

# PRODUCTIVIDAD DEL AGUA EN EL CULTIVO DE MAÍZ EN CONDICIONES DEL SUR DE LA HABANA

## TREATMENT OPTIONS FOR WASTEWATER OF THREE SWINE FARMS

**Felicita González-Robaina\* ; Julián Herrera-Puebla; Teresa López-Seijas; Greco Cid-Lazo**

Departamento Investigaciones, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola. Apartado Postal 6090. Ciudad Habana. Cuba. Telefax 6911038.  
Correo-e: felicit@iird.cu, (\*Autor para correspondencia)

### RESUMEN

El alto grado con el que el agua condiciona la producción agrícola, así como la capacidad para alimentar a la población, lleva a la necesidad de estudiar el problema de la productividad del agua. El estudio de las funciones agua-rendimiento y su aplicación en la planeación del uso del agua es una vía estratégica importante para lograr el incremento de la productividad. Utilizando datos de 12 experimentos realizados en la Estación Experimental del Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje (IIRD), localizada en Alquizar, al sur de La Habana (suelo ferralítico rojo compactado), y con ayuda de herramientas de análisis de regresión, en este trabajo se calculó la productividad del agua y el factor de respuesta del rendimiento de grano ( $K_y$ ) en el cultivo del maíz. El rango de productividad de agua consumida ( $WP_{ET}$ ) varió entre 0.9-2.5  $kg \cdot m^{-3}$  mientras que la productividad del agua por riego ( $WP_I$ ) alcanzó un valor de 16.43  $kg \cdot m^{-3}$  para un volumen de agua aplicada de 266.8  $m^3$ . El intervalo para la productividad del agua total  $WP_T$  fue más amplio que lo reportado por FAO y varió entre 0.86 y 2.9  $kg \cdot m^{-3}$ . Por cada metro cúbico de agua total, el maíz produce en promedio 1.93 kg. La pendiente  $K_y$  en la función de producción encontrada para el maíz fue de 1.67 en el invierno y de 2.3 en el verano. En las dos épocas la pérdida relativa de rendimiento resultó más que proporcional al déficit hídrico. Para un déficit hídrico planificado de un 20 % en el maíz se puede esperar una pérdida relativa de rendimiento de 33.4 y 46.2 %, en invierno y verano, respectivamente.

**Palabras clave adicionales:** *Zea Mays* L., factor de respuesta del rendimiento, déficit hídrico.

### ABSTRACT

The high level at which water affects agricultural production and its capability of the latter to feed populations leads to the need of studying the problem of water productivity. The study of the crop water production function and its application in planning water use is an important strategy to increase water productivity. Data of 12 experiments carried out at the Irrigation and Draining Research Station, located in Alquizar at south of Havana Province (red ferralitic soils), and regression tools were used to estimate the crop water productivity (WP) and crop yield response factor ( $K_y$ ) for corn. Crop water productivity based on evapotranspiration ( $WP_{ET}$ ) ranges between 0.9 and 2.5  $kg \cdot m^{-3}$ , while the  $WP_I$  was 16.43  $kg \cdot m^{-3}$  when 266.8  $m^3 \cdot ha^{-1}$  of irrigation water were applied. The range 0.86 to 2.9  $kg \cdot m^{-3}$  of  $WP_T$  obtained for corn was in a wider range than the that reported by FAO for this crop. Every cubic meter of total water used in corn yield 1.93 kg. The slope ( $K_y$ ) of the corn water productivity function was 1.67 in winter and 2.31 in summer. The relative loss of yield was proportional to irrigation deficit in both seasons. For a planned irrigation deficit of 20 % for corn it will expect a relative loss of 33.4 and 46.2 % of yield, in winter and summer respectively.

**Additional key words:** *Zea Mays* L., crop yield response factor, irrigation deficit.

## INTRODUCCIÓN

Para casi todas las regiones del mundo, aumentar la productividad del agua usada en la agricultura, en vez de adjudicar más agua, constituye el mayor potencial para mejorar la seguridad alimenticia y reducir la pobreza al costo ambiental más bajo (Rijsberman *et al.*, 2006; IWMI, 2009). El mundo se enfrenta a un nuevo reto de producir más alimento con menos agua. Una de las estrategias más importantes en este sentido es el incremento de la productividad del agua en la agricultura a través del estudio de las funciones agua rendimiento (Molden *et al.*, 2003; Dehghanisanij *et al.*, 2009).

