

# ECUACIONES QUE RIGEN EL MOVIMIENTO DEL AGUA A TRAVES DE LAS PLANTAS.

**J. Barragán Fernández (\*)**  
**I. Recasens Guinjuán (\*)**

Quaderns  
d'enginyeria

4(1983)1 p. 53-67

## RESUMEN:

El mecanismo de aporte de agua desde el suelo a la planta, camino de la atmósfera, es de gran complejidad. Y lo es fundamentalmente, tanto por la naturaleza de los medios a través de los que circula el agua (suelo, raíz, tallo, hoja y atmósfera) como por los procesos energéticos que en ellos tienen lugar.

En este trabajo se han intentado abordar esquemáticamente los procesos principales de este flujo de agua. Se han analizado los parámetros del mismo y planteado las ecuaciones que rigen cada una de sus fases, (sin olvidar las hipótesis que se efectúan y que condicionan dichas expresiones). En definitiva se ha puesto de manifiesto la interrelación existente entre los campos hidrodinámico, termodinámico y biológico, que están presentes en el problema.

Para una mayor comodidad en el análisis del movimiento del agua a través del alambicado sistema de vasos y conductos, se ha utilizado la analogía eléctrica del proceso como metodología de trabajo.

## SUMMARY:

The mechanism of water transport from the ground to the plant, and through the atmosphere is very complicated. Just as in the nature of the parts through which the water flows (ground, root, stem, leaf and atmosphere), as in the processing of energy in these parts.

In this study, it has been attempted to demonstrate schematically the principles of the water flow. The parameters of this have been analysed and the equations which pertain to each phase (not forgetting the hypotheses which affect and condition such expressions). The interrelation between the hydrodynamic, thermodynamic and biological areas has been definitively demonstrated.

For greater ease of analysis of the movement of the water through the network of veins and vessels, an electrical analysis of the process has been used in the methodology of the study.

---

(\*) Escola Superior d'Agricultura. Lleida

INDICE DE NOTACIONES:

- A ..... factor de la solución de Philip que representa los efectos gravitatorios en la infiltración.
- Ax ..... área del xilema.
- D ..... difusibilidad.
- E ..... evaporación por unidad de superficie ( $\text{grs}/\text{cm}^2/\text{sg}$ )
- Et ..... evapotranspiración.
- Ep ..... evaporación potencial.
- F ..... energía utilizada en la fotosíntesis.
- G ..... energía utilizada en calentar el suelo.
- H ..... energía utilizada en calentar el aire y el cultivo.
- K ..... factor de conductividad en la evaporación desde las hojas.
- L ..... calor latente de evaporación del agua (585 calor/gr). Área de la hoja.
- Q ..... caudal por unidad de longitud.
- R ..... radio de la raíz única equivalente al sistema radicular.
- $R_1$  ..... radiación ascendente.
- $R_n$  ..... radiación neta.
- $R_s$  ..... radiación descendente.
- $R_j$  ..... radio de los vasos conductores j.
- $R_v$  ..... concentración de raíces (cm. de raíz/ $\text{cm}^3$  de suelo).
- S ..... absorptividad (representa los efectos capilares en la solución de Philip a la infiltración).
- a ..... cte. de cada suelo en la fórmula de la conductividad capilar.
- b ..... variable que incluye el grado de contacto entre las raíces y el agua del suelo.
- $d_A$  ..... distancia media entre raíces vecinas:  $d_A \approx (\pi R_v)^{-1/2}$
- $e_2$  ..... presión de vapor del aire (mbar) a 2m. sobre el suelo.
- $e_2^0$  ..... presión de vapor del aire saturado a 2m. sobre el suelo.
- f ..... caudal total en el xilema
- h ..... parámetro análogo al de conductividad hídrica, dentro de la raíz.
- k ..... conductividad hídrica.  
conductividad capilar
- kx ..... conductividad hídrica del xilema.
- n ..... cte. de cada suelo en la fórmula de la conductividad capilar.
- $n_j$  ..... número de vasos conductores j.
- q ..... humedad específica del aire ambiente (grs.vapor agua/grs. aire húmedo).
- $q'_s$  ..... humedad específica de saturación, en la evaporación dentro de la hoja.
- $\frac{dq}{dz}$  ..... gradiente de concentración de vapor de agua.
- $r_1$  ..... resistencia al flujo de agua dentro de la hoja (sg/cm)
- $r_a$  ..... resistencia en la subcapa laminar del aire en contacto con la hoja.
- $r_c$  ..... resistencia de la cutícula.

