

Tecnología para evaluar el impacto de características del suelo en el desarrollo radical del maíz^a

Technology to assess the impact of soil characteristics in the radical development of maize

Rodolfo Delgado¹ y Teresa Barrera¹

¹ Investigadores INIA-CENIAP, Maracay, Edo. Aragua, Venezuela, Apdo. Postal 2101
Correos electrónicos: rdelgadocal@hotmail.com y tvbarrera@gmail.com

RESUMEN

El desarrollo radical es afectado por parámetros de suelo y cultivo, algunos de los cuales pueden ser alterados por prácticas de manejo. En este estudio se calibró un modelo de simulación de crecimiento radical, en el cual se consideran parámetros de suelo, cultivo y clima, para maíz cultivado bajo labranza mínima y convencional en un suelo Fluventic Haplustoll de Maracay y se evaluó la sensibilidad del modelo mediante la predicción diaria de la densidad de longitud radical (DR), en cm raíz cm^{-3} suelo y profundidad de enraizamiento (PE) en las localidades Los Bagres y Los Chorros 10 del Valle de Tucutunemo y en un suelo de la serie Los Arcos de Maracay. En la calibración, la ecuación de regresión entre DR observada y simulada, a través del ciclo del cultivo y el perfil del suelo, mostró un coeficiente de determinación de 84%. El modelo mostró sensibilidad a variaciones del contenido de arena y densidad aparente, reflejada por las diferencias observadas en los valores simulados de DR y la PE entre los tres sitios de calibración. Los valores de densidad aparente del suelo (D_a) que afectaron drásticamente la PE fueron de $1,55 \text{ g cm}^{-3}$ en Los Bagres, $1,60 \text{ g cm}^{-3}$ en Los Chorros 10 y $1,70 \text{ g cm}^{-3}$ en Los Arcos, siguiendo una tendencia proporcional al contenido de arena en estos suelos. Con este modelo se podría evaluar ex-ante factores que afectarían el desarrollo radical, y planificar prácticas de manejo que lo favorezcan.

Palabras clave: raíz, modelo, simulación, densidad radical, maíz.

ABSTRACT

The root growth is driven by soil and crop characteristics, some of which could be altered by the climate and by management practices. In this study a general rootgrowth model, which takes into account characteristics of soil, crop and climate, was calibrated for maize grown under minimum (MT) and conventional tillage (CT) in a Fluventic Haplustoll soil of Maracay. The model sensitivity was evaluated by measuring the daily root length density (RLD) and proliferation depth (RP) into the soil profile, in Los Bagres and Los Chorros 10 areas of the Tucutunemo Valley, and in Los Arcos soil of Maracay. The model was successfully calibrated: the regression equation between the simulated and observed values of RLD through the crop cycle and soil profile, showed a determination coefficient of 84%. There were differences in the simulated values of RLD and RP between the different calibration sites, revealing the model sensitivity to variations in soil parameters like sand content and soil bulk density. The values of soil bulk density that drastically affected the RP were 1.55 g cm^{-3} in Los Bagres, 1.60 g cm^{-3} in Los Chorros10, and 1.70 g cm^{-3} in Los Arcos, accordingly to the increase in the sand content. With this model, the effect of different factors affecting the growth of the root system could be evaluated in advance, in order to design and assess management practices to improve plant rooting.

Key words: root, model, simulation, root length density, corn

INTRODUCCIÓN

El estudio del crecimiento del sistema radical y de características asociadas a la absorción de nutrientes y agua (p. ej., densidad radical), y del impacto que causan ciertos cambios de las propiedades del suelo y prácticas de manejo en dicho crecimiento, representan aun un reto para la agricultura, debido, en parte, a la diversidad de factores que intervienen de manera conjunta en el desarrollo radical, y lo laborioso y costoso de los estudios que se deben conducir para la evaluación del mismo.

^a Recibido: 08-12-11; Aceptado: 17-12-14

Miller (1986) destaca la diversidad de aspectos del medio ambiente radical que afectan su desarrollo, y señala algunos de ellos, tales como la deficiencia de agua y oxígeno, deficiencia o desbalance de nutrimentos, temperaturas no óptimas y la resistencia a la penetración. Los patrones de crecimiento radical y características del mismo asociadas a la absorción de agua y nutrimentos, son alteradas por condiciones de manejo de los sistemas agrícolas o de prácticas de producción, como se sugiere en los trabajos de Ball-Coelho *et al.* (1998) y Allmaras y Nelson (1971), quienes evaluaron el impacto del tipo de labranza y manejo de residuos en los mismos. En otros estudios se ha destacado el impacto de la fertilización en el desarrollo y distribución radical. Anderson (1987) evaluó el impacto de la labranza y la fertilización nitrogenada en el crecimiento y distribución del sistema radical mientras que Mollier y Pellerin (1999) evaluaron el impacto de la deficiencia de fósforo en el crecimiento o desarrollo radical.

Por otra parte, en nuestro país existe una gran diversidad de condiciones edafo-climáticas y de manejo, en las cuales se realizan actividades agrícolas, por lo que sería muy complicada y casi imposible la evaluación del sistema radical en cada una de dichas condiciones.

De lo antes indicado, se destaca que la modelización del desarrollo del sistema radical de los cultivos, en la cual se integraría los principales factores que determinan o afectan su desarrollo, una vez realizada la calibración del modelo de simulación, podría ser una herramienta muy valiosa para evaluar el crecimiento radical de los cultivos en diversas condiciones de suelo, manejo y clima. El modelo utilizado fue presentado por Delgado (2003), quien indica que en el mismo se considera las principales variables de suelo, clima, manejo y cultivo, y permite la modelización de aquellas variables del sistema radical asociadas con la exploración del volumen del suelo (p. ej., profundidad de enraizamiento) y absorción de nutrimentos y agua (p. ej., densidad radical).

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del modelo

En la Figura 1 se indican los principales parámetros considerados para la simulación del crecimiento radical a través del perfil del suelo y la proliferación del sistema radical en las capas de suelo, una vez que las mismas han sido alcanzadas verticalmente por las raíces (desarrollo vertical). Con la consideración conjunta de los parámetros de cada una de las capas del perfil del suelo, se cuantifica la "benevolencia" o idoneidad de cada capa para permitir, inicialmente, la proliferación vertical de raíces primarias y posterior e inmediatamente después que una capa es alcanzada verticalmente, la proliferación en ésta de raíces secundarias.

