



Scientia Agricola

versión On-line ISSN 1678-992X

Sci. agric. v.56 n.3 Piracicaba Jul. 1999

<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90161999000300005>

Balance hídrico cíclico y secuencial: estimación de almacenamiento de agua en el suelo¹

Durval Dourado-Neto^{2,5*}; Axel García y García²; Antonio Luiz Fancelli²; José Antonio Frizzone^{3,5}; Klaus Reichardt^{4,5}

²Depto. de Produção Vegetal - ESALQ/USP, C.P. 09 - CEP: 13418-900 - Piracicaba, SP.

³Depto. de Engenharia Rural - ESALQ/USP.

⁴Depto. de Ciências Exatas - ESALQ/USP.

⁵Bolsista do CNPq.

*e-mail: dourado@carpa.ciagri.usp.br

Servicios Personalizados

Artículo

- Artículo en XML
- Referencias del artículo
- Como citar este artículo
- Curriculum ScienTI
- Traducción automática
- Enviar artículo por email

Indicadores

- Citado por SciELO
- Accesos

Links relacionados

Compartir

Otros

Otros

Permalink

RESUMEN: El presente trabajo tiene por objetivo presentar un modelo mecanístico para estimar el almacenamiento de agua en el suelo, con el propósito de prever el rendimiento agrícola para cultivos anuales no fotosensibles. El movimiento y la retención de agua en el sistema agrícola, son los atributos de interés en el estudio. El rendimiento agrícola depende de los procesos básicos de fotosíntesis y respiración. También, el rendimiento depende de la especie vegetal, nutrición de la planta, energía disponible, población de plantas, plantas dañinas y población de parásitos, principalmente. Además, la evapotranspiración actual también depende de los mismos atributos y procesos. Por lo tanto, la hipótesis base del modelo es que es posible estimar el rendimiento estimando la evapotranspiración. Conociendo empíricamente el comportamiento de pérdida de agua del suelo, sin conocer todos los atributos y las complejas interrelaciones que lo gobiernan, el modelo cosenoidal fue propuesto para estimar el almacenamiento de agua en el suelo. El modelo cosenoidal fue comparado con otros modelos y se concluye que el mismo estima mejor el almacenamiento de agua en el suelo.

Palabras clave: balance hídrico, almacenamiento de agua, modelagem

Balanço hídrico cíclico e seqüêncial: estimativa de armazenamento de água no solo

RESUMO: O presente trabalho tem por objetivo apresentar um modelo mecanístico para estimar armazenamento de água no solo, no intuito de prever rendimento agrícola para culturas anuais não fotossensíveis. O movimento e a retenção de água no sistema agrícola, são os atributos de interesse no estudo. O rendimento agrícola depende dos processos básicos de fotossíntese e respiração. O rendimento ainda depende da espécie vegetal, nutrição da planta, energia disponível, população de plantas, plantas daninhas e população de parasitas, principalmente. Além disso, a evapotranspiração atual também depende dos mesmos atributos e processos. Portanto, a hipótese basilar desse modelo é ser possível estimar o rendimento com a estimativa da evapotranspiração. Conhecendo empiricamente o comportamento da perda de água no solo, sem conhecer todos os atributos e suas complexas interrelações que governam esse comportamento, um modelo cosenoidal foi proposto para estimar o armazenamento de água no solo. O modelo cosenoidal foi comparado com outros modelos e conclui-se que ele é o que melhor estima o armazenamento de água no solo.

Palavras-chave: balanço hídrico, armazenamento de água, modelagem

Cyclic and sequential water balance: estimation of the available soil water storage

ABSTRACT: The objective of this paper is to present a mechanistic model to estimate the available soil water storage to forecast yield for nonphotosensitive annual crops. In this study, concern is devoted to the movement and retention of water within the agricultural system. Crop yield depends upon the basic processes of photosynthesis and respiration. The yield also depends on crop species, crop nutrition, available energy, plant population, weeds and parasite populations, mainly. In addition, actual evapotranspiration also depends on the same attributes and processes. Therefore, the basic hypothesis of this model is that it is possible to forecast crop yield with estimates of actual evapotranspiration. Knowing empirically the process of soil water loss, but without knowing all attributes and their complex relations ruling this behavior, a cosine model was established to estimate available soil water storage. The cosine model was constructed and checked together with other models and the conclusion is that the cosine model best estimates soil water storage.

Key words: water balance, soil water, storage, modeling

INTRODUCCIÓN

Indudablemente la adopción de la informática en Agricultura es imprescindible para optimizar la toma de decisiones. La viabilización del uso de algunas técnicas, tales como la utilización de modelos autoregresivos para estimar cualquier atributo del clima y para la simulación del crecimiento radicular, hasta un pasado reciente no eran viables en modelos mentales y cuando se disponía de técnicas manuales, debido al gran número de cálculos y datos involucrados.

Filosóficamente, la utopía de todo investigador es la obtención de un modelo determinístico para prever con exactitud y precisión el comportamiento de un dado fenómeno de interés en sistemas reales heterogéneos y anisotrópicos, siendo necesario caracterizar el sistema en estudio y conocer las relaciones causales entre los diferentes atributos y componentes del sistema que gobiernan aquel comportamiento. Ese procedimiento aún es ideal, el cual podrá ser viable con la utilización de nuevas técnicas asociadas a las ya existentes, tales como el análisis tensorial, la termodinámica de los procesos irreversibles y la teoría de las variables regionalizadas.