Las diferentes formas que puede tomar la curva de la función agua/rendimiento en dependencia de la forma en que se exprese la cantidad de agua utilizada (evapotranspiración, riego, agua total) ha sido discutida por Santa Olalla y Valero (1993) quienes realizaron una completa revisión sobre el tema y llegaron a la conclusión de que la forma de la función y la pendiente de la misma son únicas para cada cultivo y no se puede aplicar a otras áreas distintas de aquéllas en que se han obtenido. Los mismos autores, al igual que Stewart *et al.* (1977) y Dooroombos y Kassam (1979), plantean que la expresión de estos datos en forma relativa permite un análisis más general del problema, la extrapolación de las funciones de producción a distintas áreas y permite comparar diferencias entre cultivos. Utilizando datos de diferentes experimentos realizados en la Estación Experimental del Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje (IIRD), se calculó en el presente trabajo la productividad del agua (WP) y el factor de respuesta al suministro de agua para maíz de grano en condiciones del sur de La Habana.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó una base de datos de 12 experimentos realizados durante las épocas de invierno (diciembre-marzo) y verano (abril-agosto) en el período 1980-1990 en la Estación Experimental del Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje (IIRD), localizada en el sur de La Habana (22° 47' N, 82° 36' W), Cuba, con una altura sobre el nivel del mar de 6 m y con un sistema de riego por surcos.

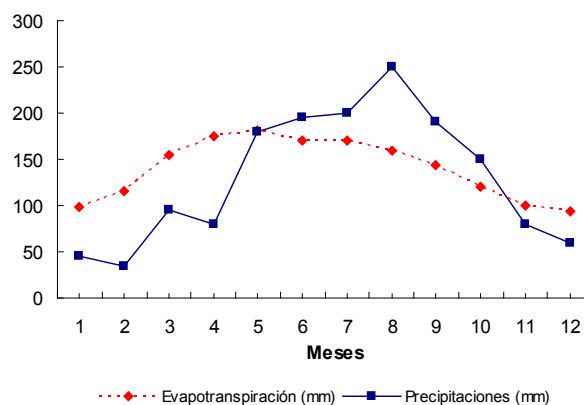
Estos experimentos se llevaron a cabo con el objetivo de estudiar las necesidades hídricas y la respuesta al agua de cinco variedades de maíz (T66, Suwan 8126, A-7926, A-7931 y P-7928). Se aplicaron cinco tratamientos con diferentes límites productivos o criterios de riego (85 y 75 % de la humedad correspondiente a la capacidad de campo, seco y combinaciones de éstos en diferentes fases del cultivo) en un diseño experimental en bloques al azar con cuatro réplicas, y una superficie experimental total de 1,123 m<sup>2</sup>. Los datos de rendimiento fueron sometidos a análisis de varianza y prueba de Duncan a un 5 % de probabilidad para la comparación de las medias.

El suelo de la estación es ferralítico rojo compactado (Instituto de Suelos, 1996). Desde el punto de vista hidropedológico el suelo presenta un comportamiento bastante similar en todo el

perfil como resultado de la homogeneidad en la calidad y cantidad de la arcilla predominante, así como en la estabilidad de sus agregados (Cid, 1995) (Cuadro 1).

Una caracterización climática completa de la zona de estudio fue realizada por Bernal (1995). El clima está influenciado principalmente por las lluvias con un valor medio anual de 1,432 mm, de los cuales el 78 % (1,116.7 mm) corresponden al período lluvioso (mayo-octubre) y los 315.3 mm restantes al período seco (noviembre-abril).

Otros factores como la temperatura y sus variaciones no ejercen mayor influencia en la caracterización climática de la zona en estudio ya que éstas no presentan grandes diferencias durante el año. Mientras que la curva de la evapotranspiración potencial (ET) mantiene una tendencia similar a la evaporación, en los meses secos es relativamente baja pero aumenta rápidamente en el inicio de la época de lluvia. El promedio anual de ET es de 1,682.7 mm y los máximos y mínimos corresponden a los meses de abril y mayo (175.2 y 181.0 mm) y diciembre y enero (93.9 y 98.0 mm), respectivamente (Figura 1).



