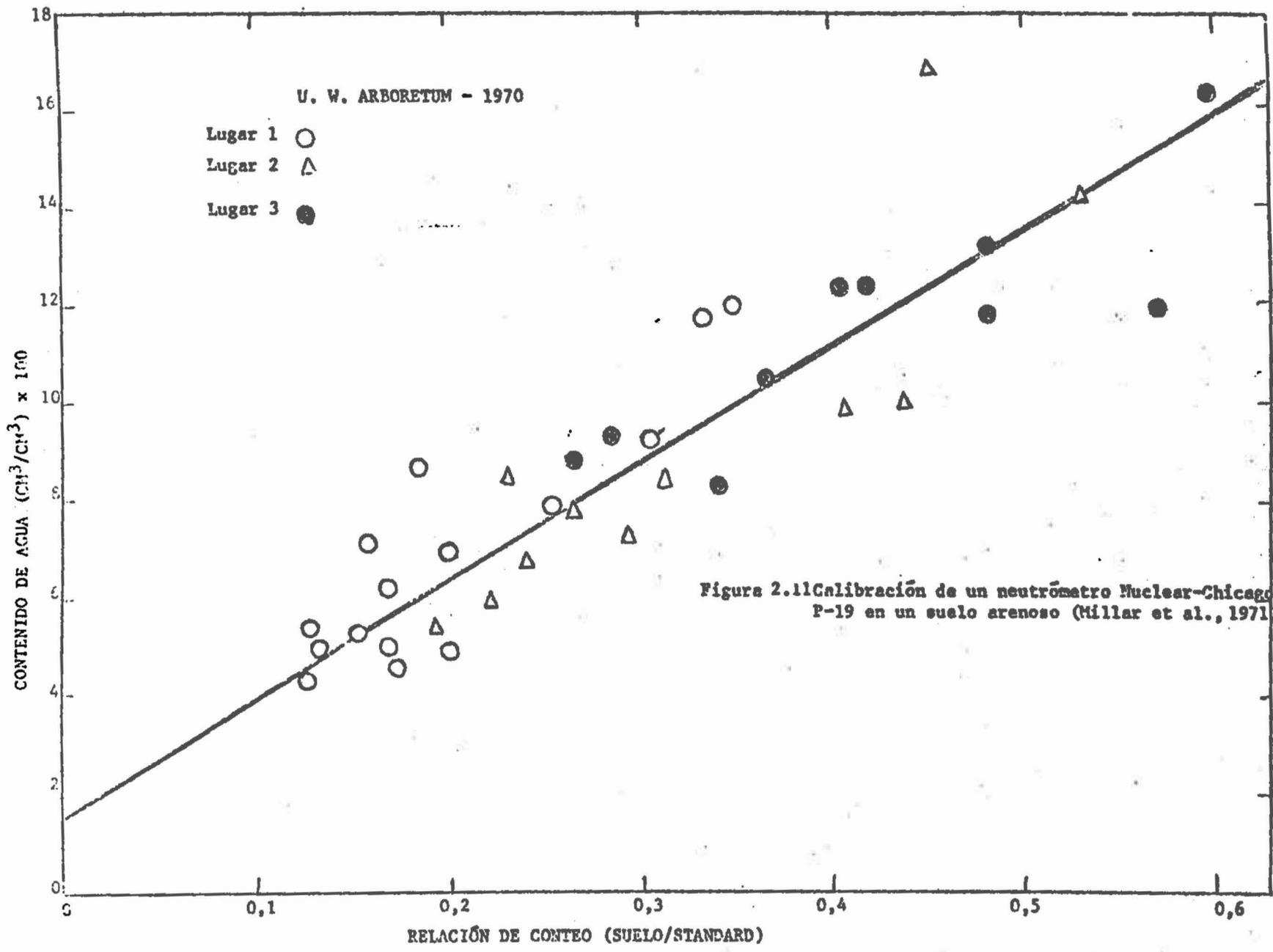


Figura 2.11 Calibración de un neutrómetro Nuclear-Chicago P-19 en un suelo arenoso (Millar et al., 1971)

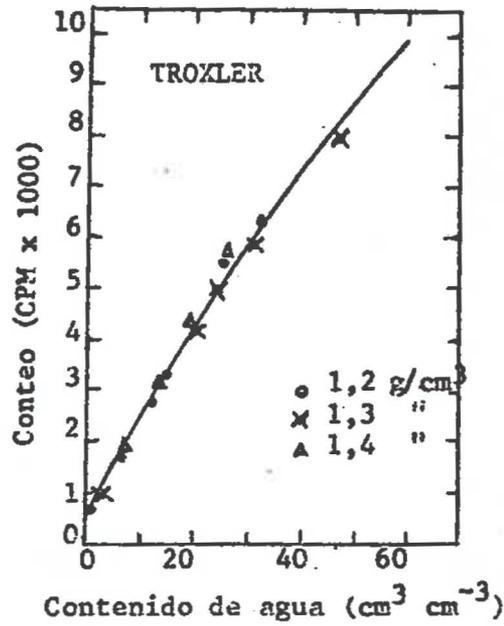


Figura 2.12. Calibración absoluta de un neutrómetro Troxler en un suelo franco limoso a diferentes densidades aparentes (McHenry y Gill, 1967).

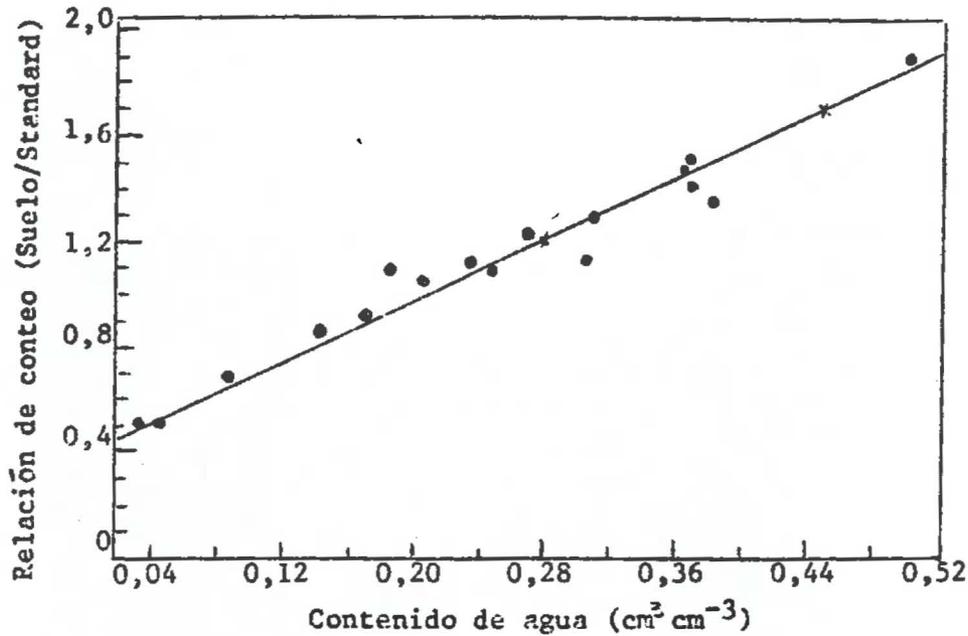


Figura 2.13. Calibración relativa de una sonda de neutrones obtenida a 76 cm de profundidad en diferentes tipos de suelos (Taylor et al., 1961).

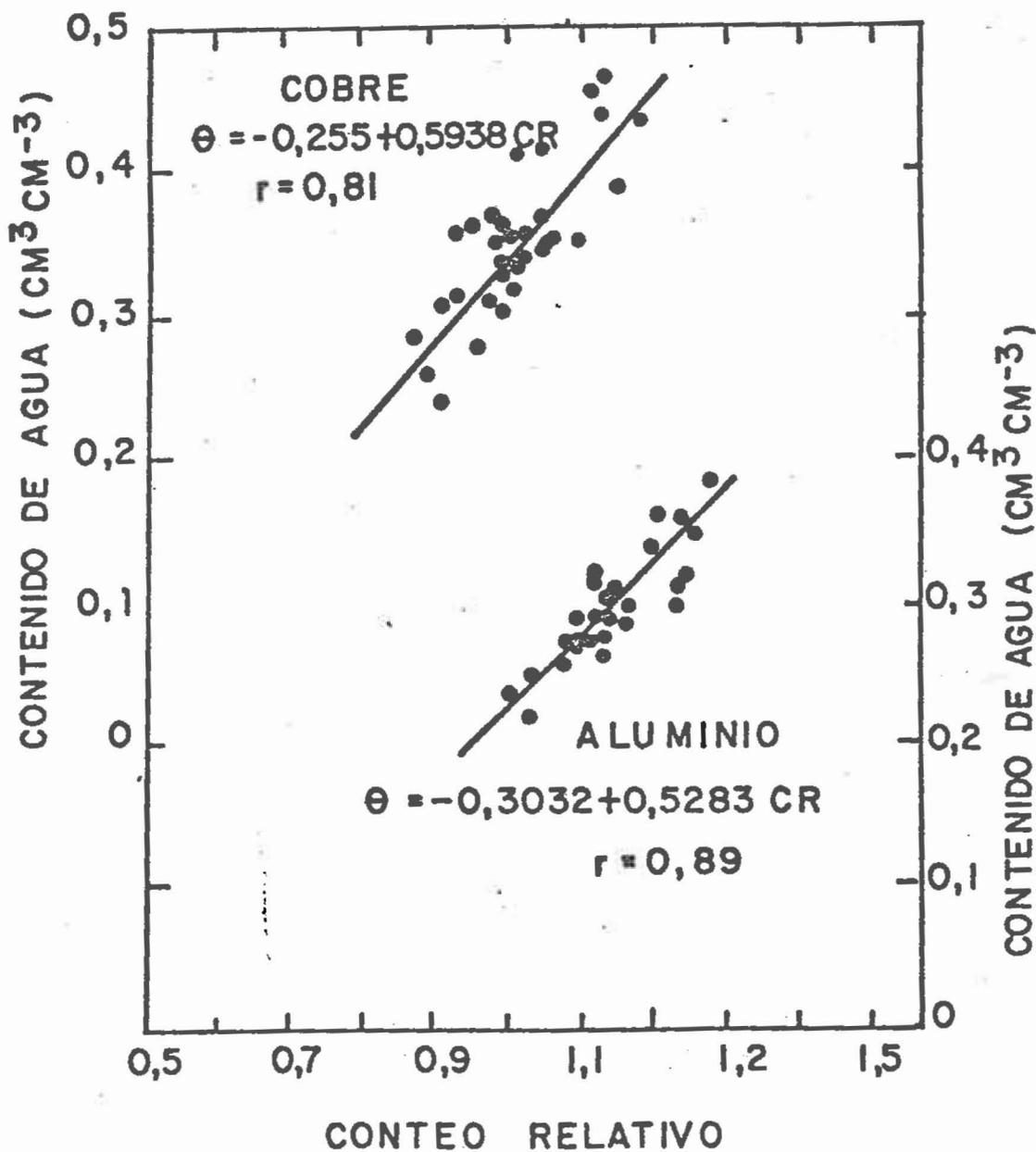


Figura 2.13a . Curvas de calibración del equipo dispersor de neutrones en un suelo Cauquenes, usando dos tipos de tubos de acceso.

### Desventajas

- Sólo se puede usar a partir de 30 cm de profundidad
- Problemas para uso en suelos pedregosos y suelos orgánicos
- Para cada suelo es necesario hacer una curva de calibración.