Pragmáticamente, debido al total desconocimiento de la compleja interacción existente entre los diferentes componentes de cada fase (suelo, planta, atmósfera y biótica) del sistema agrícola, surgieron los modelos estocásticos y mecanísticos, los cuales permiten prever, con precisión, el comportamiento en estudio, siendo la exactitud verificada estadísticamente asociada a un nivel de significancia. Para eso, se adopta el método de observar experimentalmente las propiedades de interés, partiendo de la premisa de que el sistema es isotrópico y que el comportamiento futuro será básicamente el mismo, por lo tanto previsible, siendo fijadas las condiciones de contorno (control local razonable) y estableciendo los atributos medibles (normalmente magnitudes intensivas fáciles de ser determinadas experimentalmente) que explican numérica y satisfactoriamente (a una determinada probabilidad) el proceso de interés.

Siendo el agua uno de los factores de producción de vital importancia, se adopta la hipótesis de que el rendimiento es previsible satisfactoriamente a partir, solamente, de la estimativa de la evapotranspiración, deficiencia y excedente hídricos, utilizando un modelo estocástico y mecanístico. Por lo tanto, el problema se resume en estimar la evapotranspiración real.

Siendo así, tal procedimiento permite elaborar el balance hídrico para cultivos anuales no fotosensibles. El cómputo del mismo es elaborado con variación temporal del coeficiente de cultivo (K_c) y de la profundidad efectiva del sistema radicular, cuya curva de crecimiento es derivada de una simulación.

La realización del balance hídrico es una herramienta útil que auxilia el proceso de toma de decisiones para la planificación y el manejo del sistema agrícola en relación a los aspectos cuantitativo y cualitativo.

En cuanto al aspecto cuantitativo, el conocimiento previo de la variación del almacenamiento del agua en cada tipo de suelo y de explotación agrícola, en función de la variación temporal de la lluvia, de la temperatura y de otros atributos del clima dependientes del método seleccionado para estimar evapotranspiración de referencia, a un dado nivel de significancia, hace posible cuantificar, para cada época del año, la demanda por mano de obra, tractores e implementos agrícolas, definir épocas de preparación del suelo, siembra, aplicación de agroquímicos, verificar la posibilidad de la utilización de técnicas de riego, y estimar el rendimiento agrícola.

En cuanto al aspecto cualitativo, se puede orientar el manejo en el sentido de eliminar o minimizar los riesgos de polución ambiental, tales como contaminación de acuíferos y manantiales de agua por uso inadecuado de insumos agrícolas (insecticidas, herbicidas, fungicidas, nematicidas, fertilizantes nitrogenados y potásicos y riego en exceso, principalmente).

El presente trabajo tiene por objetivo presentar un modelo mecanístico para estimar el almacenamiento de agua

en el suelo, con el propósito de servir de subsidio para prever el rendimiento agrícola de cultivos anuales no fotosensibles.

MATERIAL Y MÉTODOS

Aspectos filosóficos: La relación funcional entre el rendimiento agrícola (Y) y los diversos factores de producción ([Figura 1](#)) puede ser expresada por la siguiente ecuación:

$$Y=Y(Energía, CO_2, H_2O, Nutrientes, O_2, Microorganismos, enfermedades, plagas, plantas dañinas, etc.)$$

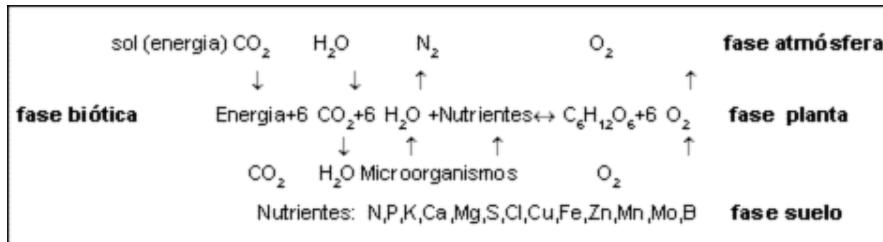


Figura 1 - Visión global del sistema agrícola ilustrando la relación entre la fase planta y las demás fases.

Sin embargo, la evapotranspiración real (ETr) también depende de los mismos factores. Siendo así:

c

$$ETr=ETr(Energía, CO_2, H_2O, Nutrientes, O_2, Microorganismos, enfermedades, plagas, plantas dañinas, etc.)$$

Para estimar el rendimiento, se adoptará la primera hipótesis base:

$$Y = Y(ETr)$$

El enfoque principal se relaciona a los aspectos cuantitativos, específicamente a los relacionados a la estimación del rendimiento agrícola, donde los aspectos cualitativos no serán considerados.

La realización del balance es justificada en función de la segunda hipótesis base de que la evapotranspiración real puede ser estimada en función del contenido de agua en el suelo ([Figura 2](#)).

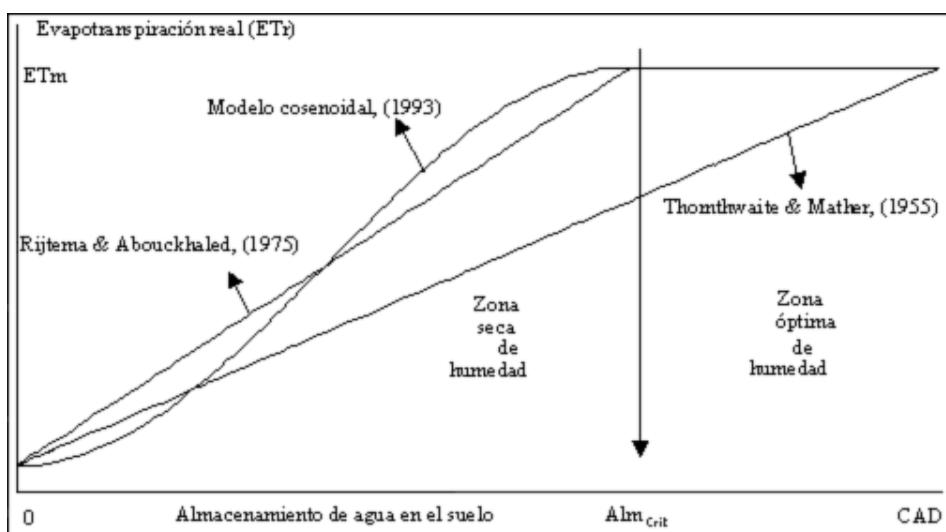


Figura 2 - Representación esquemática de la variación de evapotranspiración real en función del almacenamiento de agua en el suelo.

