

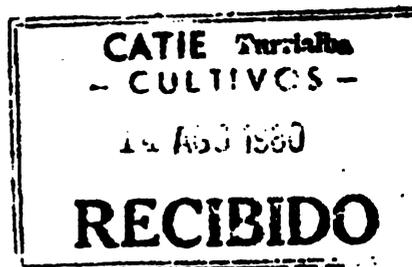
CATIE  
CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA  
El Salvador

EL AGUA EN LOS CULTIVOS

JOSÉ ARZE BORDA

Trabajo presentado en el 1er. Curso sobre Producción Moderna de Hortalizas en América Central, con énfasis en El Salvador, 1º de octubre a 9 de noviembre de 1979, CENIA, Valle de San Andrés, El Salvador.

2/2



## INDICE

### INTRODUCCION

1.	Agua en la tierra -----	1
1.1	Características físico-químicas-----	2
	- Propiedades físicas-----	3
	- Estructura de la molécula de agua-----	4
	- Acción disolvente del agua-----	4
1.2	Ciclo del agua-----	6
1.3	Distribución en la tierra-----	8
2.	El agua en la planta-----	11
2.1	La absorción del agua por la planta-----	11
2.2	Mecanismo de absorción de agua-----	12
	- Factores que afectan la absorción-----	14
2.3	El movimiento del agua en la planta-----	15
	- El mecanismo de la ascensión de agua en la planta-----	15
	- La presión radicular-----	16
	- Dirección del movimiento de agua-----	16
2.4	Efectos de las fluctuaciones de las condiciones de humedad del ambiente sobre los procesos de la planta-----	17
	- Atmósfera saturada: suelo saturado-----	18
	- Atmósfera saturada: suelo no saturado-----	19
	- Atmósfera no saturada: suelo saturado-----	20
	- Atmósfera no saturada: suelo no saturado---	20
3.	Suministro de agua-----	21

3.1	Porosidad y humedad del suelo-----	23
3.2	El agua en el suelo-----	28
	- El agua gravitacional-----	28
	- El agua capilar-----	29
	- El agua higroscópica-----	30
	- Coeficiente de marchitez-----	30
	- Estados de la humedad del suelo-----	33
	- Agua disponible utilizable y óptima-----	34
	- Formas de presentar las fluctuaciones de <u>hu</u> medad del suelo mediante diagramas-----	38

# EL AGUA EN LOS CULTIVOS\*

José Arze Borda\*\*

## INTRODUCCION:

Por siglos, la humanidad ha dañado y desperdiciado el agua -uno de los dones naturales más valiosos- ha derrochado su herencia como si no importara. Aunque posiblemente haya tanta agua en el mundo hoy en día, como en el momento de la aparición del hombre, se considera que el agua escasea y no es buena para beber, ni para regar cultivos.

El hombre primitivo pudo haber considerado las inundaciones como una expresión de la ira de un Dios. Para él, el agua era un misterio que no podía comprender ni controlar. El hombre moderno ha desechado desde hace tiempo este misticismo. Ve en el agua una forma natural de atender todas las necesidades de los vegetales y animales de la tierra. Quizá no pueda comprender todos los procesos o mecanismos por los que el agua satisface sus necesidades, pero con la ayuda de la ciencia y tecnología está aprendiendo a aprovechar este recurso natural.

## 1. EL AGUA EN LA TIERRA:

La vida acaba allí donde hay insuficiente agua dulce y limpia. En ciertas zonas del mundo, no hay prácticamente vida alguna por falta de lluvia o porque la estructura del suelo es de tal naturaleza que no aprisiona agua por tiempo suficiente. Estas zonas nunca podrán soportar muchas variedades de plantas y animales, a menos que

-----  
\* Trabajo presentado en el 1er. Curso sobre Producción Moderna de Hortalizas en América Central, con énfasis en El Salvador, 1° octubre a 9 noviembre de 1979, CENTA, Valle de San Andrés, El Salvador.

\*\* M. S. Ingeniero Agrónomo, Especialista en Sistemas de Cultivo del CATIE.

el hombre invente métodos de conservación no sólo del agua, sino de toda la humedad que exista. Afortunadamente, a diferencia de la mayoría de recursos naturales, el agua es renovable y perpetua. El suministro total no se agota más que temporalmente. No obstante, se debe conservar el agua para evitar su falta por temporadas y para asegurar su alta calidad en toda época, impidiendo su contaminación.

### 1.1 Características físico-químicas:

El agua es probablemente el compuesto más importante de todos los conocidos. La mayor parte de los procesos químicos, tanto los que tienen lugar en la materia viva, animal o vegetal, como los que provocan alteraciones en la corteza terrestre, lo mismo que la obtención de muchos cuerpos, se realizan hallándose las sustancias disueltas en agua.

En la naturaleza se encuentra libre y combinada. Libre se presenta en los tres estados de la materia. El agua líquida constituye los océanos, mares, lagos y ríos, cubre casi los dos tercios de la superficie terrestre. En estado sólido constituye el hielo y se halla también en forma de vapor: nubes y humedad atmosférica.

El agua es parte constituyente de compuestos tales como los ácidos, bases hidratos, etc., interviniendo en diversas formas.

Los antiguos griegos consideraron el agua como uno de los elementos, idea que persistió hasta que Cavendish, haciendo arder hidrógeno en el aire observó la formación de agua y fue Lavoisier quien demostró que era un compuesto formado por hidrógeno y oxígeno.

Propiedades físicas: A temperaturas comprendidas entre 0° y 100° el agua pura se presenta en estado líquido. Es incolora, inodora, insípida y transparente. En grandes masas puede presentar ligera coloración azulada.

Quando la temperatura del agua pura es de 4°C su densidad es máxima, pero si la temperatura disminuye por debajo de este valor la densidad decrece (Fig. N° 1). El valor de la densidad a 4°C se toma como densidad unidad para hallar la de otros cuerpos con relación al agua.

El que el agua tenga su máxima densidad a 4°C, indica que si se enfría por debajo de esta temperatura su volumen aumentará, por lo tanto el hielo a 0°C tiene menor densidad que el agua a igual temperatura y flota sobre ella, esto impide que en lugares fríos se solidifique el agua del fondo de los océanos, lagos, etc.; formándose solamente hielo en la superficie de los mismos.

Al aumento de volumen del agua al solidificarse, por actuar a modo de cuña en las grietas de las rocas, se atribuye, en parte, la destrucción de las mismas. Así un recipiente lleno de agua, si es tá solidificada, puede llegar a resquebrajar sus paredes.

El agua posee una capacidad calorífica elevada, la cantidad de calor necesaria para elevar 1°C la temperatura de 1 g de agua, de 14.5 a 15.5°C, es una caloría que es, por tanto, el calor específico del agua.

Los calores latentes de fusión (80 cal/g) y de vaporización 1539.5 cal/g son también muy elevados.

Estructura de la molécula del agua: En la molécula de agua los átomos de H se hallan formando entre sí un ángulo de  $104'5''$ . Los enlaces O-H son covalentes polares. El átomo de oxígeno atrae con mayor intensidad a los pares electrónicos compartidos, y se origina una molécula dipolar o dipolo. (Fig.2).

La estructura dipolar de las moléculas de agua explica que tiendan a asociarse, atrayéndose y formando polímeros o moléculas gigantes. Efectivamente se ha comprobado que en el agua en estado sólido cada átomo de oxígeno se halla rodeado de 4 átomos de H, que se hallan dispuestos alrededor de aquél, como si ocupasen los vértices de un tetraedro regular. (Fig. 3).

Solamente dos de estos cuatro átomos de hidrógeno pertenecen al oxígeno, los otros dos son de otras moléculas de agua. Así la molécula de hielo tiene una configuración espacial en la que se encuentran anillos constituidos por 6 moléculas de agua (macromoléculas) en forma de hexágono regular (Fig. 4), quedando pues un canalículo intermedio vacío, ello determina que al formarse el hielo disminuya la densidad del agua y que cuando se funda aumente la densidad porque al romperse la ordenación, se acercan más las moléculas. Cuando aumenta la temperatura por encima de  $4^{\circ}\text{C}$ , las moléculas se repelen y vuelve a disminuir la densidad. La asociación molecular es causa de los elevados calores de fusión y vaporización pues la energía calorífica debe emplearse en la separación de las macromoléculas.

Juegan también papel importante en la estructura molecular del agua los puentes de hidrógeno entre hidrógenos de agua de moléculas adyacentes.

Acción disolvente del agua: El agua es el disolvente de uso más general, no obstante hay muchas sustancias que son insolubles en ella.