Dada la rapidez de la determinación de humedad mediante la sonda de neutrones, su utilización es indispensable cuando se necesita efectuar un gran número de medidas. Su gran utilidad en trabajos de balances de agua, evapotranspiración, etc., y en trabajos de riego en general está demostrada en muchas publicaciones (Boodt et al., 1967; Lambert, 1970; Holmen et al., 1967).

### b. Atenuación de rayos gama

Hasta ahora la utilización de fuentes radioactivas, que emiten rayos gama, en la determinación de la humedad del suelo, se ha circunscrito a trabajos de laboratorio con columnas. Su utilización en determinaciones de campo ha sido restringida. El problema principal de la radiación gama radica en el hecho que su poder de penetración es muy alto, no obstante, posee un bajo poder de ionización.

El método consiste en interponer una columna de suelo entre la fuente emisora de radiación gama y el detector (Figura 2.14).

### Ventajas y Desventajas

- Método no destructivo que permite determinar la humedad en el suelo
- Por lo menos hasta ahora, sólo utilizable en columnas de suelo montadas en laboratorios.
- Requiere equipo preciso de medición
- Emite radiación altamente dañina para la salud.

Otras informaciones sobre medidores basados en la atenuación de rayos gama se pueden consultar en las publicaciones de King (1967), y Gardner y Calissendorff (1967).

### 2.1.6 Conducción de calor

Este método para determinar el potencial de agua del suelo, descrito por Phene et al, (1971), se basa en que la velocidad de disipación de calor en un medio poroso es función del contenido de agua.

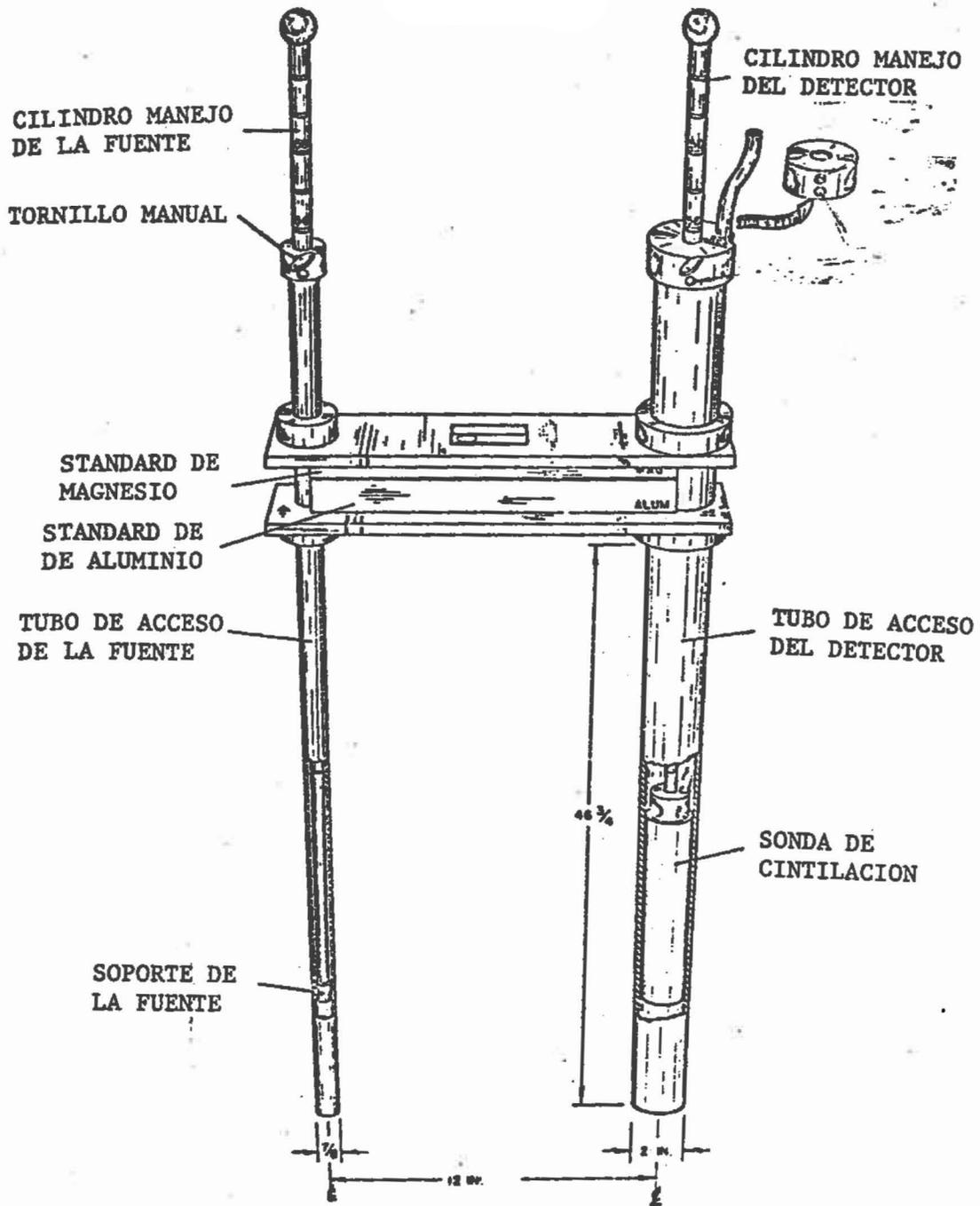


Figura 2.14. Equipo de radiación gamma para uso en estudios de campo (todas las dimensiones son en pulgadas) (Kirkham y Corey, 1973).

Según la ley de Fourier para conducción de calor, la densidad de flujo calórico es directamente proporcional a la conductividad térmica del suelo ( $k$ ) y a la gradiente de temperatura ( $dT/dz$ ). Esto queda expresado por:

$$f = -k(\theta) \frac{dT}{dz} \quad (2.2)$$

La conductividad térmica del suelo ( $k$ ) aumenta exponencialmente con el contenido de agua, y en esta propiedad se basa el método de medida.

El contenido de agua de un material poroso se puede obtener colocando una fuente generadora de energía en un punto y midiendo la variación de temperatura en el mismo punto. El instrumento consiste de un diodo de germanio (RCA IN 2326) que se utiliza como detector de la temperatura. El diodo se cubre con alambre aislado con teflon, el cual sirve como elemento disipador de energía cuando una corriente de valor determinado circula a través de él. Entonces, básicamente el instrumento consta de un circuito que alimenta al diodo y un circuito que genera energía.

El arreglo de diodo y alambre disipador de energía se coloca en un bloque de yeso, con sus salidas para conectar al circuito correspondiente. El sensor se calibra en términos de diferencia de voltaje, debida al aumento de temperatura que ocurre cuando el circuito de generador de energía se enciende por un tiempo determinado, y potencial matricial.

#### Ventajas

- Medidas son independientes del contenido de sales de la solución del suelo
- Determinación del potencial matricial hasta -15 bares
- Sistema portátil
- Este sensor da simultáneamente y potencial matricial
- Construcción relativamente fácil
- Costo moderado comparado con otros métodos.

#### 2.1.7 Psicrómetros

La utilización de psicrómetros es de uso frecuente en investigaciones del sistema suelo-planta-atmósfera. Así, en micrometeorología se utilizan para determinar la relación de Bowen (calor sensible/calor latente), y en investigaciones del sistema suelo-planta para la determinación del potencial de agua (Ehlig, 1962; Hoffman y Splinter, 1968; Hoffman y Herkelrath, 1968; Rawlins, 1966).

El potencial de agua de un sistema se define como la diferencia

de energía entre el agua a una presión y temperatura dada, y el agua libre. Termodinámicamente, el potencial de agua se puede expresar en términos de presiones de vapor de la manera siguiente:

$$\psi = (RT/\bar{v}) \ln(e/e_0) \quad (2.3)$$

donde  $\psi$  es el potencial de agua en bar, R es la constante universal de los gases en bar-cm<sup>3</sup>/mol K, T es la temperatura absoluta en grados Kelvin (K),  $\bar{v}$  es el volumen molar parcial del agua en cm<sup>3</sup>/mol, e es la presión de vapor de agua en el sistema a temperatura absoluta en milibar y  $e_0$  es la presión de vapor saturado a temperatura absoluta en milibar. En esta ecuación, la relación  $e/e_0$  es la humedad relativa del sistema. Para determinar el potencial de agua es preciso conocer la humedad relativa del aire en equilibrio con el sistema (Monteith y Owen, 1958; Richards y Ogata, 1958). Esta medición se realiza con psicrómetros de termopares, siendo los de uso más común el psicrómetro de Peltier, basado en el efecto de Peltier y el psicrómetro de Richards (Barrs, 1968, Box 1965, Dalton y Rawlins, 1968; Ehlig, 1962; Spanner, 1951).

En la Figura 2.15 se muestran las siluetas de los psicrómetros, basados en el efecto Peltier (A) y Richards (B).

El efecto Peltier se presenta toda vez que se hace pasar una corriente fría a través de un termopar; la cupla principal se enfría mientras que las cuplas de referencia se calientan. Debido a este diferencial térmico, hay una diferencia en fuerza electromotriz (fem) que se pueden detectar fácilmente con un microvoltímetro.

El psicrómetro de Richards y Ogata (1958) utiliza un anillo de plata el cual se sumerge en agua antes de colocarlo en la cámara de equilibrio que contiene la muestra de planta o suelo. Este anillo con agua representa la temperatura del bulbo húmedo y las uniones de referencia representan la temperatura del bulbo seco.

En las relaciones hídricas del sistema suelo-planta, el potencial de agua es una de las medidas de mayor importancia. En consideración a lo anterior, en este capítulo se presentan las técnicas más simples y de menor costo para la confección de termopares, así como también la construcción de psicrómetros basados en el efecto de Peltier, (Millar, 1971).

#### a. Construcción de termopares

Los metales de mayor uso en la confección de termopares para psicrómetros son cromel y constantan que generan una fem de 60 mV/C en el rango de utilización de los psicrómetros.

Considerando que los alambres son muy finos (25 micrones) y que se requiere una unión esférica y sólida entre el cromel y constantan, es necesario mantenerlos juntos antes de proceder a soldarlos para formar el termopar. Esto se logra colocando los alambres en un soporte en forma de V (Figura 2.16a). Primero se coloca un alambre (cromel por ejemplo) en el soporte, un extremo del cual se pega con cinta

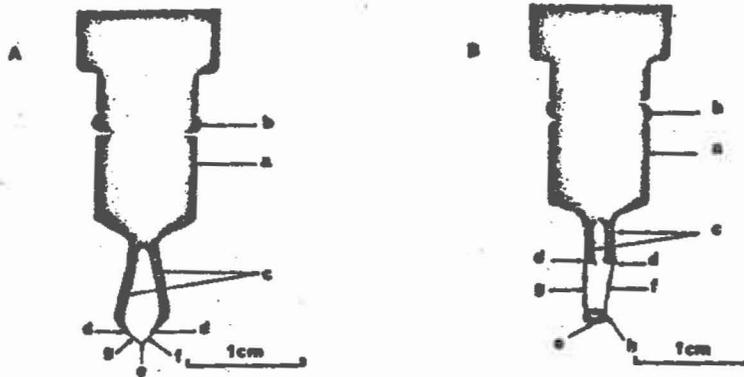


Figura 2.15. Siluetas de los psicrómetros de Spanner (efecto Peltier), A, y de Richards y Ogata (B). a: material sólido de bronce o teflón, b: anillo de sello,, c: alambres de cobre, d: uniones de referencia, e: unión libre, f: cromel, 25 micrones, g: constantan, 25 micrones, y h: anillo de plata.