Balance hídrico cíclico según Thornthwaite & Mather (1955): Ese procedimiento se utiliza cuando no se conoce la humedad actual del dia de la siembra, lo cual ocurre en la mayoría de casos.

Evapotranspiración de referencia (o potencial) según Thornthwaite (1948): Thornthwaite (1948) definió evapotranspiración de referencia (o potencial) (ETo) como la pérdida total de agua en forma de vapor, de una superficie natural bien alimentada de agua, hacia la atmósfera y que ocurre cuando el follaje vegetal se mantiene turgente y, cuando el proceso sucede, dependiente de atributos del clima, sin restricción de agua o cobertura vegetal.

$$ETo_n = 0.53 \left(10 \frac{T_n}{I} \right)^a \frac{H_n}{12} N_n$$

donde ETo_n es la evapotranspiración de referencia (mm/periodo) del n -ésimo período, T_n la temperatura media ($^{\circ}\text{C}$) referente al n -ésimo período, I es el índice térmico, a un coeficiente empírico compuesto, H_n el número posible de horas de brillo solar en el dia mediano del n -ésimo período, y N_n el número de días del n -ésimo período.

Para auxiliar la estimativa de la evapotranspiración de referencia, Thornthwaite (1948) creó una variable denominada índice térmico o índice de calor anual (I):

$$I = 0.08745 \sum_{j=1}^{12} T_j^{1.514}$$

donde T_j se refiere a la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) media diaria del j -ésimo mes.

El coeficiente empírico compuesto (a) es calculado de la siguiente manera:

$$a = \sum_{i=0}^3 a_i I^i$$

donde I es el índice térmico y a_i se refiere a los coeficientes empíricos. Los valores de esos coeficientes fueron determinados através de análisis de regresión utilizando valores mensuales medios de temperatura, que resultó en $a_0=0,49239$, $a_1=0,01792$, $a_2=-0,0000771$ y $a_3=0,000000675$.

El número de horas de brillo solar (H_n) necesario para cuantificar la evapotranspiración de referencia, es calculado según la fórmula:

$$H_n = \frac{24}{\pi} ar \cos[-\operatorname{tg}(\alpha_n) \operatorname{tg}(\phi)]$$

donde ϕ es la latitud de la localidad (rad) y α_n es la declinación solar (rad) en el dia mediano del n -ésimo período. La declinación solar puede aproximarse utilizando la expresión propuesta por Paltridge & Platt (1976):

$$\alpha_n = C_0 + \sum_{i=1}^3 C_i \operatorname{sen}\left(\frac{2i\pi d_n}{365}\right) - D_i \cos\left(\frac{2i\pi d_n}{365}\right)$$

donde d_n es el número de orden (dia Juliano), desfazado de 1 dia del dia mediano del n -ésimo período (el número de orden desfazado del dia mediano 3 es 2, p.e.), y C_0 (0,006918), C_1 ($C_1=0,070257$; $C_2=0,000907$; $C_3=0,00148$) y D_i ($D_1=0,399912$; $D_2=0,006758$ y $D_3=0,002697$) son los parámetros empíricos del modelo. Se consideró siempre que el año posee 365 días.

Evapotranspiración óptima (o máxima) del cultivo: Se entiende por evapotranspiración óptima (o máxima) (ETm) del cultivo las perdidas totales de agua, del suelo hacia la atmósfera, através de una superficie vegetada por el cultivo de interés, por los procesos simultáneos de evaporación y transpiración. Esa evapotranspiración, por representar el máximo intercambio posible de gases entre el cultivo y la atmósfera, corresponde al máximo rendimiento del cultivo. Se estima la evapotranspiración óptima del cultivo de interés multiplicándose la evapotraspiración de referencia por el coeficiente de cultivo, el procedimiento de Doorenbos & Pruitt (1975).

Saldo y negativo acumulado: Se entiende por saldo a la diferencia entre lluvia y evapotranspiración óptima:

$$S_n = C_n - ETm_n$$

donde S_n es el saldo (mm), C_n la lluvia (mm) y ETm_n la evapotranspiración óptima (mm) del cultivo, referentes al n -ésimo período.

El negativo acumulado puede ser entendido como el módulo de la diferencia acumulada de las lluvias y la evapotranspiración óptima del cultivo hasta el período en cuestión, el cual es estimado utilizando el siguiente procedimiento (Thornthwaite & Mather, 1955):

$$L_n = L_{n-1} + |S_n| \text{ y } Alm_n = CAD_n e^{\frac{-L_n}{CAD_n}} \quad (\text{si } S_n < 0)$$

$$Alm_n = Alm_{n-1} + S_n \text{ y } L_n = -CAD_n \ln\left(\frac{Alm_n}{CAD_n}\right) \quad (\text{si } S_n > 0)$$

donde L_n es el negativo acumulado (mm), Alm_n es el almacenamiento y CAD_n la capacidad de agua disponible en el n -ésimo período.