**FIGURA 1. Distribución mensual del balance de precipitación y evapotranspiración para el período 1980 – 1990.**

El balance de lluvia y evapotranspiración de la zona durante el período seco muestra un balance negativo, por lo que el riego es imprescindible para la obtención de buenos rendimientos agrícolas.

La ET y la lluvia aprovechable fueron calculadas a partir de balances hídricos basados en el seguimiento de la dinámica de humedad del suelo por el método gravimétrico y la evaporación en un evaporímetro clase "A". Una descripción más detallada de los procedimientos experimentales para la estimación de los consumos de agua aparece en los trabajos publicados por los autores de los cuales se utilizaron los datos (Giralt, 1984; Sánchez y Ramírez, 1988).

## Productividad del agua

En las condiciones agronómicas del cultivo en campo existen relaciones generalmente lineales y relativamente

**CUADRO 1. Análisis granulométrico, capacidad de campo (Cc), densidad aparente (Da) para la Cc, velocidad de infiltración básica en todo el perfil (Inf. básica), conductividad hidráulica saturada (K sat), contenido de materia orgánica (MO), capacidad de intercambio catiónico (V) y pH en cloruro de potasio en el perfil del suelo Ferralítico Rojo compactado.**

Prof (cm)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Cc (cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	Da a Cc (g·cm <sup>3</sup> )	Inf. básica m·día <sup>-1</sup>	K sat (cm·hr <sup>-1</sup> )	MO (%)	V (%)	pH (CIK)
20	57.4	21.7	20.9	0.394	1.18	4.9	102.3	3.6	76	5.5
40	61.8	20.5	17.7	0.431	1.28		60.5	1.7	87	5.8
60	62.8	14.3	28.9	0.397	1.20		47.8	0.9	80	5.7
80	61.4	18.3	20.3	0.396	1.20		39.1	0.8	75	5.9

estables, que ligan el rendimiento real de grano (R) con la evapotranspiración relativa ( $ET/ET_{\max}$ ) de una especie:

$$R = a\left(\frac{ET}{ET_{\max}}\right) \pm b \quad (1)$$

Donde R es el rendimiento o producción total de grano (t·ha<sup>-1</sup>), ET la evapotranspiración real (mm),  $ET_{\max}$  la evapotranspiración máxima obtenida en el mejor tratamiento (mm), a y b coeficientes de regresión.

Con ayuda de esta relación se puede estimar el potencial de producción para una especie o variedad dada a partir de datos experimentales obtenidos durante varios años, así como calcular la productividad agronómica del agua, un elemento clave en el planeamiento del suministro de agua a los cultivos (Puech y Hernández, 1973; Puech, *et al.*, 1976). Cuando las condiciones están cerca del óptimo ( $ET/ET_{\max}=1$ ) la producción será:  $R=a\pm b$ .

La productividad del agua (WP) se define como la cosecha física o económica por unidad de agua consumida por el cultivo (en kg·m<sup>-3</sup> o \$·m<sup>-3</sup>). El numerador puede ser expresado en términos de rendimiento de grano (kg·ha<sup>-1</sup>) o en términos económicos (\$·ha<sup>-1</sup>), mientras que en el denominador puede usarse la transpiración, la evapotranspiración, el agua aplicada o agua aplicada y lluvia, entre otros (Molden, 1997). En este trabajo se usaron las siguientes definiciones de WP:

$$WP_{Et} \left( \text{kg m}^{-3} \right) = \frac{R(\text{kg})}{ET(\text{m}^3)} \quad (1)$$

$$WP_I \left( \text{kg m}^{-3} \right) = \frac{R(\text{kg})}{I(\text{m}^3)} \quad (2)$$

$$WP_T \left( \text{kg m}^{-3} \right) = \frac{R(\text{kg})}{T(\text{m}^3)} \quad (3)$$

Donde  $WP_{Et}$  productividad del agua consumida;  $WP_I$  productividad del agua aplicada por riego (I) y  $WP_T$  es la productividad del agua total (agua aplicada más precipitaciones). Con el objetivo de eliminar los valores extremos, los rangos de productividad fueron determinados para el 5 y el 95 percentil de la distribución de frecuencias de los datos experimentales.