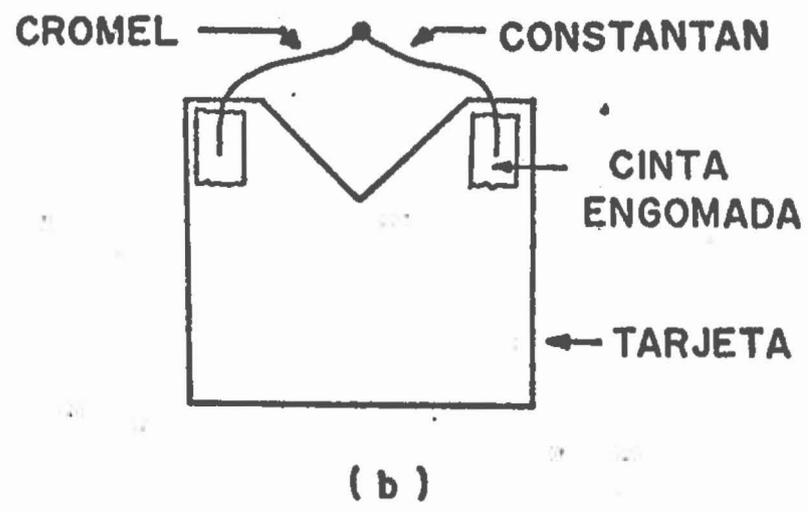
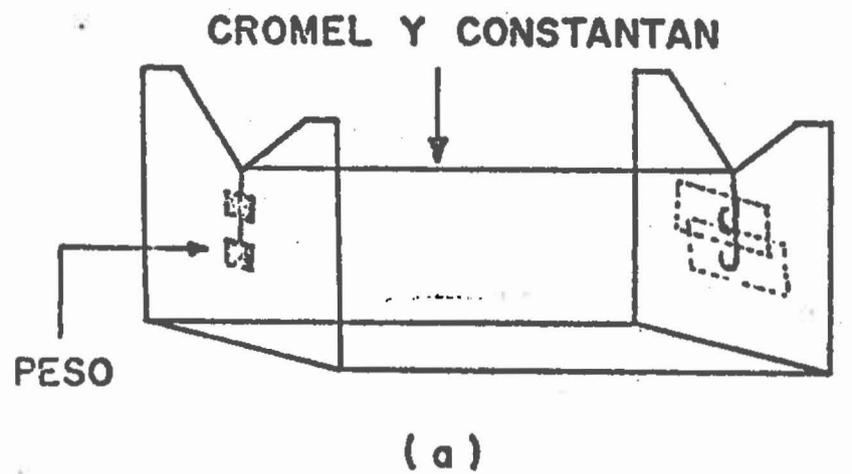


Fig. 2.16 Soporte para mantener los alambres de cromel y constantan en contacto y fijación de las termocuplas.

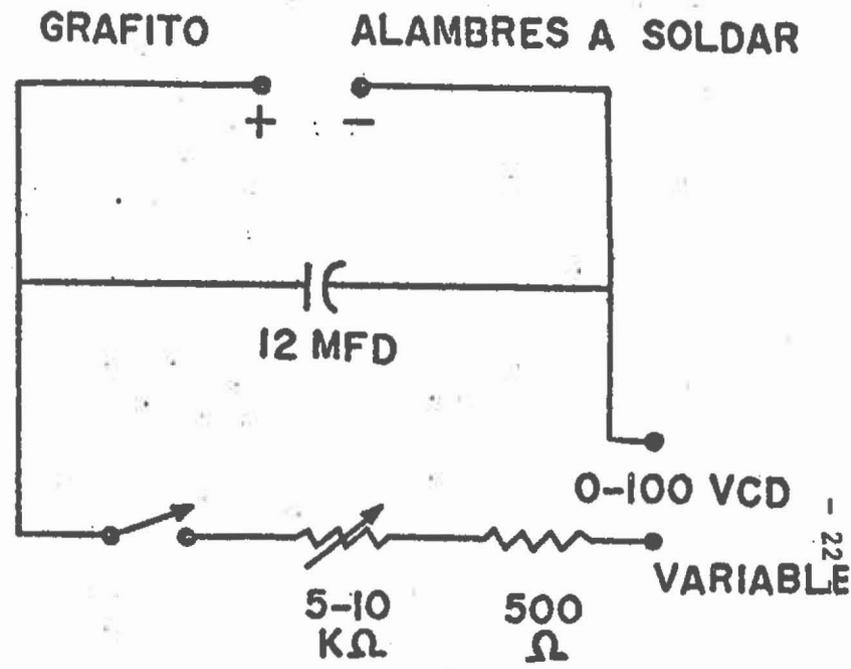


Fig. 2.17 Circuito para soldadura mediante descarga de un condensador utilizando corriente continua.

engomada a un costado de éste y en el otro extremo se cuelga un peso de aproximadamente 2 g para mantenerlo tenso. Se hace exactamente lo mismo con el segundo alambre (constantan). Una vez que ambos alambres de ubican en el soporte, se ponen en estrecho contacto en el sector comprendido entre los extremos de éste. Con ayuda de una lupa, se inspecciona que los alambres no estén separados en ningún sector. Para mantener cromel y constantan en contacto permanente, se utiliza barniz de uña incoloro.

La soldadura se efectúa mediante la descarga de un condensador a través de los alambres y contra una superficie plana de grafito, usando un circuito eléctrico que se describe en la Figura 2.17. Esta operación se debe realizar bajo un microscopio para controlar que los alambres estén perpendiculares al grafito antes de efectuar la descarga, así como también para constatar el éxito de la soldadura.

El circuito eléctrico para efectuar la soldadura, varía de acuerdo al tipo de corriente disponible, continua o alterna.

En la Figura 2.17 se muestra uno de los circuitos más sencillos para el caso de corriente continua. En la eventualidad que no exista corriente continua de a lo menos 40 V, se deberá utilizar corriente alterna. En este caso, es necesario rectificar la corriente con el objeto de polarizarla. Circuitos de rectificación son fáciles de construir y uno de los procedimientos al que se recurre con frecuencia, es el uso de diodos de silicio. Una de las propiedades de los diodos es bloquear el paso de la corriente en un sentido, permitiendo el flujo de corriente en la otra dirección. En la Figura 2.18a se presenta el circuito más adecuado para corriente alterna de 220 V. El voltaje de 220 VCA se reduce a 40VCA, mediante un reóstato y la corriente se polariza con un rectificador de 75 ma. El circuito se completa con un condensador electrolítico de 12 MFD. En el caso que se utilice corriente de mayor intensidad, es necesario usar dos diodos en paralelo precedidos de dos resistencias para obtener la polarización adecuada. Las resistencias deben ser de igual valor para evitar mayor trabajo de uno de los rectificadores, y deben producir una caída de voltaje de 1 V a través de ellas. Este último circuito se presenta en la Figura 2.18b.

Para efectuar la soldadura, se colocan los alambres en un soporte o micromanipulador que permita el desplazamiento lineal. Se carga el condensador por un instante (2 a 5 seg) y luego se desplaza el extremo con el grafito hasta que toma contacto con los alambres descargándose el condensador.

Una vez que se ha obtenido la soldadura, se cortan los alambres de un largo de 3 cm y se colocan en una cápsula petri con acetona para remover el barniz que los une. La firmeza de la termocupla se prueba colgando, mediante una pequeña tenaza, un peso de 2 a 3 g en un extremo de la cupla y levantándola con una pinza desde el otro extremo.

Para conservar las termocuplas de manera que se facilite su uso posterior en la confección de psicrómetros, es conveniente fijarlas

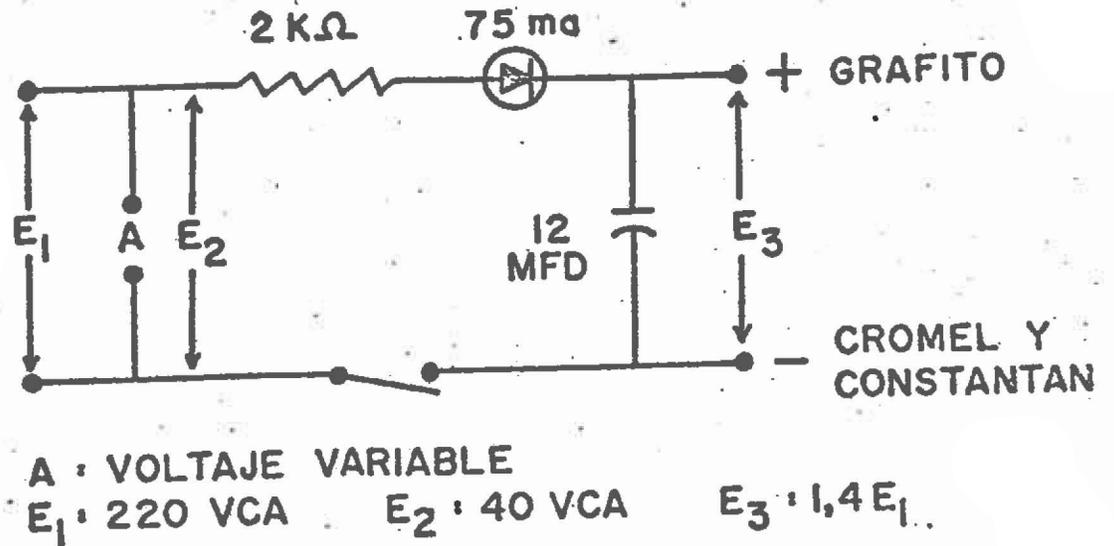


Fig. 2.18a. Circuito para soldadura mediante descarga de un condensador utilizando corriente alterna rectificad (media onda).

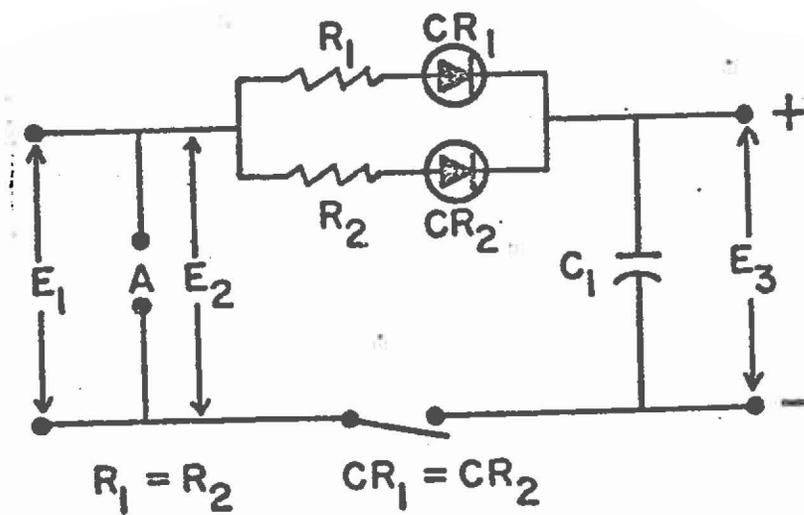


Fig. 2.18b. Circuito para rectificaci3n de corriente alterna de una mayor intensidad.

desde los extremos con una cinta engomada a un pequeño trozo de cartulina en forma de V (Figura 17b).