Análogamente, por el modelo cosenoide (Dourado-Neto et al., 1993), considerando el factor de depleción de agua en el suelo (p), se tiene las siguientes ecuaciones:

$$L_n = Alm_n \cdot \left[p + \frac{2}{\pi} \cdot (1-p) \cdot \operatorname{tg} \left\{ \frac{\pi}{2} \cdot \left[1 - \frac{Alm_n}{(1-p) \cdot CAD_n} \right] \right\} \right] \quad (\text{si } 0 < Alm_n \leq (1-p) \cdot CAD_n)$$

y

$$L_n = CAD_n - Alm_n \quad (\text{si } (1-p) \cdot CAD_n < Alm_n \leq CAD_n)$$

$$Alm_n = (1-p) \cdot CAD \cdot \left[1 - \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \left\{ \frac{\pi}{2} \cdot \left[\frac{\frac{L_n}{CAD_n} - p}{1-p} \right] \right\} \right] \quad (\text{si } L \geq p \cdot SWHC)$$

y

$$Alm_n = CAD_n - L_n \quad (\text{si } 0 \leq L < p \cdot SWHC)$$

Criterios para iniciar el balance hídrico

- Según Thornthwaite & Mather (1955)

La hipótesis base del método de Thornthwaite & Mather (1955) es que la pérdida de agua por el proceso de evapotranspiración es directamente proporcional al contenido de agua en el suelo. Los autores asumieron que la evapotranspiración varía linealmente con el almacenamiento de agua en el suelo. Siendo así, se deduce que el almacenamiento varía exponencialmente con el negativo acumulado:

$$Alm_n = CAD_n e^{\frac{-L_n}{CAD_n}}$$

El criterio para iniciar el balance hídrico, según Thornthwaite & Mather (1955) es que el suelo se encuentra a capacidad de campo al final del período húmedo ($L=0 \therefore Alm=CAD$).

- Según Mendonça (1958)

Mendonça (1958) determinó la expresión matemática destinada a estimar el negativo acumulado en el último período de la estación húmeda. Reescribiendo la expresión original de Thornthwaite & Mather (1955) y utilizando variables reducidas adimensionales ([Figura 3](#)):

$$\alpha = e^{-\lambda}$$

siendo que:

$$\alpha = \frac{Alm}{CAD} \text{ y } \lambda = \frac{L}{CAD}$$

estación seca (s)		último período de la estación seca: $\lambda=x-n$ y $\alpha=y$
estación húmeda (u)		primer período de la estación húmeda último período de la estación húmeda: $\lambda=x$ y $\alpha=y+p$
estación seca (s)		primer período de la estación seca

Figura 3 - Representación esquemática del balance hídrico cíclico elaborado mensualmente, donde son presentadas las

Como en el último período de la estación húmeda:

$$\lambda = x \Rightarrow \alpha = y + p$$

y en el último período de la estación seca:

$$\lambda = x - n \Rightarrow \alpha = y$$

donde:

$$p = \frac{P}{CAD} \text{ y } n = \frac{N}{CAD}$$

siendo que P es el total de los saldos positivos y N el total de los saldos negativos en el año:

$$P = \sum_{i=a \bmod 13}^b S_i \quad (\text{si } S_i \geq 0) \text{ y } N = \sum_{i=(b+1) \bmod 13}^{a-1} S_i \quad (\text{si } S_i < 0)$$

donde a y b representan, respectivamente, el número de orden del primero y último meses de la única estación húmeda.

Siendo así, se verifica fácilmente que:

$$L_b = -CAD \ln \left(\frac{p}{1 - e^n} \right) \quad (\text{si } p < 1 - e^n)$$

$$L_b = 0 \quad (\text{si } p \geq 1 - e^n)$$

donde L_b representa el negativo acumulado en el último mes de la estación húmeda. A partir de ese punto, se hace el balance hídrico conforme propusieron Thornthwaite & Mather (1955).

- *Criterio generalizado*

Utilizando la expresión propuesta por Thornthwaite & Mather (1955) y las variables reducidas propuestas por Mendonça (1958), se verifica fácilmente que cuando ([Figura 4](#)):

$$p_1 + e^{-x_j + n_j} < 1 \text{ y } P_j + \sum_{i=1}^{j-1} P_i e^{k=j-1} < \left(\frac{\sum_{k=1}^j n_k}{1 - e^{k=1}} \right) CAD$$

$$x_j = -\ln \left[\frac{P_j + \sum_{i=1}^{j-1} P_i e^{k=j-1} \sum_{k=1}^i n_k}{\left(\frac{\sum_{k=1}^j n_k}{1 - e^{k=1}} \right) CAD} \right] \quad \text{y} \quad x_1 = -\ln \left(p_1 + e^{-x_j + n_j} \right)$$

estación seca (s_j)		último período de la última estación seca: $\lambda=x_j-n_j$ y $\alpha=y_j$
estación húmeda (u_j)		primer período de la primera estación húmeda último período de la primera estación húmeda: $\lambda=x_j$ y $\alpha=y_j+p_j$
estación seca (s_1)		primer período de la primera estación seca último período de la primera estación seca: $\lambda=x_1-n_1$ y $\alpha=y_1$
estación húmeda (s_2)		primer período de la segunda estación húmeda último período de la segunda estación húmeda: $\lambda=x_2$ y $\alpha=y_1+p_2$
estación seca (s_2)		primer período de la segunda estación seca último período de la estación seca: $\lambda=x_2-n_2$ y $\alpha=y_2$
estación seca (s_j)		primer período de la última estación seca

Figura 4 - Representación esquemática del balance hídrico cíclico elaborado por período, donde son presentadas las estaciones húmeda (u_1 a u_j) y seca (s_1 a s_j).