Estimación del crecimiento vertical diario, distribución entre capas del perfil y profundidad de enraizamiento:

Como se puede observar en la Figura 1, en la determinación de la "benevolencia" para el desarrollo vertical se considera: (1) el efecto de la resistencia a la penetración radical, la cual es estimada a partir de la densidad aparente (D_a) del suelo, la proporción de arena y el efecto de la humedad del suelo, la cual es estimada a partir del contenido actual de humedad, la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP); y (2) el efecto de la temperatura del suelo. Por otra parte, en la determinación de la "benevolencia" para la proliferación horizontal, se considera la resistencia a la penetración radical, el efecto individual de la humedad del suelo, la temperatura y la disponibilidad de N, esta última estimada en función del contenido actual de N mineral disponible para el cultivo y la concentración de N mínima en la solución del suelo por debajo de la cual no es posible la absorción por las raíces.

En el modelo, la colonización o proliferación del sistema radical en una capa del suelo se inicia una vez que la misma es alcanzada verticalmente por el sistema radical. Por ello inicialmente se calcula el crecimiento vertical potencial diario (CVP_d (cm)), el cual se estima considerando el máximo desarrollo vertical registrado para el cultivo que se desea modelar ($DVR_{máx}$ (cm)), el periodo del ciclo del cultivo o tiempo térmico acumulado ($TT_{máx}$ (°C)) hasta donde se observa desarrollo radical y el tiempo térmico diario (TT_d (°C)), como se indica en la Ecuación 1.

$$CVP_d = \left(\frac{DVR_{máx}}{TT_{máx}} \right) * TT_d \quad (\text{Ec. 1})$$

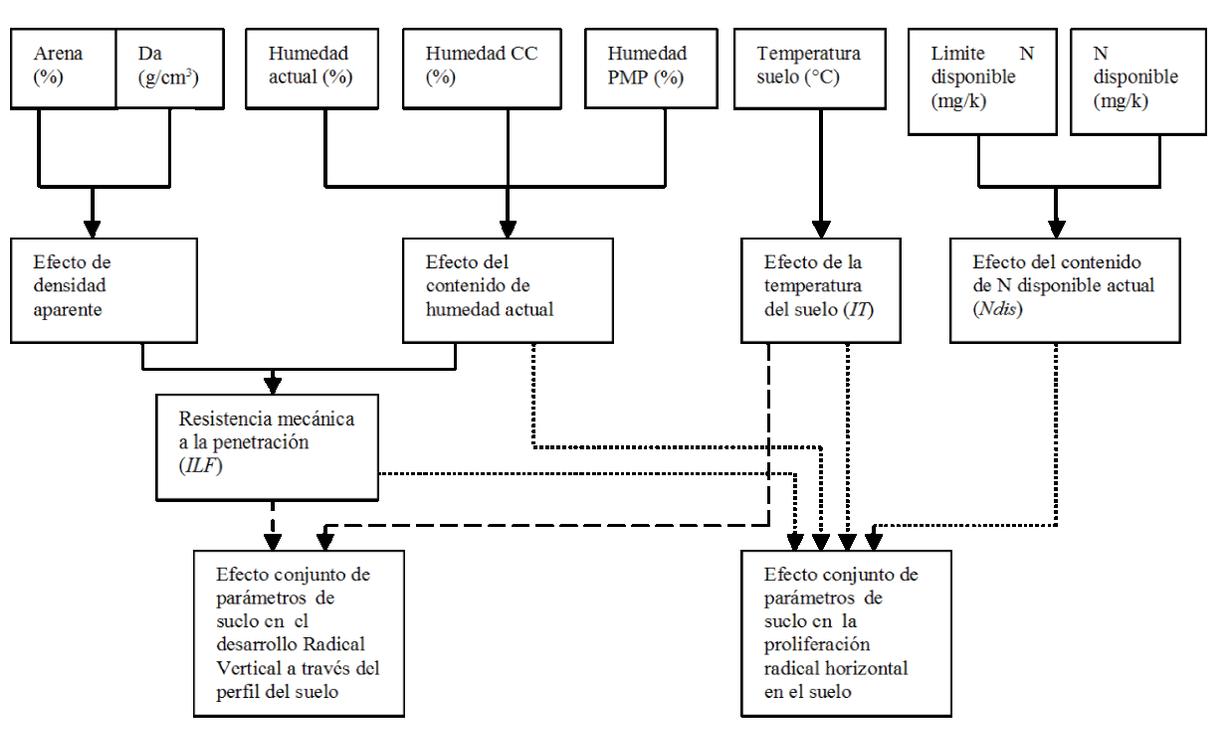


Figura 1. Propiedades del suelo e interacciones consideradas para la determinación de la benevolencia de cada capa considerada del perfil del suelo para permitir el desarrollo vertical y la proliferación horizontal del sistema radical.
Fuente: (Delgado, 2003).

El crecimiento vertical diario real ($CVRd$), como se indica en la Ecuación 2 para la capa de suelo c , será el mínimo entre el desarrollo vertical permitido por 1) la disponibilidad de carbono ($Cdisp * efiCR * Ilm_v$), 2) el nitrógeno disponibles en la planta para desarrollo radical ($Ndisp * CNmax * Ilm_v$) y 3) el permitido por los factores ILF y IT , los cuales son parámetros adimensionales que fluctúan entre 0 y 1 que constituyen índices de la “benevolencia” de la capa c para permitir el desarrollo radical ($CVPd * ILF_c * IT_c$). ILF expresa las limitaciones físicas (definidas por la resistencia a la penetración, la Da y la disponibilidad de humedad) e IT el impacto de la temperatura del suelo.

$$CVRd_c = \text{mínimo} (Cdisp * efiCR * Ilm_v, Ndisp * CNmáx * Ilm_v, CVPd * ILF_c * IT_c) \tag{Ec. 2}$$

Donde, Ilm_v es un factor de conversión de longitud radical por unidad de masa radical, $CNmáx$ es la máxima relación C: N observada en biomasa radical y $efiCR$ es un parámetro de eficiencia de utilización de C en el proceso metabólico de conversión de C disponible a masa radical. Estos parámetros son introducidos por el usuario (Cuadro 1).