- $r_e$  .... resistencia equivalente para el haz y el envés de la hoja.  
 $r_i$  .... resistencia de la cavidad subestomática.  
 $r_s$  .... resistencia de los estomas.  
 $r_w$  .... resistencia de las capas más exteriores de las paredes celulares.  
 $r_{so}$  ... resistencia equivalente a la sufrida por el agua antes de entrar en la raíz.  
 $r_{co1}$  ... resistencia intracelular en el cortex de la raíz.  
 $r_{co2}$  .. resistencia del agua a través de las paredes celulares del cortex.  
 $r_{ic1}$  .. resistencia intracelular en la hoja.  
 $r_{ic2}$  .. resistencia del agua a través de las paredes celulares del mesófilo de la hoja.  
 $r_{1u}$  ... resistencia en el haz de la hoja.  
 $r_{1L}$  ... resistencia en el envés de la hoja.  
 $t$  ..... variable temporal.  
 $u$  ..... velocidad del viento.  
 $u_2$  .... velocidad del viento en km/día a 2m. de altura (fórmula de Penman)  
 $v$  ..... velocidad vertical del flujo de agua.  
 velocidad en un punto del xilema.  
 $\frac{dv}{dz}$  ... caudal ascendente por unidad de superficie.  
 $z$  ..... variable espacial (profundidad).  
 $\theta$  ..... contenido de humedad del suelo (%).  
 $\theta_i$  ..... contenido de humedad del suelo en un instante  $i$ .  
 $\theta_s$  ..... contenido de humedad del suelo en saturación.  
 $\theta_o$  ..... contenido de humedad del suelo mucho tiempo después del riego.  
 $\phi_h$  ..... potencial hídrico en el suelo:  $\phi_h = \phi_m + \phi_g + \phi_p$   
 $\phi_m$  ..... potencial matricial.  
 $\phi_g$  ..... potencial gravitatorio.  
 $\phi_p$  ..... potencial de presión.  
 $\phi_s$  ..... potencial hídrico del suelo a una distancia  $d_A$   
 $\phi_o$  ..... potencial hídrico en la superficie de la raíz.  
 $\phi_x$  ..... potencial hídrico en el xilema.  
 $\alpha$  ..... tanto por uno de energía reflejada.  
 $\gamma$  ..... cte. psicrométrica.  
 $\rho$  ..... densidad del vapor de agua.  
 $\mu$  ..... viscosidad del agua.  
 $\delta$  ..... pendiente de la curva:  $e_2 = f$  (temperatura).

## INTRODUCCION:

El consumo de agua de los cultivos oscila entre 3.600 y 7.200 m<sup>3</sup>/Ha aproximadamente, dependiendo del tipo de cultivo y de las condiciones climáticas en que se desarrolla. La distribución a lo largo del período vegetativo es muy irregular.

Según los cálculos para el maíz (*Zea mays*) realizados por Miller [1], del montante de agua total consumido, el 98% es transpirado por la planta, el 0,2% se utiliza en la fotosíntesis y el resto es retenido por el cultivo como agua de composición.

Las cifras anteriores ponen de manifiesto el importante flujo de agua que se produce a través de las plantas.

El agua que se encuentra en el suelo, por la acción del riego o de la lluvia, pasará hacia las plantas a través de sus raíces, si el potencial hídrico en éstas es menor que el existente en el suelo.

Una vez en la raíz el agua puede seguir dos caminos hacia el xilema: Circulando a través de los protoplasmas de las células del cortex o bien por las pa redes celulares. Ambos caminos confluyendo a nivel de endodermis llevan el agua al xilema de la raíz.

El xilema constituye un intrincado conducto desde la raíz a las hojas, a lo largo del tallo, por donde circula el agua como respuesta a un potencial hídrico decreciente y desencadenado por la evaporación desde las partes aéreas de la planta.

En las hojas el agua sufre un cambio de estado, de líquido a vapor, - (con la entrada en el balance energético del flujo del calor latente de evaporación). Desde allí es conducido el vapor de agua al exterior a través de los estomas o de la cutícula.

En el aire y mediante la acción de la radiación solar, humedad relativa y flujo turbulento del viento, que actúan sobre los estomas, se logra el control de la difusión del vapor de agua a la atmósfera.

Dada la complejidad del sistema por el que se mueve el agua, (continuo suelo-planta-atmósfera), no puede actualmente darse un tratamiento riguroso al flujo de la misma. Sin embargo se ha avanzado suficientemente en su análisis como para tener un modelo que marque con claridad los mecanismos principales del movimiento del agua. Para guiar el análisis utilizamos la analogía eléctrica del proceso sustituyendo el trinomio suelo-planta-atmósfera por la malla de resistencias de la Figura nº 1.