A partir de ese punto, se hace el balance hídrico conforme propusieron Thornthwaite & Mather (1955).

Ese procedimiento permite estimar los valores de almacenamiento y negativo acumulado de una sola vez, mientras que el procedimiento original propuesto por los mismos autores, a pesar de llegar al mismo resultado, considera una secuencia exhaustiva de cálculos, limitando su utilización cuando se carece de recursos computacionales.

Almacenamiento de agua en el suelo

- *Capacidad de agua disponible*

La capacidad de agua disponible (CAD, mm) es el almacenamiento máximo de agua disponible para el cultivo. Considerando las definiciones de capacidad de campo (θ_{CC} , $m^3 \cdot m^{-3}$) y punto de marchitez permanente (θ_{PMP} , $m^3 \cdot m^{-3}$), y adoptando los valores medios de humedad correspondiente a la capacidad de campo y al punto de marchitez permanente en el perfil de humedad, se puede calcular la capacidad de agua disponible através de la siguiente expresión:

$$CAD_n = 10(\theta_{CC} - \theta_{PMP})Ze_n$$

donde Ze_n es la profundidad efectiva del sistema radicular (cm) en el n -ésimo período.

- *Profundidad efectiva del sistema radicular*

Se asume como profundidad máxima efectiva del sistema radicular (Ze_{max} , mm) para efecto de estimativa del almacenamiento de agua en el suelo, una fracción (f) de la profundidad máxima real (Zr_{max} , mm) del sistema radicular observable en el campo:

$$Ze_{max} = fZr_{max}$$

Para la mayoría de cultivos anuales esa fracción f , que representa un factor de geometría del sistema radicular, oscila entre 0,45 y 0,90. El valor modal es 0,70.

Para las especies en que se hace la siembra, a efecto de estimar el almacenamiento de agua en el suelo, se adopta un valor inicial de profundidad efectiva del sistema radicular igual a la profundidad de la misma. Para la mayoría de cultivos anuales la profundidad inicial efectiva del sistema radicular oscila entre 0,01 y 0,05 m y se asume que las raíces alcanzan esa profundidad al llegar a la mitad del estadio fenológico 3. En el caso de cultivos perennes, esa profundidad es alcanzada en el año de su madurez.

Para estimar el factor f , se sugiere hacer la simulación del crecimiento radicular, utilizando el modelo de Diggle (1988) con algunas modificaciones. Después de la simulación, se hace el conteo del total de pixels, relativos al suelo y a la raíz, circunscritos en un rectángulo cuyos lados son: profundidad real máxima simulada del sistema radicular y la media de los espaciamientos entre plantas (dentro de una misma hilera y entre hileras de plantas).

Se asume, para los modelos potencial y lineal (Figura 5), que la profundidad efectiva del sistema radicular d días después de la siembra (o plantio) (Ze_d) es dada por la siguiente expresión:

$$Ze_d = Ze_{ini} + (Ze_{max} - Ze_{ini})\left(\frac{d}{DAS}\right)^F \quad (\text{si } d < DAS \text{ y } Ze_d = Ze_{max} \text{ si } d \geq DAS)$$

donde DAS es el número de días después de la siembra (o plantio) en que Ze_{max} es alcanzada; y F es el factor de forma de la curva de crecimiento del sistema radicular (Figura 5).

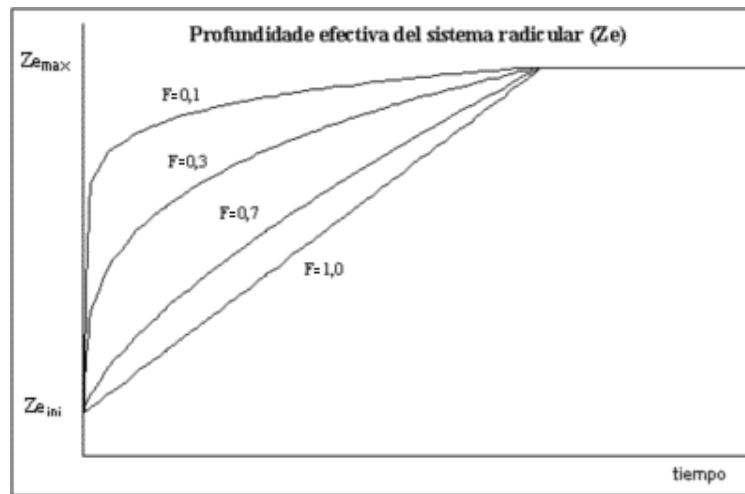


Figura 5 – Efecto del factor de forma (F) de la curva de crecimiento del sistema radicular para los modelos potencial y lineal.

Para el modelo sigmoidal (Figura 6), tenemos que:

$$Ze_d = Ze_{ini} + \left(\frac{Ze_{max} - Ze_{ini}}{2} \right) \left[1 - \cos \left(\pi \frac{1}{F} \frac{d}{DAS} \right)^F \right] \quad (\text{si } d \geq DAS) \text{ y } Ze_d = Ze_{max} \quad (\text{si } d \geq DAS)$$