#### b. Construcción de los psicrómetros

La Construcción de la parte básica de los psicrómetros para material vegetal o suelo, es idéntica. Sin embargo, los psicrómetros para tejido vegetal requieren de una cámara o receptáculo donde colocar la muestra (Figura 2.19). En cambio, los psicrómetros para uso en el suelo están dotados de una cápsula porosa o una malla de acero inoxidable muy fina que rodea al termopar (Figura 2.20).

En la construcción de los componentes básicos de un psicrómetro, puede usarse acero inoxidable, cobre, acrílicos, etc., sin embargo, el material de uso más corriente es el teflón, por ser fácilmente trabajable en el torno y no absorber agua (Merrill, 1968).

Una barra de teflón de 1,5 cm de diámetro se monta en un torno y se perfora un orificio central de 1 cm de diámetro y 3 cm de largo. A 3 mm de este extremo se corta la barra, obteniéndose un cilindro con una abertura sólo en un extremo. El extremo cerrado se pule y se le abren dos orificios pequeños con un alfiler y luego se hace pasar por ellos sendos alambres de cobre de 1 mm de diámetro (22 ga), tal como lo indica la secuencia de la Figura 2.21. A estos alambres se les suelda cables de cobre aislado, los cuales servirán de extensión hasta la caja distribuidora de corriente fría. El lugar de la soldadura se debe aislar ya sea con tubería plástica o con huincha aisladora. Los alambres de cobre (22 ga) se desplazan hasta que la soldadura con la cubierta aisladora impiden mayor movimiento. Estos alambres se cortan a una altura de 6 mm y el corte se lija o lima suavemente hasta obtener una superficie plana.

A partir de este instante, todo el proceso de construcción posterior se realiza bajo el microscopio. Con una hoja de rasurar se hace una ranura en la superficie plana. La profundidad del corte deberá ser de 0,5 mm para que permita el desplazamiento de los alambres de la cupla previamente preparada.

Los extremos de la cupla se colocan en las ranuras y con la ayuda de un alicate pequeño se aprieta el alambre de cobre para hacer un contacto mecánico. Con una hoja de rasurar se elimina el excedente de alambre de la cupla.

La parte básica del psicrómetro está finalizada, pero es conveniente darle mayor maniobrabilidad, lo cual se consigue con un trozo de tubería de teflón, cobre o madera de un diámetro externo adecuado a la cavidad central. A esta parte se le adapta una cámara para uso con muestras vegetales o una cápsula cerámica para uso en el suelo. (Figuras 2.19 y 2.20). La cámara o receptáculo para muestras vegetales debe ser de aproximadamente 2,5 cm<sup>3</sup> de capacidad y puede hacerse de teflón o acero inoxidable. Este último ha dado buenos resultados, pero existen dificultades en su construcción (Barrs, 1968).

Para eliminar la presencia de materiales extraños que se puedan

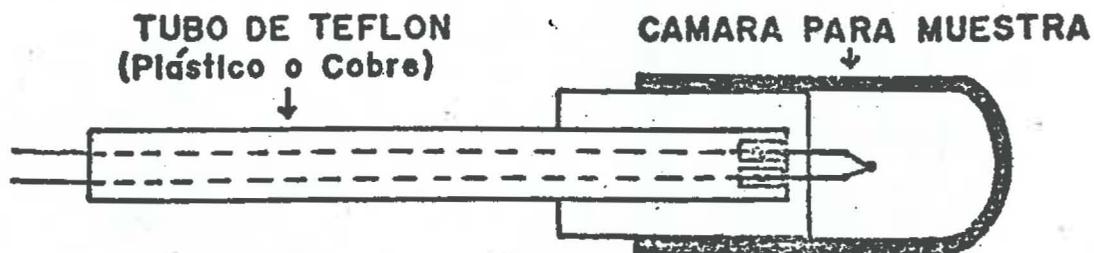


Fig. 2.19. Psicrómetro para determinar el potencial de agua en muestras vegetales o de suelo (Millar, 1971)

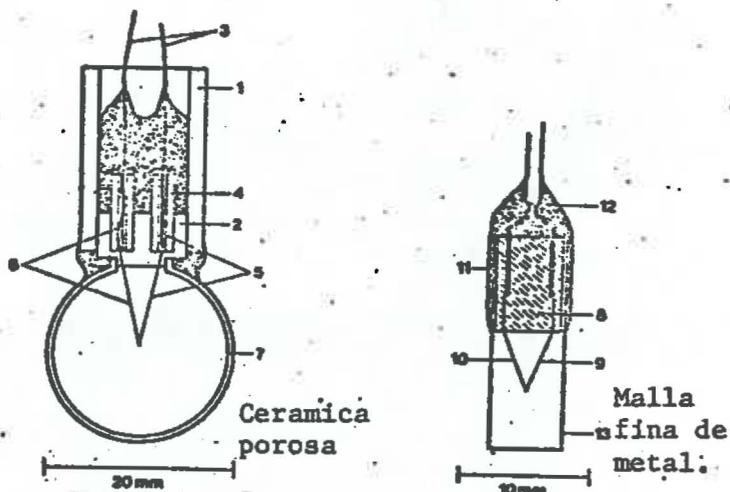


Fig. 2.20. Psicrómetros para determinar in situ el potencial de agua en el suelo (Dalton y Rawlins, 1967).

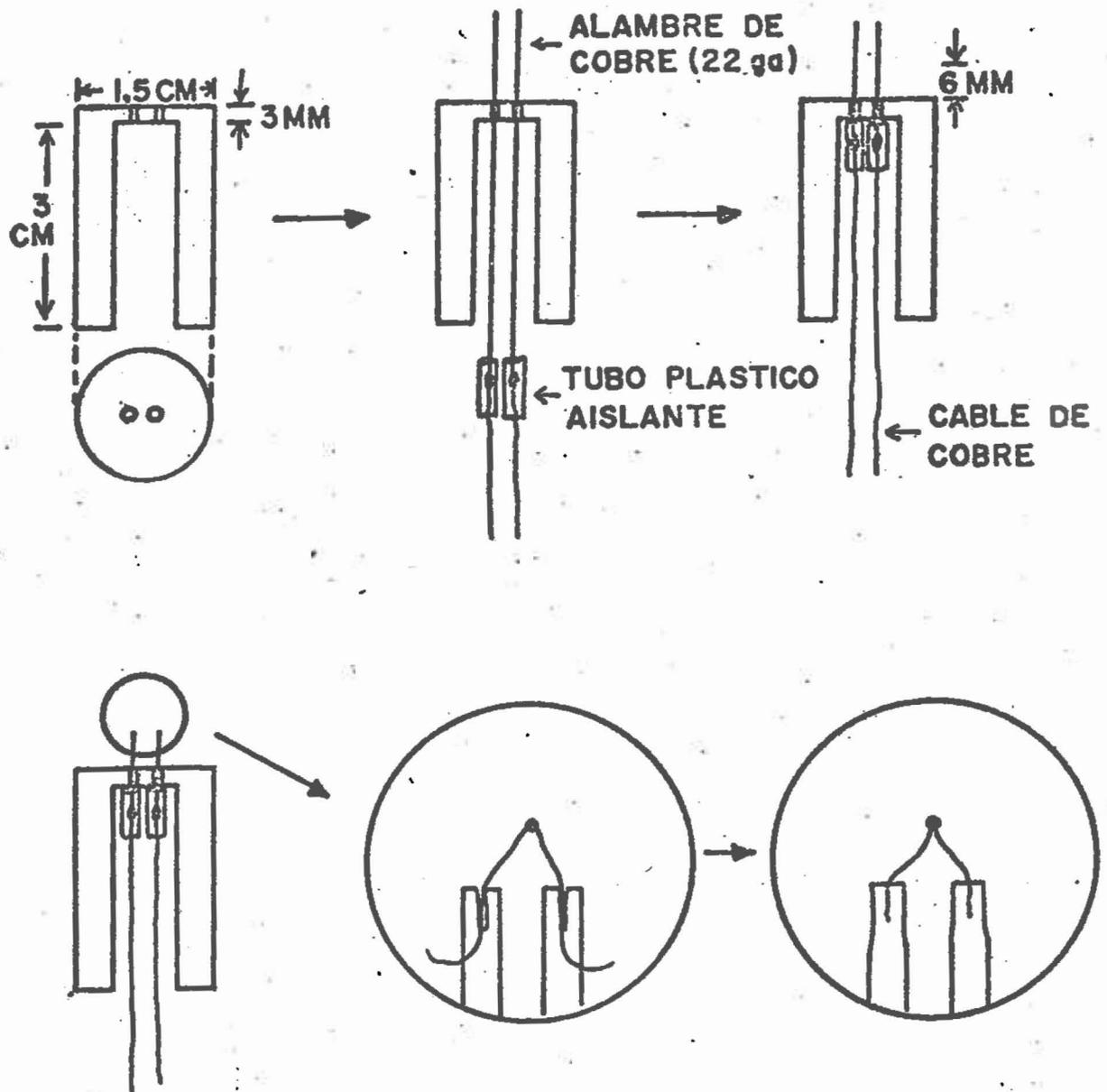


Fig. 2.21. Secuencia de la construcción y armado de un psicrómetro del tipo de Peltier. (Millar, 1971).

haber adherido a la cupla, se recomienda la limpieza primero con agua hirviendo, luego con acetona y finalmente con agua destilada. El exceso de agua se elimina con corriente de aire seco.

### c. Calibración

Para calibrar los psicrómetros es necesario recubrir las paredes internas de la cámara con papel filtro. Para ello se coloca un pedazo rectangular en su manto y otro circular en la base. El papel filtro se imbebe con 4 ó 5 gotas de una solución de NaCl de molalidad conocida. En el Cuadro 2.1 se presenta una lista de potenciales de agua a diferentes temperaturas para soluciones de NaCl de diferentes molalidades (Lang, 1967). En la calibración de psicrómetros se utiliza comunmente soluciones de NaCl de molalidades 0,05; 0,1; 0,3 y 0,5. A la temperatura de 25 grados C, los potenciales de agua de estas soluciones son -2,34; -4,62; -13,68 y -22,8 bar, respectivamente (Cuadro 2.1). Cada psicrómetro debe calibrarse a una misma temperatura con cada una de estas soluciones. Una vez que los psicrómetros se han preparado con una solución molal determinada, se colocan en un baño a temperatura constante. Generalmente después de 2 a 2,5 horas, se establece el equilibrio y se pueden tomar las lecturas. En la Figura 2.22 se muestra la variación de la fem en función del tiempo para un psicrómetro con muestra vegetal (Millar, 1967).

Para cada psicrómetro se confecciona un gráfico en términos de microvoltios versus potencial de agua de la solución. (Figura 2.23). Los potenciales de agua para las respectivas molalidades y temperatura de trabajo se obtienen del Cuadro 2.1. En la Figura 2.24 se muestran curvas de calibración a diferentes temperaturas (Millar et al, 1969).

### d. Circuito eléctrico y lecturas

El circuito eléctrico que se requiere para pasar la corriente fría a los psicrómetros, se presenta en la Figura 2.24. Los componentes de este circuito están a la venta en cualquier establecimiento de material electrónico.

Las características del psicrómetro determinan la intensidad de la corriente fría que se debe usar. Para el psicrómetro descrito en este capítulo, debe utilizarse una corriente de 3 ma. Cuando el psicrómetro está conectado al circuito se hace pasar corriente por la cupla y se regula la intensidad (3 ma), utilizando el potenciómetro variable R-2 (Figura 2.25).