El modelo asigna al índice ILF un valor comprendido entre 1 y un valor limitante debido a la resistencia a la penetración denominado $ILmin$, que se determina mediante la ecuación 3, según Jones *et al.* (1991), en donde FDa_c es el factor asociado a la desviación de la Da actual de una capa (Da_c) de la condición óptima en la cual no hay limitaciones para el desarrollo radical (DaO_c) y de la condición de densidad aparente limitante (DaL_c) (ecuación 4), mientras que FAA_c es la proporción de agua aprovechable en la capa en un momento determinado en relación al contenido actual de la humedad en la capa c del suelo (Hs_c), a la capacidad de campo y punto de marchitez permanente de la capa (ecuación 5).

$$ILF_c = FDa_c * \text{sen}(\pi^2 * FAA_c) \quad (\text{Ec. 3})$$

$$FDa_c = \frac{(DaL_c - Da_c)}{(DaL_c - DaO_c)} \quad (\text{Ec. 4})$$

$$FAA_c = \frac{(Hs_c - PMP_c)}{(CC_c - PMP_c)} \quad (\text{Ec. 5})$$

Los parámetros DaO_c y DaL_c se calculan según ecuaciones lineales que dependen de la proporción de arena (% a), como se indica en las ecuaciones 6 y 7 para la capa c.

$$DaO_c = 1,1 + 0,005 * \%a_c \quad (\text{Ec. 6})$$

$$DaL_c = 1,6 + 0,004 * \%a_c \quad (\text{Ec. 7})$$

Si la Da es mayor que la DaL o la humedad del suelo es menor que el PMP , se le asigna un valor de 0 al FDa y a la FAA , mientras que si la Da es menor que DaO al FDa en la Ecuación 3 se le asigna un valor de 1.

La variable IT de la ecuación 2 es un factor que considera el efecto diario y en cada capa, de la temperatura del suelo en el desarrollo vertical del sistema radical (ecuación 8), basado en la temperatura diaria por capa (TSd), la temperatura más baja a la cual es posible el crecimiento radical (TC) y la temperatura a la cual se inhibe el desarrollo radical ($TCmáx$). El factor qft permite variar la forma de la curva (ej. cuadrática, cubica) como lo señala Thordley (1998), normalizado por la temperatura a la cual se observa el óptimo desarrollo radical (TCO).

$$IT_c = \frac{(TSd_c - TC)^{qft} * (TCmáx - TSd_c)}{(TCO - TC)^{qft} * (TCmáx - TCO)} \quad (\text{Ec. 8})$$

Estimación del crecimiento vertical diario y distribución entre capas y profundidad de enraizamiento diaria:

La profundidad de enraizamiento (PEd) del día i , se determina considerando el $CVRd$, la PEd actual del día anterior o previo ($i-1$) y la comparación de la suma de ambos parámetros contra el espesor de la primera capa y/o la sumatoria de los espesores de las capas de manera creciente o progresiva (espesor capa 1, sumatoria espesores capas 1 y 2, sumatoria espesores capas 1, 2 y 3, sumatoria espesores capas 1, 2, 3 y 4, y así sucesivamente hasta la última capa considerada), para verificar el cambio de la profundidad de enraizamiento de un capa a otra, y con ello distribuir el crecimiento diario $CVRd$ entre capas sucesivas. Si la suma de la PEd actual más la $CVRd$ estimada en un día no sobrepasa la sumatoria de los espesores de las capas actualmente alcanzadas, el $CVRd$ sólo se agrega en la capa hasta donde ha llegado el sistema radical (c), y la nueva PEd se calcula como se indica en la Ecuación 9, y si por el contrario sobrepasa la sumatoria de los espesores de las capas actualmente alcanzadas por el sistema radical ($\sum EspCapas$), se estima que la longitud o crecimiento (CR) ocurrirá, una parte a lo largo de esa capa actual (c) como se indica en la ecuación 10, la cual será la distancia faltante para alcanzar el límite inferior de la misma, y el CR en la siguiente capa ($c+1$) se estimará utilizando el resto del $CVRd$ ($RemCVRd = CVRd - CR$), reestimado utilizando los factores ILF y IT de la capa alcanzada como se indica en la Ecuación 11. En este segundo caso la PEd finalmente se obtiene de la sumatoria de la PEd previa y de los CR en las capas alcanzadas ($c, c+1$) como se indica en la Ecuación 12.

$$PEd_{(i)} = PEd_{(i-1)} + CVRd_c \quad (\text{Ec. 9})$$

$$CR_c = \sum EspCapas - PEd_{(i)} \quad (\text{Ec. 10})$$

$$CR_{c+1} = \left(\frac{RemCVRd_c}{ILF_c * IT_c} \right) * ILF_{c+1} * IT_{c+1} \quad (\text{Ec. 11})$$

$$PEd_{(i)} = PEd_{(i-1)} + CR_c + CR_{c+1} \quad (\text{Ec. 12})$$

Estimación de la proliferación radical y densidad radical en las capas:

Una vez que una capa es alcanzada de manera vertical por el sistema radical, se inicia la proliferación de raíces en el mismo. La estimación diaria por capa del incremento potencial de la longitud radical (*IPLR*), es el mínimo entre: (1) la longitud radical faltante para alcanzar una longitud máxima permitida (*LRmáx*) por capa, la cual se estima como la diferencia entre la *LRmáx* calculada a partir de una *DR* máxima específica por cultivo (*DRmáx*), la longitud de raíces (*LR*) previamente existentes (del día *i*) y el incremento de la longitud radical asociada al incremento vertical de las raíces primarias (*IRV*) (ver ecuación 13), y (2) la *LR* estimada según la *LR* previamente desarrollada, afectada por un factor que varía entre 0 y 1, el cual es estimado según la proximidad de la *LR* actual a la longitud máxima permitida [$1 - (LR_{(i)} / LRmáx_c)$], por un factor empírico que representa la capacidad de ramificación de las raíces previamente desarrolladas (*CRRpd*) por los factores limitantes *ILF* e *IT*, determinados como se indicó previamente; y por un efecto combinado de la disponibilidad de agua y concentración de nitrógeno (*HNdisp*). Para el día *i* y la capa *c*, el *IPLR* se estima de la siguiente manera:

$$IPLR_{c(i)} = \text{mínimo} (LRmáx_c - LR_{c(i-1)} - IRV_{c(i)}, \\ LR_{c(i-1)} * \left[1 - \left(\frac{LR_{c(i-1)}}{LRmáx_c} \right) \right] * CRRpd * ILF_c * IT_c * HNdisp_c) \quad (\text{Ec. 13})$$

La estimación del parámetro que relaciona la concentración de N en la solución del suelo y el contenido de humedad (*HNdisp*) se realiza en función de la concentración actual diaria de N en la solución del suelo (*Nsol*) en cada capa de suelo y la concentración de N en la solución del suelo por encima de la cual el crecimiento de raíces no es afectado (*Nsat*), tal como lo sugieren Marschner (1997) y Gregory (1988), y el efecto de la humedad del suelo (*FAA*), este último calculado como se indicó previamente. En la ecuación 14 se indica el cálculo de *HNdisp* para la capa *c*.

$$HNdisp_c = \text{mínimo} (Nsol_c, Nsat) * FAA_c \quad (\text{Ec. 14})$$

Se considera que en el suelo existe una concentración mínima de N, por debajo de la cual la misma no disminuye.