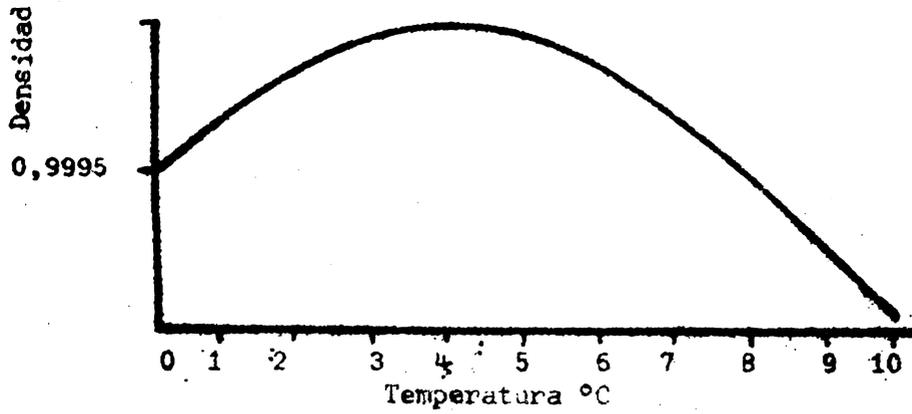


Fig. 1 VARIACION DE LA DENSIDAD DEL AGUA CON LA TEMPERATURA

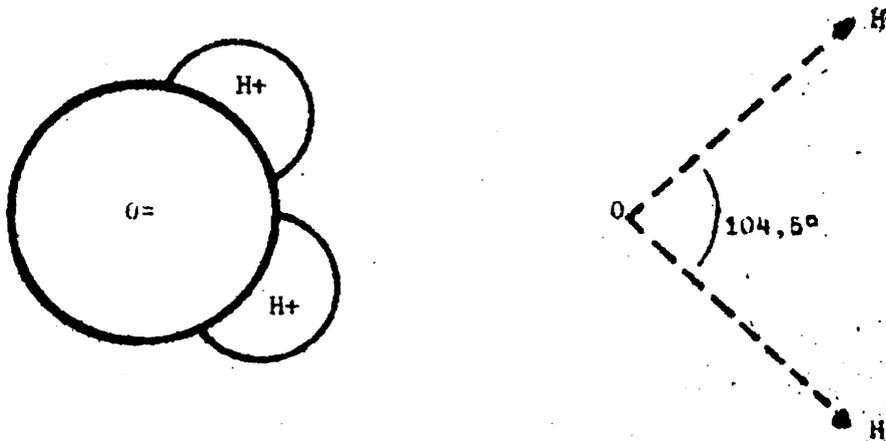


Fig. 2 MOLECULA DIPOLAR DEL AGUA



Fig. 3 ORDENACION TETRAEDRICA DE LOS ATOMOS DE H ALREDEDOR DEL ATOMO DE OXIGENO

La capacidad del agua como disolvente se debe también al carácter dipolar de su molécula, así para que un cuerpo se disuelva en agua, sus partículas (moléculas o iones) deberán ser atraídas por las del agua con mayor intensidad que la que se atraen entre sí. Los compuestos cuyas moléculas sean covalentes no serán atraídos, o lo serán muy poco por las moléculas del agua y por tanto no se disolverán en ella. Por ejemplo el  $O_2$ ,  $H_2$  y  $N_2$  apenas se disuelven en el agua. Aquellos compuestos cuyas moléculas sean de estructura análoga a la de las moléculas de agua, se disolverán en ella, por ejemplo el  $NH_3$ , el  $CO_2$ , el  $SO_2$ , el alcohol, etc.

Los cristales iónicos se disolverán en general en agua, los iones y las moléculas polares de agua se atraerán intensamente. Si esta atracción es superior a las que experimentan los iones en la red del cristal éste se disolverá, si no, quedará en estado sólido.

El que el agua no sea conductora de la electricidad se debe asimismo a su estructura polar; si se introduce entre las placas de un condensador agua pura, se observa que no hay conducción de corriente eléctrica (Fig.5).

## 1.2 Ciclo del agua:

El calor del sol hace que surja vapor de los océanos y mares, dejando sal y otros minerales en suspensión o que caen al fondo en forma sólida. La humedad limpia se eleva y acumula en nubes que desprenden la humedad al contacto de corrientes de aire con temperatura propicia, formando lluvia, nieve o granizo. Al caer sobre la tierra, el agua empieza su sinuoso curso de vuelta al mar. Una pequeña parte de ella vuelve casi inmediatamente, pero la mayor parte desagua como "agua superficial" a riachuelos o se filtra en la tierra como "agua

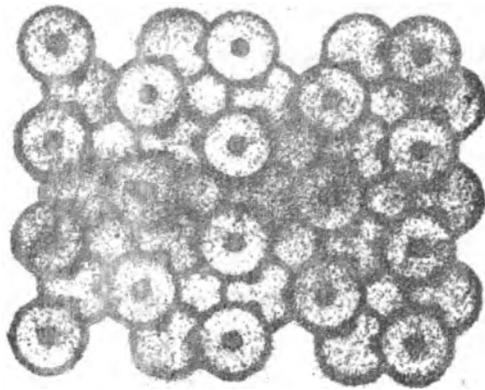


Fig. 4 ESTRUCTURA DEL HIELO

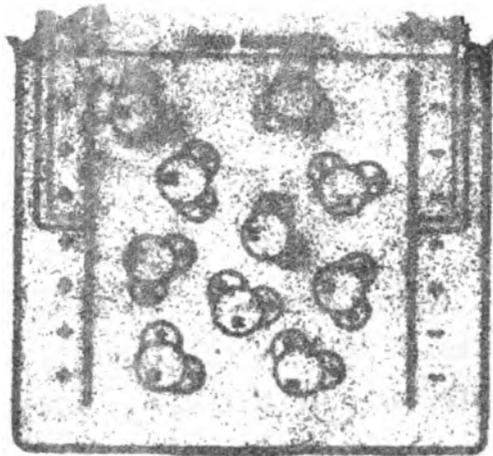


Fig. 5 MOLECULAS DE AGUA ORIENTADAS EN EL CAMPO ELECTRICO

subterránea<sup>11</sup>. En su curso subterráneo, puede que se acumule en lo que podríamos llamar vetas. Estas vetas de agua se mueven a diferentes velocidades, lentamente por arcilla y con más rapidez por arena, y con sorprendente velocidad alrededor de piedras y pedruscos. Mucha del agua que cae en la tierra se vuelve a evaporar, retardando su retorno al mar (Fig. 6). Como es natural, gran parte del agua de la lluvia es absorbida por plantas y animales. Pero no importe el curso que tome, toda el agua que toca en la tierra en forma de lluvia vuelve tarde o temprano al mar.

El agua recibida por la vida vegetal o animal se usa principalmente como portadora de alimentos y es expulsada ya sea en forma líquida o de humedad a través de las células, que se evapora pronto y vuelve al aire. Se desecha el agua usada y se absorbe agua limpia de nuevo en un ciclo continuo. Por consiguiente, toda el agua sale del mar como humedad, viaja por tierra donde cae como lluvia o nieve y desagua finalmente al mar. El hombre puede usar el agua en el grado que puede retardar su viaje. La puede contener en lagos y depósitos, atraparla en el suelo por la forma en que cultiva sus campos o bombearla de las vetas subterráneas que se dirigen al mar.

### .3 Distribución en la tierra:

Parecería que no debiera haber escasez de agua en la tierra, ya que tres cuartas partes de ella está cubierta de océanos y mares a una profundidad de hasta cuatro kilómetros en algunos puntos.

El monte Everest desaparecería si se pudiera dejar caer en la parte más profunda del Océano Pacífico. Los océanos y mares contienen 951 del agua de la tierra, que se calcula en 1,400 millones de kilómetros cúbicos. Un dos por ciento está helado en forma de hielo o nieve y

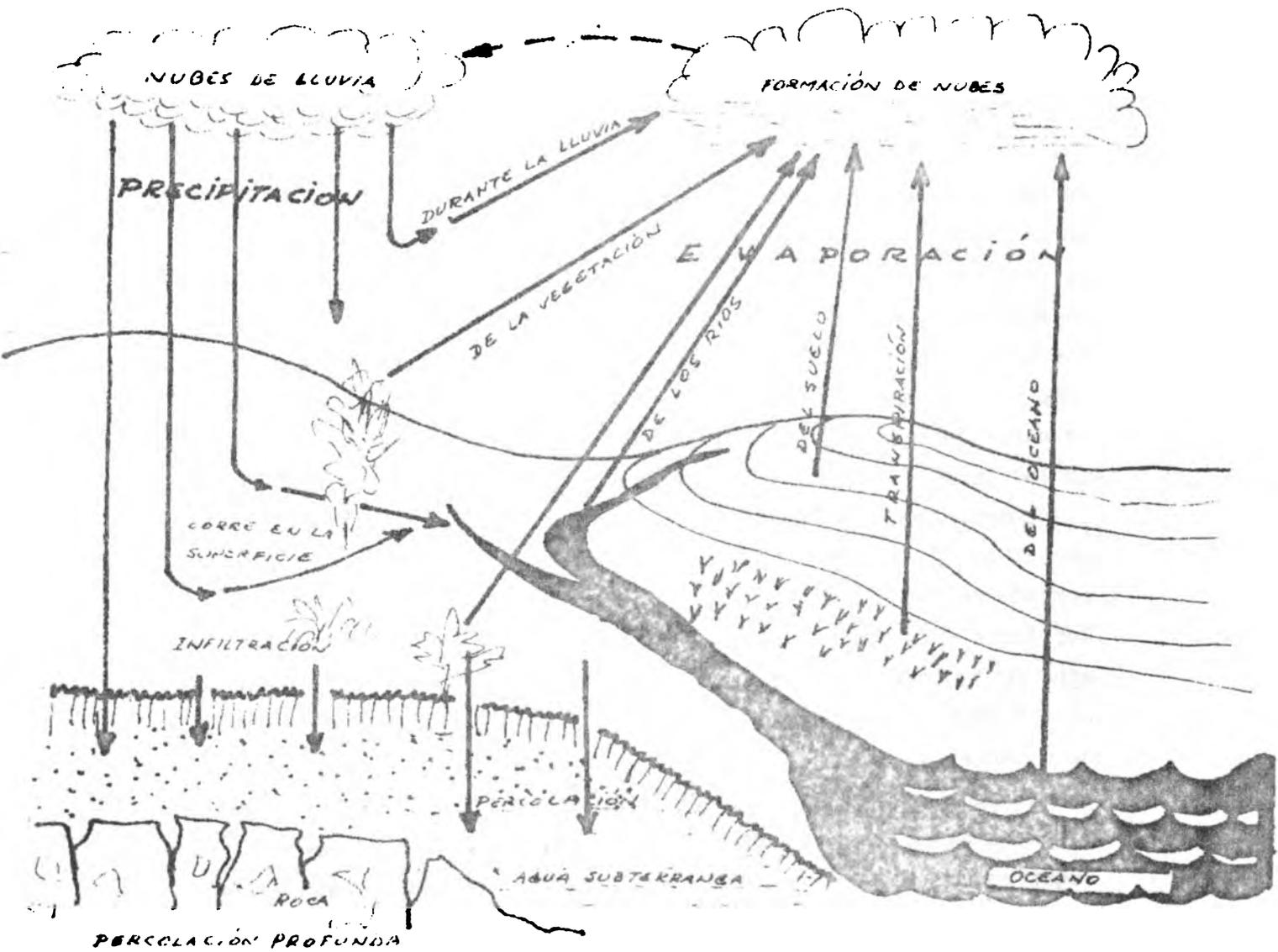
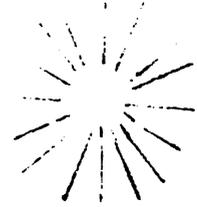


Fig. 6

CICLO DEL AGUA

otro dos por ciento corre en forma de agua dulce por ríos, lagos, riachuelos, pantanos y dentro de los estratos del suelo. Una pequeña fracción del uno por ciento flota en forma de humedad, invisible en el aire, excepto en ciertas condiciones atmosféricas. La proporción de agua en la corteza superior de la tierra, aunque relativamente pequeña, es tres veces la de todas las demás sustancias. El agua representa la mayor parte del peso de plantas y animales. Se calcula que el cuerpo humano es setenta por ciento agua. Con la gran prevalencia del agua sobre la tierra, se podría preguntar por qué hay que preocuparse de su escasez.