### Función de producción agua rendimiento (CWPF)

Stewart *et al.* (1977) y Dooroombos y Kassam (1979) propusieron utilizar la relación entre la pérdida relativa del rendimiento y el déficit relativo de evapotranspiración como función de producción agua-rendimiento (CWPF). Según Al-Jamal *et al.* (2000) y Kipkorir *et al.* (2002) esta función es siempre lineal con una pendiente llamada **factor de respuesta del rendimiento** ( $K_y$ ) si la función de producción calculada con base en la evapotranspiración es lineal:

$$\left(1 - \frac{R}{R_{\max}}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET}{ET_{\max}}\right) \quad (5)$$

Donde  $R_{\max}$  es el rendimiento máximo obtenido en el mejor tratamiento y  $K_y$  es el factor de respuesta del rendimiento. Dooroombos y Kassam (1979) calcularon este factor para casi todos los cultivos agrícolas y más recientemente Kipkorir *et al.* (2002), Molden *et al.* (2003) y Dehghanisaniy *et al.* (2009); sin embargo, los valores de  $K_y$  fueron obtenidos de la evaluación de numerosos experimentos en Europa, Estados Unidos y el medio Oriente y no incluyen resultados más cercanos a nuestra área geográfica. Estos autores ubican a los diferentes cultivos en cuatro grupos en dependencia del valor del factor de respuesta del rendimiento ( $K_y$ ): Grupo I:  $K_y=0.7-0.8$  (alfalfa, remolacha, cacahuete); Grupo II:  $K_y=0.85-0.95$  (sorgo, trigo, soya, cítricos; pimiento); Grupo III:  $K_y=1.05-1.15$  (frijol, cebolla, papa, tomate); Grupo IV:  $K_y \geq 1.2$  (banana, maíz, caña de azúcar).

La magnitud del déficit hídrico en este trabajo se refiere al déficit en relación con las necesidades de agua del cultivo durante todo su ciclo vital. Se procesaron los datos acordes con la metodología propuesta por Dooroombos y Kassam (1979) y se realizaron los análisis de correlación y regresión correspondientes.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 2 se presentan los resultados de rendimientos máximos en cada época de siembra y sus correspondientes valores de evapotranspiración total, agua aplicada, lluvia,

**CUADRO 2. Rendimientos máximos, valores de evapotranspiración total, agua aplicada, lluvias, lluvia aprovechable, número de riegos y duración del ciclo en las dos épocas de siembra para el maíz.**

Época	Rendimiento máximo (t·ha <sup>-1</sup> )	ET Total (m <sup>3</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	Agua aplicada (m <sup>3</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	Lluvia (m <sup>3</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	Lluvia aprovechable (m <sup>3</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	Núm. Riegos	Total ciclo (días)
Invierno	8.3	3906	3100	1630	806	14	130
Verano	6.2	3866	2080	3817	1786	11	114

lluvia aprovechable, número de riegos y duración del ciclo. Los rendimientos del maíz oscilaron entre 1.98 y 8.3 t·ha<sup>-1</sup> a los que les correspondieron valores de 300 y 3,100 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> de agua aplicada. Los máximos rendimientos fueron obtenidos con el mejor tratamiento de riego (límite productivo al 85 % de la humedad correspondiente a la capacidad de campo) para un valor den 8.3 t·ha<sup>-1</sup> en la época de seca; mientras que en la época de lluvia fue de 6.22 t·ha<sup>-1</sup>. En las dos épocas la ET fue mayor que el agua aplicada como riego, y el aporte de la lluvia al consumo fue como promedio de 43.4 y 54.6 % en el período seco y lluvioso respectivamente, lo que enfatiza el papel suplementario del riego en las condiciones subtropicales de la zona occidental de Cuba. Los menores valores de rendimiento coinciden con los tratamientos de secano durante todo el ciclo de desarrollo del cultivo. La duración del ciclo de cultivo fue inferior para el verano donde las temperaturas promedio son superiores.

El valor del coeficiente de correlación lineal entre el rendimiento y la ET en el maíz fue alto ( $r=0.98$ ), demostrando la linealidad de esta relación. El modelo lineal  $R=1,59 ET$  fue el de mejor ajuste con un coeficiente de determinación de 0.96 y la pendiente nos muestra una eficiencia del agua evapotranspirada de alrededor de 15.9 kg de grano de maíz por cada milímetro adicional de agua consumida (Figura 2A).