Finalmente, el efecto de la concentración de N y humedad (*HNdisp*) de cada capa, el cual se utiliza en la ecuación 13, es un valor relativo de cada capa en relación a la máxima *HNdisp* observada entre todas las capas de suelo como se indica en la ecuación 15 para la capa *c*.

$$HNdisp_c = \frac{HNdisp_c}{\text{máximo} (HNdisp_1, HNdisp_2, HNdisp_3, HNdisp_4, HNdisp_5)} \quad (\text{Ec. 15})$$

Asociado al *IPLR*, calculado por cada capa, se estima la masa de raíces (*IMPC*), como se indica en la ecuación 16 para la capa *c*, utilizando un factor de conversión que relaciona la materia seca y la longitud radical para raíces secundarias (*Ilm_s*).

$$IMPC_{c(i)} = \frac{IPLR_{c(i)}}{Ilm_s} \quad (\text{Ec. 16})$$

El incremento diario real de raíces (*IRLR*) se obtiene de la comparación entre la biomasa radical total (*BRCT*) obtenida de la sumatoria de la biomasa radical estimada en las diferentes capas (con base a materia seca), como se indica en la ecuación 17 y la biomasa radical que se puede realmente sintetizar (*BRClim*), dependiente del *Cdisp* y *Ndisp*, como se indica en la ecuación 18. *Cdisp* es actualizado diariamente descontando una proporción del mismo que es utilizado para el mantenimiento de las raíces previamente desarrolladas (*Cdis_mrp*).

$$BRCT = \sum IMRC_c \quad (\text{Ec. 17})$$

$$BRClim = \text{mínimo} (Cdisp * efiCR, Ndisp * CNmáx) \quad (\text{Ec. 18})$$

Si *BRClim* es menor que *BRCT*, entonces se calcula la cantidad de C que se dispone en cada capa (c) para el crecimiento de raíces (*IMRC*) de manera proporcional a la cantidad potencial inicialmente calculada, como se indica en la ecuación 19 para el día *i*, y se actualiza el C disponible para desarrollo radical como se indica en la ecuación 20 para el día *i*.

$$IMRC_{c(i)} = IMPC_{c(i-1)} * \frac{BRClim}{BRCT} \quad (\text{Ec. 19})$$

$$Cdisp_{(i)} = Cdisp_{(i-1)} - \left(\frac{BRCT}{efiCR} \right) \quad (\text{Ec. 20})$$

Finalmente el *IRLR* se obtiene convirtiendo la materia seca radical mediante *Ilm_s* (ecuación 21), y se actualiza la *LR* en cada una de las capas de suelo (c), como se indica en la ecuación 22 para el día *i*.

$$IRLR_{c(i)} = IMRC_{c(i)} * Ilm_s \quad (\text{Ec. 21})$$

$$LR_{c(i)} = LR_{c(i-1)} + IRLR_{c(i)} \quad (\text{Ec. 22})$$

En este modelo se considera una tasa de mortalidad diaria sólo de las raíces secundarias (*MRSd*), la cual es introducida por el usuario (Tabla 1). La densidad de longitud radical (*DR*) diaria en cada capa se estima dividiendo la *LR* entre el volumen ocupado por las raíces en la capa de suelo.

Calibración del modelo en un suelo Mollisol de Maracay

En los Cuadros 1 y 2 se indican los parámetros de cultivo y suelo utilizados en la calibración del modelo para maíz cultivado en labranza mínima (LM) y labranza convencional (LC) en un suelo Mollisol de Maracay, Edo. Aragua (Delgado *et al.*, 2008, Castro 2007 y Gámez 2009).

Evaluación del crecimiento radical en diferentes suelos de Aragua

Para evaluar la potencialidad de uso del modelo de simulación en diferentes condiciones, se seleccionaron tres suelos contrastantes en características edafológicas: Los Bagres y Los Chorros 10 del Valle de Tucutunemo (Wagner *et al.*, 1985) y el suelo Los Arcos de la Estación Experimental del INIA-CENIAP (Sucre *et al.*, 1979 e Hidalgo y Avilán, 1955).

Cuadro 1. Parámetros específicos de cultivo definidos por el usuario usados para la simulación del crecimiento radical del maíz.

Parámetro y descripción / unidades	unidades	Maíz
<i>DVR</i> _{máx} : Desarrollo vertical radical máximo	cm	100
<i>TT</i> _{máx} : Etapa del cultivo (tiempo térmico acumulado) hasta donde el desarrollo vertical es permitido	°C	1034
<i>efiCR</i> : Eficiencia de utilización de C no estructural en C estructural	adimensional	45
<i>CRRpd</i> : Factor relacionado con la ramificación de las raíces secundarias	adimensional	0,55
<i>Cdis_mrp</i> : Proporción del C disponible para crecimiento radical a ser utilizado para el mantenimiento de las raíces previamente desarrolladas	%	0,02
<i>MRSd</i> : Factor de mortalidad diaria de raíces secundarias	%	0,07
<i>DR</i> _{máx} : Máxima densidad radical observada	cm * cm ⁻³	5,0
<i>llm_v</i> : Factor de relación longitud radical : masa radical de raíces primarias	cm * g ⁻¹ C	1000
<i>llm_s</i> : Factor de relación longitud radical : masa radical de raíces secundarias	cm * g ⁻¹ C	16.000
<i>NRP</i> : Número de raíces primarias	# raíces * planta ⁻¹	100
<i>CN</i> _{máx} : Máxima relación C:N observada en raíces	adimensional	25
<i>CN</i> _{mín} : Mínima relación C:N observada en raíces	adimensional	20
<i>Nsat</i> : Concentración de N en la solución del suelo por encima de la cual el crecimiento de raíces no es afectado	mg * L ⁻¹	75
<i>Dp</i> : Densidad de plantas	planta * m ⁻²	20

Cuadro 2. Principales características de un suelo Mollisol de Maracay, Edo. Aragua, cultivado con maíz bajo Labranza Mínima (LM) y Convencional (LC).