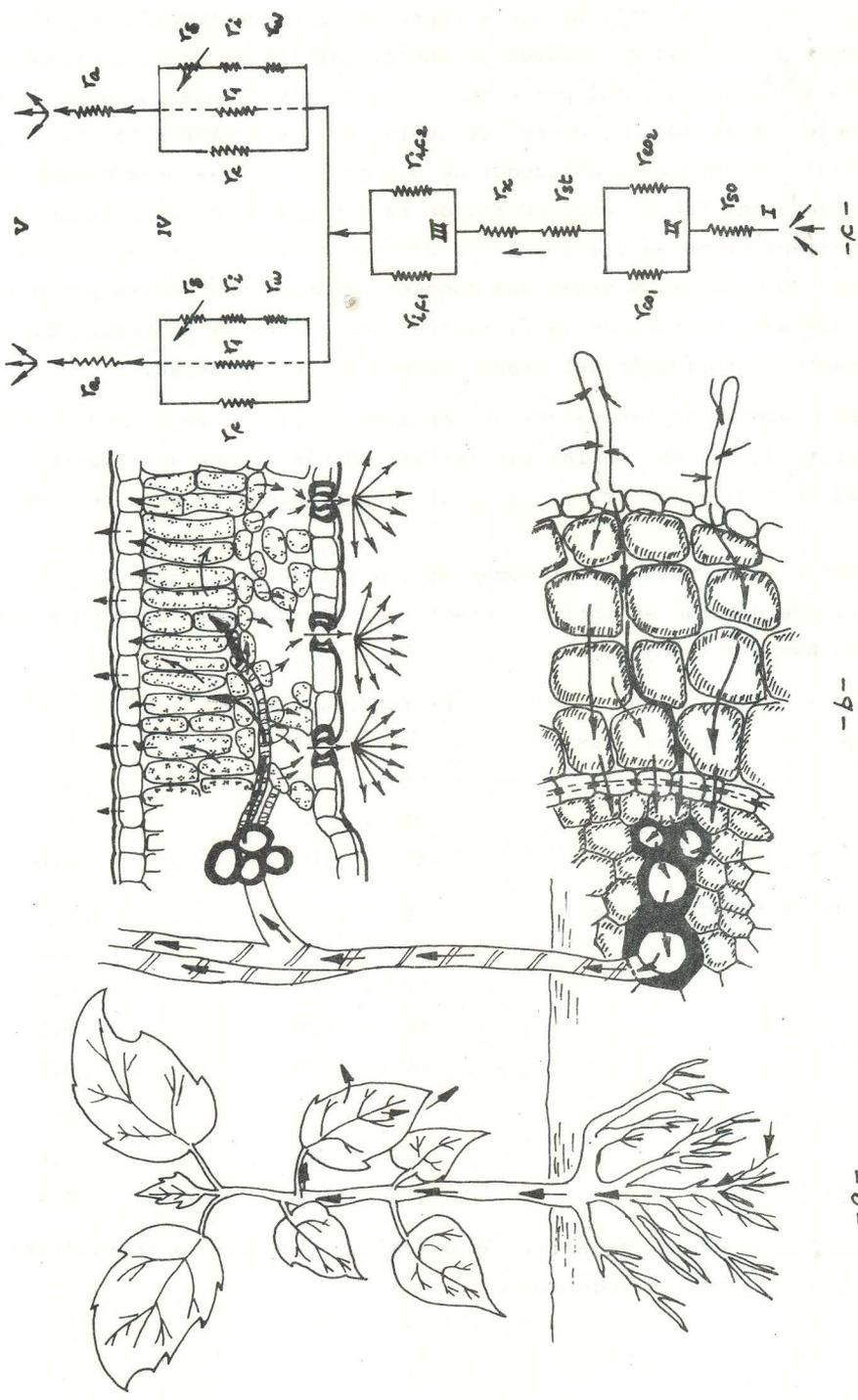


FIGURA Nº1: a - ascenso del agua por la planta; b - esquema de la transpiración foliar y absorción radicular; c - analogía eléctrica.

## 1.- EL SUELO COMO ALMACEN DE AGUA: SISTEMA RADICULAR Y FLUJO DEL AGUA.

### 1.1.- Capacidad del sistema de raíces.

Las raíces de los cultivos penetran en el suelo profundidades medias variables desde 1 a 3 metros. Sin embargo las mayores concentraciones se encuentran en las altas capas (ver Tabla nº1). Se suele expresar la concentración de raíces, Rv, en longitud de éstas por unidad de volumen de suelo. También se suele considerar su distribución en capas sucesivas. Así por ejemplo, en cultivos desarrollados en buenas condiciones puede ser de 10 a 20 cm/cm<sup>3</sup> de suelo, en los primeros 15 cm. de profundidad; cantidad que decrece hasta alrededor de 0,5 cm/cm<sup>3</sup> en las proximidades de 80 ó 100 cm. de profundidad. Habría unos 20 Km. de raíces por m<sup>2</sup> de superficie. En el caso del trigo, densamente sembrado, a las 3 ó 4 semanas de la nascencia, las raíces pueden estar a unos 40 ó 50 cm. y tener una concentración de una décima parte de la anteriormente comentada. Después de la floración, las raíces se extienden muy poco por el suelo y durante la formación del grano algunas raíces se secan.

El diámetro de las raíces de cereales oscila en valor medio desde 0,5 mm. para las primarias, a 0,1 mm. en las terciarias. Además tienen una superficie por unidad de longitud de 0,03 a 0,2 cm. y una longitud por unidad de peso seco de 100 a 200 m/gr.

Todos estos parámetros, comentados a título de ejemplo, lo son del sistema radicular, que estando en íntimo contacto con el agua del suelo va a permitir el ascenso de ésta hacia las hojas.

Especie	Profundidad (cm.)	Rv (cm/cm <sup>3</sup> )
Trigo ( <i>Triticum aestivum</i> )	0 - 15	8
	15 - 25	3
	25 - 55	1
	55 - 100	0,6
Cebada ( <i>Hordeum vulgare</i> )	0 - 10	3
	10 - 20	1,2
	20 - 50	0,9
	50 - 100	0,5
	100 - 130	0,1
Pino ( <i>Pinus radiata</i> )	0 - 8	2
	25 - 45	0,8
	91 - 106	0,4

TABLA Nº1 .- Variación de la concentración de raíces, Rv, con la profundidad para algunas especies vegetales.