Cuando se trata de psicrómetros de diferente diseño, se debe investigar la intensidad de la corriente más adecuada a él (Dalton y Rawlins, 1968). Para ello, se conectan los psicrómetros, con las cámaras limpias y secas, a la caja distribuidora de corriente y utilizando el potenciómetro variable (R-2), se regula una corriente de 2 ma, la cual debe pasar durante 15 segundos. Al término de este tiempo, se toman las lecturas siguiendo los pasos indicados más adelante. Se hace lo mismo para corrientes de 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, y 10 ma. Para cada psicrómetro se confecciona un gráfico de la fuerza electromotriz

Cuadro 2.1 POTENCIAL DE AGUA DE SOLUCIONES DE NaCl (Joules/kg)<sup>1</sup>

Molalidad	Temperatura (C)								
	0	5	10	15	20	25	30	35	40
0.05	-214.4	-218.4	-222.2	-226.2	-230.1	-233.9	-237.7	-241.6	-245.4
0.1	-423	-431	-439	-447	-454	-462	-470	-477	-485
0.2	-836	-852	-868	-884	-900	-915	-930	-946	-961
0.3	-1247	-1272	-1297	-1321	-1344	-1368	-1391	-1415	-1437
0.4	-1658	-1693	-1727	-1759	-1791	-1823	-1855	-1886	-1917
0.5	-2070	-2115	-2158	-2200	-2241	-2281	-2322	-2362	-2402
0.6	-2484	-2539	-2593	-2644	-2694	-2744	-2794	-2843	-2891
0.7	-2901	-2967	-3030	-3091	-3151	-3210	-3270	-3328	-3385
0.8	-3320	-3398	-3472	-3543	-3612	-3682	-3751	-3818	-3885
0.9	-3743	-3832	-3917	-3998	-4079	-4158	-4237	-4314	-4390
1.0	-4169	-4270	-4366	-4459	-4550	-4640	-4729	-4815	-4901
1.1	-4599	-4713	-4820	-4924	-5026	-5127	-5226	-5322	-5418
1.2	-5032	-5160	-5278	-5394	-5507	-5620	-5730	-5835	-5941
1.3	-5470	-5611	-5742	-5869	-5994	-6119	-6239	-6354	-6471
1.4	-5912	-6068	-6210	-6350	-6487	-6623	-6754	-6880	-7006
1.5	-6359	-6529	-6684	-6837	-6986	-7134	-7276	-7411	-7548
1.6	-6811	-6996	-7163	-7330	-7491	-7652	-7805	-7950	-8097
1.7	-7260	-7460	-7640	-7820	-8000	-8170	-8330	-8490	-8650
1.8	-7730	-7940	-8130	-8330	-8520	-8700	-8880	-9040	-9210
1.9	-8190	-8430	-8630	-8840	-9040	-9240	-9430	-9600	-9780
2.0	-8670	-8920	-9130	-9360	-9570	-9780	-9980	-10160	-10350

1 Conversión: 1 bar = 100 Joules/kg

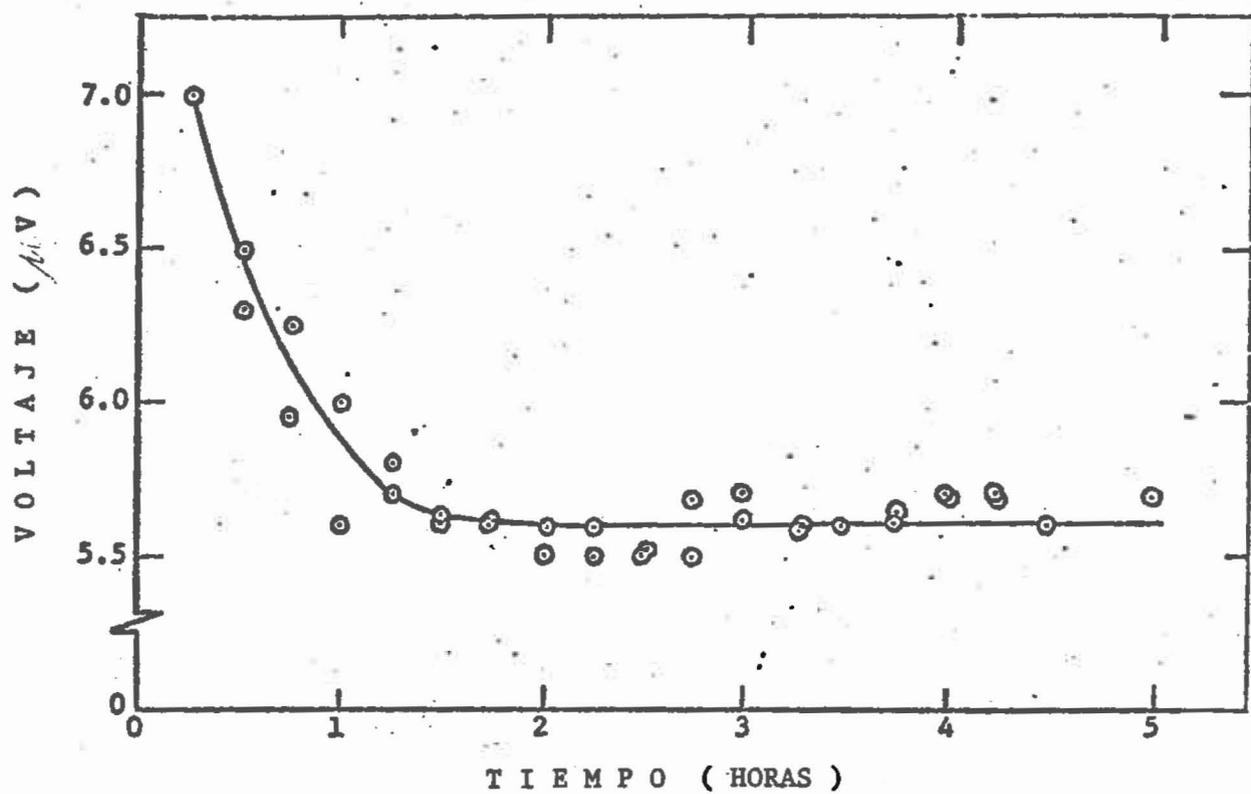


Figura 2.22. Fuerza electromotriz en función del tiempo para un psicrómetro Spanner, tipo Peltier, cuando usado con muestras de hojas de cebada ( Millar, 1967 ).

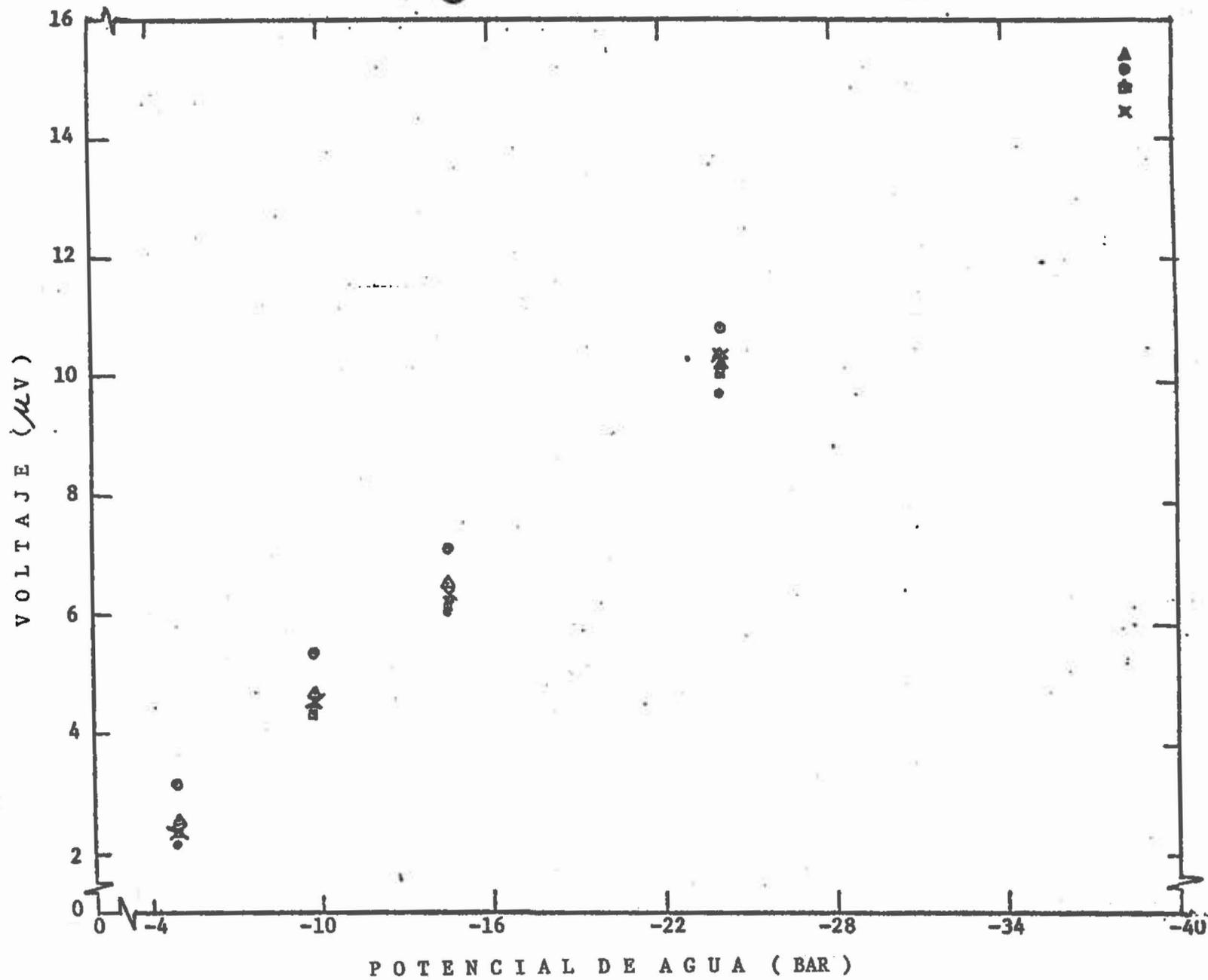


Figura 2.23. Calibración de varios psicrómetros Spanner usando soluciones de KCl ( Millar, 1967 ).

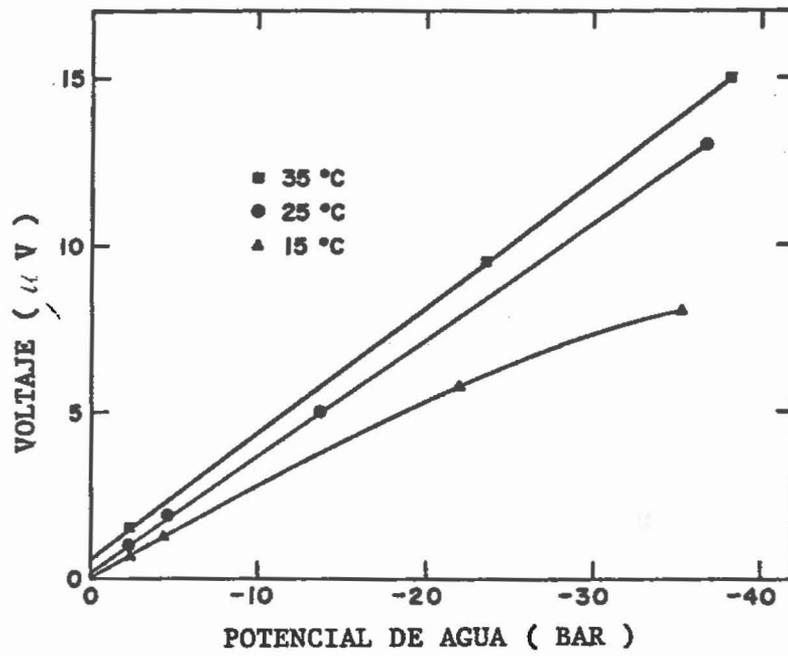


Figura 2.24 Curvas de calibración de un Psicrómetro de Peltier a 15,25 y 35°C (Millar, Lang y Gardner, 1969).