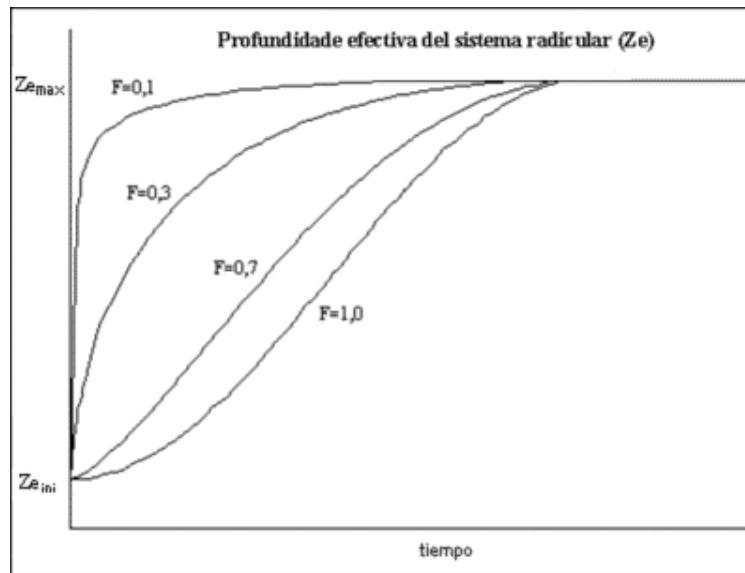


Figura 6 – Efecto del factor de forma (F) de la curva de crecimiento del sistema radicular para el modelo sigmoidal.

Si el factor de forma fuera unitario ($F=1,0$), significa que el sistema radicular crece según una función lineal con el tiempo. Si éste fuera inferior a la unidad ($0,0 < F < 1,0$), significa que el sistema radicular crece según una función potencial con el tiempo.

Después de alcanzado el valor máximo, se asume que la profundidad efectiva de la raíz permanece constante hasta el final de su ciclo, en el caso de las cultivos anuales y semi-perennes, o de su vida útil, en el caso de cultivos perennes.

La definición del factor de forma del sistema radicular, juntamente con la profundidad máxima real observable, puede ser hecha a través del análisis de regresión no lineal, adoptando uno de los modelos disponibles, utilizando el método de los mínimos cuadrados (en ese caso, se utilizará el método interactivo de Newton-Raphson), donde los datos utilizados para la regresión son provenientes de la simulación del crecimiento radicular utilizando el modelo propuesto por Diggle (1988) con algunas modificaciones.

Se estima la profundidad efectiva del sistema radicular como el valor medio de las profundidades estimadas en todos los días del n -ésimo período en estudio:

$$Z_{e_n} = \sum_{i=1}^{k_n} \frac{Z_{\theta_i, n}}{k_n}$$

donde $Z_{\theta_i, n}$ es la profundidad efectiva del sistema radicular en el i -ésimo dia del n -ésimo período de interés.

Agua disponible: Agua disponible es la cantidad de agua almacenada en el perfil del suelo, de la superficie a la profundidad efectiva del sistema radicular, del contenido de agua correspondiente al punto de marchitez permanente a la humedad actual, asumiendo que los valores de humedad actual (θ_a) y del punto de marchitez permanente no varían con la profundidad, o adoptando valores medios de humedad:

$$Alm_n = 10(\theta_a - \theta_{pmp})Z_{e_n}$$

donde Alm_n es la cantidad de agua disponible referente al n -ésimo período, y θ_a ($m^3.m^{-3}$) es la humedad actual en el dia mediano del n -ésimo período después de la siembra.

Profundidad máxima de mojado: Se entiende por profundidad máxima de mojado (Zm_{max} , mm) a la profundidad máxima que el agua puede alcanzar en el perfil del suelo después de una lluvia.

Esa profundidad es siempre superior, o por lo menos igual a la profundidad máxima efectiva del sistema radicular.

Al inicio del balance hídrico se asume que todo el perfil del suelo, hasta la profundidad máxima de mojado, presenta un único valor de humedad.

A partir de allí, cada vez que ocurre un saldo negativo, hay pérdida de agua de la camada de suelo que posee raíces. Siendo así, se tiene entonces dos camadas en el perfil con diferentes contenidos medios de agua, donde la camada que contiene las raíces (θ_{con} , $m^3.m^{-3}$) presenta siempre humedad inferior o, como máximo, igual a la otra camada sin raízes (θ_{sin} , $m^3.m^{-3}$).

Cuando el saldo de un período es positivo, se asume que, al inicio el agua es almacenada en la camada con raízes. A partir del momento en que la humedad media en la camada con raízes se iguala a la de la camada subyacente (sin raízes en actividad), se asume que el agua infiltra hasta la profundidad máxima de mojado, o sea:

$$\theta_{sin_n} = \theta_{sin_{n-1}} \text{ y } \theta_{con_n} = \theta_{con_{n-1}} + \frac{S_n}{Z_{e_{n-1}}} (\text{si } S_n < (\theta_{sin_{n-1}} - \theta_{con_{n-1}}) Z_{e_{n-1}})$$

$$\theta_{sin_n} = \theta_{con_n} = \theta_{sin_n} + \frac{S_n - (\theta_{sin_{n-1}} - \theta_{con_{n-1}}) Z_{e_{n-1}}}{Z_{e_n}} (\text{si } S_n < (\theta_{sin_{n-1}} - \theta_{con_{n-1}}) Z_{e_{n-1}})$$

Luego de ese procedimiento, la camada con las raízes incorpora parte del agua contenida en la camada sin raízes, como consecuencia del crecimiento del sistema radicular, y nuevamente se calcula la humedad media equivalente de la camada de suelo con raízes de la siguiente manera:

$$\theta_{con_n} = \theta_{con_{n-1}} + \frac{(\theta_{sin_n} - \theta_{con_n})(Z_{e_n} - Z_{e_{n-1}})}{Z_{e_n}}$$