1.2.- Movimiento del agua en el suelo: Medio saturado y no saturado.

La penetración del agua en el suelo, considerando un modelo unidimensional en el que la única variable espacial sea la  $z$ , viene dada, en régimen permanente y con medio saturado, por la ecuación de Darcy:

$$v = -k \frac{d\phi_h}{dz} \quad \dots (1a)$$

- $v$  (cm/sg), es la velocidad vertical del flujo de agua.
- $k$  ( $\text{kg cm}^2 / \text{J sg}$ ) la conductividad hidráulica, variable con las características del suelo. (Por ejemplo en suelos arenosos, limosos o arcillosos su valor es del orden de  $10^{-2}$ ,  $10^{-3}$ , y  $10^{-4}$  respectivamente).
- $\phi_h$  (J/kg), es el potencial hidráulico, suma del matricial, gravitatorio y de presión  $\phi_h = \phi_m + \phi_g + \phi_p$ , en el suelo. (Al estar el medio saturado  $\phi_m = 0$ , y además se desprecian los potenciales osmótico y neumático).

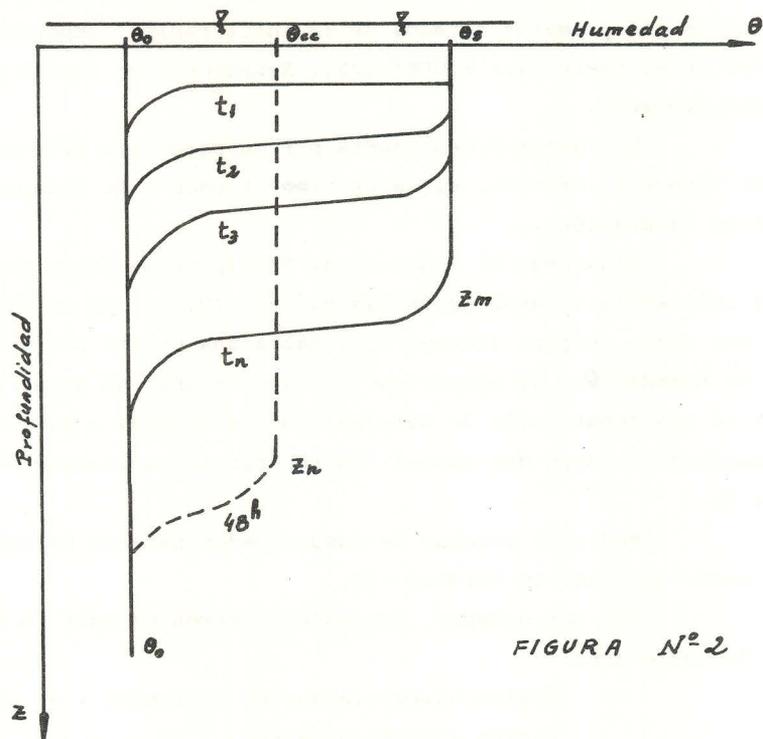


FIGURA N° 2

Sin embargo la situación que se produce p.e. en un riego por inundación es bien distinta. El suelo, si hace tiempo que no ha llovido ni se ha regado, estará lejos de su saturación y tendrá un contenido de humedad (en volumen) que podemos llamar  $\theta_0$ . Al regar y producirse la inundación de la superficie, la variación de humedad,  $\theta$ , en cada punto del perfil del suelo,  $z$ , y en cada instante,  $t$ , viene dada por la ecuación:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ k(\theta) \frac{\partial \phi_h}{\partial z} \right] \quad \dots (1b)$$

(Siguiendo con el modelo unidimensional anterior).

Introduciendo el concepto de "difusibilidad":

$$D(\theta) = k(\theta) \frac{\partial \phi_m}{\partial \theta}$$

la ecuación (1b) puede escribirse:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} - k(\theta) \right] \quad \dots (1c)$$

Philip, [2] , [3] , y a partir de las condiciones de contorno

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta = \theta_s \text{ para } z = 0 \text{ y } t > 0 \\ \theta = \theta_i \text{ para } z \neq 0 \text{ y } t = 0 \end{array} \right\} \quad \text{(que se ajustan bien al riego por inundación)}$$

resolvió la ecuación diferencial, hallando la expresión de la velocidad de infiltración superficial  $v(t)$ :

$$v(t) \approx \frac{S}{2} t^{-1/2} + A \quad \dots (2)$$

siendo  $S$  la absortividad, magnitud que representa la capacidad del suelo para recibir el agua en los primeros estados de la infiltración. Depende del contenido inicial de humedad en el suelo (ver FIGURA Nº2). Representa en cierta forma, los efectos capilares del fenómeno.

El factor  $A$  representa por su parte los efectos gravitatorios. Cuando el tiempo tiende a infinito, el valor  $v(\infty)$  tiende a  $A$ . (Luego representaría la conductividad en saturación).

