

## Modelación de la eficiencia del uso del agua en maíz y frijol en diferentes condiciones de suelos y disponibilidad hídrica

### *Modelling of the efficiency of the use of the water in corn and bean in different hydric availability and soil conditions*

Teresa López<sup>1</sup>, G. Cid<sup>1</sup>, Felicita González<sup>2</sup>, J. Herrera<sup>1</sup> y Yoíma Chaterlán<sup>2</sup>

**RESUMEN.** En el presente trabajo se utilizan los resultados de herramientas de simulación aplicadas anteriormente para la predicción del rendimiento en los cultivos de maíz y frijol ante diferentes manejos hídricos así como para la cuantificación de la eficiencia de almacenamiento del agua en diferentes tipos de suelos de Cuba. Estos resultados se integran para modelar la eficiencia del uso del agua por los cultivos de maíz y frijol en diferentes condiciones de disponibilidad hídrica y de suelos, lo cual contribuiría a la toma de decisiones de manejo agrícola en diferentes regiones del país y ante condiciones cambiantes de las precipitaciones. El análisis integrado de los resultados permite definir los consumos de agua que maximizan la productividad de los cultivos estudiados, 420 mm y 1,2 kg/m<sup>3</sup> para el caso del maíz y 314 mm y 0,93 kg/m<sup>3</sup> para el frijol, y definen que debe garantizarse que se consuma en la fase de floración-fructificación de ambos cultivos el 90% de estos consumos óptimos. Por otra parte las pérdidas de agua por concepto de eficiencia del riego, para las condiciones medias del periodo seco en Cuba, alcanzan como media 28 y 20 mm por cada % de reducción del 90% de la eficiencia del sistema de riego en suelos arcillosos y medios respectivamente y estas pérdidas aumentan en un 35% para suelos arenosos. **Palabras clave:** simulación productividad del agua consumida, perdidas de agua por eficiencia riego.

**ABSTRACT.** This paper use previous results of simulation tools applied to prediction of water response in maize and beans crops and soil water storage efficiency in different Cuban soils, for simulate water use efficiency of maize and beans crops in different conditions of hydric availability and soils, to contribute to taking decisions in agricultural management in different agricultural regions and different and changing rain conditions. The integrated analysis of results let's to define the optimum water consumes that maximize the water productivity in studied crops, 420 mm and 1,2 kg/m<sup>3</sup> for maize, 314 mm and 0,93 kg/m<sup>3</sup> for beans, and define that in the period of flowering-fructification of both crops it should be consumed 90% of optimum water consume. In other side the water losses for irrigation efficiency for media conditions of dry period in Cuba are about 28 y 20 mm for each % efficiency system reduction from 90% in clay and mediums soils respectively, and this loses increase in 35% for sand soils.

**Keywords:** water productivity simulation, water losses for irrigation efficiency.

<sup>1</sup> Dr.C., Inv. Titular, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), Carretera de Fontanar, km 2½, Reparto Abel Santamaría, Boyeros, La Habana, Cuba, Teléf.: (53) (7) 691-1038, 691-2665, 691 2533, e-mail: [teresa@iagric.cu](mailto:teresa@iagric.cu).

<sup>2</sup> M.Sc., Investigador Auxiliar, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric).

Recibido 15/12/10, aprobado 25/11/11, trabajo 00/11, investigación.

## INTRODUCCIÓN

En nuestro país sin riego no es posible obtener rendimientos agrícolas óptimos al menos durante seis meses en el año, y aunque más del 50% del agua aprovechable para la agricultura se dedica a esta actividad según un Informe elaborado por la Dirección de Ingeniería Agropecuaria (Cuba, Ministerio de la Agricultura (2010), aún así resulta insuficiente, en relación con las áreas potencialmente cultivables.