A pesar de que los aportes de agua en este trabajo no llegaron a ser excesivos fue posible explicar la relación entre el rendimiento de grano en el maíz y el agua aplicada (I) usando un polinomio de segundo orden ( $R=0,0007 I^2 + 4,18 I$ ) con un coeficiente de determinación igual a 0.87 (Figura 2B). Anulando la primera derivada de esta función se calculó el valor óptimo de riego 2982.8 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> y el rendimiento máximo 6,228.2 kg·ha<sup>-1</sup>.

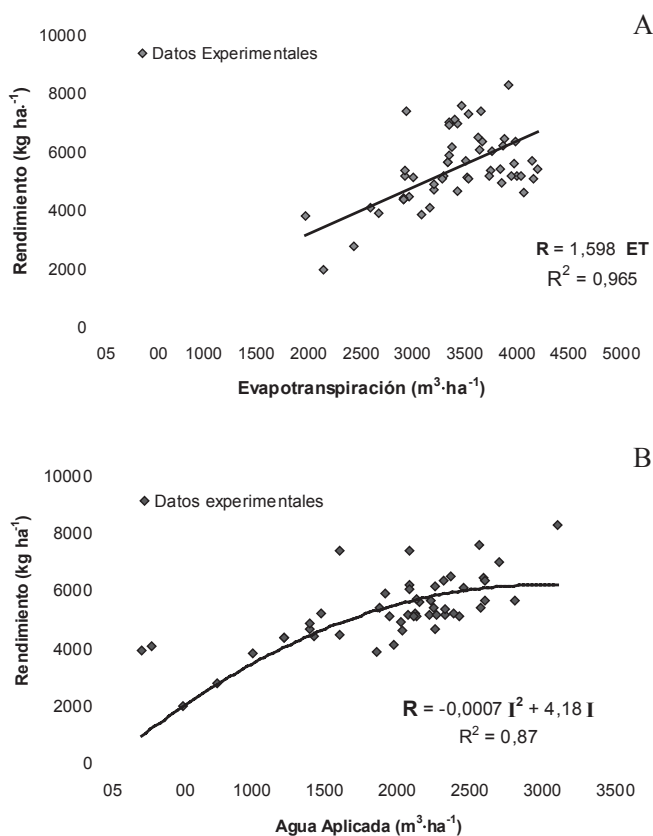
Trabajos de Musick y Dusek, (1971), Hexen y Headey, (1978), Martin *et al.*, (1984), Santa Olalla y Valero (1993) y Al-Jamal *et al.*, (2000) señalan al polinomio de segundo orden como el de mejor ajuste para las relaciones rendimiento/agua aplicada.

Para la relación entre el rendimiento y la evapotranspiración relativa, la ecuación ajustada pasa por el origen ( $R=6.41 ET/ET_{max}$ ) con un coeficiente de determinación de 0.97. El valor de la pendiente de esta recta coincide con el potencial de producción del maíz, que podría llegar a ser de 6.41 t·ha<sup>-1</sup> si las condiciones están cerca del óptimo ( $ET/ET_{max}=1$ ). Si las disponibilidades hídricas son limitadas, todo aumento o mantenimiento del rendimiento puede lograrse aumentando la ET por medio del

riego o disminuyendo la  $ET_{max}$ , por ejemplo, mediante el uso de barreras rompevientos, obteniéndose obviamente una mejora de la productividad agronómica del uso del agua (Santa Olalla y Valero, 1993).

### Productividad del agua consumida ( $WP_{ET}$ )

Usando la Ecuación 2 se obtuvo el rango de variación de la  $WP_{ET}$ . El maíz produce como promedio 1.61 kg de grano por cada metro cúbico de agua utilizada. El rango de  $WP_{ET}$  encontrado, 0.9 a 2.5 kg·m<sup>-3</sup> es mayor que el reportado de 0.8 a 1.6 kg·m<sup>-3</sup> por Doorenbos y Kassam (1979), lo que puede explicarse por las diferentes condiciones climáticas y el manejo del riego. El valor máximo de  $WP_{ET}$  obtenido fue de 2.53 kg·m<sup>-3</sup> para una ET de 2,927.6 m<sup>3</sup> (Cuadro 3). Estos resultados difieren de los reportados en Estados Unidos, China, y algunos países de Europa, con rendimientos de maíz por encima de las 6.0 t·ha<sup>-1</sup> y



**FIGURA 2. Relación entre el rendimiento y: A: evapotranspiración total (ET); B: agua aplicada por riego (I) para el maíz.**