Siguiendo el análisis de Philip, a lo largo del tiempo, el perfil de humedad iría evolucionando según las curvas 1,2,3... de la FIGURA Nº2. Cuando la inundación del riego termina (tiempo  $t_n$ ), hasta una cierta profundidad  $Z_m$  existirá un contenido de humedad  $\theta_s$ . Se admite que al cabo de unas 48 horas habrá drenado el suelo y existirá una repartición de humedad como la marcada a puntos, (siendo  $\theta_{cc}$  la humedad a capacidad de campo del suelo). La repartición uniforme de humedad llegará ahora - hasta  $Z_n$ .

Mediante pruebas de campo pueden hacerse estimaciones razonables de  $S$  y  $A$ , para poder utilizar la fórmula (2).

Así por ejemplo, los valores normales para la absortividad en función del tipo de suelo son:

Suelos húmedos, arenosos profundos y de aluvión ...	8 - 11 mm/h
Suelos arenosos-limosos .....	4 - 6 mm/h.
Suelos limosos arcillosos .....	1 - 4 mm/h.
Suelos altamente hinchados .....	1 mm/h.

1.3.- Absorción del agua por las raíces:

La acción de la evaporación superficial por un lado y por otro el agua que las raíces absorben del suelo, (fundamentalmente en su parte superior donde son más numerosas), hace que el diagrama real de la distribución del agua en el perfil del suelo sea del tipo indicado en la FIGURA N°3 para diferentes tiempos.

La diferencia de potencial existente entre el agua del suelo y el vapor de agua de la atmósfera, provoca el movimiento ascendente de la misma desde la raíz hacia las hojas.

El flujo hacia las raíces se analiza suponiendo que existe una única raíz cilíndrica, equivalente al sistema radicular y de radio R, por cuya superficie penetra toda el agua, como si de una sucesión de estados permanentes se tratara. El caudal que se introduce por unidad de longitud, prescindiendo de la resistencia de contacto entre suelo y raíz, viene dado por la expresión:

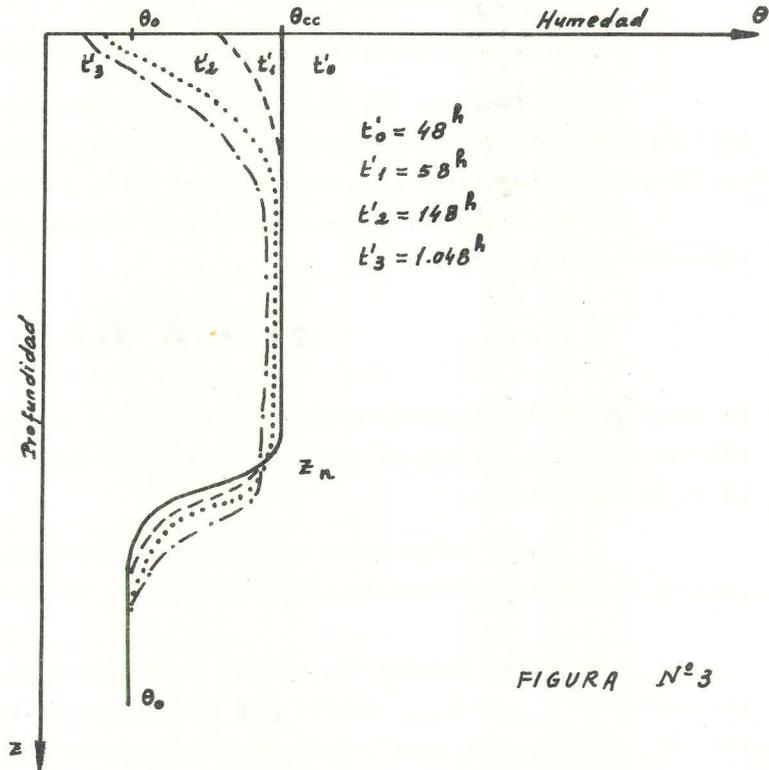


FIGURA N°3

$$Q = \frac{-4\pi k(\phi_s - \phi_0)}{\ln(d_A^2 R^2)} \dots (3)$$

-  $\phi_s$  y  $\phi_0$ , son los potenciales hídricos en el suelo, a una distancia  $d_A$  y en la superficie de la raíz respectivamente. El punto A se suele tomar como un valor medio entre distancia de raíces vecinas. Su valor aproximado es de:

$$d_A \approx \frac{1}{(\pi R_v)^{0,5}}$$

- k, es la conductividad capilar, análoga a la de la ecuación (1a) pero variando en un campo mucho más amplio:

Así por ejemplo, en las proximidades de capacidad de campo vale:  $10^{-4}$  ó  $10^{-5} \frac{\text{Kg} \cdot \text{cm}^2}{\text{J} \cdot \text{sg}}$  y en las de punto de marchitez:  $10^{-8}$  ó  $10^{-9} \frac{\text{Kg} \cdot \text{cm}^2}{\text{J} \cdot \text{sg}}$

Esta conductividad capilar puede calcularse mediante:

$$k = \frac{k_{sat.}}{(\phi_m/a)^n + 1} \quad \dots(4)$$

siendo:  $\phi_m$  el potencial matricial; a, una constante para cada suelo (variando su valor desde 1 a 10 J/kg) y n, variando desde 2 (en suelos arcillosos) a 10 (en arenosos).