Profundidad o capa (cm)	Da (g cm ⁻³)		Tasa de infiltración (mm h ⁻¹)		CC (% vol)		PMP (% vol)		Arena (%)		Humedad inicial (% grav)		N mineral inicial (mg kg ⁻¹)	
	LM	LC	LM	LC	LM	LC	LM	LC	LM	$\frac{L}{C}$	LM	LC	LM	LC
0-5	1,58	1,62	1,22	4,68	39,0	35,3	16,8	15,3	41	46	17,30	16,90	31,50	47,0
5-10	1,60	1,70	3,45	4,70	39,2	39,0	17,2	17,8	41	47	16,20	15,40	30,20	22,8
10-20	1,50	1,73	2,36	1,27	35,9	41,8	16,6	17,9	40	46	16,10	15,23	15,90	15,5
20-30	1,52	1,68	0,67	1,07	38,6	41,8	17,9	18,3	49	45	16,50	12,70	12,90	9,2
30-40	1,60	1,68	1,14	1,72	39,6	42,8	18,5	19,8	42	47	15,00	7,87	12,60	5,7

CC y PMP: contenido de humedad a capacidad de campo y punto de marchitez permanente, respectivamente consideradas de las mediciones a 1//10 y 15 bares de succión

Las principales características de los suelos Los Bagres, Los Chorros 10 y Los Arcos se indican en la tabla 3. Como aspecto importante a destacar se tiene que los contenidos de arena entre 0 y 40 cm de profundidad, fluctuaron entre 15,6 y 19,6% en Los Bagres; entre 34,3 y 29,3% en Los Chorros 10 (Warner *et al.*, 1985) y entre 59,6 y 66,1% en Los Arcos (Sucre *et al.*, 1979). Los contenidos de materia orgánica del suelo y de N mineral (Nitrato) decrecen de manera inversa con el incremento del contenido de arena, mientras que la densidad aparente del suelo aumenta con la profundidad en el suelo

y con el incremento de los contenidos de arena.

En cada una de estas localidades se evaluó: 1) el desarrollo radical (velocidad y profundidad de enraizamiento y DR en las diferentes capas hasta 40 cm de profundidad) durante el ciclo del cultivo y 2) el impacto de incremento de la Da del suelo en la profundización del sistema radical.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Calibración del modelo de simulación en un suelo de Maracay:

Para la calibración del modelo a la condición de LM y LC, se ajustó la profundidad máxima de enraizamiento ($DVR_{m\acute{a}x}$) a 50 cm, y se logró disminuir la tasa de proliferación vertical del sistema radical y el inicio de la proliferación de raíces secundarias en las capas inferiores.

En la figura 2 se muestra la densidad radical observada (DRO) y simulada (DRS), a manera de ejemplo, en algunas de las capas de suelo para LM y LC, aunque las mismas se obtuvieron para todas las capas de suelo hasta 40 cm de profundidad. En las figuras 2a, 2b y 2c se muestra la DRO y DRS en LM para algunas de las capas del suelo durante el ciclo del cultivo y en la Figura 3a la relación entre la DRO y la DRS en las diferentes capas comprendidas entre 0 y 40 cm de manera conjunta para el maíz cultivado en LM. De manera similar, en las figuras de la 2d a la 2f se indica la DRO y la DRS en algunas capas en LC, y en la Figura 3b la relación de regresión entre la DRO y la DRS de manera conjunta de las diferentes capas en LC. En general, la DRS en las diferentes capas se asemeja y está en el mismo orden de magnitud a la DRO, aunque en las capas inferiores tienden a ser menores. En LM y LC la DRS tiende a disminuir, al igual que la DRO, desde las capas superiores a las inferiores. Es interesante destacar que el inicio de la proliferación radical simulada en la capa 30-40 cm, a los 45 días, coincide con lo observado (figuras 2c y 2f), denotando la capacidad de calibración del modelo.

En general, en LM y LC, la DRS estuvo en el mismo orden de magnitud que la DRO, y durante el ciclo del cultivo se observó un comportamiento de la variación de la densidad radical similar entre los valores observados y los simulados. Posiblemente las discrepancias que existen en algunas de las capas entre los valores de densidad radical observados y simulados podrían deberse a 1) procesos no considerados en el modelo de simulación o 2) a la utilización de valores promedios de algunos de los parámetros requeridos por el modelo, lo cual no refleja la variación espacial de las mismas, a la cual posiblemente está asociada una variación de la densidad radical.

Del análisis conjunto de la DRO y la DRS de las diferentes capas para LM y LC (figura 3), se obtuvo que el modelo predice satisfactoriamente la densidad radical, como sugieren los resultados del análisis de regresión lineal que relaciona la DRO y la DRS: el modelo de regresión presenta un coeficiente de determinación elevado ($R^2 = 0,9053$) y una pendiente de regresión de 0,8636; lo que indica una buena concordancia entre la DRO y la DRS en LM. De manera similar, en LC el coeficiente de determinación del modelo de regresión entre DRO y DRS fue de 0,8006 y la pendiente de 0,5105.

Cuadro 3. Principales características físicas y químicas de los sitios donde se simuló el desarrollo radical

Suelo	Capa (cm)	Da (g cm ⁻³)	Tasa de infiltración (mm h ⁻¹)	CC (% vol)	PMP (% vol)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Clase textural	pH	Materia orgánica (%)	N-NO ₃ (mg kg ⁻¹)
Los Bagres	0-20	1,25	5,0	34,5	28,7	15,6	30,0	54,4	A	6,0	5,29	100
	20-40	1,35	5,0	34,9	22,6	19,6	30,0	50,4	A	5,5	5,13	100
Los Chorros 10	0-20	1,39	2,17	29,1	12,3	34,3	40,6	25,1	F	7,2	3,78	67
	20-40	1,45	2,17	30,4	13,6	29,3	42,6	28,1	FA	7,1	4,05	100
Los Arcos	0-20	1,44 *	9,5 ****	14,10*	6,0*	59,6*	22,7*	17,7*	Fa	6,3**	2,28**	0,73***
	20-40	1,72 *	9,5 ****	10,25*	4,8*	66,1*	19,7*	14,2*	Fa	6,3**	0,24**	---