La baja eficiencia en la operación de los sistemas de riego constituye uno de los problemas más agudos que afectan a las áreas bajo riego en Cuba y en muchos otros países que desarrollan una agricultura de regadío. En el 60 Encuentro del Consejo Ejecutivo de la Comisión Internacional de Riego y Drenaje y la 5<sup>ta</sup> Conferencia Regional Asiática este fue un aspecto analizado y se constató un aumento significativo de la eficiencia del riego (hasta en un 20%) solo con mejoras en la

## MATERIALES Y MÉTODOS

Primeramente se utilizaron los resultados de los trabajos de simulación con el modelo STICS de Brisson *et al.* (1997) desarrollados por López *et al.* (2001, 2003, 2010a) para los cultivos de maíz y frijol sobre suelos Ferralíticos que definieron funciones de producción para los cultivos de maíz y frijol en función de diferentes cantidades de agua total consumida por evapotranspiración ( $E_t$ ) así como las relaciones observadas entre el rendimiento y el porcentaje que representan de la  $E_t$  total, la evapotranspiración en la fase de floración-fructificación. Estos trabajos definen el comportamiento de estas funciones para las variedades de maíz A-7926, A-7931, P-7926, P-7928, suwan 8126-29, con rendimientos entre 2 y 6 t/ha y para las variedades de frijol negro/ cueto 259-270, con rendimientos entre 1 y 3 t/ha.

A partir de las ecuaciones obtenidas en estos trabajos se determinó el rendimiento a obtener para los cultivos de maíz y frijol en función de diferentes cantidades de agua total consumida,  $E_t$ , y a partir de estos valores se determinó la productividad del uso del agua (kg de rendimiento por  $m^3$  de agua consumida) en cada condición de  $E_t$ , según lo definido por González *et al.* (2010, 2011). Los valores de rendimiento y  $E_t$  óptimos se definieron a partir del máximo de la productividad para cada cultivo.

También se definió la relación entre la reducción en el rendimiento con respecto al máximo,  $\% Rend_{max}$ , en función del porcentaje del agua consumida en la fase de floración fructificación,

operación de los sistemas y el manejo del riego (Madramootoo y Helen Fyles, 2010; Mukesh y Kapadia, 2010).

El presente trabajo pretende utilizar herramientas de modelación obtenidas anteriormente a partir de la utilización del modelo de simulación de cultivo STICS por Brisson *et al.* (1997) y de la modelación del proceso de redistribución de la humedad del suelo hasta la profundidad radical efectiva media de la mayoría de los cultivos de interés agrícola obtenidas por López *et al.* (2001, 2003, 2010a,b), para definir indicadores de la eficiencia del uso del agua por los cultivos de maíz y frijol en diferentes condiciones de disponibilidad de agua y tipos de suelos, lo cual contribuiría a la toma de decisiones de manejo agrícola en diferentes regiones del país y ante condiciones cambiantes de las precipitaciones.

$\% E_{t_{floración-fructificación}}$ , como fase fundamental del cultivo, lo que permite definir la distribución del agua óptima durante el ciclo del cultivo.

Por otra parte se utilizaron los valores modelados por López *et al.* (2010b) de la eficiencia de aplicación del agua de riego,  $E_a$ , asumiendo diferentes valores de eficiencia del sistema de riego,  $E_f$ , para tiempos de riego medios de 4h y para una lámina aplicada correspondiente al límite productivo del 85% de la capacidad de campo en diferentes tipos de suelos, promediados según el tipo de textura y funcionamiento hídrico en: *Arcillosos, drenaje insuficiente, Arcillosos-Medios, buen drenaje, Arenosos, muy buen drenaje* según Cid *et al.* (2011).