En nuestra analogía eléctrica nos hemos movido a través de la resistencia  $r_{so}$

El agua una vez en la raíz, atraviesa por dos caminos el cortex de la misma: uno intracelular, esquematizado en el circuito eléctrico por  $r_{CO1}$  y otro a través de las paredes celulares  $r_{CO2}$  (Ver esquema de la FIGURA N°1b).

El flujo total que atraviesa el córtex por esos caminos "resistencias en paralelo", viene dado por:

$$Q = -h(\phi_o - \phi_x) \quad \dots(5)$$

en donde  $\phi_x$  es el potencial hídrico en el xilema (incluyendo ahora en el mismo el potencial osmótico, ya que se trata de un flujo a través de una membrana semipermeable: la de la endodermis).

Se han hecho pocos intentos para determinar h. Algunas experiencias realizadas con raíces jóvenes de trigo dan valores desde  $0,2 \times 10^8$  a  $2 \times 10^8 \frac{Kg \cdot cm^2}{J \cdot sg}$ .

Varias teorías han tratado de explicar la importancia relativa de las resistencias de  $r_{CO1}$  y  $r_{CO2}$ . Levitt [4] dedujo que el flujo a través de las raíces debía ser un "flujo de masa". Este, dado su volumen no podría pasar de célula a célula sino a través de las paredes celulares. (El papel fundamental del sistema radicular - sería producir una gran superficie de contacto con el suelo para la absorción). Sin embargo Mees y Weatherley [5], dedujeron que el 75% del flujo era osmótico y el 25% de masa: Parece lógico pensar que las presiones negativas del xilema, provocadas por la transpiración, ocasionan una reducción de  $r_{CO1}$ .

De cualquier modo, dado que la conductancia para el flujo de agua a través del cortex de la raíz es de  $10^2$  a  $10^3$  veces menor que la existente en el xilema, se acepta que el ascenso de agua en la zona de raíces puede darse directamente por un balance entre el suelo y el xilema mediante la expresión:

$$\frac{dv}{dz} = R_v(bk+h)(\phi_s - \phi_x) \quad \dots(6)$$

-dv/dz (cm/sg), es el caudal ascendente, por unidad de superficie de suelo, a una profundidad z.

-b, es una variable que incluye el grado de contacto entre las raíces y el agua del suelo.

La integración de la ecuación (6) sobre las sucesivas capas de la zona de raíces proporciona el total del ascenso.

En nuestra analogía eléctrica hemos sustituido, con la última expresión (6) las resistencias  $r_{so}$ ,  $r_{co1}$ ,  $r_{co2}$  por una única resistencia equivalente a ellas (y que proporciona el mismo flujo de agua total).

## 2.- TRANSPORTE A TRAVES DE LA PLANTA.

Una vez el agua llega al xilema de la raíz, los vasos de las diferentes raíces se unen en los haces de las mayores y finalmente todos se juntan en la base del tallo. En el xilema de éste existen haces de vasos anastomosados con haces de peciolo. Estos, una vez atravesado el peciolo, se separan en pequeñas venas que acaban en células del mesófilo de la hoja.

El flujo de agua, en un punto a lo largo del camino comentado, viene dado por la ecuación:

$$v = \frac{f}{A_x} = -k_x \frac{d\phi}{dz} \quad \dots(7)$$

siendo:  $f$ , caudal total en el xilema.

$A_x$ , área del xilema.

$\phi$ , potencial hídrico.

La conductividad,  $k_x$ , varía con el número y diámetro de los elementos conductores del xilema: así por ejemplo, siendo  $\mu$  la viscosidad del agua,  $n_j$  y  $R_j$  los números y radios de los vasos  $j$  respectivamente, la  $k_x$  valdría,  $\pi \sum \{n_j\} R_j^4 / 8 \mu$

La  $k_x$  no varía mucho a lo largo de la longitud de los tallos en plantas herbáceas, donde el tejido "está maduro". Tiene un valor del orden de  $2 \text{ Kg} \cdot \text{cm}^2 / \text{J} \cdot \text{sg}.$ , sin embargo en tallos jóvenes, en expansión, y en peciolo, es del orden de  $0,02 \text{ kgcm}^2 / \text{J} \cdot \text{sg}$ . Con estos valores de conductividad y con los de áreas de xilemas existentes, tanto en plantas herbáceas como leñosas, aún para los casos de mayor flujo ascendente, no es probable que existan gradientes de potencial mayores de  $20 \text{ J/kg}$  por metro de tallo.

La información es más escasa en cuanto a la conductividad en la hoja. En general, parece ser mucho menor que en el peciolo. Ello puede ser debido al camino que sigue el flujo de agua desde los vasos finales, a través de 2 ó 3 células, antes de evaporarse (Ver FIGURA Nº1b). La mayor parte de este flujo parece ocurrir a lo largo de las paredes celulares.