Evapotranspiración real: Se estima la evapotranspiración real (ETr , mm) para todos los períodos por el método propuesto por Thornthwaite & Mather (1955):

$$ETr_n = VA_n + C_n \quad (\text{si } C_n < ETm_n) \quad \text{y} \quad ETr_n = ETm_n \quad (\text{si } C_n \geq ETm_n)$$

donde C_n se refiere a la lluvia y VA_n a la variación de almacenamiento ocurrida en el n -ésimo período, siendo que:

$$VA_n = Alm_n - Alm_{n-1}$$

Deficiencia hídrica: La deficiencia hídrica (DH_n) es definida como la diferencia entre la ETm y la ETr :

$$DH_n = 0 \quad (\text{si } C_n \geq ETm_n) \quad \text{y} \quad DH_n = ETm_n - ETr_n \quad (\text{si } C_n < ETm_n)$$

Existirá entonces deficiencia hídrica en los períodos en que la ETr_n es menor que la ETm_n , en consecuencia de la falta de lluvia y de la variación de agua almacenada en el perfil de suelo.

Excedente hídrico: Excedente hídrico (EH_n) es definido como la diferencia entre la cantidad de lluvia de un período y la evapotranspiración real más la variación del almacenamiento:

$$EH_n = 0 \quad (\text{si } C_n < ETm_n) \quad \text{y} \quad EH_n = C_n - ETr_n - VA_n \quad (\text{si } C_n \geq ETm_n)$$

Existe entonces excedente hídrico cuando la lluvia excede la suma de la evapotranspiración real y la cantidad de agua que falta en el suelo para alcanzar su máxima capacidad de almacenamiento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para estimar la evapotranspiración, se utilizó el procedimiento propuesto por Thornthwaite (1948). Ese método tiene la ventaja de necesitar solo datos de temperatura media de los períodos y de la latitud del lugar para el cálculo de la evapotranspiración de referencia. Sin embargo, el método presenta mejores resultados entre las latitudes 40°N y 40°S.

Para estimar la evapotranspiración real, se realizó el balance hídrico utilizando el procedimiento propuesto por Thornthwaite & Mather (1955) con algunas modificaciones.

En regiones áridas y semi-áridas, principalmente, dependiendo de las condiciones del suelo y del cultivo en estudio, existe la posibilidad de que el suelo nunca alcance la capacidad de campo. Con base en esa posibilidad Mendonça (1958) elaboró un criterio para iniciar el balance hídrico, válido en el caso de tener solo una estación húmeda y una estación seca, que permite determinar los valores correctos de almacenamiento y negativo acumulado dispensando los cálculos interactivos originalmente propuestos por Thornthwaite & Mather (1955) para la realización del balance hídrico cíclico.

Como en Agronomía se desea hacer el balance hídrico utilizando un número mayor de períodos, con un número menor de días para su composición, fue necesario generalizar el criterio para iniciar el balance hídrico propuesto por Mendonça (1958). Una nueva expresión (eqs. 25 y 26), válida para cualquier número de estaciones húmedas y secas consecutivas fue utilizada como criterio para iniciar el balance hídrico.

Cuando no se conoce la humedad del suelo al inicio del período de interés, se hace el balance hídrico cíclico a partir de los datos de temperatura y lluvia de un año hipotético, usando como profundidad efectiva del sistema radicular la profundidad máxima de mojado, y como coeficiente de cultivo un valor cualquiera, definido previamente.

Después de realizado el balance hídrico cíclico, se obtuvo el almacenamiento de agua en el suelo, hasta la profundidad máxima de mojado, en todos los períodos del año hipotético.

Siendo así, se utilizó el almacenamiento correspondiente al período inmediatamente anterior al período de siembra para iniciar el balance hídrico secuencial.

El procedimiento relativo al balance hídrico cíclico para la grama ([Figura 7](#)), manteniendo la profundidad efectiva del sistema radicular constante, fue hecho con el propósito de estimar el contenido de agua en el suelo en el día de la siembra de frijol (22 de febrero).

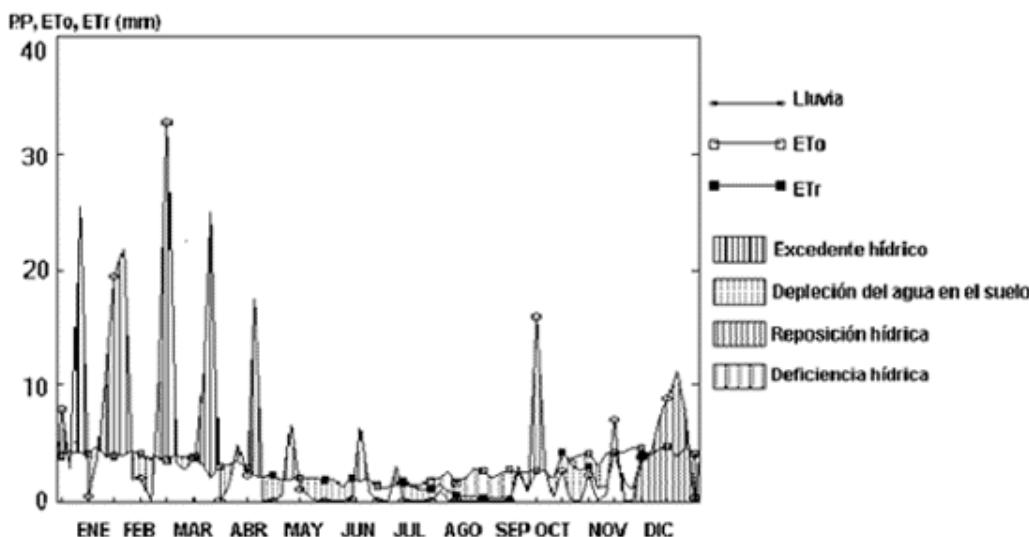


Figura 7 – Balance hídrico para grama utilizando el modelo cosenoidal con datos medios de lluvia y temperatura de 1917 a 1991 y períodos pentadarios. Piracicaba, SP, Brasil.