No hay realmente escasez de suministro de agua, pero sí un límite en el suministro de agua utilizable en casi todas partes del mundo. La utilidad del agua depende de tres condiciones principales: (1) la época del año, (2) su calidad, y (3) su situación. El agua es más valiosa para la vida vegetal en su época de crecimiento. El campesino no da importancia alguna a las lluvias que caen después de haber recogido la cosecha, excepto por el efecto que pueda tener en los pozos y manantiales. El agua, para ser útil, debe ser suficientemente dulce y limpia, o como se suele decir "de alta calidad", con el fin de servir a las plantas y animales. El agua con alta proporción de sales o minerales es de muy poco valor para la mayoría de los fines y es posible que destruya en vez de fomentar la vida. El agua contaminada es igualmente peligrosa para la vida animal y humana. Propaga bacterias y virus que pueden infectar grandes regiones de disentería, fiebre tifoidea y todas las enfermedades propagadas por el agua. Algunas plantas también sufren por la falta de agua limpia o puede que propaguen enfermedades que atacan al hombre. El lugar en que se halle el agua influye en su utilidad. Las lluvias tienen poco valor para la vida humana si caen en llanuras o montañas despobladas. Son sumamente útiles si caen en los campos cultivados o aumentan el suministro de agua de un centro urbano.

## 2. EL AGUA EN LA PLANTA:

### 2.1 La absorción de agua por las plantas:

Normalmente las plantas absorben agua por las raíces. Hay algunas especies epifitas como la Bromelaceae Tillandsia usneoides ("clavel de aire") que se abastece de agua a través de las hojas. Prácticamente todos los vegetales terrestres pueden también absorber agua a través de las hojas pero esta absorción en general no tiene mucha importancia para la fisiología de las plantas. (En condiciones de laboratorio se ha conseguido cultivar tomates hasta la producción de frutos, abasteciéndolos de agua por las hojas).

La penetración del agua en las raíces es principalmente un fenómeno de ósmosis. En las semillas el agua penetra principalmente por imbibición, o sea, por la fuerza con que el almidón y otros constituyentes de dimensiones coloidales encontrados en las semillas absorben el agua.

Para comprender la gran eficiencia de las raíces como órgano de absorción de agua, es conveniente llamar la atención a la gran superficie de contacto que el sistema radicular de una planta mantiene con el suelo.

Los datos que siguen fueron obtenidos por Dittmer (1937) en centeno de 4 meses de edad, cultivado en una caja de 12" x 12" x 22".

Largo total de las raíces	620,000 m
Largo total de los pelos absorbentes	10,600.000 m
Largo total de raíces + pelos	11,220.000 m
Superficie total de las raíces	237 m <sup>2</sup>
Superficie total de los pelos absorbentes	401 m <sup>2</sup>
Superficie total de raíces + pelos	638 m <sup>2</sup>
Superficie total de las hojas	4.6 m <sup>2</sup>
Relación superficie raíces:superficie hojas 137:1	

Véase por estos resultados que el área de contacto de la planta (hojas) con el aire es en este caso menos de 100 veces su área de contacto con el suelo. La pérdida de agua (transpiración) por unidad de área de hojas durante el día es mucho más rápida que la absorción por unidad de área de raíz, pero la superioridad de superficie de las raíces sobre las hojas tiende a equilibrar la diferencia.

Según los datos anteriores, el crecimiento de las raíces por día tuvo un promedio de 5.16 m no contando los pelos absorbentes. Estudios con avena salvaje han dado un promedio de 5.76 m por día. Comparándose así que el crecimiento de las raíces tiene mucha importancia para el abastecimiento de agua de las plantas.

## 2.2 El mecanismo de absorción de agua:

Hay dos tipos de mecanismo por los cuales las raíces pueden absorber el agua: mecanismo activo y mecanismo pasivo. El pasivo tiene este nombre porque las raíces actúan "pasivamente" en este mecanismo, la fuerza de absorción es un resultado del poder de absorción o fuerza de succión de las células de las hojas.

En condiciones que favorecen la transpiración, la solución encontrada en vasos leñosos, tanto en el tallo como en las raíces es sometida a una tensión o presión negativa, que aumenta el poder de absorción de agua de dichos vasos. Este aumento es mayor cuanto más rápida es la transpiración. Las células de las raíces pierden agua hacia los vasos y a la vez aumentan en poder de absorción, lo que resulta en una penetración más rápida de agua a través de los pe los absorbentes.

El mecanismo activo es independiente de la parte aérea de la planta. La fuerza que causa la absorción de agua en este caso es la concentración osmótica de la solución encontrada en los vasos leñosos. Como la concentración osmótica de esta solución es en general muy baja (0.05 a 0.1 molar), la absorción activa es muy lenta y prácti camente no tiene importancia para el abastecimiento normal de agua de la planta. Cuando se corta una planta herbácea, como el tomate, por la base del tallo, se nota una exudación a través de la superficie cortada de la parte que quedó en el suelo. Esta exudación sa le con una presión, en general, de 1 a 3 atmósferas, conocida como "presión radicular" y resulta de la absorción activa. El fenómeno de la gutación (salida de gotitas de agua a través de los hidatodios de las hojas durante la noche o en días muy húmedos) es también un resultado de la absorción activa.

La absorción pasiva es la más importante, pues, en general por lo menos un 95% del agua que la planta absorbe entra a las raíces por este mecanismo. Además, algunas plantas por ejemplo, los gymnosper mas, aparentemente no tienen capacidad de absorber el agua por el me canismo activo.

Factores que afectan la absorción de agua: Los principales factores son: 1) la cantidad de agua en el suelo; 2) la intensidad de transpiración; 3) el aireamiento del suelo; y 4) la temperatura del suelo.

- 1) Las plantas no pueden absorber agua cuando el porcentaje en el suelo es inferior al punto de marchitez. A medida que el porcentaje de agua aumenta encima del coeficiente de marchitez, hay, hasta cierto punto, un aumento correspondiente en la absorción de agua por las raíces, en caso que las condiciones sean muy favorables a la transpiración. Si la transpiración no es muy intensa, la absorción prácticamente no varía con el aumento de agua en el suelo encima del punto de marchitez.
- 2) Como la absorción pasiva es muy afectada por la transpiración, se comprende que todo factor que afecte la intensidad de este fenómeno, tendrá también influencia sobre la absorción de agua. La influencia de la transpiración, entonces, es de gran importancia.
- 3) La respiración de las células es necesaria para que el protoplasma conserve sus actividades normales, inclusive sus propiedades osmóticas. En un suelo poco aireado hay mucho  $\text{CO}_2$ , poco  $\text{O}_2$ . Estos dos factores (principalmente, tal vez, el exceso de  $\text{CO}_2$ ) impiden la respiración normal de las raíces e indirectamente disminuyen la absorción de agua. Las plantas, pueden marchitarse como consecuencia de la falta de aireamiento, aunque el agua sea muy abundante.
- 4) La permeabilidad de las células disminuye con una reducción de temperatura. Por otro lado, la viscosidad del agua aumenta cuando la temperatura disminuye, haciendo su difusión más lenta. Estos dos factores explican por qué las plantas marchitan cuando la temperatura del suelo es relativamente baja. Las plantas de clima caliente son las más sensibles. El algodón, por ejemplo, marchita cuando la temperatura del suelo baja o más o menos  $17^\circ\text{C}$  independiente de la cantidad de agua disponible.

### 2.3 El movimiento de agua en la planta:

La circulación del agua en plantas superiores se hace a través del xilema, o más específicamente, a través de los vasos leñosos y/o los traquéidos. Los vasos tienen un diámetro de 0.1 a 0.5 mm y una extensión que en algunas plantas pueden ir de las raíces a la punta del tallo. En otras son segmentados en unidades de más o menos 10 cm de largo. Los traquéidos tienen 0.04 a 0.06 mm de ancho y una longitud media de 3 a 5 mm. Son encontrados principalmente en las gymnospermas, las cuales no poseen vasos leñosos.

El mecanismo de la ascensión de agua en la planta: La mayoría de los fisiólogos consideran la "teoría de la cohesión del agua" como la que mejor explica el fenómeno de la ascensión del agua en las plantas. En líneas generales, esta teoría dice que la fuerza que causa la ascensión viene del poder de absorción o fuerza de succión de las células de las hojas, y que la cohesión del agua hace que toda la columna hídrica de la planta sufra a un solo tiempo el efecto de dicha fuerza de succión, resultando de esto la ascensión de la columna. El poder de absorción de agua de las hojas será, naturalmente, tan o más grande cuanto más rápida es la transpiración y cuanto más elevada es la concentración osmótica de las células. Las hojas de los árboles tienen una presión osmótica promedio de 15 a 30 atmósferas. En condiciones de rápida transpiración el poder de absorción de agua de las hojas puede aproximarse a estos valores, o sea, desenvolver una fuerza capaz de elevar una columna de agua de 150 a 300 m de altura ( $1 \text{ Atmós.} = 1,033 \text{ kg/cm}^2 = \text{una columna de agua de } 10.33 \text{ m de altura por cm}^2$ ). La cohesión del agua es de cerca de 350 atmósferas, por lo tanto la columna de agua puede soportar fácilmente una tensión de 15 a 30 atmósferas, sin el peligro de romperse.