### 3.- EVAPORACION DESDE LAS HOJAS.

#### 3.1.- Caso de una hoja única.

El agua, una vez en los últimos vasos de la hoja, punto III del circuito eléctrico, bifurca su camino hacia las dos superficies externas de la misma, siguiendo un flujo inverso al del córtex de la raíz. (Véase la FIGURA N°1c). Es decir, yendo de célula en célula,  $r_{ic1}$  o bien a través de los espacios entre las paredes de éstas  $r_{ic2}$ . En dicho recorrido el agua se evapora, pasa por la cavidad estomática o por la cutícula y saliendo a la superficie externa, es transportada a la atmósfera mediante una transferencia turbulenta que el viento provoca.

En principio, dado que el agua se mueve desde las regiones de alta a las de baja concentración de vapor, podríamos describir este proceso como un flujo de masa de vapor de agua a través de la hoja, como hemos venido haciendo hasta ahora. Así tendríamos la ecuación:

$$E = -2\rho k \frac{dq}{dz} \quad \dots(8)$$

siendo:  $\rho$  la densidad del vapor de agua; E, la evaporación por unidad de superficie y tiempo. (Suponemos un régimen estacionario).

Ahora bien, la complejidad del sistema, que afecta directamente al valor de k y la dificultad de medir el gradiente  $dq/dz$ , hace necesario que el problema tenga que abordarse de otro modo: así por ejemplo, el flujo de vapor de agua,  $E(\text{gr/cm}^2 \text{ sg})$ , puede venir dado por:

$$E = \frac{2\rho(q'_s - q)}{r_a + r_i} \quad \dots(9)$$

siendo:  $q'_s$ , humedad específica de saturación, en la evaporación dentro de la hoja.

$q$ , humedad específica del aire ambiente (grs de vapor de agua/grs. de aire húmedo).

$r_1$ , resistencias al flujo dentro de la hoja.

$r_a$ , resistencias en la subcapa laminar de aire en contacto con la hoja.

Se acepta en este análisis que las resistencias, por cada uno de los caminos que el agua puede seguir hacia el exterior, son iguales.

Cuando dichas resistencias no pueden considerarse iguales, porque el número de estomas en el haz o en el envés sean muy diferentes, (como ocurre en el haba, (*Phaseolus vulgaris*) o en la hiedra (*Hedera helix*),  $r_1$  y  $r_a$  son reemplazadas por  $2r_e$ , siendo  $1/r_e = 1/(r_a + r_{1u}) + 1/(r_a + r_{1L})$  en donde  $r_{1u}$  y  $r_{1L}$  son las resistencias en el haz y en el envés de la hoja respectivamente.

Dentro de la capa límite que el viento crea sobre la superficie de la hoja existen 3 zonas diferenciadas. La más cercana a la pared, donde el flujo es laminar y en cuyo seno se crea la resistencia  $r_a$ . Sigue una zona de transición y otra turbulenta (ver FIGURA N°4) en donde hay transferencia de propiedades según la teoría de -

"Longitud de mezcla de Prandtl", (Shames, [6]). Dentro de la capa límite los efectos viscosos son importantes. Fuera de ella pueden desprejarse y considerar la velocidad del viento uniforme.

El valor de  $r_a$  suele tomarse,  $r_a = 2,6 L^{0,25} u^{-0,5}$ , siendo  $L$  el área de la hoja en  $\text{cm}^2$  y  $u$  la velocidad del viento en  $\text{cm}/\text{sg}$ . (En condiciones de cultivo probablemente un valor de 1,7 sea más acertado).

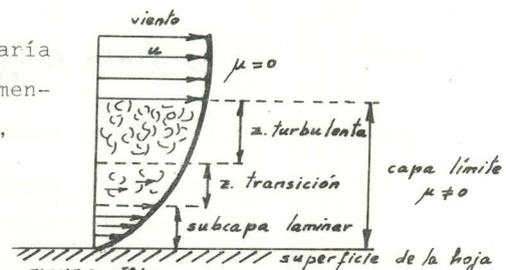
Realmente el valor de  $r_1$  es suma de tres resistencias: la de los estomas,  $r_s$ ; la de la cavidad subestomática,  $r_i$ ; y la de las capas más exteriores de las paredes celulares,  $r_w$ . Además  $r_1$  está en paralelo con la resistencia de la cutícula,  $r_c$ , tal como se ve en la FIGURA N°1c.

Ciertas estimaciones realizadas, Fogg [7]; Kozlowski [8]; Kramer [9], han dado para  $r_i$  y  $r_w$  valores análogos del orden de 0,2  $\text{sg}/\text{cm}$ . Por otro lado, la menor resistencia estomática,  $r_s$ , no suele bajar de 0,5  $\text{sg}/\text{cm}$ . Además para las mesófitas, que incluyen la mayoría de las plantas de cultivo, el valor de  $r_c$  es del orden de 40 a 50  $\text{sg}/\text{cm}$ . En las xerófitas se pueden esperar valores desde 50 a 400  $\text{sg}/\text{cm}$ . En definitiva, y dado que  $1/r_1 = 1/(r_w + r_i + r_s) + 1/r_c$ ; pueden esperarse valores de  $r_1$  a partir de un mínimo de 1  $\text{sg}/\text{cm}$ .