** Valores tomados de Hidalgo y Avilán 1955 * valores promedios ponderados tomados de descripción de Sucre et al., 1979

*** promedio de valores de la serie Los Arcos Fa de Hidalgo y Avilán, 1955. **** Valores de infiltración básica medidos en campo

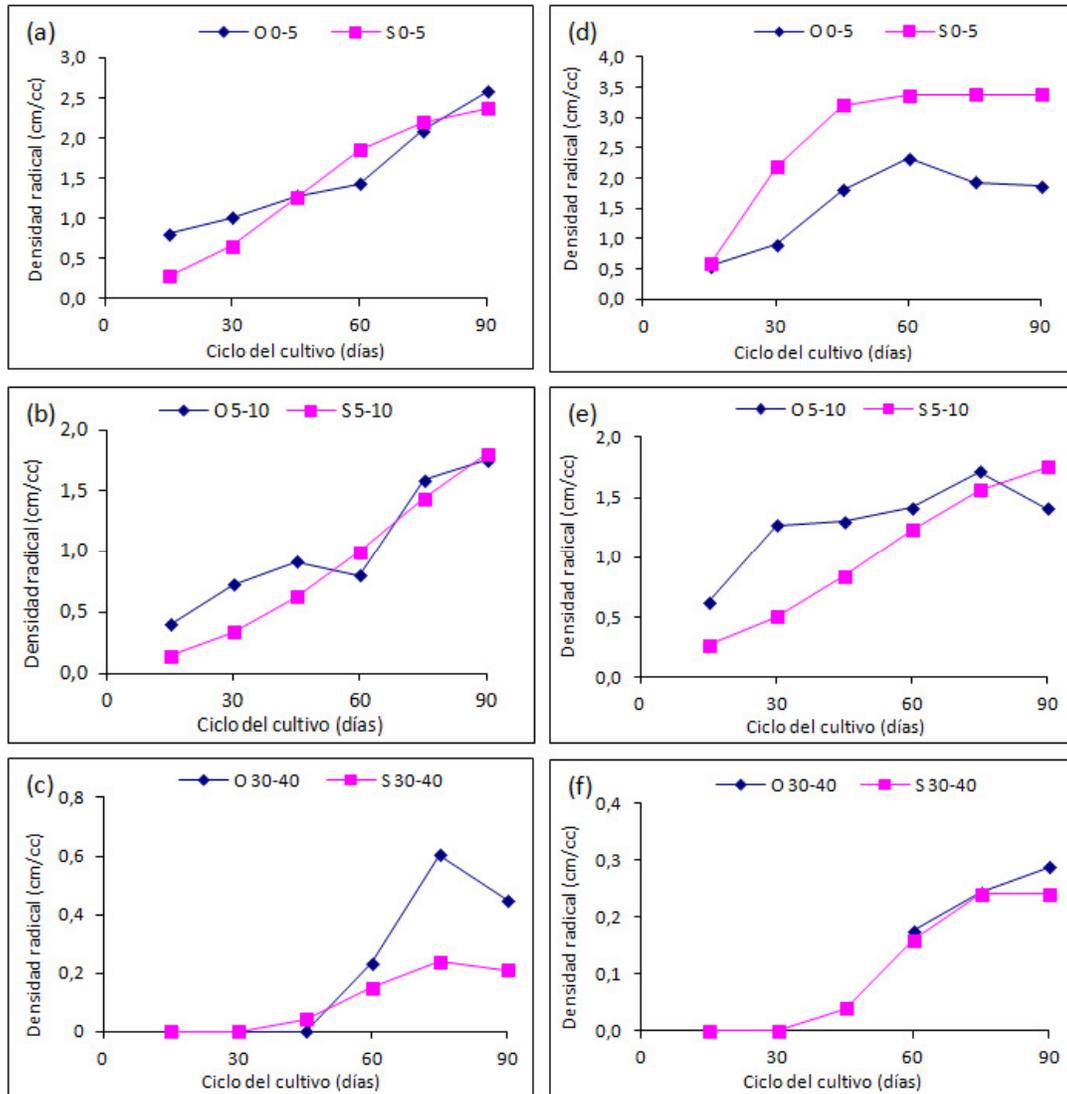


Figura 2. Densidad radical observada (O) y simulada (S) en las capas 0-5, 5-10 y 30-40 cm en maíz cultivado en labranza mínima (a, b y c) y en labranza convencional (d, e y f) en un suelo Mollisol de Maracay

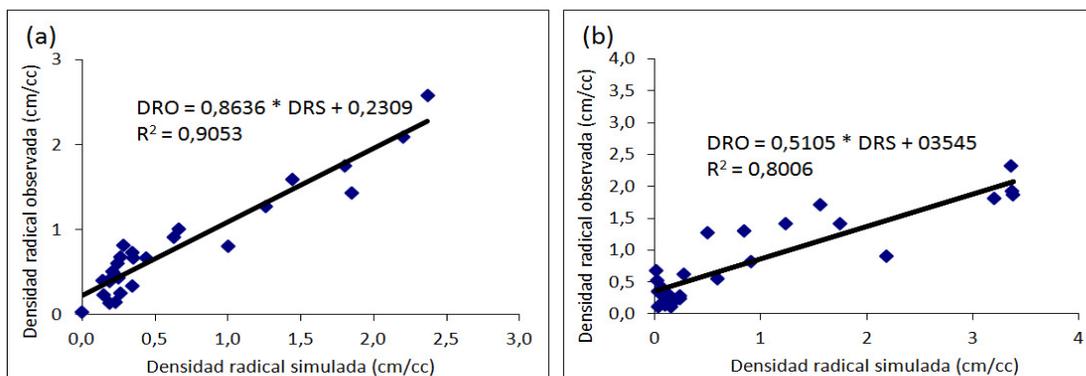


Figura 3. Relación entre densidad radical observada (DRO) y simulada (DRS) en las diferentes capas del suelo hasta 40 cm de profundidad en maíz cultivado en labranza mínima (a) y labranza convencional (b).

Análisis de la sensibilidad del modelo en diferentes condiciones de suelo

En las figuras 4a y 5 se muestran la profundidad de enraizamiento y la densidad radical simulada en diferentes capas, en las localidades Los Bagres, Los Chorros 10, y Los Arcos en las condiciones normales de esos sitios (Wagner *et al.*, 1985; Sucre *et al.*, 1979), y en la Figura 4b se muestra el impacto de incrementos crecientes de la Da del suelo en la profundidad de enraizamiento en los tres sitios evaluados.