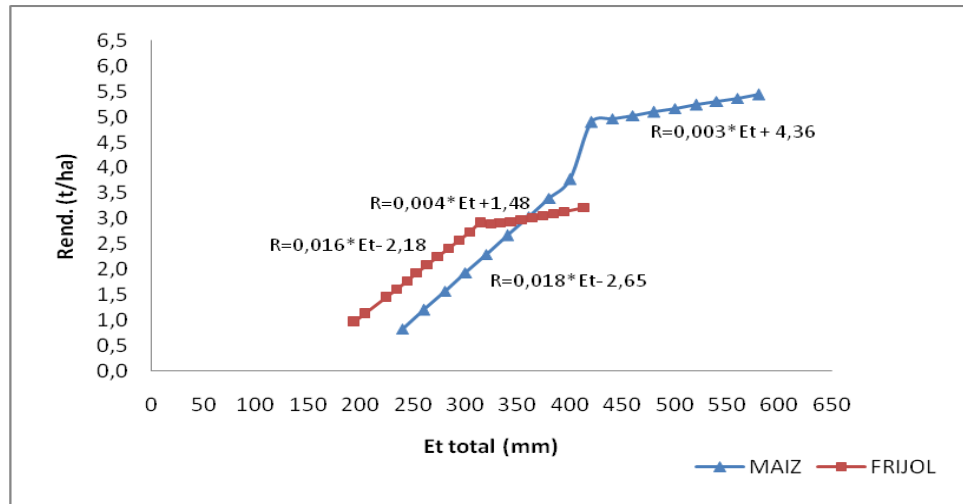
Estos valores de  $E_a$  permitieron definir los valores de norma total máxima a aplicar por riego para cada cultivo,  $N_{t_{max}}$ , como la relación ( $E_t/E_a$ ). Esta norma total de riego,  $N_t$ , se calculó también para distintos porcentajes de aporte de la lluvia aprovechable,  $\% Aporte Pa$ , desde el 90% hasta el 0%, como la diferencia entre ( $N_{t_{max}} (N_{t_{max}} \cdot \% Pa / 100)$ ).

Por último se cuantificaron las pérdidas de agua por eficiencia del riego,  $P_{E_{friegos}}$ , en cada caso como la diferencia ( $N_t - E_t$ ) para cada condición de suelo y eficiencia del sistema,  $E_f$ , considerado así como la relación pérdidas de agua por porcentaje de decrecimiento de la eficiencia del sistema para cada condición de disponibilidad hídrica,  $\Delta P_{E_{friegos}}/\Delta E_f$ .

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1 se presentan las funciones de producción modeladas anteriormente para los cultivos de Maíz y Frijol a partir de la herramienta de simulación STICS (López *et al.*, 2001, 2003). Como puede observarse ambas funciones tienen

evapotranspiración total del mismo (Et total), y a partir de un valor determinado de la evapotranspiración este aumento del rendimiento se hace menor y tiende a estabilizarse. Para el maíz este valor está alrededor de los 400-450 mm



en general el mismo comportamiento, un crecimiento lineal del rendimiento con el aumento del consumo del agua por la planta, reflejado en la

con rendimiento de 5,5–6 t/ha y para el frijol entre los 300-350 mm con rendimientos entre 2,5-3 t/ha.

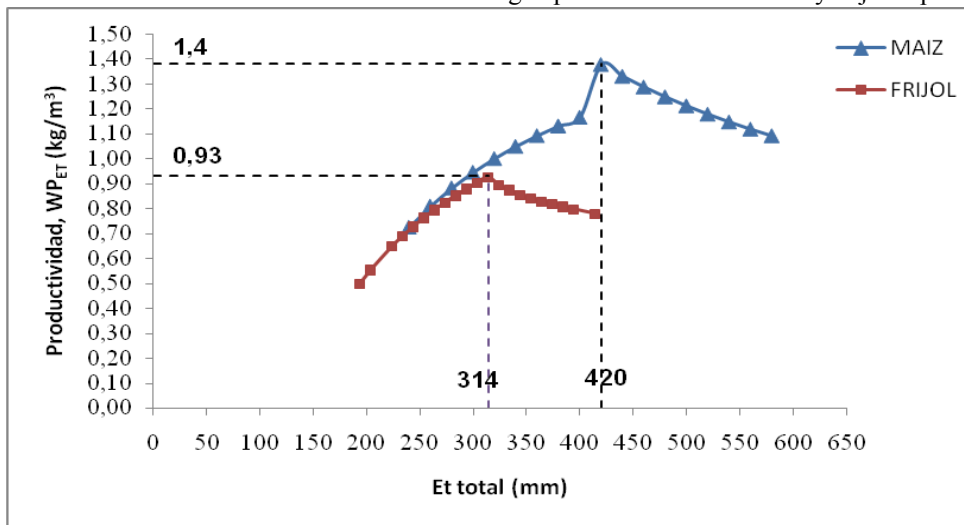
FIGURA 1. Funciones de producción, *Rendimiento vs. Agua total consumida (Et)*, modeladas para los cultivos de maíz y frijol (López *et al.*, 2003, 2010).

