

Productividad del agua en maíz, soya y sorgo en suelo Ferralítico Rojo del sur de La Habana

Water productivity of corn, soybean and sorghum in Red Ferralitic soils of the south of Havana

Felicita González Robaina¹, Julián Herrera Puebla² y Teresa López Seijas²

RESUMEN. El estudio de las funciones agua rendimiento y su uso dentro de la planificación del agua es una vía estratégica importante para lograr el incremento de la productividad. Utilizando datos de 25 experimentos realizados en la Estación Experimental del Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje (IIRD) y con ayuda de herramientas de análisis de regresión en este trabajo se calcula la productividad del agua aplicada por riego (WP_r) y agua total (WP_T) y el factor de respuesta del rendimiento (Kr) en los cultivos maíz, soya y sorgo para las condiciones de la región occidental de Cuba. En el maíz la WP_r fue superior al resto de los cultivos, de 16,43 kg/m³ para un agua aplicada de 266,8 m³, para la soya fue de 2,96 kg/m³ con 600 m³ y el sorgo 4,23 kg/m³ con 800 m³. El intervalo para la productividad del agua total WP_T del maíz varió entre 0,86 y 2,9 kg/m³, para la soya entre 0,28 y 0,81 kg/m³, mientras que para el sorgo entre 0,49 y 0,96 kg/m³. La pendiente Kr en la función de producción encontrada para el maíz en el invierno fue de 1,67 y en verano de 2,31, mientras que los valores de Kr calculados para el sorgo en las dos épocas estudiadas se ubicaron en el grupo I. El maíz fue el único cultivo que 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 en invierno se puede esperar una pérdida relativa de rendimiento de un 33,4%, mientras que en verano será de 46,2%.

Palabras clave: factor de respuesta del rendimiento, déficit hídrico, *Zea may*, *Glycine max*, *Sorghum vulgare*

ABSTRACT. The study of the crop water production function is an important strategy to increase the water productivity. Using a data base of 25 experiments carried out at the Irrigation and Draining Research Station located in Alquizar at south of Havana Province (red ferralitic soils), and with the help of regression tools, it was estimated the crop water productivity (WP) (based on irrigation water applied and total water) and crop yield response factor (Kr) for corn, soybean and sorghum. The corn, soybean and sorghum WP_r was 16,43; 2,96 y 4,23 kg/m³ when were applied 266,8; 600 y 800 m³/ha irrigation water, respectively. The range 0,86 to 2,9 kg/m³ of WP_T obtained for maize, was in a wider range than the range reported by FAO for this crop. The soybean WP_T varied between 0,28 and 0,81 kg/m³, while sorghum varied between 0,49 and 0,96 kg/m³. Every cubic meter of total water used in maize yield 1,93 kg, while in soybean and sorghum it was 0,49 y 0,68 kg/m³ respectively. The slope (Kr) of the maize water productivity function was 1,67 in winter and 2,31 in summer. Soybean and sorghum showed similar response to water deficit in winter. Maize was the only crop where the relative loss of yield was proportional to deficit irrigation. For a planned irrigation deficit of 20% for maize it will expect a relative loss of 33,4% and 46,2% of yield, in winter and summer respectively.

Keywords: crop yield response factor, deficit irrigation, *Zea may*, *Glycine max*, *Sorghum vulgare*.

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).

El alto grado con el que el agua condiciona la producción

agrícola, así como su capacidad para alimentar a sus poblaciones, lleva a la necesidad de estudiar el problema de la productividad del agua. Debido a que la agricultura por irrigación consume en la actualidad la mayor parte del suministro de agua de buena calidad (en una cantidad estimada entre el 60 y el 80 por ciento), la búsqueda de nuevas formas de producir más alimentos con menos cantidad de agua ofrece una respuesta al problema de la escasez del agua (IWMI, 2009).

Recibido 20/02/09, aprobado 22/02/09, trabajo 12/10, investigación.

¹ MSc. Inv., Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje (IIRD), Apdo. Postal 6090; La Habana, Cuba, E-✉: felicita@iird.cu.

² Dr.C. Inv. Tit., IIRD, La Habana, Cuba.

En los sistemas agrícolas la productividad del agua (WP) se define como la cosecha física o económica por unidad de agua consumida por el cultivo (en kg/m³ o \$/m³). El numerador puede ser expresado en términos de rendimiento del cultivo (kg/ha) o en términos monetarios (\$/ha), mientras que en el denominador puede usarse la transpiración, la evapotranspiración, el agua aplicada por riego o agua total (riego más lluvia), entre otros (Molden, 1997).