**CUADRO 3. Rango de valores y estadígrafos de la productividad del agua consumida, productividad del agua aplicada por riego, productividad del agua total obtenidos para el maíz y valor reportado por FAO 33.**

Rango de valores	Frecuencia de los datos de productividad		
	WPET	WPI	WPT
0-0.4	0	0	0
0.4-0.8	0	0	0
0.8-1.2	3	0	10
1.2-1.6	27	0	10
1.6-2.0	15	0	6
2.0-2.4	8	13	9
2.4-2.8	1	16	16
2.8-3.2	0	9	3
3.2-3.6	0	2	0
3.6-10	0	10	0
Superior a 10	0	4	0
Rango de WP <sup>a</sup> (kg·m <sup>-3</sup> )	0.9 - 2.5	2.09 – 11.2	0.86 – 2.9
Rango de WP (kg·m <sup>-3</sup> ) reportado por FAO 33		0.8-1.6	
N	54	54	54
Mínimo	0.93	2.03	0.84
Máximo	2.53	16.43	2.99
Media	1.61	3.67	1.93
Desviación Estándar	0.31	2.91	0.66
Coefficiente de Variación (%)	19.5	79.3	34

<sup>a</sup> Definido como el 5 y 95 percentiles del rango completo.

productividad del agua consumida  $WP_{ET}$  superior a los  $1.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , mientras que en muchos países de África los rendimientos fueron inferiores a los  $2.0 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  y una baja productividad de  $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  (Liu *et al.*, 2008).

### Productividad del agua aplicada (WP<sub>i</sub>)

Al realizar un análisis de la distribución de frecuencias de los valores de  $WP_i$  a partir de los datos experimentales y utilizando la Ecuación 3, se encontró que el rango de productividad varió entre  $2.03$  y  $16.43 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  (Cuadro 3). La mayor frecuencia de valores de  $WP_i$  (70.4 %) se halló entre  $2.0$  y  $3.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . El coeficiente de variación fue el más elevado, mostrando la alta variabilidad de la  $WP_i$ .

El valor máximo de  $16.43 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  se obtuvo en los experimentos conducidos en invierno (diciembre-marzo) y en los tratamientos donde se suspendieron los riegos después de la germinación (agua aplicada de  $266.8 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ ). En las condiciones donde se realizaron estos experimentos en la época de invierno, puede inferirse para un año y medio un promedio de lluvias de  $315.3 \text{ mm}$  (Bernal, 1995). En estas condiciones se cumple lo enunciado por Doorenbos y Kassam (1979) de que puede ser ventajoso para el crecimiento rápido y profundo del sistema radicular un nivel de agotamiento del 80 % durante las primeras fases de crecimiento del cultivo, lo cual también fue comprobado por Howell *et al.* (1997) y

Zwart y Bstiaanssen (2004), en experimentos con diferentes niveles de riego, demostrando, que el riego deficitario usualmente tiene valores más altos de  $WP_i$  que los tratamientos bajo riego durante todo el período vegetativo del cultivo.

Estos resultados de productividad alta no son un buen indicador de eficiencia del uso del agua para las condiciones de la zona de estudio, donde se reportaron para los años analizados, porcentajes de lluvia aprovechable de hasta el 41 %, supliendo ésta una parte importante de las necesidades de los cultivos agrícolas.

### Productividad del agua total (WP<sub>T</sub>)

Al utilizar en el cálculo la productividad al agua total  $WP_T$  (agua aplicada por riego más precipitación), el intervalo varió entre  $0.86$  y  $2.9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  (Cuadro 3). La mayor frecuencia de los datos se encontró entre  $2.4$  y  $2.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Por cada metro cúbico de agua total, el maíz produce como promedio  $1.93 \text{ kg}$ . El máximo valor  $2.99$  corresponde al tratamiento 85 % de la capacidad de campo, en la época de verano. El uso del agua total en el cálculo de la productividad, permitirá un análisis más objetivo de la eficiencia del uso del agua por el cultivo.

### Función de producción agua rendimiento (CWPF)

Los modelos lineales encontrados que relacionan la disminución relativa del rendimiento ( $1-R/R_{\max}$ ) y el déficit relativo de evapotranspiración ( $1-ET/ET_{\max}$ ) para las dos épocas presentan coeficientes de determinación superiores al 79 %. El déficit de agua varió entre  $0-0.5$  (valor adimensional), coincidiendo con el rango válido reportado por Doorenbos y Kassam (1979).