Aunque ambas funciones tienen la misma tendencia, para el cultivo del maíz el rango de valores del rendimiento y la Et son superiores que para el Frijol, no obstante para consumos por debajo de los 350 mm el incremento del rendimiento es mayor para el frijol que para el Maíz, lo que indica un valor crítico del consumo de agua para el maíz.

respecto a la Et total. Como se observa en ambos casos existe un valor máximo de la productividad a partir del cual el aumento del consumo de agua por la planta implica un decrecimiento de la productividad, o sea del rendimiento por m<sup>3</sup> de agua consumida. Para el caso del maíz este punto corresponde a 420 mm para una productividad máxima de 1,2 kg/m<sup>3</sup> y para el frijol de 314 mm para una productividad máxima de 0,93 kg/m<sup>3</sup>.

Por su parte la Figura 2 muestra la modelación de la productividad del agua consumida,  $WP_{Et}$ , con

FIGURA 2. Modelación de la eficiencia del uso del agua por los cultivos de maíz y frijol expresada a



través de la modelación de la relación *Productividad del agua,  $WP_{Et}$ , vs. Agua total consumida (Et total)*.

Los valores de productividad óptimos para el maíz y el frijol obtenidos a partir de las funciones agua rendimiento modeladas están en el rango reportado por González *et al.* (2011), a partir de los datos de experimentaciones de campo realizadas en distintas condiciones de suelo y clima de Cuba, los cuales reportan para el frijol valores de productividad entre 0,53 y 0,97 para un rango de  $E_t$  de 280 a 372 mm con valores de rendimiento entre 1,6 y 2,6 t/ha y para el maíz los valores de productividad están entre 0,92 y 2,53 para un rango de  $E_t$  de 300 a 490 mm, con valores de rendimiento entre 3,9 y 6,22 t/ha.

No obstante, como se puede apreciar la modelación de las funciones de producción y de productividad del agua consumida a través de una herramienta de simulación permite abarcar un rango mayor de consumos de agua y su efecto sobre el rendimiento, cuestión que se dificulta a través de las experimentaciones de campo, donde por lo general no se encuentran valores de  $E_t$  en los rangos de consumo superiores a los potenciales o máximos ni inferiores a los mínimos o críticos para la rentabilidad del cultivo. De aquí la utilidad de estas herramientas para la definición de los valores óptimos de eficiencia del consumo

de agua por el cultivo, expresada a través de la productividad del agua consumida.

En la Figura 3 por su parte se utilizan los resultados anteriores de la modelación del rendimiento de estos cultivos con respecto a la distribución del consumo de agua total por fases del cultivo (López *et al.*, 2001, 2003, 2010a) para ilustrar el efecto sobre la reducción del rendimiento con respecto al valor óptimo, en función del porcentaje que representa el consumo de agua de la fase principal del cultivo,  $E_{t \text{ floración fructificación}}$ , del total del consumo óptimo.

Como se puede observar para ambos cultivos la reducción del rendimiento se hace mínima cuando en la fase de floración fructificación se consume el 90% del valor total de la  $E_t$ . No obstante, para el cultivo del frijol la reducción del consumo en esta fase tiene un efecto menos brusco que para el cultivo del maíz. Para este último una reducción del consumo en esta fase correspondiente al 80% del valor de  $E_t$  total, reduce el rendimiento hasta el 70% de su valor óptimo, mientras que en el frijol solo hasta el 90%. Este comportamiento indica nuevamente la mayor sensibilidad del maíz al estrés hídrico y en particular en su fase fenológica fundamental.