En todo este proceso, de la fase de vapor del agua en la hoja, son los estomas la variable dominante del mismo. Regulan la transpiración mediante su apertura o cierre como respuesta a tres acciones que sobre ellos se ejercen: flujo luminoso, contenido de agua y temperatura.

La curva diurna de  $r_1$  puede obtenerse mediante el porómetro de difusión. Las estimaciones de  $r_s$  pueden realizarse convirtiendo las mediciones de una porómetro de fluido viscoso en resistencias de difusión.

En general podemos afirmar que  $r_1$  varía de un máximo,  $r_c$ , cuando los estomas están totalmente cerrados y todo el flujo pasa por la cutícula, a un mínimo cuando están completamente abiertos.



### 3.2.- Evaporación desde un cultivo: Balance energético.

Quando se quiere calcular la transpiración en un campo cultivado, es difícil separarla de la evaporación del suelo, y se requiere conocer la radiación neta,  $R_n$ , a través de todas las capas del mismo. (En cada punto  $R_n$  viene dado por la diferencia entre la radiación descendente,  $R_s$ , y la radiación ascendente de onda larga,  $R_l$ ). La ecuación energética está esquematizada por la ecuación:

$$R_n = R_s (1 - \alpha) - R_l \quad \dots (10)$$

en la que  $\alpha$  es el tanto por uno de energía  $R_s$  que se refleja, (y que depende lógicamente del tipo de superficie sobre la que incide).

Esta radiación neta se transforma en calor latente (evaporando agua del suelo y de las hojas del cultivo), en calor sensible (calentando el aire, las hojas y el suelo) y en energía química (fotosíntesis). Podemos escribir:

$$R_n = L \cdot E_t + H + G + F \quad \dots(11)$$

siendo: L calor latente de evaporación (585 calorías/gramo de agua).

$E_t$ , montante de agua evaporada desde el suelo y transpirada por la planta (evapotranspiración).

H, energía utilizada en calentar el aire y el cultivo.

G, energía utilizada en calentar el suelo.

F, energía utilizada en la fotosíntesis.

Si planteamos este análisis en una hoja en concreto, debido a las variaciones de energías transmitidas y reflejadas a través de la profundidad  $z$  del cultivo, obtendremos gradientes de todas las propiedades tales como densidad de superficie de hoja,  $L_v$ , concentraciones de  $CO_2$  y  $H_2O$ , temperatura,  $T$ , y  $R_n$ , así como de la velocidad del viento.

Penman [10], a partir de la teoría de transferencia turbulenta, dedujo una fórmula que permite calcular la evaporación potencial desde una superficie libre de agua. Su expresión es:

$$L \cdot E_p = \frac{\frac{\delta}{\gamma} \cdot (R_n + G) + L \cdot f(u) \cdot (e_2^o - e_2)}{\frac{\delta}{\gamma} + 1} \quad \dots(12)$$

Con:

$$L \cdot f(u) = 15 \frac{\text{cal.}/\text{cm}^2}{\text{dia} \cdot \text{mbar}} + 0,09 \frac{\text{cal.}/\text{cm}^2}{\text{km} \cdot \text{mbar}} \cdot u_2$$

siendo:  $e_2$ , la presión de vapor del aire en mbar a 2m. sobre el suelo.

$e_2^o$ , la presión de vapor del aire saturado a 2m. sobre el suelo, en mbar.

$u_2$ , velocidad del viento en km/día, medida a 2m. sobre el suelo.

$\delta$  pendiente de la curva:  $e_2 = f(\text{temperatura})$ .

$\gamma$  constante psicrométrica.

(Los valores de  $\delta/\gamma$  están tabulados).

A partir de esta expresión de Penman y mediante factores correctores del cultivo y del estado de humedad del suelo, pueden calcularse las E.T.P. reales para cualquier cultivo. Todos los datos meteorológicos necesarios para aplicar la fórmula (12) pueden encontrarse en una estación standart.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1.- MILLER, E.C. (1938) "Plant Physiology" Mc. Graw-Hill. New York.
- 2.- PHILIP, J.R. (1954) "An infiltration equation with physical significance".  
Soil Sci., 77.
- 3.- PHILIP, J.R. (1957) "The theory of infiltration: 4 Sorptivity and algebraic infiltration equations" Soil Sci., 84.
- 4.- LEVITT, J. (1956) "Plant Physiology" Lancaster, 22.
- 5.- MEES, G.C. and WEATHERLEY, P.E. (1957) "Proceedings of the Royal Society",  
London Series B, 147.
- 6.- SHAMES, I.H. (1967) "La mecánica de los fluidos" Ediciones del Castillo.
- 7.- FOGG, G.E. (1965) "The state and movement of water in living organisms"  
Simp. Soc. exp. Biol. vol 19. Cambridge University Press.
- 8.- KOZLOWSKI, T.T. (1968). "Water deficits and plant growth", 2 vols. Academic Press,  
New York and London.
- 9.- KRAMER, P.J. (1969) "Plant and soil water relationships. A modern synthesis"  
Mc. Graw-Hill, New York.
- 10.- HANKS, R.J. and ASHCROFT, G.L. (1980) "Applied Soil Physics" Springer Verlag,  
Berlin, Heidelberg, New York.