Con el propósito de utilizar el procedimiento relativo al balance hídrico secuencial, se simuló el crecimiento radicular para dicho cultivo, utilizando el modelo cosenoidal (Dourado-Neto et al., 1993) y los propuestos por Rijtema & Abouckhaled (1975) y Thornthwaite & Mather (1955) para estimar el almacenamiento de agua en el suelo. Fue hecha la comparación entre los valores observados y los valores estimados, por los diferentes

modelos, de evapotranspiración real, considerando el período entre el 27 de marzo y el 11 de mayo. El modelo cosenoidal fue el que mejor estimó la evapotranspiración real ([Figura 8](#)).

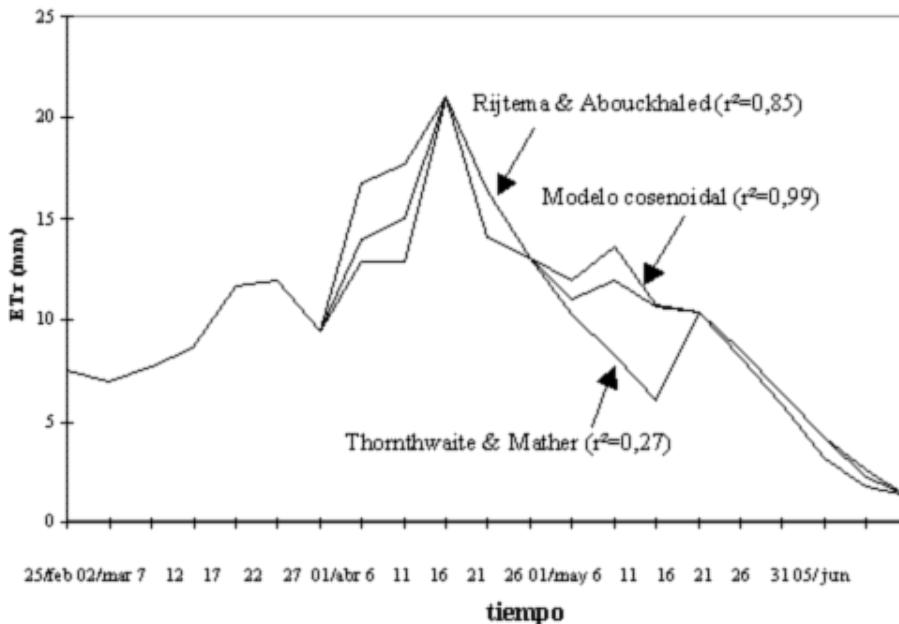


Figura 8 - Balance hídrico secuencial en cultivo de frijol utilizando tres diferentes modelos para estimar el almacenamiento.

Los valores observados de humedad fueron determinados con el auxilio de tensímetros y curvas de retención. Se determinaron los valores de evapotranspiración real, en períodos de cinco días (pentadarios), a través de la variación del almacenamiento de agua en el suelo.

Es imprescindible conocer los períodos del año en que ocurre deficiencia hídrica para tomar decisiones referentes a los diversos aspectos técnicos de manejo relacionados a la economicidad de la explotación agrícola, como la adopción de técnicas de riego, época, cantidad, tipos y modos de aplicación de fertilizantes a ser utilizados, control de plantas dañinas, control fitosanitario y selección de las especies y variedades a ser explotadas comercialmente.

CONCLUSIÓN

Con base en el análisis de los modelos discutidos, se concluye que el modelo cosenoidal es el que mejor estima el almacenamiento de agua en el suelo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DIGGLE, L.A.J. ROOTMAP: a model in three-dimensional coordinates of the growth and structure of fibrous root systems. **Plant and Soil**, v.105, p.169-178, 1988. [[Links](#)]
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W.E. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome: FAO, 1975. 179p. (Irrigation and Drainage Paper, 24). [[Links](#)]
- DOURADO-NETO, D.; NIELSEN, D.R.; HOPMANS, J.W.; PARLANGE, M.B. **Mechanistic model to forecast yield for a nonphotosensitive annual crop**. Davis: University of California, Department of Land, Air and Water Resources, 1993. 27p. [[Links](#)]
- MENDONÇA, P. de V.E. Sobre o novo método de balance hídrico de Thornthwaite e Mather. In: CONGRESSO LUSO-ESPAÑOL PARA EL PROGRESO DE LAS CIENCIAS, 24., Madrid, 1958. s.n.t. p. 415-425. [[Links](#)]
- PALTRIDGE, G.W.; PLATT, C.M.R. **Radiative processes in meteorology and climatology**. Amsterdam: Elsevier Scientific, 1976. (Developments in Atmospheric Science, 5). [[Links](#)]
- RIJTEMA, P.E.; ABOUKHALED, A. **Crop water use**. In: FAO. **Research on crop water use, salt affected soils and drainage in the Arab Republic of Egypt**. Rome: FAO Regional Office for the near East, 1975. p.1-70. [[Links](#)]

Recibido para publicación el 19.08.98
Aceptado para publicación el 20.12.98

¹Trabajo presentado en el "Congreso Latinoamericano de Ingeniería Rural", CLIR 98, La Plata, Argentina, 1998.



USP/ESALQ - Scientia Agricola
Av. Pádua Dias, 11
13418-900 Piracicaba SP Brazil
Tel.: +55 19 3429-4401 / 3429-4486
Fax: +55 19 3429-4401



scientia@usp.br