Físicamente la "teoría de la cohesión" es perfectamente adecuada para explicar la ascensión de agua. Una objeción presentada por algunos fisiólogos a esta teoría es la existencia de burbujas de aire frecuentemente encontradas dentro de los vasos, las cuales quebraría la continuidad de la columna de agua, impidiendo, por tanto, su movimiento ascensional. Entretanto, los defensores de la teoría de la cohesión, explican que los vasos leñosos están en comunicación osmótica entre sí, a través de las células parenquimatosas encontradas en el xilema; de manera que el agua puede contornear dichas burbujas de aire o pasar de un vaso a otro.

El agua se mueve así como una sola columna, y no como una serie de pequeñas columnas separadas, como si cada vaso fuera un sistema aislado.

La presión radicular: resultante del fenómeno de absorción activa, sin duda contribuye en parte para la ascensión del agua en algunas plantas, principalmente herbáceas. El agua que sale de estas plantas durante la noche o en días muy húmedos en forma de gutación es puesta en movimiento por la presión radicular. Se debe recordar entretanto, que muchos árboles no tienen presión radicular, y que además, el valor de dicha presión es tan baja que no daría para elevar el agua en plantas de más de 2 o 3 m de alto.

#### Dirección del movimiento de agua:

La dirección del movimiento de agua en la planta es controlada por la diferencia entre el poder de absorción o fuerza de succión de sus distintos órganos. Es consecuencia de la transpiración, las hojas, en general, tienen un poder de absorción (PAA) más alto que las raíces, y por eso el agua se mueve generalmente hacia arriba. En condiciones especiales puede haber inversión en el movimiento. Así, cuando una planta marchitada por falta de agua en el suelo es mojada apenas en las hojas, nótase un movimiento de agua de la parte superior hacia abajo, esto es, de las hojas hacia las raíces.

Los frutos pierden agua a las hojas siempre que el poder de absorción de estas es mayor que el de los primeros. Esto se observa principalmente durante períodos de sequía, habiendo en consecuencia, una disminución del volumen de los frutos. En los citrus, tomates y otros vegetales de frutos suculentos, este fenómeno se observa todos los días durante las horas de transpiración más intensa. En la noche los frutos vuelven a su volumen original.

Después de una sequía prolongada, el humedecimiento del suelo puede causar el rajamiento de los frutos, en consecuencia del rápido aumento de volumen de los mismos. La cáscara reseca no tiene suficiente elasticidad para acompañar la expansión de la pulpa y se hiende. Esto es un fenómeno muy común en tomates y citrus. El rajamiento de la caña de azúcar después de las lluvias tiene explicación semejante.

#### 2.4 Efectos de las fluctuaciones de las condiciones de humedad del ambiente sobre los procesos de la planta.

Las siguientes son las principales respuestas de la planta a las condiciones de humedad fluctuante en el ambiente.

ATMOSFERA	SUELO	RESPUESTA DE LA PLANTA
1. Saturada	Saturado	No es posible la transpiración. Se origina una tensión en los tejidos de la planta. <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Las hojas exudan agua por los hidatodos.</li> <li>b) Hay ruptura de la membrana de la célula</li> <li>c) Revientan los frutos suculentos.</li> </ul>

- |                |             |  |
|----------------|-------------|--|
| 2. Saturada    | No saturado | Disminuye la transpiración y la absorción.<br>a) Sobrevienen condiciones estáticas<br>b) Hay pérdida de agua de los tejidos de la planta y de los frutos suculentos.                 |
| 3. No saturada | Saturado    | Gran aumento en la transpiración y absorción. Sobreviene un rápido crecimiento.  |
| 4. No saturada | No saturado | Aumento de transpiración, disminución en la absorción.<br>a) Las plantas se marchitan<br>b) Desprendimiento de hojas<br>c) Desprendimiento de flores<br>d) Desprendimiento de frutos |

Atmósfera saturada: suelo saturado: Las hojas de la planta, rodeadas por una atmósfera completamente saturada no pueden continuar transpirando, la intensidad de transpiración se reduce a cero. Esta condición se presenta con frecuencia en plantas cuyos estomas se encuentran hundidos en orificios en los cuales el aire está estancado y hay un lento escape de vapor de agua. La transpiración es posible en aire turbulento, aún si éste está próximo a la saturación con vapor de agua. Por lo tanto, un aumento en la velocidad del aire de solo 1.6 Km/hora puede causar un aumento del 30 por ciento en la velocidad de la transpiración, cuando el aire en movimiento no está saturado, y un aumento de 25.7 Km/hora puede causar un incremento del 50% en la velocidad de transpiración.

Cuando la transpiración cesa en el aire saturado, la repleción de los tejidos de la planta con agua, debido a la succión osmótica, puede ocasionar la exudación del líquido a través de células especiales, llamadas hidatodos, que se encuentran a lo largo de los bordes de la hoja, o extremos terminales de la hoja de ciertas plantas. De esta manera hay un alivio de las tensiones internas.

Cuando no es posible la exudación, las tensiones originadas por la succión osmótica pueden causar la ruptura de las paredes celulares, particularmente si ellas no son elásticas, como en el caso de ciertas plantas de sombra. Por ejemplo, una falla conocida como cuello agrietado se presenta en crisantemos cultivados en condiciones de extrema saturación en invernadero, debido a la ruptura de células en el pedúnculo que sostiene a la inflorescencia.

Otro efecto de la saturación ambiental es la causa del rompimiento de paredes delgadas en frutos suaves, suculentos, como el tomate y ciertos cítricos, especialmente cuando están maduros. El fruto se parte de un lado, frecuentemente con violencia explosiva. Casi siempre la herida se cierra por la formación de una callosidad, si acaso sobrevienen condiciones más favorables.

Atmósfera saturada: suelo no saturado.

En este caso, como en el anterior, no es posible la transpiración en condiciones de aire saturado. El suelo, no estando saturado, extrae agua de la planta, siempre que la magnitud de su fuerza de succión sea suficientemente grande. En general, la planta no se marchita, aunque puede ocurrir esto cuando el suelo se seca demasiado. Los frutos suaves, suculentos, perdiendo agua, pueden disminuir su volumen. Esto ocurre con el tomate, y a veces, con cítricos maduros cuya corteza se contrae y agrieta al perder su agua.

Al principio, el agua que se pierde de los frutos suculentos mantiene la turgencia en las hojas de las ramas que sostienen los frutos, pero luego, en condiciones extremas de sequía, los frutos secos caen al suelo, las hojas se secan y, finalmente, también caen al suelo.

Atmósfera no saturada: suelo saturado: En estas condiciones, la transpiración continúa rápidamente, los nutrimentos son transportados en la misma forma desde el suelo hasta los puntos de crecimiento de la planta, y se produce un rápido crecimiento. La tensión de agua en los tubos conductores se mantiene a un elevado nivel y, si el suministro de agua del suelo no es restringido, las condiciones favorecen un máximo desarrollo de la planta. Este es el medio ecológico ideal para el crecimiento de las plantas.

Atmósfera no saturada: suelo no saturado: En este caso, la transpiración, que al principio puede ser rápida y sin restricciones, disminuye gradualmente por la succión opuesta del suelo que extrae agua del sistema radical. Si el espacio radical es reducido o si el sistema radical no es desarrollado, por ejemplo, debido a la acción de factores perjudiciales o falta de aireación, entonces el suministro de agua viene a ser un factor limitante y el agua es rápidamente extraída de la planta, conforme aumenta la fuerza de succión. Esta es la causa más común de marchitamiento de hojas de flores y de frutos. El marchitamiento está precedido por la pérdida de turgencia y frecuentemente es seguida por la formación de capas de abscisión en la base de los pecíolos de la hoja, pedúnculos de flores y frutos. Finalmente, las hojas, las flores y los frutos caen al suelo.

### 3. SUMINISTRO DE AGUA.

Para explicarse, el suministro de agua a la planta a través del suelo, debe entenderse la importancia del espacio radical de un suelo, definido como el volumen del suelo cuyas relaciones con el agua y el aire son favorables para un activo desarrollo de las raíces.

Su magnitud depende del grado de restricción al desarrollo lateral y vertical de las raíces y también de la estructura del suelo, la cual determina la porosidad.

La restricción lateral a las raíces está determinada por la distancia de siembra, sin embargo ocurre una entremezcla de raíces a lo largo de la zona intermedia entre los sistemas radicales de las plantas adyacentes, siempre que la estructura del suelo no sea limitante.

En la práctica el distanciamiento entre plantas está determinado generalmente no por las dimensiones de la parte aérea o del follaje, sino por las dimensiones del sistema radical.

El tamaño del follaje puede reducirse por medio de la poda, pero el del sistema radical es más difícil de modificar, aunque la poda en las raíces pueda efectuarse parcialmente cavando zanjas alrededor de la planta. Sin embargo, esta es una medida temporal, ya que las raíces de la plantas tienden a crecer por debajo de las zanjas. Si acaso las zanjas se rellenan con tierra, las raíces crecen a través de las zanjas, pero si éstas se limpian periódicamente, puede conseguirse el aislamiento del sistema radical de una planta y se evita así la competencia de raíces, lo cual se hace necesario a veces por ejemplo cuando se realizan experimentos con fertilizantes.