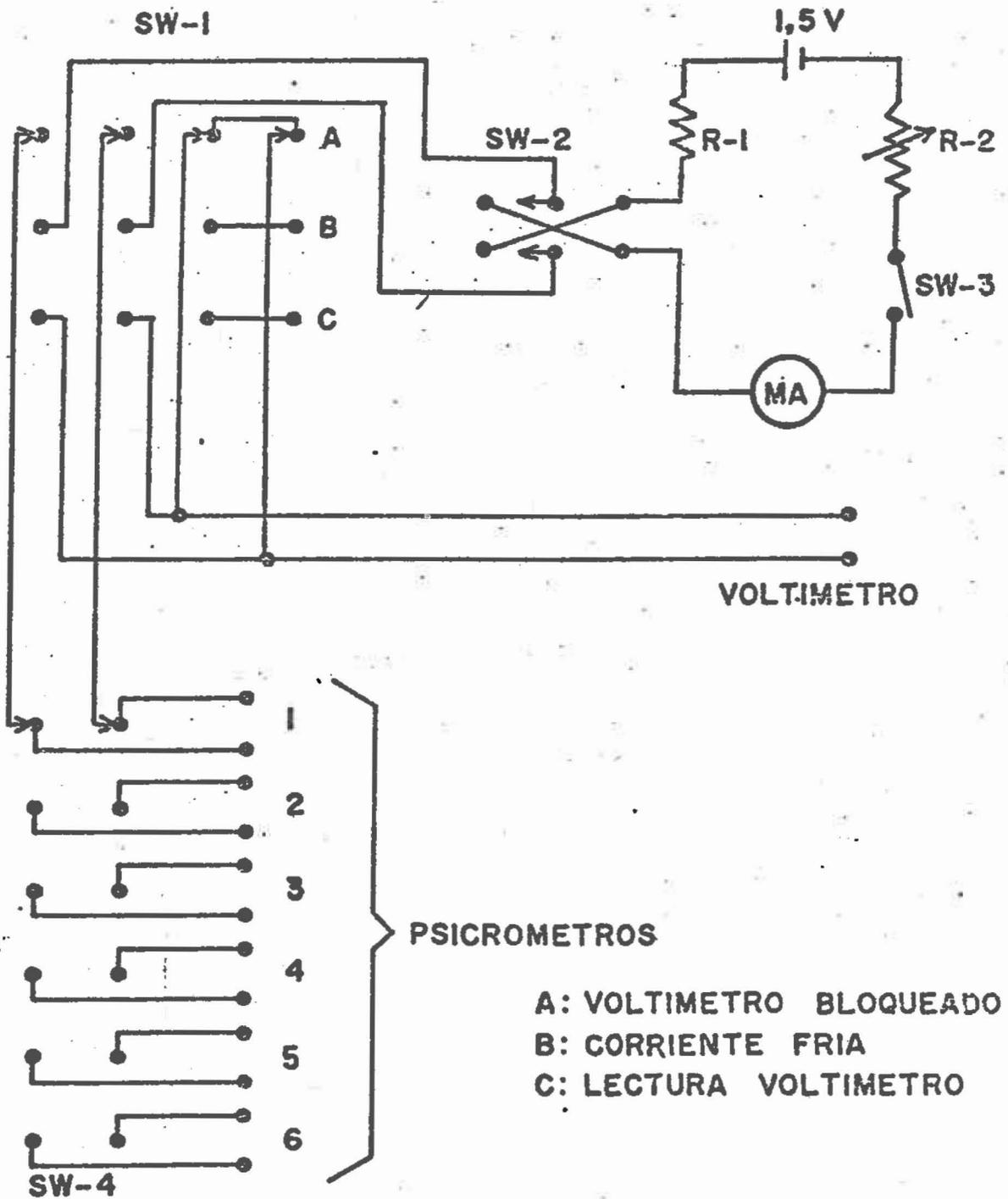


Figura 2.25 Circuito eléctrico para aplicar corriente fría a psicrómetros de termocuplas. (Millar, 1967)

en función de la intensidad de la corriente. En general, la fem aumenta con la intensidad de la corriente hasta alcanzar un máximo y luego disminuye (Hoffman y Herkelrath, 1968). La primera etapa de esta curva corresponde al efecto de Peltier (enfriamiento de la cupla) y la segunda etapa al efecto Joule (calentamiento de la cupla). La corriente más adecuada para el psicrómetro es aquella obtenida antes de alcanzar el máximo en la curva fem versus intensidad de la corriente.

Para tomar las lecturas de los psicrómetros se requiere de un voltímetro de gran sensibilidad, debido a que la fem generada por los termopares es del orden de microvoltios. Este microvoltímetro deberá tener un mecanismo para ubicar el voltaje cero y poseer a lo menos de dos rangos de voltaje, 10-0-10  $\mu\text{V}$  y 30-0-30  $\mu\text{V}$ . Los microvoltímetros de mayor uso son los modelos 148 y 150B de la compañía Keithley y el microvoltímetro MJ-55 de la Wescor que ya viene con el circuito para producir el efecto Peltier.

Previo a tomar las lecturas, es necesario constatar si los psicrómetros tienen la polaridad adecuada para recibir la corriente. Los psicrómetros se deben conectar de tal manera que la corriente pase primero por el alambre de constantan y luego por el cromel. Si la corriente pasa en sentido inverso, se obtiene calentamiento de la cupla en vez de enfriamiento. La polaridad es fácil de predecir para aquellos psicrómetros contruidos con termopares obtenidos comercialmente, puesto que los alambres vienen señalados.

La situación se complica cuando se confeccionan termocuplas en el laboratorio ya que no es posible una marcación de los alambres. En general, los psicrómetros basados en el efecto de Peltier tienen una sensibilidad entre -0,3 y -0,4  $\mu\text{V}/\text{bar}$  (Rawlins, 1966). Esta información se utiliza como referencia para determinar la polaridad de los psicrómetros mediante el uso de ellos con una solución de NaCl de molaridad conocida.

Cuando se trabaja con material vegetal, éste debe ponerse en la cámara del psicrómetro de la misma forma como se colocó el papel filtro para calibrarlos. En este caso la lectura en microvoltios se utiliza para obtener el potencial de agua de la muestra mediante la curva de calibración.

Cuando se usan psicrómetros en el suelo, se recomienda la utilización de un termopar adicional de cobre y constantan en el mismo lugar con el objeto de obtener el potencial de agua a la temperatura del suelo. Esto requiere que los psicrómetros sean calibrados por lo menos a tres temperaturas (15, 30 y 45 grados C).

Es muy probable que las temperaturas del suelo nunca coincidan con las temperaturas de calibración, y en este caso, es necesario interpolar entre las curvas de calibración para obtener el potencial de agua del suelo.

Se han desarrollado nuevas técnicas para la determinación del potencial de agua en condiciones de campo que vienen usándose en forma extensiva en estudios de las relaciones hídricas del sistema suelo-planta (Hoffman y Splinter, 1968, Manohar, 1966; Millar et al, 1969;

## 2.2 EXPRESION DEL AGUA DEL SUELO

### 2.2.1 Porcentaje base seca (Ps)

$$P_s = \frac{\text{Peso del agua}}{\text{Peso suelo seco}} \times 100$$

También,

$$P_s = \frac{M_{SH} - M_{SS}}{M_{SS}} \times 100 \quad (2.4)$$

donde:

$P_s$  = Porcentaje de agua en base seca  
 $M_{SH}$  = Peso del suelo húmedo  
 $M_{SS}$  = Peso del suelo seco

### 2.2.2 Contenido de humedad en volumen ( $\theta$ )

$$\theta = \frac{\text{Volumen de agua}}{\text{Volumen suelo}} = \frac{V_{\text{agua}}}{V_s} \quad (2.5)$$

$$d_a = \frac{M_{SS}}{V_s} \Rightarrow V_s = \frac{M_{SS}}{d_a} \quad (2.6)$$

De ecuación 2.4, tenemos:

$$P_s = \frac{M_{\text{agua}}}{M_{SS}} \Rightarrow M_s = \frac{M_{\text{agua}}}{P_s} \quad (2.7)$$

Reemplazando la ecuación 2.7 en 2.6 se obtiene:

$$V_s = \frac{M_{\text{agua}}}{P_s \cdot d_a} \quad (2.8)$$

Reemplazando ecuación 2.8 en 2.5 se obtiene:

$$\theta = \frac{V_{\text{agua}}}{\frac{M_{\text{agua}}}{P_s \cdot d_a}} = \frac{V_{\text{agua}}}{M_{\text{agua}}} \cdot P_s \cdot d_a$$

$$\frac{V_{\text{agua}}}{M_{\text{agua}}} = \frac{1}{d_{\text{agua}}}$$

$$\theta = P_s \cdot \frac{d_a}{d_{\text{agua}}} \quad (2.9)$$

La expresión 2.9 para el contenido volumétrico de agua es una fracción que puede expresarse como porcentaje, y más propiamente como fracción volumétrica  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$  lo cual indica un volumen de agua en un volumen de suelo.

Normalmente, la expresión 2.9 se escribe como  $\theta = P_s \cdot d_a$  en consideración a que la densidad del agua cambia relativamente poco con la temperatura, por lo que se supone igual a la unidad.

### 2.2.3 Altura o lámina de agua (h)

En balances de agua y estudios de riego es necesario trabajar con láminas de agua. Esta se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$h = \theta \cdot Z = \frac{Ps \times da \cdot Z}{100} \quad (2.10)$$

donde  $\theta$  es la fracción volumétrica de agua, Z es la profundidad u horizonte considerado, Ps es el porcentaje de humedad en base seca y da es la densidad aparente del suelo.

### 2.2.4 Lámina de Riego

Esta se refiere a la lámina de reposición, la cual depende sólo de las características físico-hídricas del suelo, o la lámina bruta o de aplicación, la cual depende de las características del suelo y de la eficiencia del método de aplicación del agua.

La lámina de riego es una altura de agua y el cálculo se basa en el uso de la ecuación 2.10.

Se calcula el agua retenida por el suelo entre dos niveles de retención que son conocidos como capacidad de campo y punto de marchitez, entre los cuales el agua está disponible para uso por las plantas. La definición y factores que afectan estos niveles extremos de aprovechamiento por las plantas se discuten en el capítulo 4.

Así, la lámina de agua aprovechable por las plantas se calcula por la expresión siguiente: 
$$h = \frac{Ps_{cc} - P_{spm}}{100} \times da \times Z \quad (2.11)$$

donde  $Ps_{cc}$  es el porcentaje de humedad en base seca retenida a capacidad de campo (1/10 para suelos arenosos y 1/3 para suelos arcillosos) y  $P_{spm}$  es el porcentaje de humedad en base seca retenida en el punto de marchitez permanente (15 atm). La lámina de reposición ( $L_r$ ) se obtiene de:

$$L_r = f \times h \quad (2.12)$$

donde f es el nivel de reposición elegido de acuerdo al efecto de la humedad en la productividad del cultivo. Así, f asume, normalmente, valores entre 1 (el suelo está a nivel del punto de marchitez) y 0.6, es decir, se restituye 60% de la lámina de agua retenida entre capacidad de campo y punto de marchitez.