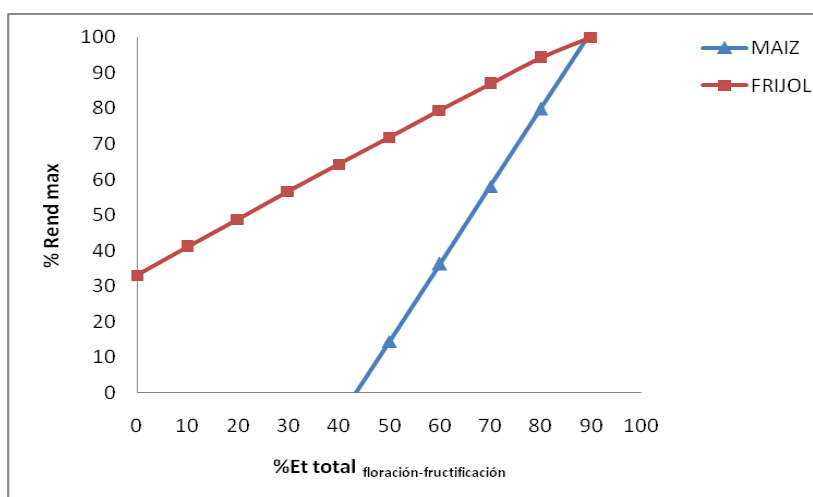


FIGURA 3. Modelación del porcentaje de reducción del rendimiento con respecto al máximo,  $\%Rend_{max}$  vs. porcentaje del agua total consumida en la fase de floración fructificación,  $\%Et_{total \text{ floración fructificación}}$  para los cultivos de maíz y frijol.

Para poder cuantificar las cantidades o normas de riego totales a aplicar en estos cultivos se consideraron los valores de eficiencia de aplicación del riego modelados en trabajos anteriores para diferentes condiciones de suelos y considerando distintas eficiencias de los sistemas de riego (López *et al.* 2010). Como se puede apreciar en la Tabla 1 se promedian los valores de eficiencias de almacenamiento del agua en el suelo,  $E_{falmac}$  hasta una profundidad radical media de 40cm para los suelos agrupados por tipos de textura y sus características de drenaje interno, así se asumen valores de  $E_{falmac}$  del 99% para los

suelos de textura arcillosa y con drenaje interno deficiente, del 97% para los suelos arcillosos y medios con buen drenaje interno y del 85% para los suelos arenosos, con muy buen drenaje interno.

Con estos valores medios de  $E_{falmac}$  se definen los valores de eficiencia de aplicación del agua de riego,  $E_a$ , para distintos valores de eficiencia del sistema,  $E_f$ , desde 90% hasta 75%. El rango de  $E_a$  es de 89%-74% en suelos arcillosos con drenaje insuficiente, mientras que para los suelos arcillosos y medios con buen drenaje el rango de

$E_a$  está entre 87%-73% y para los suelos arenosos este rango oscila entre 76%-63%.

En la Figura 4 se resumen los valores de normas totales máximas a aplicar por riego,  $Nt_{max}$ , en ambos cultivos para una condición de cero aporte de las precipitaciones efectivas,  $Pa$ , al consumo total del cultivo en distintos tipos de suelos. Como se puede observar para el cultivo del maíz las normas totales máximas de riego están entre 471–577 mm para los suelos arcillosos y medios y entre 556–667 mm para los suelos arenosos. Por su parte para el frijol estas normas máximas están entre 352–432 mm para los suelos arcillosos y medios y entre 415–498 mm para los suelos arenosos. En ambos casos el aumento de la norma máxima total es del 20% para una reducción de la eficiencia del sistema de riego del 90% al 75%.

La Figura 5 por su parte muestra los valores de pérdidas de agua máximas por eficiencia del riego con respecto al consumo de agua total óptimo de cada cultivo estudiado. Como se puede apreciar las pérdidas de agua para el cultivo del maíz para variaciones de la eficiencia del sistema de riego desde el 90% hasta el 75%, en suelos arcillosos y medios, pueden alcanzar entre 51 y 157 mm, mientras que en suelos arenosos estas pérdidas están entre 136 y 247 mm.

Para el frijol las pérdidas son menores y alcanzan un rango de 38 a 118 mm para variaciones de la

eficiencia del sistema de riego desde el 90% hasta el 75%, en suelos arcillosos y medios y de 101–184 mm en suelos arenosos.