La pendiente  $K_y$  en la función de producción encontrada para el maíz en el invierno fue de  $1.67$ , mientras que en el verano fue  $2.31$  (Grupo IV). En las dos épocas la pérdida relativa de rendimiento resultó más que proporcional al déficit hídrico ( $K_y$  superior a 1). Estos resultados confirman la baja tolerancia del maíz a la escasez de agua bajo condiciones de déficit moderado e incluso severo (Pandey *et al.*, 2000).

Un factor de respuesta superior a la unidad indica que será proporcionalmente superior la pérdida relativa de rendimiento que el decrecimiento relativo en evapotranspiración (Kirda *et al.*, 1999). Significa, en nuestro caso, que en el cultivo del maíz, para un déficit hídrico planificado de un 20 % en invierno, se puede esperar una pérdida relativa de rendimiento de un 33.4 %, o sea un rendimiento máximo esperado de  $5.5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  (Cuadro 4). Si el déficit se planifica de un 30 %, la pérdida relativa de rendimiento podría llegar a ser de 50.1 %, en tanto que en el verano el maíz alcanzaría pérdidas del 69.3 %.

Kirda *et al.* (1999) obtuvieron para este cultivo un factor de respuesta inferior de  $0.74$  y para un déficit hídrico planificado del 25 % y reportaron un rendimiento relativo esperado de  $0.82$ . Dehghanisani *et al.* (2009) encontraron, en cinco regiones de Irán, valores de  $K_y$  para el cultivo del maíz que oscilaron entre  $1.03$  y  $1.46$ . La alta sensibilidad del maíz al estrés hídrico sugiere que bajo condiciones limitadas de agua se hace difícil



**CUADRO 4. Factor de respuesta del rendimiento, pérdida relativa de rendimiento y rendimiento máximo esperado del maíz para un déficit**

Época	Factor de respuesta $K_y$	Déficit hídrico planificado (%)	Pérdida relativa de rendimiento (%)	Rendimiento máximo esperado ( $t \cdot ha^{-1}$ )
Invierno	1.67	10	16.7	6.9
		20	33.4	5.5
		30	50.1	4.1
Verano	2.31	10	23.1	4.8
		20	46.2	3.4
		30	69.3	1.9

la implementación de estrategias de manejo sin importantes pérdidas de rendimiento.

### CONCLUSIONES

La mayor amplitud del rango de productividad del agua consumida ( $WP_{Et}$ ) ( $0.9-2.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) indica una mayor oportunidad de aumentar la producción agrícola con menos agua. La productividad del agua aplicada por riego ( $WP_r$ ) fue de  $16.43 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  para un agua aplicada de  $266.8 \text{ m}^3$ . El intervalo para la productividad calculada con base en el agua total ( $WP_t$ ) varió entre  $0.86$  y  $2.9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Por cada metro cúbico de agua total, el maíz produce como promedio  $1.93 \text{ kg}$ . Para las condiciones climáticas del área de estudio el uso del agua total para el cálculo de la productividad, resulta un indicador más efectivo. La pendiente  $K_y$  en la función de producción encontrada para el maíz en el invierno fue de  $1.67$  mientras que en el verano fue  $2.31$ . En el verano el déficit de agua incide en mayor cuantía sobre el rendimiento del maíz. La alta sensibilidad del maíz al estrés hídrico sugiere que bajo condiciones limitadas de agua se hace difícil la implementación de estrategias de manejo sin importantes pérdidas de rendimiento.

### LITERATURA CITADA

Al-Jamal M. S.; Sammis T. W.; Ball S.; Smeal D. 2000. Computing the crop water production function for onion. *Agricultural Water Management* 46: 29-41.

Bernal P. 1995. Caracterización agroclimática de la Estación Experimental de Riego y Drenaje (IIRD). Informe Técnico. La Habana. 32p.

Cid G. 1995. Introducción de métodos y metodologías para la caracterización de las propiedades hidrofísicas así como las variaciones espacio temporales. Informe del Contrato 004-17 IIRD-MTCMA. Cuba.

Dehghanisani H.; Nakhjavani M.; Tahiri A. Z.; Anyoji H. 2009. Assessment of wheat and maize water productivities and production function for cropping system decisions in arid and semiarid regions. *Irrigation and Drainage* 58(1): 105-115.