La lámina bruta o de aplicación ( $L_b$ ) se obtiene por la expresión:

$$L_b = \frac{L_r}{\text{Eficiencia de aplicación}} \quad (2.13)$$

2.2.5 Ejemplos conceptuales

La información físico-hídrica de un suelo arenoso es la siguiente:

Profundidad (cm)	Densidad Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Retención de Agua (%)	
		1/10 atm	15 atm.
0-30	1,56	9,0	2,44
30-60	1,52	9,48	3,71
60-100	1,53	10,32	3,89
100-120	1,54	10,32	4,48

Usando esta información, calcular lo siguiente:

- Contenido volumétrico de agua a capacidad de campo de la camada 60-90 cm.
- Lámina de agua retenida por el suelo a 15 atm en la camada 0-30 cm.
- Lámina de agua retenida por el perfil del suelo de 120 cm de profundidad entre 1/10 y 15 atm.
- Lámina de reposición cuando el suelo llega a 6,5% de humedad en base seca para un cultivo de 60 cm de profundidad efectiva del sistema radicular.
- Lámina bruta de riego para un cultivo de 30 cm de profundidad radicular, cuando el suelo llega al nivel de 60% del agua disponible y se riega con una eficiencia de 45%

CALCULOS

a. Usando ecuación 2.9, se obtiene

$$\theta = 10,32 \times \frac{1,53}{1} = 15.8\% \text{ ó } 0.158 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$$

b. Usando ecuación 2.10, se obtiene

$$h = \frac{2,44}{100} \times 1,56 \times 30 = 1.14 \text{ cm (11,4 mm)}$$

c. Se usa la ecuación 2.10, donde

$$P_s = P_{s\ 1/10} - P_{s\ 15}$$

$$h_{0-30} = \frac{9 - 2,44}{100} \times 1,56 \times 30 = 3,07 \text{ cm}$$

$$h_{30-60} = \frac{9,48 - 3,71}{100} \times 1,52 \times 30 = 2,63 \text{ cm}$$

$$h_{60-100} = \frac{10,32 - 3,89}{100} \times 1,53 \times 40 = 3,94 \text{ cm}$$

$$h_{100-120} = \frac{10,32 - 4,48}{100} \times 1,54 \times 20 = 1,80 \text{ cm}$$

$$h_0 - 120 = 11,44 \text{ cm}$$

d. Se usa la ecuación 2.10 y valores medios de retención a 1/10 atm. para la camada de 60 cm.

$$\text{donde: } L_r = \frac{9,24 - 6,5}{100} \times 1,54 \times 60 = 2,53 \text{ cm (25,3mm)}$$

$$\text{Retención a 1/10, media} = (9 + 9,48)/2 = 9,24\%$$

$$\text{Densidad aparente, media} = (1,56 + 1,52)/2 = 1,54 \text{ g/cm}^3$$

e. Se usa la ecuación 2.11 para calcular la lámina retenida y la ecuación 2.12 para calcular la lámina de reposición.

$$h = \frac{9 - 2,44}{100} \times 1,56 \times 30 = 3,07 \text{ cm}$$

$$L_r = 0,4 \times 3,07 = 1,23 \text{ cm}$$

$$L_b = 1,23/0,45 = 2,73 \text{ cm (27,3 mm)}$$

### 2.3 CONCEPTO HIDRAULICO DEL AGUA EN EL SUELO

En el capítulo 1 se discutieron los aspectos termodinámicos del agua en el sistema suelo-planta. De dicho análisis se obtuvo que el "concepto termodinámico" que describe el nivel de energía del agua del suelo era el potencial de agua.

Desde el punto de vista hidráulico, el nivel de energía del agua en cierto punto de un perfil de suelo se expresa en términos de carga hidráulica. El suelo es un material poroso compuesto de capilares de diferentes diámetros y longitud. Considerando la situación hidráulica de los conductos capilares en forma similar a la de tuberías, se puede aplicar el teorema de Bernouilli, el cual establece:

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + H \quad (2.11)$$

donde  $z_1$  y  $z_2$  es la altura geométrica o de elevación;  $\frac{P_1}{\rho g}$ ,  $\frac{P_2}{\rho g}$

es la altura piezométrica o de presión  $\frac{V_1^2}{2g}$   $\frac{V_2^2}{2g}$  es la altura debida a la

velocidad y  $H$  es la altura que representa las pérdidas de carga (Figura 2.26).

En el caso del flujo de agua en el suelo, la velocidad del agua es muy baja, siendo insignificantes los valores de la taquicarga ( $V^2/2g$ ).

Despreciando el término  $V^2/2g$ , la ecuación 2.11 se reduce a:

$$H = \left( \frac{P_1}{\rho g} + z_1 \right) - \left( \frac{P_2}{\rho g} + z_2 \right) \quad (2.12)$$

$$H = \left( \frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g} \right) + (z_1 - z_2) \quad (2.13)$$

En forma más general, se puede escribir

$$H = h_p + h_g \quad (2.14)$$

donde

$H$  = carga hidráulica

$h_g$  = carga gravitacional o de posición

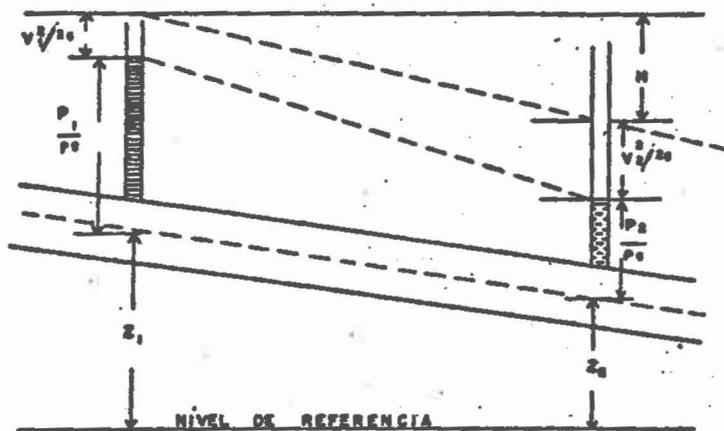


Fig. 2.26 Esquema que muestra los términos del teorema de Bernoulli aplicado al flujo de agua en una tubería.

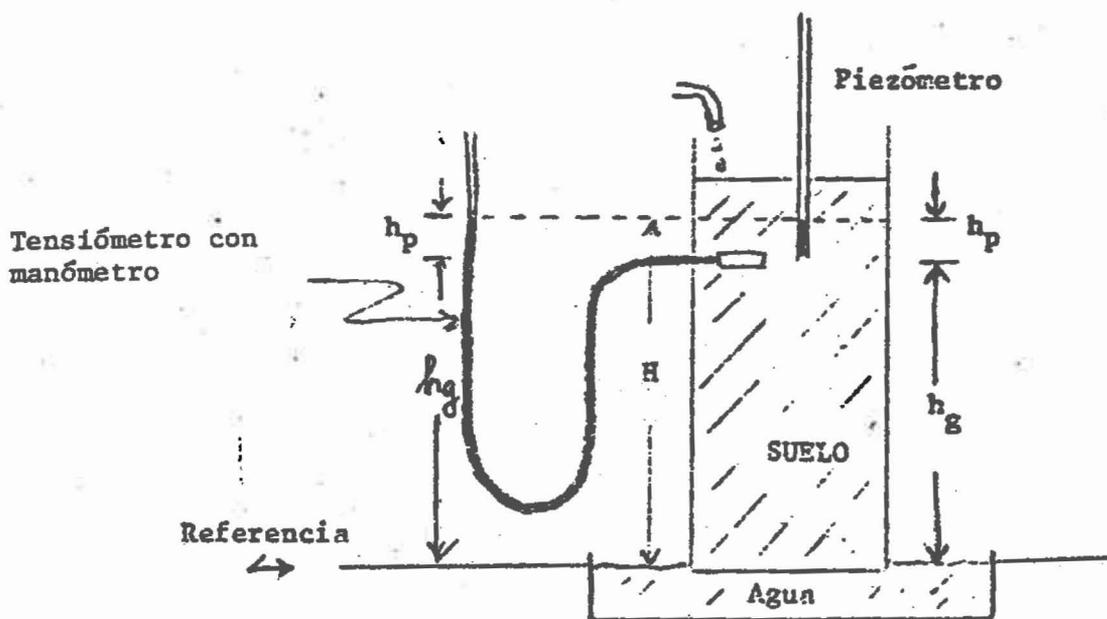


Fig. 2.27 Esquema que muestra los componentes de la carga hidráulica en el caso del piezómetro y del tensiómetro.

La definición de estos conceptos, de acuerdo a la Figura 2.27 es la siguiente:

Carga hidráulica (H): elevación de agua en una cañería abierta la cual se conecta a un punto en el sistema suelo-agua. Se mide en cm.

Carga gravitacional (hg): altura del punto en cuestión, sobre la referencia. Se mide en cm.

Carga de presión (hp): altura de agua en la cañería abierta sobre el punto en cuestión. Se mide en cm.

## 2.4 EJEMPLOS CONCEPTUALES

### 2.4.1 Carga hidráulica en un tensiómetro de investigación

En la Figura 2.28 se muestra un esquema del tensiómetro de investigación como instalado en el campo.

El potencial matricial en el suelo (Punto A), en unidades de carga hidráulica, está dado por:

$$\psi_{mA} = - [13,6h - (h + h_1 + h_2)] \quad (2.15)$$

donde:

$\psi_{mA}$  = potencial matricial en el punto A (cm de agua)

h = altura en cm de mercurio

h<sub>1</sub> = distancia de la referencia (superficie del suelo) a la superficie del mercurio en la cubeta.

h<sub>2</sub> = profundidad de instalación de la cápsula porosa.

Véase que estamos interesados en la tensión que corresponde al punto A. Puesto que la lectura de altura de Hg corresponde a la tensión en el punto B, para obtener la tensión en A, se debe descontar la carga correspondiente a la columna de agua entre B y A, es decir, (h + h<sub>1</sub> + h<sub>2</sub>).