Por último el análisis de las pérdidas de agua por efecto de la reducción de la eficiencia del sistema de riego para distintas condiciones de aporte de las precipitaciones efectivas al consumo de agua por el cultivo, se ilustran en la Figura 6. Como se puede ver para condiciones de mínimos aportes de las precipitaciones al consumo de agua del cultivo (entre 10-20%), como es característico del periodo seco en las condiciones de Cuba, las pérdidas de agua por eficiencia del riego en el cultivo del frijol alcanzan como media 20 mm por cada % de reducción desde el 90% de la eficiencia del sistema de riego, para los suelos arcillosos y medios, y llegan hasta 27 mm en suelos arenosos. Por otra parte para el cultivo del maíz estas pérdidas son mayores, alcanzando valores medios de 28 mm por cada % de reducción de la eficiencia del sistema de riego para los suelos arcillosos y medios, y llegan hasta 37 mm en suelos arenosos.

Para condiciones de mayor aporte de las precipitaciones al consumo total de agua por el cultivo (mayor del 40%), estas pérdidas se reducen significativamente, oscilando entre 7–14 mm por cada % de reducción de la eficiencia del sistema de riego

**TABLA 1. Valores medios\* de eficiencia de almacenamiento del agua en el suelo,  $E_{almac}$  y eficiencia de aplicación del riego,  $E_a$ , agrupados por tipos de suelos y para diferentes valores de eficiencia del sistema de riego,  $E_f$**

No. y Tipos de Suelos (referencia López <i>et al.</i> , 2010)	Tipos agrupados por textura y función. hídrico	$E_{almac}$ Media (%)	$E_a$			
			$E_f$ 75%	$E_f$ 80%	$E_f$ 85%	$E_f$ 90%
<b>IX</b> Oscuro Plástico Gleyzado	Arcillosos (drenaje insuficiente)	99,1	74,3	79,3	84,2	89,2
<b>X</b> Oscuro Plástico Gleysoso						
<b>XI</b> Oscuro Plástico no Gleyzado						
<b>XII</b> Gley Húmico						
<b>XIII</b> Gley Ferralítico	Arcillosos- Medios (buen drenaje)	97,0	72,8	77,6	82,5	87,3
<b>XIV</b> Gley Amarillento						
<b>II</b> Ferralítico Rojo						
<b>V</b> Ferralítico Pardo Rojizo	Arenoso (muy buen drenaje)	84,7	63,5	67,8	72,0	76,2
<b>VII</b> Pardo con Carbonatos						
<b>XVI</b> Arenoso						

\* Los valores medios se consideraron a partir de los valores definidos por López *et al.* (2010) para una lámina de riego correspondiente al 85% de la capacidad de campo y un tiempo de aplicación del riego de 4h.

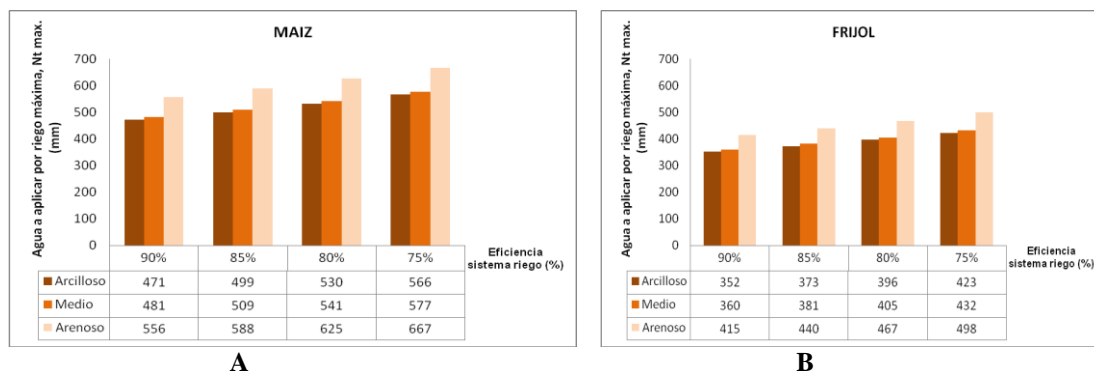


FIGURA 4. Normas de riego máximas a aplicar estimadas para diferentes condiciones de suelos y de eficiencias del sistema de riego: A-en el cultivo del maíz, B-en el cultivo del frijol.