Las restricciones al crecimiento vertical de las raíces se debe a varias clases de obstáculos o impedimentos, siendo los más comunes

1. Roca sólida o roca madre, ausente de fisuras o juntas
2. Capa dura (arcillosa, ferruginosa o calcárea)
3. Horizontes gruesos de grava o de concreciones de mineral de hierro
4. Horizontes compactos de arena o limo
5. Capas freáticas

Los tres primeros roca, capa dura, grava, son simples impedimentos mecánicos que rara vez pueden ser removidos mediante prácticas agrícolas. El último o sea las capas freáticas, pueden ser eliminadas mediante drenajes profundos y el 4o. suelo compacto, puede con frecuencia, eliminarse en forma económica y provechosa, con una labranza profunda, mediante el empleo de subsoladores que consisten en arados fuertes, provistos de pías largas y rígidas que rompiendo la capa endurecida y compacta aflojan el suelo hasta la profundidad de 60 cm o más.

La compactación del suelo es causada por la cohesión estrecha de las partículas del suelo, al que imparte una consistencia firme. Para poder comprender las diferencias esenciales entre el suelo compacto impenetrable a las raíces y suelo suelto fácilmente penetrable, deben considerarse algunos conceptos sobre estructura del suelo.

Estructura del suelo: Se entiende por estructura del suelo la forma de disposición de las unidades que lo constituyen. Si las unidades son partículas monogranulares (o de grano simple) la estructura está determinada por la forma de arreglo con el tamaño y forma de las partículas, y por la distribución de las partículas o la proporción del tamaño de ellas.

Quando las dimensiones de los poros que dejan libre las partículas del suelo en una disposición compacta, son proporcionales a las dimensiones de la cofia que protege la extremidad de la raíz o raicilla, la penetración de las raíces es fácil, pero cuando las dimensiones de los poros de un suelo compacto y rígido son menores de las dimensiones de la extremidad de la raíz, la penetración de éste es imposible.

Esta simple interpretación física de penetración de las raíces, explica satisfactoriamente por qué ciertos suelos rígidos no permiten la penetración de raíces, mientras que otros, por ejemplo un suelo húmico, suave y húmedo, permite la penetración fácil y una ramificación libre de las raíces entre los intersticios.

#### 1 Porosidad y humedad del suelo.

Es bien conocido que los espacios porosos presentes entre las partículas del suelo, tienen diferentes grados de importancia agrícola, de acuerdo con sus dimensiones.

En los primeros tiempos de la física de suelos se hizo la diferenciación entre poros pequeños llamados capilares (parecidos al cabello) y los poros grandes o no capilares. Estas dos clases de espacios porosos se confunden imperceptiblemente unos con otros y tienen las siguientes características principales:

1. Espacios porosos capilares:
  - A) Dimensiones (diámetro promedio) inferior a 0.1 mm, por lo tanto, no permite la penetración de las raíces.
  - B) Retienen el agua, oponiéndose a la fuerza de gravedad (almacenamiento de agua).
  - C) Generalmente no contiene cantidades apreciables de aire.
  - D) Incluyen los micro poros de los coloides del suelo.
  
2. Espacios porosos no capilares:
  - A) Dimensiones (diámetro promedio), mayor de 0.1 mm por lo tanto permiten la penetración de las raíces.
  - B) No retienen agua contra la gravedad y se drenan libremente.
  - C) Contienen y retienen aire, cuando vacíos (almacenamiento del aire).
  - D) Incluyen fisuras, grietas, huellas de raíces y canales biológicos (cavidades y huecos hechos por gusanos, termitas y larvas de insectos).

La propiedad más importante de los poros capilares es su capacidad para absorber y almacenar grandes cantidades de agua, mientras que los poros no capilares es su capacidad para almacenar aire. Esta distinción justifica ampliamente su diferenciación.



Las raíces pueden penetrar sólo a los poros no capilares y obtener de ellos el aire que necesitan, mientras que gran parte del agua la obtienen de los poros capilares.

Los suelos más apropiados para el crecimiento de las raíces son los agregados, estables a la acción del agua. Consistentes en partículas de una amplia gama de dimensiones, pero que incluyen una gran proporción de arcilla coloidal, por ejemplo: el húmico, el brunoso, el arcillo-arenoso o franco. El agua asociada con los coloides del suelo aunque relativamente grande en cantidad, está fuertemente retenida por la unidad de masa de coloide, de manera que la capacidad de retención de agua de un suelo coloidal es extremadamente grande. Esto se atribuye no sólo al tamaño sumamente pequeño de sus micro poros, sino también a la combinación de superficies o absorción de las moléculas del agua sobre la superficie coloidal.

En general, cuanto mayor es la porosidad no capilar de un suelo, mayores serán las dimensiones reales de la mayoría de los espacios porosos y mayor el espacio radical.

Uno de los problemas es la medición tanto del espacio poroso total, como del espacio poroso no capilar, con el fin de determinar si el espacio radical es o no factor limitante en el caso de un determinado cultivo que crece en un suelo particular.

Consecuentemente, la importancia del espacio poroso capilar como una medida de la cantidad de agua que un suelo pueda absorber y retener, de manera que no pueda ser extraído por la fuerza de gravedad, reviste suma importancia.



Después del espacio poroso total el espacio poroso capilar es la característica física más importante de un suelo. Ambos espacio poroso total y espacio poroso capilar, pueden ser determinados por la medición de la cantidad de agua que un suelo pueda absorber.

En el primer caso, para llenar completamente todos los espacios porosos con la exclusión total del aire y en el segundo caso, solamente para llenar el espacio poroso capilar. La primera constante de humedad del suelo puede determinarse a partir de la gravedad específica aparente y real. La segunda, puede determinarse aproximadamente por métodos diferentes.

En general, para suelos, puede aceptarse un valor crítico de gravedad específica aparente de 1.5 como valor límite de porosidad para una fácil penetración de raíces.

Este resultado está respaldado por datos obtenidos en caña de azúcar en Hawaii, los que indican que la penetración de raíces se ve ligeramente impedida cuando la gravedad específica aparente es de 1.12 o 1.25, pero fuertemente impedida, cuando excede de 1.46.

El valor crítico varía apreciablemente para las diferentes clases de suelo y para diferentes clases de plantas. Así, en las investigaciones realizadas en cuatro diferentes series de suelo en Pennsylvania, se obtuvieron valores de 1.6 a 2.0, donde la penetración de raíces tenía fuerte impedimento. Se observó que las raíces del pasto Sudán penetraban más fácilmente que las raíces de soya.

La restricción a la penetración interna de las raíces por la compactación del subsuelo, causa por la aradura o por el paso de tractores pesados, ocurre cuando los valores de gravedad específica aparente están por encima de 1.33, 1.50 o 1.80, según la clase de suelo.

La relación entre el espacio poroso total y la penetración de raíces establecida experimentalmente, es algo arbitraria y fortuita. Suelos que tienen una porosidad total grande no poseen necesariamente todos los poros tan anchos como para permitir el paso de las raíces. Así, un suelo compuesto en su mayor parte de partículas pequeñas, separadas, es posible que contenga pocos poros grandes en comparación con otro formado mayormente por partículas grandes. Sin embargo, como los suelos están compuestos en su mayor parte de una amplia gama de partículas, muchas de ellas agregadas en partículas compuestas grandes, hay mayor probabilidad que haya predominio de espacios porosos grandes en suelos sueltos, esto es, suelos con una gravedad específica aparente baja.

La figura 7 ilustra un método sencillo para expresar los resultados de determinación de espacio poroso, y muestra tres diferentes perfiles de suelo, uno arenoso, uno franco y uno arcilloso. La porosidad capilar y la no capilar se ilustran para cada suelo. Se dan también valores promedio para ambos y para el espacio poroso total. El espacio poroso no capilar es grande en el suelo arenoso y muy pequeño en el arcilloso. La penetración de las raíces es libre en el suelo arenoso y el franco, y va hasta 1.20 m de profundidad, pero en el suelo arcilloso sólo alcanza a 30 cm de profundidad, por debajo de la cual la porosidad no capilar va disminuyendo grandemente en magnitud e impide la penetración de raíces.