Doorenbos J.; Kassam A. H. 1979. Yield response to water. *Irrigation and Drainage*. Paper N° 33. FAO, Rome. 193 p.

Giralt T. E. 1984. Respuesta del cultivo del maíz sembrado en primavera a diferentes niveles de humedad en el suelo. Informe técnico. IIRD. La Habana. 20 p.

Hexen R. W.; Headey E. O. 1978. Water production functions for irrigated agriculture. Center for Agricultural and Rural Development. Iowa State University Press, Ames, IA.

Howell T. A.; Schneider A. D.; Evett S. R. 1997. Subsurface and surface microirrigation of corn Southern High Plains. *Transactions of the ASAE* 40(3): 635-641.

Instituto de Suelos. 1996. Nueva versión de la Clasificación Genética de los Suelos de Cuba. Editorial Academia. La Habana. 102 p.

IWMI. 2009. ¿Cómo se pueden producir más alimentos con menos agua? [en línea]. Water Management and Environment. International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka. *Disponible en:* <http://www.iwmi.org> [Consulta: 6 de julio 2009].

Kipkorir E. C.; Raes D.; Massawe B. 2002. Seasonal water production functions and yield response factors for maize and onion in Perkerra, Kenya. *Agricultural Water Management* 56 (3): 229-240.

Kirda C.; Kanber R.; Tulucu K. 1999. Yield response of cotton, maize, soybean, sugar beet, sunflower and wheat to deficit irrigation. In: *Crop yield response to deficit irrigation*. C. Kirda; Moutonnet P.; C. Hera & D.R. Nielsen (eds.), Dordrecht, The Netherlands, Kluwer Academic.

Liu J.; Zehnder A. J. B.; Yang H. 2008. Drops for crops: modelling crop water productivity on a global scale. *Global NEST Journal* 10 (3): 295-300.

Martin D. L.; Watts D. G.; Gilley J. R. 1984. Model and production functions for irrigation management. *J. of Irrig. and Drain. Eng., ASCE* 110: 149-164.

Molden D. 1997. Accounting for water use and productivity. SWIM Paper 1. International Irrigation Management Institute. Colombo, Sri Lanka; 16p.

Molden D.; Murray-Rust H.; Sakthivadivel R.; Makin I. 2003. A water-productivity framework for understanding and action. In: *Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement*. Wallingford, Colombo: 1-18.

Musick J. T.; Dusek D. A. 1971. Grain sorghum response to number, timing and size of irrigations in the Southern High Plains. *Transactions of the ASAE* 14: 401-410.

Pandey R. K.; Maranville J. W.; Admou A. 2000. Deficit irrigation and nitrogen effect on maize in a Sahelian environment: I. Grain yield and yield components. *Agricultural Water Management* 46(1): 1-13.

Puech J.; Hernández M. 1973. Evapotranspiration comparée de différents cultures et étude de quelques facteurs influenciant les rythmes de consommations. *Ann. Agron* 24(4): 437.

Puech J.; Marty J. R.; Martensy C. 1976. Efficience de l'eau consommé par divers végétaux et application de l'irrigation. *B.T.I* 306: 41-53.

Rijsberman F.; Manning N.; Sanjiv de Silva. 2006. Aumentar la Productividad del Agua Verde y Azul, para Equilibrar el Agua para Alimentación y Medio Ambiente. Documento Base del Eje Temático Agua, Alimentación y Medio Ambiente. IV Foro Mundial del Agua, Instituto Internacional para Manejo del Agua (IWMI). 24p.

Sánchez M. A.; Ramírez E. 1988. Evapotranspiración máxima y coeficientes bioclimáticos del maíz sembrado en primavera. *Ciencia y Técnica en la Agricultura*. Serie Riego y Drenaje 11(1): 23-34.

Santa Olalla M. M.; Valero J. A. J. 1993. Las funciones de producción versus agua. Capítulo VII. En: *Agronomía del riego*. Ediciones Mundi Prensa, Madrid, España. pp: 448-519.

Stewart J. I. 1977. Optimizing crop production through control of water and salinity levels in the soil. *Utah Water Res. Lab., Utah State University, Logan*. Pub. N°. PRNG 151-1.

Zwart S. J.; Bstiaanssen W. G. M. 2004. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. *Agricultural Water Management* 69(2): 115-133.