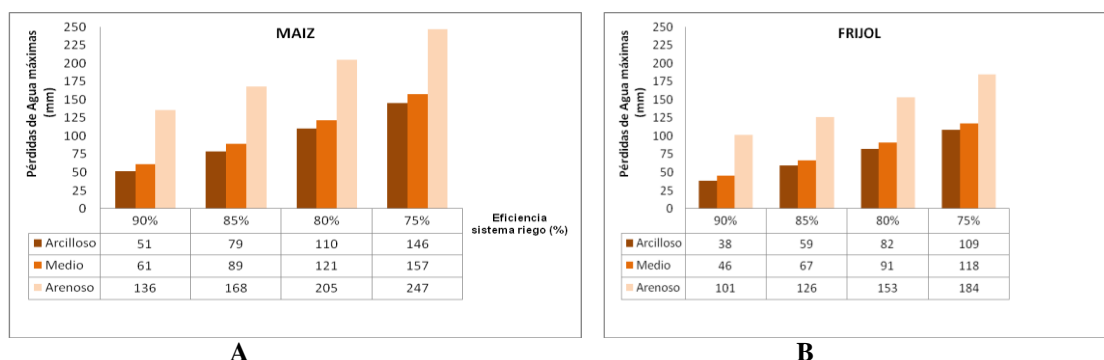


FIGURA 5. Pérdidas de agua aplicada máximas estimadas para diferentes condiciones de suelos y de eficiencias del sistema de riego: A-en el cultivo del maíz, B-en el cultivo del frijol.

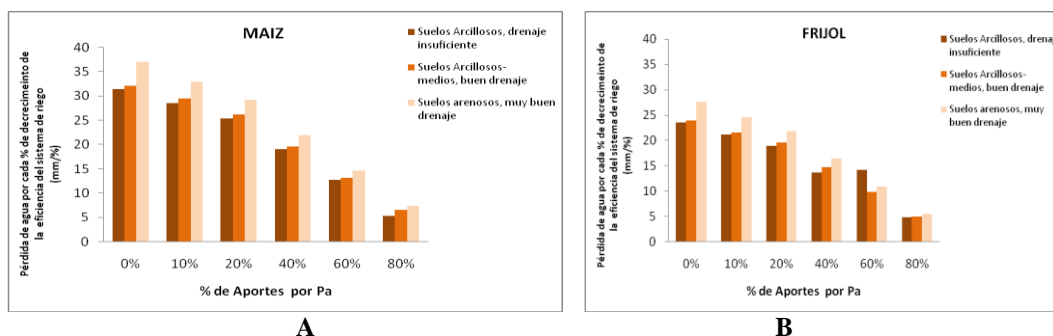


FIGURA 6. Pérdidas de agua estimadas por cada porcentaje de decrecimiento de la eficiencia del sistema de riego para diferentes condiciones de aporte de las precipitaciones y en diferentes tipos de suelos: A-en el cultivo del maíz, B-en el cultivo del frijol.

**CONSIDERACIONES FINALES**

El análisis integrado de estos resultados permite definir los consumos de agua que maximizan la productividad de los cultivos estudiados, 420 mm y 1,2 kg/m<sup>3</sup> para el caso del maíz y 314 mm y 0,93 kg/m<sup>3</sup> para el frijol.

Por otra parte definen que debe garantizarse que se consuma en la fase de floración-fructificación de ambos cultivos el 90% de estos consumos óptimos, no obstante para el caso del frijol un consumo del 80% de la *Et total* en esta fase solo

reduce el rendimiento óptimo en un 10% mientras que en el maíz se reduce en un 30%.

Por otra parte las normas de riego totales máximas están entre 471–577 mm para el maíz y 352–432 mm para el frijol, en suelos arcillosos y medios, y entre 556–667 mm para el maíz y 415–498 mm para el frijol en suelos arenosos. En ambos casos el aumento de la norma máxima total es del 20% para una reducción de la eficiencia del sistema de riego del 90% al 75%.