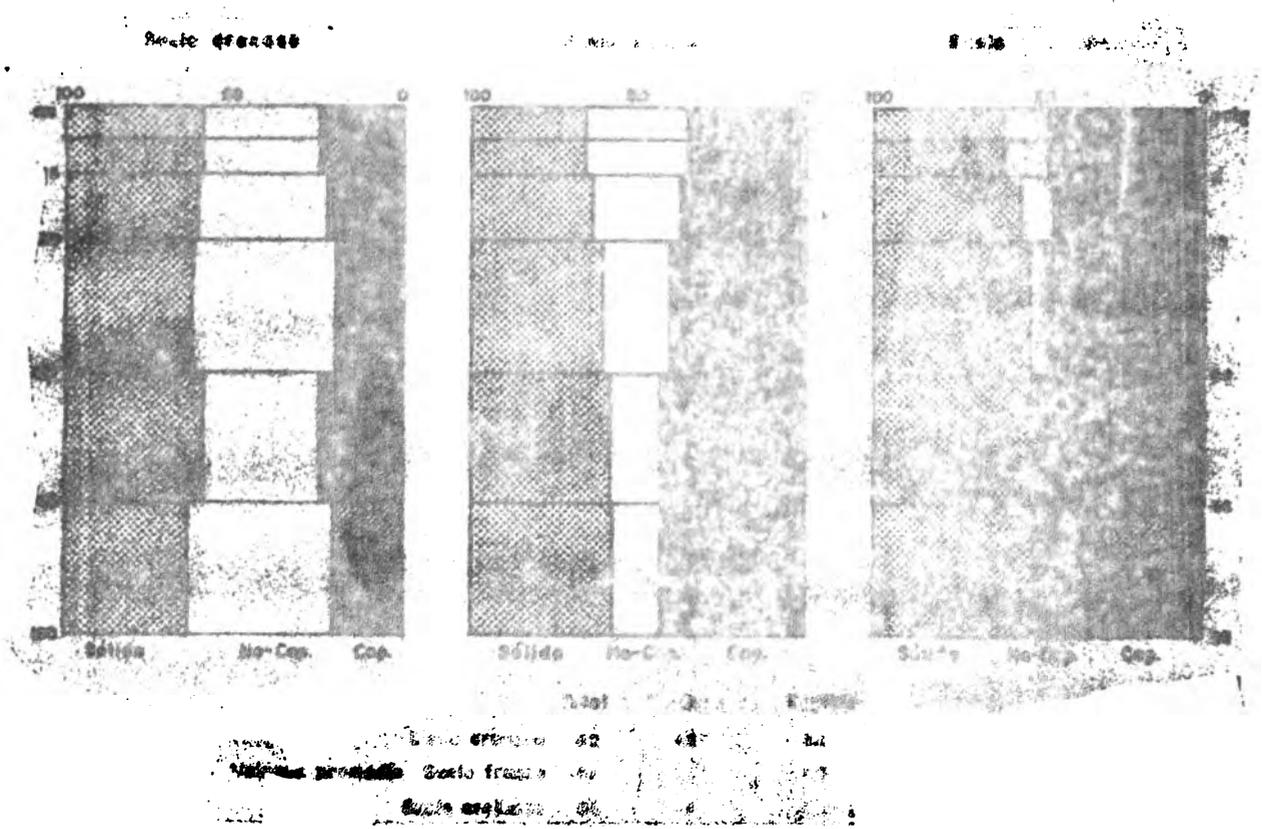


Fig. 7      DIAGRAMS IN FIGURE

.2 El agua en el suelo:

El estudio del agua en el suelo es parte de la Edafología. Su inclusión aquí es apenas para facilitar el estudio de la absorción de agua por las plantas.

El agua gravitacional: Se encuentra normalmente en la tabla de agua, abajo de los suelos cultivados. En la capa cultivada del suelo la presencia de agua gravitacional solamente se verifica de 1 a 4 días después de las lluvias, dependiendo de la textura del suelo. Es un agua totalmente libre, que se mueve por la acción de la gravedad. Las plantas naturalmente pueden absorber esta agua, pero su presencia en el suelo cultivado es casi siempre perjudicial, pues impide el aireamiento del suelo, pudiendo causar la muerte de las raíces (imposibilita la respiración aeróbica).

Son pocas las plantas que pueden ser cultivadas en suelos saturados de agua (arroz, por ejemplo). Estas plantas poseen adaptaciones anatómicas (existencia de aerenquima en el corte de las raíces) y/o fisiológicas (respiración principalmente anaeróbica) que les permite soportar las deficiencias de oxígeno en el suelo.

La gran mayoría de las plantas cultivadas sufren cuando el suelo se mantiene saturado por mucho tiempo. Cuando la capa de agua del suelo es poco profunda, las raíces se desarrollan apenas en la superficie, pues todas las ramificaciones que se dirigen para abajo mueren por falta de oxígeno.

El agua capilar: Se encuentra retenida en el suelo por la fuerza de capilaridad. En un terreno de textura mediana, el porcentaje de agua (expresada a base del peso seco) encontrado dos o tres días después de una lluvia fuerte, da el valor de la capacidad capilar, o capacidad de campo del suelo. La tensión con que el agua es retenida cuando el suelo está en su capacidad de campo corresponde a más o menos 1/2 atmósfera.

A medida que el agua capilar disminuye, la tensión del agua restante gradualmente aumenta hasta alcanzar un valor que impide el normal abastecimiento de agua para las raíces, provocando así el marchitamiento de las plantas. En general esto se verifica cuando la tensión del agua alcanza alrededor de 15 a 16 atmósferas. El porcentaje de agua que el suelo contiene cuando las plantas se marchitan es el "coeficiente de marchitez" o "punto de marchitez" del suelo. Existen diferentes métodos para obtener el "punto de marchitez".

Algunos libros dan mucha importancia al movimiento del agua capilar en el suelo, considerándolo muy útil para el abastecimiento de las plantas. Hoy en día se ha demostrado que este movimiento es tan lento que prácticamente de nada vale para las plantas. El crecimiento de las raíces es mucho más importante que el movimiento de agua por capilaridad para el abastecimiento de agua.

El agua higroscópica: Es generalmente definida como el agua que el suelo contiene después de ser secado al aire. Naturalmente, esta definición es muy imprecisa, pues mientras más humedad hay en el aire, mayor será la cantidad de agua higroscópica encontrada en el suelo. La división entre el agua higroscópica y el agua capilar es por tanto arbitraria. Para estandarizar esta división se pensó en crear un "coeficiente de higroscopicidad", determinado siempre a una humedad relativa. El coeficiente más común usado es determinado a una humedad relativa de 98.2% (suelo o puesto en un desecador en equilibrio con una solución de  $H_2SO_4$  al 3.3%).

La fuerza (tensión) con que el agua es retenida en el suelo a dicho coeficiente, es de más o menos 31 atmósferas. La tensión aumenta progresivamente con la desecación del suelo, pudiendo alcanzar un valor hasta de 10,000 atmósferas. El agua higroscópica se encuentra absorbida por los coloides del suelo (principalmente para arcilla y coloides orgánicos), siendo su tensión un resultado de la fuerza de atracción de dichos coloides por el agua (absorción).

Las plantas, naturalmente, no pueden utilizar el agua higroscópica para el crecimiento. La Fig. 3 da una representación esquemática de lo que fue dicho sobre el agua en el suelo.

Coefficiente de marchitez: El coeficiente de marchitez o punto de marchitez es la constante del suelo que más importancia tiene para la fisiología, pues es el que demarca la separación entre el agua activa y el agua inactiva (o inprovechable) para las plantas. Determinándose apenas el porcentaje de agua en un suelo no se puede

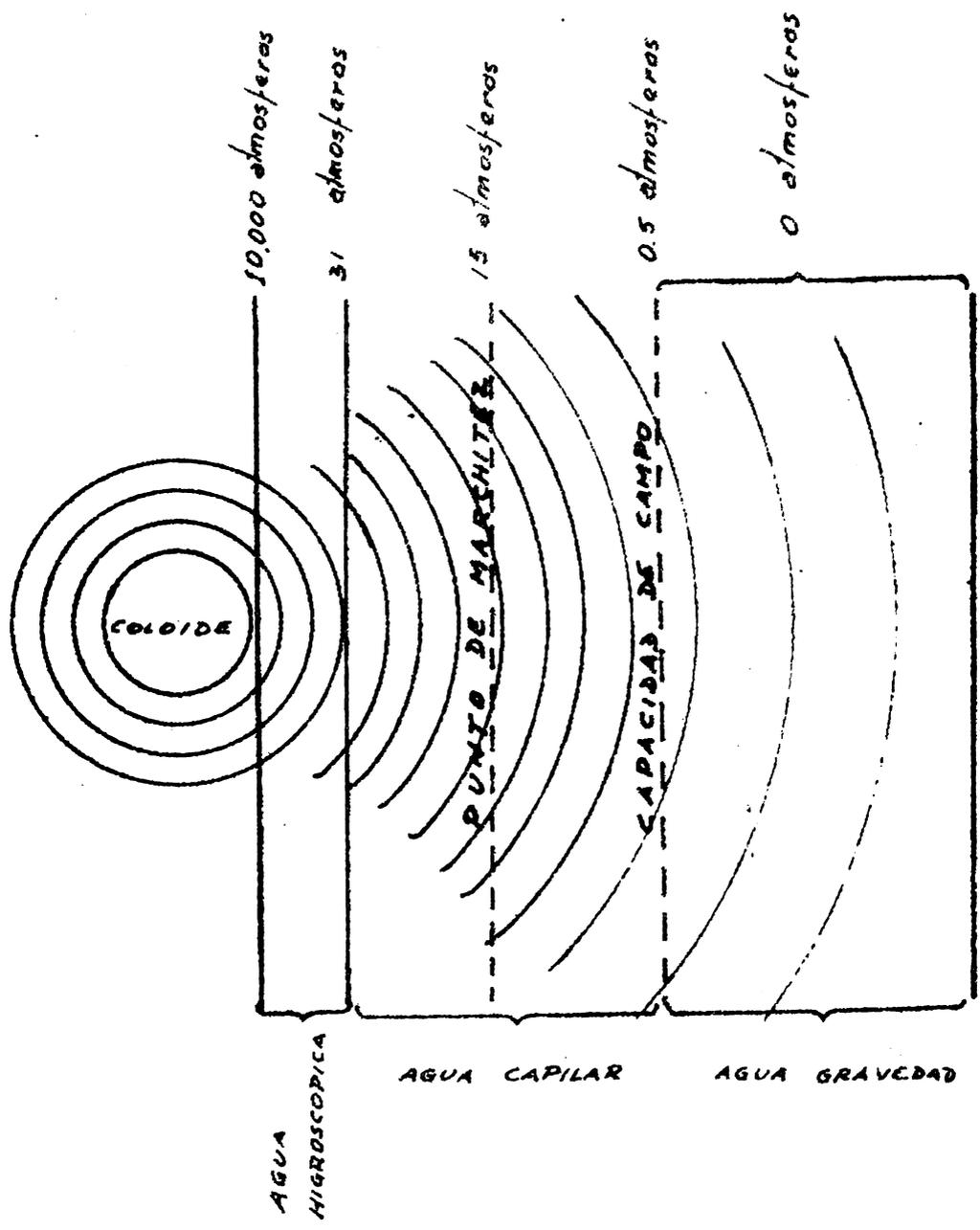


Fig. 8

AGUA EN EL SUELO

saber si este suelo necesita o no irrigación. Para esto es necesario conocer primeramente su coeficiente de marchitez. En la práctica de la irrigación la determinación del punto de marchitez tiene mucha importancia.