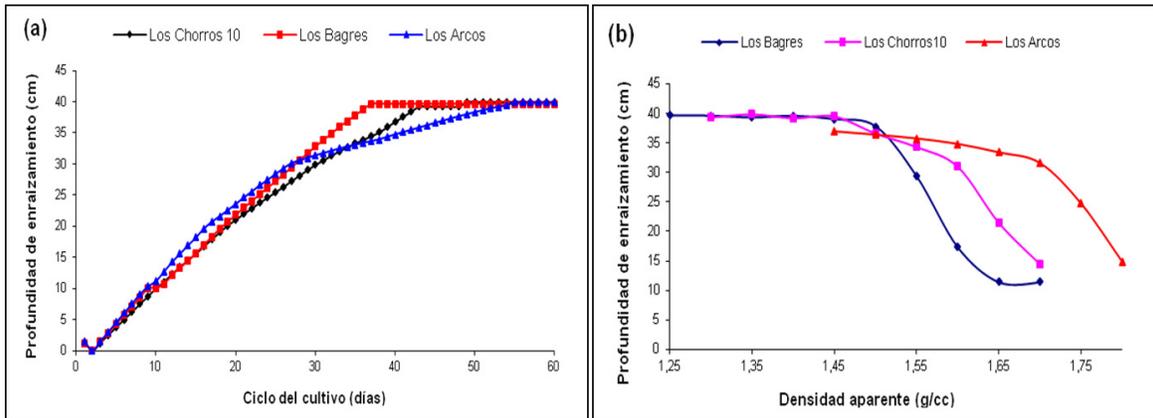


Figura 4. Profundidad de enraizamiento: (a) en condiciones normales del ciclo de cultivo y (b) afectada por un incremento de la densidad aparente en la capa 10-20 a los 45 días, en tres sitios de Aragua

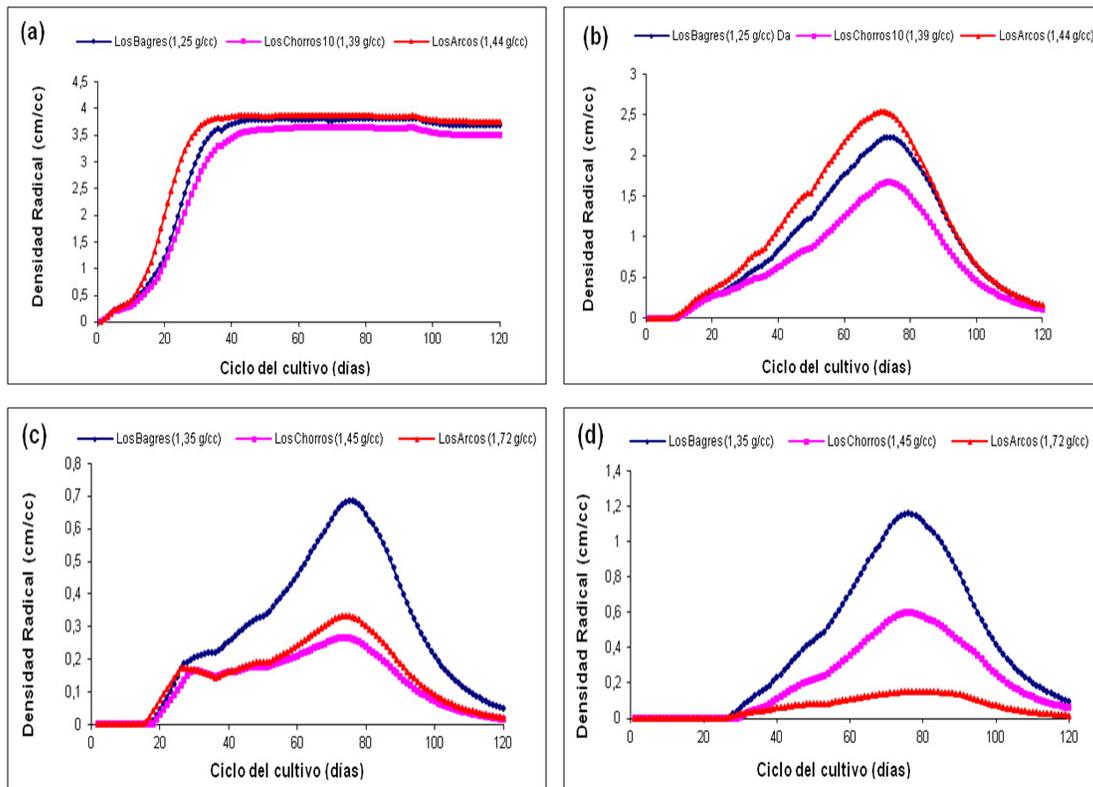


Figura 5. Densidad radical en: (a) capa 0-5 cm, (b) capa 10-20 cm, (c) capa 20-30, y (d) capa 30-40 cm, en los tres sitios del estudio. Valores entre paréntesis indican densidad aparente del suelo

En la figura 4a se puede apreciar que existen diferencias en la velocidad de profundización radical: el valor máximo en el suelo Los Bagres (40 cm) se alcanzó a los 36 días, mientras que la misma se alcanzó 12 y 18 días después en los suelos Los Chorros 10 y Los Arcos, respectivamente. La más lenta profundización del sistema radical entre los 30 y 40 cm en el suelo Los Arcos está asociada a una elevada D_a en esta capa ($1,72 \text{ g cm}^{-3}$) como se observa en el cuadro 3. Verificar densidad de cuadros 2 y 3.

En la figura 5 se muestra la DR en algunas de las capas en los suelos Los Bagres, Los Chorros 10, y Los Arcos. De las mismas se observa que en las capas 0-5 cm (Figura 5a) la DR es aproximadamente similar en los tres suelos, mientras que en la capa 10-20 cm (Figura 5b) es más elevada en Los Arcos, seguida por Los Bagres, y luego Los Chorros 10. Sin embargo, en las capas 20-30 y 30-40 cm (figuras 5c y 5d) la DR es notoriamente inferior en el suelo Los Arcos, lo cual podría estar asociado a que en este suelo la D_a del suelo presentó un incremento de $1,44 \text{ g cm}^{-3}$ en la capa 0 - 20 cm, a $1,72 \text{ g cm}^{-3}$ en la capa 20 - 40 cm (cuadro 3), lo cual podría limitar la proliferación de raíces en la misma; mientras que en el suelo Los Bagres la D_a presentó un incremento de $1,25$ a $1,35 \text{ g cm}^{-3}$ y en el suelo Los Chorros 10 de $1,39$ a $1,45 \text{ g cm}^{-3}$ en las profundidades señaladas.