Considerando que la carga hidráulica se puede describir por la expresión  $H=hp+hg$ , entonces, en el caso del tensiómetro se reduce a:

$$H = -(13,6h - h - h_1 - h_2) - h_2$$

$$H = -12,6h + h_1 + h_2 - h_2$$

$$H = -12,6h + h_1$$

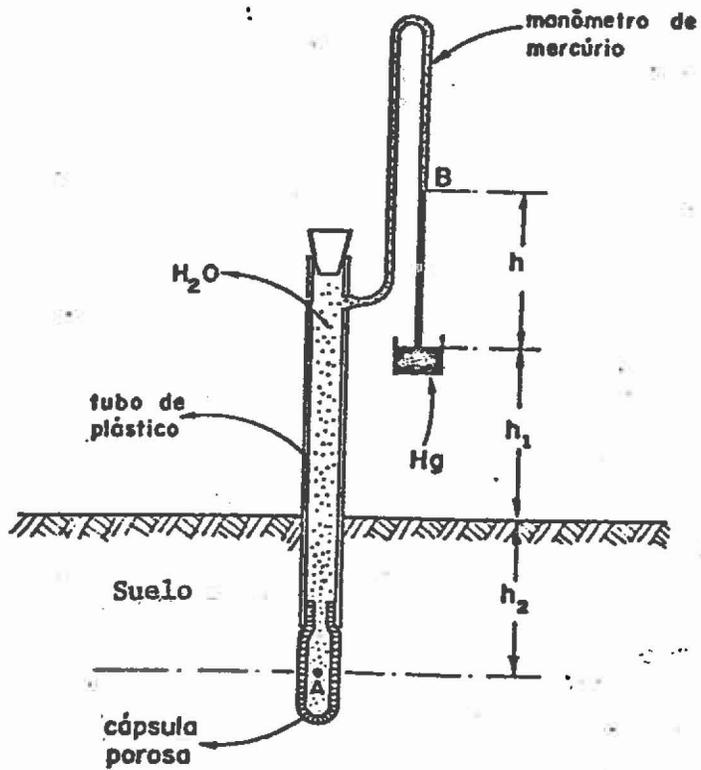
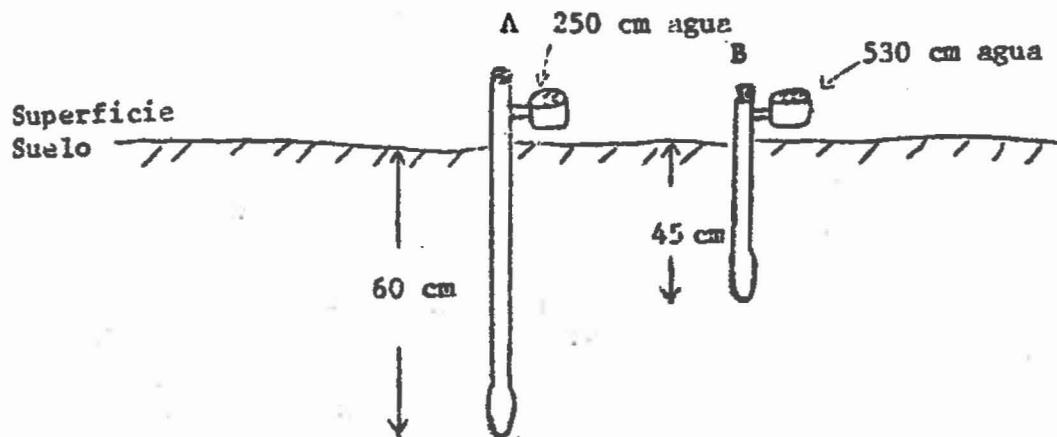


Fig. 2.28. Esquema de un tensiómetro de investigación

2.4.2 Cargas hidráulicas en tensiómetros comerciales

En el esquema siguiente, calcular las cargas hidráulicas de los tensiómetros A y B, y la diferencia de carga entre los mismos, usando como referencia la superficie del suelo y luego el extremo del tensiómetro A. En este caso las lecturas de los vacuómetros corresponden al potencial matricial o carga de presión (succión).



Referencia: Superficie del suelo

$$h_{gA} = -60 \text{ cm}$$

$$h_{gB} = -45 \text{ cm}$$

$$h_{pA} = -250 \text{ cm}$$

$$h_{pB} = -530 \text{ cm}$$

$$H_A = -310 \text{ cm}$$

$$H_B = -575 \text{ cm}$$

$$\Delta H = H_B - H_A = -575 + 310 = \underline{\underline{-265 \text{ cm}}}$$

Referencia: Extremo tensiómetro A

$$h_{gA} = 0$$

$$h_{gB} = 15 \text{ cm}$$

$$h_p = -250 \text{ cm}$$

$$h_p = -530 \text{ cm}$$

$$H_A = -250 \text{ cm}$$

$$H_B = -515 \text{ cm}$$

$$\Delta H = H_B - H_A = -515 + 250 = \underline{\underline{-265 \text{ cm}}}$$

De este ejemplo se concluye que la posición de la referencia es arbitraria, pudiéndose utilizar cualquier punto como tal, con la observación de utilizar la misma referencia cuando se pretende comparar datos o hacer cálculos sucesivos en el mismo sistema.

## 2.5 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- BARRS, H. D. 1968. Determination of Water deficits in plant tissues, p. 235-368. IN: T. Kozlowski (ed.) Water deficits and plant growth. I. Development, control and measurement. Academic Press, New York.
- BLACK, T.A., W.R. GARDNER AND G.W. THURTELL. 1969. The prediction of evaporation, drainage, and soil water storage for a bare soil. Agronomy Journal 33 (5):655-660.
- BOODT, M. DE, R. HARTMANN and P. DE MEESTER. 1967. Determination of soil-moisture characteristics for irrigation purposes by neutron-moisture meter and air-purged tensiometers. IAEA (ed.) Publication. pp. 147-160. Vienna, IAEA.
- BOX, J.E. Jr. 1965. Design and calibration of a thermocouple psychrometer which uses the Peltier effect. IN: A. Wexler (ed.) Humidity and moisture. Reinhold Publishing Corp., New York. p. 110-121.
- CAMPBELL, G.S., J.W. TRULL, AND W. H. GARDNER. 1968, A welding technique for Peltier thermocouple psychrometers, Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 32 (6):887-889.
- DALTON, F.N. and S. L. RAWLINS, 1968. Design criteria for Peltier-effect thermocouple psychrometers. Soil Sci. 105 (1):12-17.
- EHLIG, C.F. 1962. Measurement of energy status of water in plants with a thermocouple psychrometer. Plant Phys. 37 (3):288-290.
- GARDNER, W.H. 1965. Water content. IN: C.A. Black et al. (ed.), Methods of soil analysis, Part 1, Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling. Madison. Wis., American Society of Agronomy. pp. 82-127.
- GARDNER, W.H. and C. CALISSENDORFF. 1967. Gamma-ray and neutron attenuation in measurement of soil bulk density and water content. IN: IAEA (ed.), Isotope and radiation techniques in soil physics and irrigation studies. pp 101-113. Vienna, International Atomic Energy Agency.
- HOFFMAN, G.J. AND W.E. SPLINTER. 1968. Instrumentation for measuring water potential of an intact plant-soil system. Trans. Amer. Soc. Agr. Engrs. 11:38-40.
- HOFFMAN, G.J. AND W. N. HERKELRATH. 1968. Design feature of intact leaf thermocouple psychrometer for measuring water potential. Trans. Amer. Soc. Agr. Engrs. 11:631-634.
- HOMES, J.W., S.A. TAYLOR and S.J. RICHARDS. 1967. Measurement of soil water. pp 275-303. IN: R.M. Hagan et al. (ed.) Irrigation of Agricultural Lands. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy. (Monograph 11).

- KING, L.G. 1967. Gamma-ray attenuation for soil-water content measurements using  $^{241}\text{Am}$ . IN: IAEA (ed.), Isotope and radiation techniques in soil physics and irrigation studies. pp. 17-29, Vienna, International Atomic Energy Agency.
- KIRKHAM, D. AND J.C. COREY. 1973. Recent progress in the design of radiation equipment and its practical implications. pp. 17 - 39. IN: IAEA, (ed), Soil-Moisture and Irrigation Studies II, Proceedings of a panel held in Vienna, 1973.
- LAMBERT, JOHN. 1970. Studies of water removal by weeds from pine plantations. Madison, Wisconsin Dept. of Soil and Water Sciences, University of Wisconsin. 90 p. (Ph.D. Thesis).
- LANG, A.R. G. 1967. Osmotic coefficients and water potentials of sodium chloride solutions from 0 to 40 degrees C. Aust. J. Chem. 20:2017-2023.
- MANOHAR, M.S. 1966. Measurement of the water potential of intact plant tissues. I. Design of a microthermocouple psychrometer. J. Exp. Bot. 17(50):44-50.
- McHENRY, J.R. AND A.C. GILL. 1967. The influence of bulk density, slow neutron absorbers, and time on the calibration of neutron-moisture probes. IN: IAEA (ed.), Isotope and irrigation studies. pp. 83-99. Vienna. International Atomic Energy Agency.
- MERRILL, S.D. 1968. Details of construction of a multipurpose thermocouple psychrometer. Research report No. 115 U.S. Salinity Laboratory, Riverside, California. 9 p.
- MILLAR, A.A. 1967. Internal water balance of barley in relation to moisture stress and environmental conditions. Fargo, North Dakota, North Dakota State University. 104 p.
- MILLAR, A. A., A.R.G. LANG AND W.R. GARDNER. 1969. Four-terminal Peltier type thermocouple psychrometer for measuring water potential in nonisothermal systems. Agron. J.62:705-708.
- MILLAR, A.A. 1971. Water balance of a natural site in the Lake Wingra Basin. Report to the International Biological Program, National Science Foundation. Madison, Wisconsin, Dept. of Soil and Water Sciences, University of Wisconsin. 11 p. (Biome Abstract 2 (1):423, 1972).
- MILLAR, A.A., W. R. GARDNER AND G. WEISS. 1970. Water regime of a sandy soil under row crops. Madison, Wisconsin, Dept. of Soil and Water Sciences, University of Wisconsin. 11 p. (Chapter I, Ph.D. Thesis of A. A. Millar).

- MILLAR, A.A. 1971. Descripción, construcción, calibración y uso de psicrómetros de termocuplas para determinar el potencial de agua en el sistema suelo-planta. Lima, Perú. Anales del IV Simposio Latinoamericano de Fisiología Vegetal 20 p.
- MILLAR, B.D. 1971. Improved thermocouple psychrometer for the measurement of plant and soil water potential. I. Thermocouple psychrometer and an improved instrument design. J. Exp. Bot 22:875-891.
- MONTEITH, J.L. AND P.C. OWEN. 1958. A thermocouple method for measuring relative humidity in the range 95-100%. J. Sci. Instrum. 35:433-446.
- NEUMAN, H.H. and G.W. THURTELL. 1972. A Peltier cooled thermocouple dew-point hygrometer for in situ measurements of water potential. IN: R.W. Brown and B.P. Van Haveren, eds. Psychrometry in water relations research. Utah Agr. Exp. Sta., Utah State University, Logan Utah.
- NEUMAN, H.H., G.W. THURTELL, K.R. STEVENSON and C.L. BEADLE. 1974. Leaf Water content and potential in corn, sorghum, soybean, and sunflower. Can. J. Plant Sci. 54:185-195.
- PECK, A.J. AND R. M. RABBIDGE. 1969. Design and performance of an Osmotic tensiometer for measuring capillary potential. Soil Science Society of America. Proceedings 33(2):196-202.
- PHENE, C.J., G.J. HOFFMAN AND S.L. RAWLINS, 1971. Measuring soil matric potential "in situ" by sensing heat dissipation within a porous body: I. Theory and sensor construction. Soil Science Society of America Proceedings 35 (1):27-33.
- RAWLINS, S.L. AND F.N. DALTON. 1967. Psychrometric measurement of soil water potential without precise temperature control. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 31(3):297-301.
- RAWLINS, S.L. 1966. Theory for thermocouple psychrometers used to measure water potential in soil and plant samples. Ag. Meteorol. 3:293-310.
- RICHARDS, L.A. AND G. OGATA. 1958. Thermocouple for vapor pressure measurements in biological and soil systems at high humidity. Science 128(3331):1089-1090.
- SPANNER, D.C. 1951. The Peltier effect and its use in measurement of suction pressure. J. Exp. Bot. 2:145-168.
- TAYLOR, S.A., D.D. EVANS AND W.D. KEMPER. 1961. Evaluating soil water. Logan, Utah Agricultural Experiment Station. 67 p. (Bulletin 426).
- VAN BAVEL, C.H.M., N. UNDERWOOD and R.W. SWANSON. 1956. Soil moisture measurement by neutron moderation. Soil Science 82(1):29-41.