Antiguamente se pensaba que las plantas variaban mucho en cuanto a su capacidad o fuerza de absorción de agua del suelo, y que por lo tanto, el punto de marchitez también variaba conforme la especie vegetal. Hoy se sabe que el punto de marchitez es prácticamente el mismo para todas las plantas y que su valor es una función apenas del tipo de suelo. En las vecindades del punto de marchitez una pequeña variación en la cantidad de agua causa una gran variación en la tensión de dicha agua en el suelo.

Una variación de apenas 1 o 2% en el agua del suelo en las vecindades del punto de marchitez causa una oscilación de tensión de 10 atmósferas. Las diferencias que podrían haber entre las plantas, en cuanto a su poder de absorción de agua, son pues, enmarcadas por esta variación de tensión en el suelo, y por esto, todos los vegetales marchitan más o menos a un mismo porcentaje de agua.

La tabla que sigue muestra la capacidad de campo, el punto de marchitez y la capacidad de retención de agua activa (diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitez) en tres tipos de suelos.

	Suelo Arcilloso	Suelo Arcilloso Arenoso	Suelo Arenoso
Capacidad de campo (agua capilar)	28.4%	16.1%	9.5%
Punto de marchitez (coef.marchitam.)	13.4%	7.5%	2.9%
Cap. de retención agua activa o Agua disponible	15.0%	8.6%	6.6%

Estados de la humedad del suelo: Se ha establecido que el con-  
tenido de humedad de un suelo, en cualquier instante, puede en  
contrarse en uno de los cuatro estados importantes en que el  
agua se presenta en él, aunque los límites entre estos estados  
no sean definidos, sino que ellos se confunden imperceptible-  
mente. Los cuatro principales grados de humedad del suelo o  
las principales constantes de humedad son:

1. Humedad de saturación (condición de anegamiento)
2. Humedad capilar (índice de textura, equivalente de humedad,  
capacidad de campo)
3. Humedad no capilar (saturación menos capilar)
4. Humedad en el coeficiente de marchitamiento (límite inferior  
de agua extraíble).

La experiencia ha demostrado que las plantas no pueden desarro-  
llar un buen sistema radical, a menos que el espacio poroso no  
capilar, con buen drenaje de agua en el suelo saturado y penetra

de aire, sea mayor al diez por ciento del total del volumen del suelo. Esto se debe, en parte, a que los suelos que tienen un espacio poroso no capilar inferior al diez por ciento, no poseen suficiente espacio radical, y sus poros son generalmente demasiado pequeños para permitir la entrada de raíces, pero principalmente debido a que el abastecimiento de aire es inadecuado para la respiración de las raíces.

Agua disponible, utilizable y óptima: En términos ecológicos, las cuatro primeras constantes de humedad del suelo, como se define más arriba, pueden emplearse para indicar y evaluar las relaciones entre el agua del suelo y la planta en crecimiento. Cuando el contenido de humedad de un suelo está en su punto de saturación, las plantas no pueden desarrollar normalmente su sistema radical, debido a la falta de aire u oxígeno requeridos para la respiración y actividad de las raíces. Ocurren excepciones, por ejemplo, el arroz, que por poseer un tejido aerenquimatoso especial en sus tallos y raíces, puede tomar oxígeno de la atmósfera hasta en las células de las raíces.

Ciertos pastos de pantano, tales como Ischaemum spp. posiblemente conducen oxígeno atmosférico a sus raíces en una forma parecida al arroz.

A medida que el contenido de humedad de un suelo saturado se reduce por el drenaje o por secamiento, el aire ocupa los espacios porosos no capilares. Cuando aproximadamente el diez por ciento

de estos poros está ocupado por aire, las raíces pueden crecer libremente y el suelo se halla en condiciones de mantener la vida de la planta inclusive la mayoría de las plantas de cultivo. Conforme la humedad baja al límite del espacio poroso no capilar y aumenta el aire, las raíces pueden crecer aún más rápidamente. Cuando la humedad no capilar está completamente absorbida, aumentos ulteriores de agua provienen de poros cuyas dimensiones están dentro del rango de la capilaridad. Como se ha visto, muchos expertos designan aquella parte del agua capilar por encima del coeficiente de marchitamiento como agua disponible (capacidad de retención del agua activa), como sigue:

$$\text{Agua disponible} = \text{agua capilar} - \text{agua en el coef. de marchitamiento}$$

En la práctica, las plantas no pueden absorber y utilizar el agua disponible, a menos que el suelo esté convenientemente aireado de modo que las raíces puedan realizar sus funciones en forma adecuada. Por lo tanto, el agua en un suelo húmedo viene a ser utilizable cuando aproximadamente el diez por ciento del volumen total del suelo está ocupado por aire. Por debajo de este valor, el agua está libre y prontamente disponible (la succión de las raíces de la planta compete con la fuerza de la gravedad) hasta que todos los espacios porosos no capilares se vean desprovistos de agua. Por debajo de este estado, cerca de dos quintos (40 por ciento) del agua remanente retenida en los poros capilares, está disponible hasta que se llega el coeficiente de marchitamiento, por debajo del cual cesa por completo

la absorción de agua por las raíces de la mayoría de las plantas de cultivo. Las diversas fases de pérdida de agua se muestran en el diagrama Fig. 9, en el cual se ven las reacciones entre las diferentes constantes de humedad de un suelo arcilloso con un espacio poroso total del 60%, dividido en 20% de espacio poroso no capilar, y 40% de espacio poroso capilar.

En conclusión, el ámbito más apropiado de humedad del suelo, o sea, el ámbito óptimo de humedad se extiende desde el 10% menos de la capacidad de saturación hasta el resto del ámbito del espacio poroso no capilar y un poco más allá del comienzo del espacio poroso capilar, como se ilustra en el diagrama (Fig. 9).

Los horticultores que cultivan lechuga y otras plantas anuales como repollo, coliflor y tomate, han notado con frecuencia que, en lugares donde el suelo está bien preparado de manera que adquieren una estructura estable con un amplio espacio poroso no capilar, se obtienen mayores rendimientos. Este es particularmente el caso en que se provee de agua en abundancia, sea por riego (con preferencia por el método de aspersión) o por mantenimiento de una capa freática elevada. En estas circunstancias el espacio radical es grande y la tensión de agua en el interior de los tejidos de la planta se mantiene baja, debido a que el contenido de agua disponible del suelo se mantiene en la parte inferior del ámbito no capilar y la parte superior del ámbito de capilaridad, pero muy por encima del coeficiente de marchitamiento.

Suelo con Capacidad de Saturación 60% vol.  
 Capacidad de Campo 40% vol.  
 Coeficiente de Marchitamiento 20% vol.

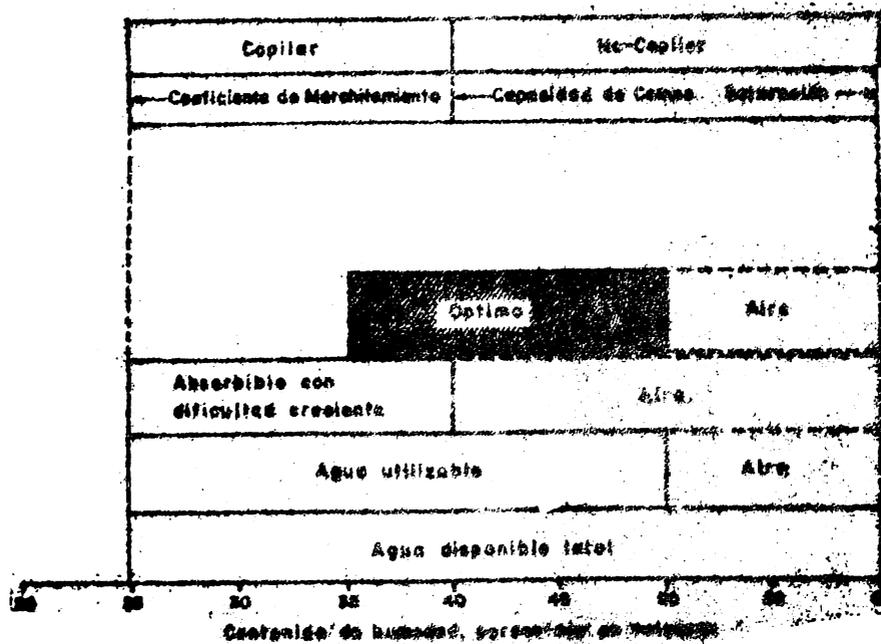


Fig. 9 HUMEDAD DEL SUELO: "DISPONIBLE", "UTILIZABLE" Y "OPTIMA"

Forma de representar las fluctuaciones de humedad del suelo mediante diagramas: Generalmente, se emplean dos procedimientos para representar las fluctuaciones en el contenido de humedad del suelo en base a datos obtenidos en el muestreo de parcelas o campos. Ellos pueden denominarse como métodos vertical y horizontal.

Método vertical: Este está ilustrado por el diagrama (Fig.10), y se emplea cuando se efectúa el muestreo de varias profundidades y a intervalos no frecuentes. En el diagrama, las profundidades de muestreo son 0-7.5, 7.5-15, 15-30, 30-60 y 60-99 cm. Considérese primero el horizonte 0-7.5 cm. Supóngase que el espacio poroso total del suelo en este horizonte es del 66% en volumen volumen. Este valor se representa junto a la línea límite superior del diagrama. Supóngase que el espacio poroso capilar es de 33% en volumen. Este se representa en la misma forma que el anterior. En la suposición de que el coeficiente de marchitamiento sea aproximadamente igual a dos tercios del espacio poroso capilar, se representa con una línea (doble línea en el diagrama) que señala el límite inferior del agua disponible en el punto de 19.8 ( $33 \times 0.6$ ). Se tienen ahora todas las constantes significativas del suelo para el horizonte superior representado en el diagrama.