Por último las pérdidas de agua por concepto de eficiencia del riego, para condiciones de 10-20% de aporte de las precipitaciones al consumo de agua total del cultivo, como es característico del periodo seco en las condiciones de Cuba, alcanzan

como media 28 y 20 mm por cada % de reducción del 90% de la eficiencia del sistema de riego en suelos arcillosos y medios, y estas pérdidas aumentan en un 35% para suelos arenosos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BRISSON, N. ; M. BRUNO ; D. RIPOCHE; M.H. JEUFFROY; F. RUGET; B. NICOULLAUD; P. GATE; F. DEVIENNE; R. ANTONIOLETTI; C. DURR; N. BEAUDOIN; S. RECOUS; X. TAYOT; D. PLENETE; G. RICHARD; P. CELLIER; J.M. MACHET; J.M. MEYNARD; DEL"ECOLLE and R. STICS: "A generic model of crops, their water and nitrogen balances. Application to wheat and maize. I Theory and parameterization", *Agronomie*, 18: 311-346, 1998.
2. CID, G.; T. LÓPEZ; F. GONZÁLEZ; J. HERRERA Y M.E. RUIZ: "Propiedades físicas de algunos suelos de Cuba y su uso en modelos de simulación", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 20(2): 42-46, 2011.
3. CUBA, MINISTERIO DE LA AGRICULTURA: *Balance de Uso del Agua para el Riego. Informe anual elaborado por Dir. Ingeniería Agropecuaria*, MINAG, La Habana, Cuba, 2010.
4. GONZÁLEZ, F.; J. HERRERA Y T. LÓPEZ: "Productividad del agua en maíz, soya y sorgo en suelo Ferralítico Rojo del sur de La Habana". *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 19(1): 65-72, 2010.
5. GONZÁLEZ, F.; J. HERRERA, T.LÓPEZ; y G. CID: "Productividad del agua en el cultivo de maíz en condiciones del sur de la Habana", *Revista Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 2(2): 81-86, julio-diciembre (Chapingo, México), 2011
6. LÓPEZ, T.; F. GONZÁLEZ; Y. CHATERLÁN; G. CID; G. DUEÑAS y A. CASANOVA: *Los modelos de simulación como herramienta eficaz para el estudio del manejo del agua y la fertilización en diferentes sistemas de cultivos agrícolas en el sur de La Habana*, pp. 20-27, Tecnologías para o uso sustentável da água em regadió, Edições Colibri e CEER-Centro da Engenharia dos Biosistemas, ISBN 978-989-689-016-2, 2010a.
7. LÓPEZ, T.; G. CID; J. HERRERA y F. GONZÁLEZ: *Eficiencia del almacenamiento del agua en suelos agrícolas irrigados de Cuba*, [en línea] Sitio Web de la representación de la FAO en Cuba, Disponible en: <http://bva.fao.cu/>. [Consulta diciembre 2010b].
8. LÓPEZ, T.; F. GONZÁLEZ; G. CID Y G. DUEÑAS: *Informe final del SubProyecto 11-06: Mejoramiento del manejo del agua y la fertilización nitrogenada en suelos Ferralíticos del sur de La Habana*, Fondo Inst. Inv. Riego y Drenaje, La Habana, Cuba, 2003.
9. LÓPEZ, T.; G. DUEÑAS; J. SIERRA; H. OZIER-LAFONTAINE; F. GONZÁLEZ; E. GIRALT; Y. CHATERLÁN y G. CID: "Simulación del manejo del riego y la fertilización nitrogenada del maíz sobre suelo Ferralítico del sur de La Habana", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 10(3): 59-66, 2001.
10. MADRAMOOTOO, CH. A. Y H. FYLES: "Irrigation in the context of today's global food crisis", *Irrigation and Drainage*. *Irrig. and Drain*, 59: 40-52, 2010.
11. MUKESH, B. J. and V. P. KAPADIA: Sharing water in the 21st century: rethinking the rationale?. *Irrigation and Drainage*, *Irrig. and Drain*, 59: 92-101, 2010.