En relación al impacto del incremento de la D_a en la profundidad de enraizamiento (Figura 4b), se aprecia que a los 45 días de la siembra en el suelo Los Arcos, donde los contenidos de arena son de 60%, se requerirían incrementos de la D_a más elevados (superiores a $1,70 \text{ g cm}^{-3}$) para que la profundización radical sea notoriamente afectada, contrario a los suelos Los Bagres y Los Chorros 10, donde a partir de densidades aparentes de $1,55$ y $1,60 \text{ g cm}^{-3}$, respectivamente, la profundización radical se afectaría notoriamente. Los valores limitantes indicados previamente, están en el mismo orden de magnitud que los obtenidos por Miller (1986), y por Veihmeyer y Hendrickson (1948) para cultivo de girasol en suelos de diferente textura.

La sensibilidad del modelo a variaciones de la D_a del suelo, es un aspecto de gran relevancia debido a que es una característica sensible al tipo de labranza, y el modelo podría ser utilizado para evaluar el impacto de variaciones de ésta en el comportamiento del cultivo.

CONCLUSIONES

El modelo se pudo calibrar para la modelización del sistema radical (p. ej., densidad radical, y profundidad de enraizamiento) del cultivo maíz en diversas condiciones de labranza, y mostró ser sensible a variaciones en características de suelo, tanto a las que ocurren de manera natural en el perfil del suelo (p. ej., proporción de arena), como a las causadas por prácticas de manejo (p. ej., densidad aparente), lo que denota la potencialidad de este modelo para evaluar ex-ante el impacto de las características del suelo en el desarrollo radical, y la evaluación de prácticas de manejo con fines de mejorar el mismo. Se recomienda evaluar el modelo en otras condiciones de suelo, clima, manejo, y con otros cultivos (p. ej., leguminosas).

Con esta Tecnología Integral, se podría evaluar escenarios de suelo donde las características de los mismos pueden ser alteradas debido a condiciones de manejo tanto convencionales como conservacionistas (p. ej., sistemas de labranza).

LITERATURA CITADA

- Allmaras, R.R. y W.W. Nelson. (1971). Corn (*Zea mays* L.) root configuration as influenced by some row-interrow variants of tillage and straw mulch management. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 35: 974-980.
- Anderson E.L. (1987). Corn root growth and distribution as influenced by tillage and nitrogen fertilization. *Agron. J.*, 79: 544-549.
- Ball-Coelho, B.R.; R.C. Roy y C.J. Swanton. (1998). Tillage alters corn root distribution in coarse-texture soil. *Soil and Tillage res.* 45: 237-239.
- Castro, L. 2007. Evolución del impacto de sistemas de labranza en el patrón de crecimiento del sistema radical del maíz (*Zea mays* L.) cultivado en un suelo del estado Aragua. Tesis de grado FAGRO-UCV. Maracay. Venezuela. 80 páginas.
- Delgado, R. (2003). Soil-plant dynamics related to N uptake and soil N availability. Ph.D. Dissertation. Fort Collins, Colorado. Colorado State University. 140 p.

- Delgado, R.; L. Castro, E. Cabrera de Bisbal, M. De Jesús Mújica, S. Canache. L. Navarro, e I. No-guera.** (2008). Relación entre propiedades físicas del suelo y algunas características del sistema radical del maíz, cultivado en un suelo Fluventic Hapustoll de textura franco-arenosa de Maracay, Venezuela. *Agron. Trop.*, 58 (3):245-255.
- Delgado, R.; T. Barrera y F. Gámez.** (2011). Tecnología para evaluar el impacto que producen algunas propiedades físicas y químicas del suelo en el sistema radical. *INIADivulga*, 20: (en prensa).
- Gamez F.** 2009. Efecto del tipo de labranza sobre el crecimiento del frijol Tuy (*Vigna Unguiculata* (L) WALP) en un suelo de Maracay. FAGRO_UCV. Maracay. 28 páginas.
- Gregory, P.J.** (1988). Growth and functioning of plant roots, p. 113-167. *En:* A. Wild (Ed.). Russell's soil conditions and plant growth. (11a ed.). Longman Scientific and Technical. Inglaterra.
- Hidalgo E., y J. Avilán.** 1955. Estudio agrologico detallado de los campos experimentales del centro de Investigaciones Agronómicas. Ministerio de Agricultura y Cría. Dirección de Agricultura, C.I.A. Departamento de Suelos, Maracay.
- Jones, C.A.; W.L. Bland, J.T. Ritchie, y J.R. Williams.** (1991). Simulation of root growth, p. 91-123. *En:* Modeling plant and soil systems, J. Hanks y J.T. Ritchie (Eds.) Agronomy Series 31. ASA, CSSA, SSSA Publishers. Madison, WI. EE.UU. p. 545.
- Marschner, H.** (1997). Mineral nutrition of higher plants. (2a ed.). Academic Press. San Diego, CA. EE.UU. 889 páginas.
- Miller, D.E.** (1986). Root systems in relation to stress tolerance. *HortScience* 21, (4):963-970.
- Mollier, A. y S. Pellerin.** (1999). Maize root growth and development as influenced by phosphorus deficiency. *J. Exp. Bot.*, 50: 487-497.
- Sucre, R.; L. Meneses, N. Planchart, y J.A. Vásquez.** (1979). Caracterización física de los suelos del campo Experimental del CENIAP. CENIAP-FONAIAP. Boletín Técnico 10. 18 páginas.
- Thornley J.H.M.** 1998. Grassland Dynamics: An ecosystem simulation model. University Press, Cambridge, UK.
- Veihmeyer, F.J. y A.H. Hendrickson.** (1948). Soil density and root penetration. *Soil Science*, 65:487-493
- Wagner, M.; I. Avila, H. Pacheco, G. Medina y O. Haddad.** (1985). Evaluación del método de riego por aspersión en los valles de Taiguaguay y Tucutunemo y su comparación con un modelo de riego. *Agron. Trop.*, 35:51-62.