Supóngase que el contenido de humedad total en el horizonte superficial del suelo en el momento del muestreo era del 45% en volumen. Este valor se representa en el diagrama, y la cantidad de humedad en el suelo se muestra por las líneas horizontales punteadas. Este procedimiento en el presente caso indica claramente que al momento del muestreo todo el espacio poroso capilar, en el horizonte superficial, más 12% del espacio poroso no capilar, se encontraba lleno de agua. La cantidad de espacio de aire libre era, pues de 21% (66 menos 45), el cual es casi el doble del valor crítico para espacio ocupado por aire, que es el 10%. La cantidad de agua disponible en este horizonte en el momento del muestreo era de 13 (capilar) más 12 (no capilar) igual a 25% en volumen. De esta cantidad de agua, aquella que ocupa el espacio poroso no capilar es la que está a disposición más inmediata, mientras que el resto puede disponerse con mayor dificultad, conforme se pierde, suponiendo que la disponibilidad disminuye gradualmente conforme el agua se retira del suelo.

Los valores experimentales para los subsiguientes horizontes del perfil, son considerados de la misma manera, y transferidos al diagrama respectivo. Una vez completado, el diagrama indica que este perfil contiene un amplio espacio no capilar y suficiente espacio radical, hasta los 60 cm de profundidad, pero el último horizonte es deficiente en espacios provistos de aire, ya que su

Datos de un muestreo

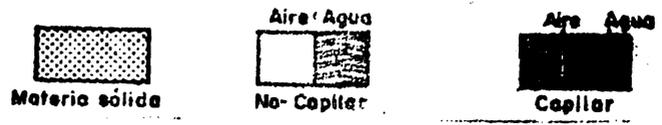
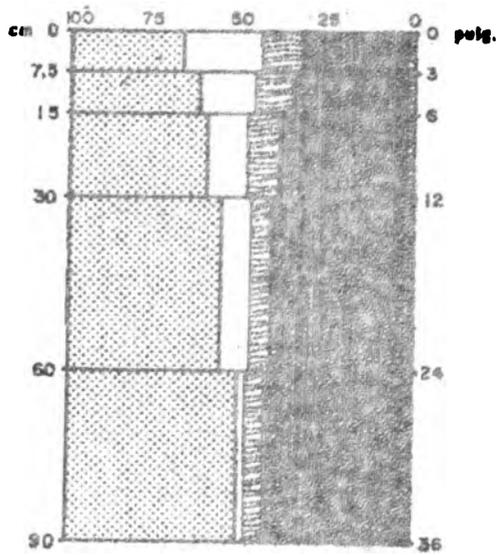


Fig. 10. Corte de muestra de suelo, método vertical.

porosidad no capilar es sólo de alrededor de 7% en lugar de 10%. Al momento del muestreo, entre un tercio y un medio del espacio poroso no capilar estaba ocupado por agua en los cuatro primeros horizontes, mientras que el último horizonte estaba si completamente lleno de agua con exclusión de aire. Esta situación, si se prolongara, causaría asfixia de las raíces y limitaría el espacio radical a 60 cm. de profundidad.

Método horizontal: Este método está ilustrado por otro diagrama (figura 11), y se emplea cuando se considera una sola profundidad de muestreo, pero en forma continua y a intervalos regulares, por ejemplo, una vez por semana, como en el diagrama.

El valor del espacio poroso total, por ciento en volumen se representa en el límite vertical a la izquierda del diagrama. En el ejemplo, éste es 66%. El suelo sólido se representa en la parte inferior con sombreado horizontal y debe continuarse en teoría hasta la marca del 100%, aunque esto es innecesario y se omite. El espacio poroso capilar se identifica con puntos negros y su valor en el ejemplo es de 33%. La doble línea horizontal que atraviesa el área capilar marca el coeficiente de marchitamiento, 19.81 ( $33 \times 0.6$ ) o más o menos 20%. El espacio poroso no capilar se extiende del límite superior, 0%, hasta el límite del espacio poroso capilar, o sea 33%, que es el valor del espacio poroso no capilar en el suelo del ejemplo. La línea horizontal planteada en la marca del 10% indica el límite de suficiencia de aeración.

Relación de mezclas, C-18 cm  
 Datos de 10 semanas sucesivas de muestreo

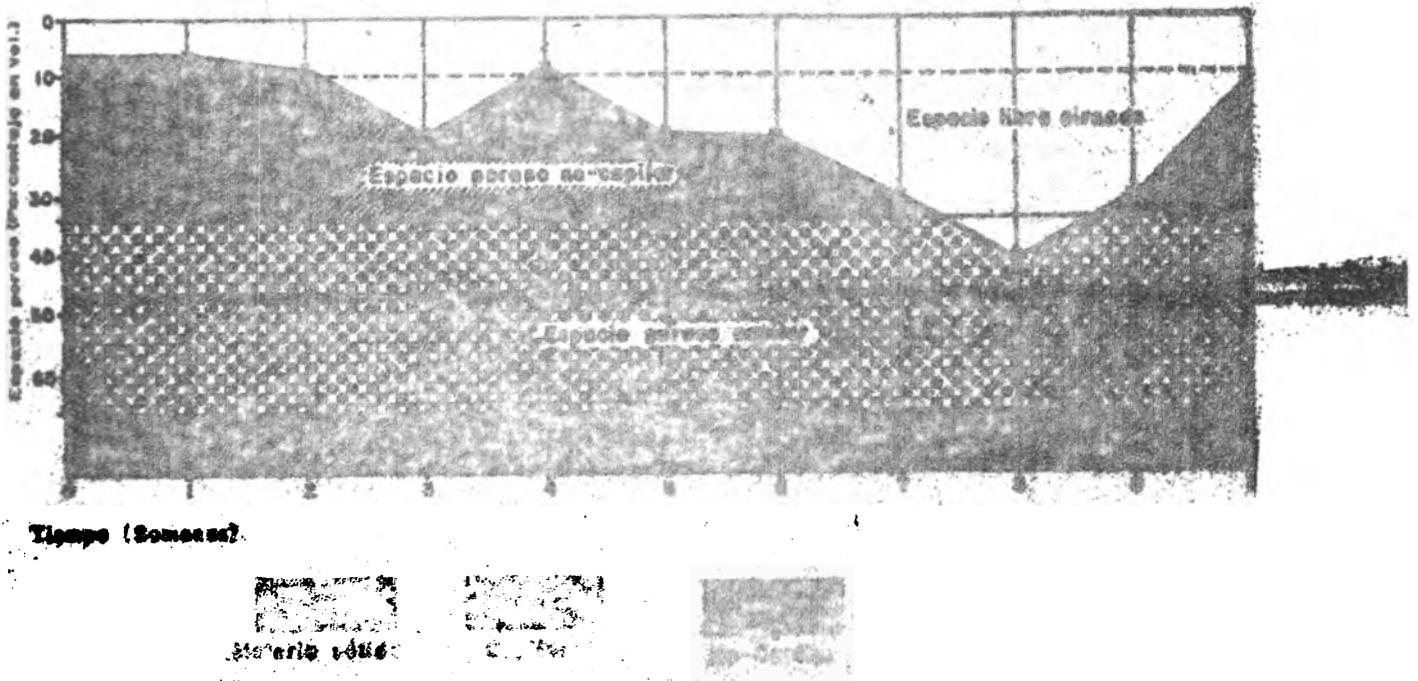


Fig. 11 PERMEABILIDAD DEL PUNTO, METODO HORIZONTAL.

Los valores semanales de humedad total se trasladan al diagrama. La posición de la línea en zigzag del contenido de humedad total en relación con las diversas líneas de límite horizontal dan información de las condiciones de humedad en el suelo, semana tras semana. El diagrama representa, pues, las condiciones dinámicas o la marcha semanal de la humedad del suelo en contraste con el diagrama vertical del perfil, el cual representa condiciones estáticas al tiempo del muestreo y en una ocasión solamente.

#### Infiltración y percolación:

Infiltración: La infiltración del agua en la superficie del suelo depende de la calidad del suelo, es decir, de su infiltrabilidad. Está determinada por la estructura del suelo y su estabilidad, y de algunas otras características físicas, por ejemplo, humedecimiento, lo que controla la velocidad a la que penetra el agua en la superficie del suelo, cuando se aplica, sea en forma de riego o de lluvia. Otro nombre para infiltrabilidad es el de receptividad.

Percolación: La percolación se refiere a la penetración del agua en los horizontes inferiores, luego que se ha infiltrado en la superficie del suelo. Depende de la calidad del suelo, de su permeabilidad. Está también determinada por la estructura y otras características físicas del suelo.

## B I B L I O G R A F I A

- ALVIM, P. de T. Estudio de las relaciones entre la planta y el agua. In. Curso de irrigación y avenamiento, 22 Oct. 20 Dic. 1952, San José Costa Rica y Santa Tecla, El Salvador, 1952, 49 p.
- ARZE B. J. Los factores climáticos en el proceso de producción agrícola. CATIE, El Salvador, 1978, 23 p.
- BOZAL, J. Química. Teide, Barcelona 1972, 271 p.
- HARDY. F. Edafología tropical. Herrero México, 1970, 416 p.
- HARVEY, G. L. El agua, métodos modernos de su uso y conservación. Intercontinental, Stanford, Connecticut, 1969, 78 p.
- MILLER, E. V. Fisiología Vegetal, UTEHA, México, 1967, 344 p.
- NACE, R. L. El agua y el hombre, Programa Mundial, París, UNESCO 1970, 48 p.
- ODUM, E. P. Ecología. Interamericana, México 1973, 639 p.
- PAPADAKIS, J. El Clima y los cultivos. In Seminario Regional de estudios integrados sobre ecología, Buenos Aires, 15 junio a 8 julio 1970, UNESCO, Montevideo 1971, pp 69-78.
- TRICART J. Los recursos de agua. In Seminario Regional de estudios integrados sobre ecología, Buenos Aires, 15 junio 8 julio 1970. UNESCO, Montevideo 1971, pp 19-45.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURAL, El agua: su aprovechamiento en agricultura, Anuario 1955, México D.F., Centro Regional de Ayuda Técnica, 1965.

\*\*\*\*\*