Molden *et al.* (2003) y Dehghanisanij *et al.* (2009) sugieren que el estudio de las funciones agua rendimiento y su uso dentro de la planificación del agua es una vía estratégica importante para lograr el incremento de la productividad de la misma. Sin embargo la forma y la pendiente de esta función son únicas para cada cultivo y no se pueden aplicar a otras áreas distintas de aquellas en que se han obtenido (Santa Olalla y Varela, 1993). En este sentido Stewart *et al.* (1977) y Dooroembos y Kassam (1979) propusieron utilizar la relación entre la disminución relativa del rendimiento y el déficit relativo de evapotranspiración como función de producción agua rendimiento (CWPF). Según Kipkorir *et al.* (2002) esta función es siempre lineal con una pendiente llamada **factor de respuesta del rendimiento** (Kr).

Dooroembos y Kassam (1979) calcularon este factor para casi todos los cultivos agrícolas y mas recientemente Kipkorir *et al.* (2002), Molden et al (2003) y Dehghanisanij *et al.* (2009), sin embargo los valores de Kr fueron obtenidos de la

evaluación de numerosos experimentos en Europa, USA y el medio Oriente y no incluyen resultados más cercanos a nuestra área geográfica.

Por estas razones el objetivo de este trabajo es obtener, utilizando datos de diferentes experimentos realizados en la Estación Experimental del Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje (IIRD) la productividad del agua (WP) y el factor de respuesta del rendimiento (Kr) en los cultivos maíz, soya y sorgo para las condiciones de la región occidental de Cuba.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó una base de datos de 25 experimentos que comprenden diferentes tratamientos de riego realizados 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) con una altura sobre el nivel del mar de 6 m. El suelo de la estación es Ferralítico Rojo compactado (Instituto de Suelos, 1996).

Desde el punto de vista hidropedológico este 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) (Tabla 1).

TABLA 1. Análisis granulométrico, capacidad de campo (Cc), densidad real (Dr), densidad aparente (Da) para la Cc y porosidad total (Pt) en el perfil del suelo Ferralítico Rojo compactado

Prof (cm)	Cc (g/g)	Da a Cc (g/cm ³)	Dr (g/cm ³)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Pt (%)
0-30	0,338	1,18	2,55	59,2	22,39	18,50	53,71
30-80	0,342	1,21	2,52	64,1	13,78	22,10	52,05
80-100	0,337	1,26	2,48	51,8	23,50	24,71	49,08

El clima de la zona (Chaterlán *et al.*, 2007) está influenciado principalmente por las lluvias y su régimen de distribución dentro del año; con un valor de lluvia media anual de 1432 mm, de los cuales el 78% (1116,7 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 del territorio en estudio ya que éstas no presentan grandes diferencias durante el año. La curva de la evapotranspiración potencial mantiene una tendencia similar a la evaporación. En

los meses de seca es relativamente baja pero aumenta rápidamente en el inicio de la época de lluvia. El promedio anual es de 1682,7 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.

Una descripción detallada de los procedimientos experimentales utilizados para la estimación de los consumos de agua en los diferentes tratamientos de riego aparece en los trabajos publicados por los autores de los cuales se utilizaron los datos (Tabla 2 y Tzenova, 1976).

TABLA 2. Resumen de la información de los experimentos de campos utilizados

Cultivo	Años de estudios	Época	Tratamientos de riego	Autor
Maiz (<i>Zea Mays</i>)	1980-1988	Invierno Verano	85% Cc* durante todo el ciclo 75% Cc durante todo el ciclo 85% Cc hasta germinación-espigamiento, 75% resto del ciclo 75% Cc hasta germinación-espigamiento, 85% resto del ciclo Secano a partir de la germinación	Giralt T E. (1984) Sánchez, A. M. (1988)

Cultivo	Años de estudios	Época	Tratamientos de riego	Autor
Soya (<i>Glycine max</i>)	1981-1984	Invierno	85% Cc durante todo el ciclo	Castellanos A. <i>et al.</i> (1984)
		Verano	75% Cc durante todo el ciclo	
			75% Cc hasta la floración y luego 85% Cc	Castellanos A. (1988)
			42% agua aprovechable 70% agua aprovechable Secano a partir de la germinación	
Sorgo (<i>sorghum bicolor</i>)	1986-1987	Invierno	85% Cc durante todo el ciclo y	Herrera J. <i>et al.</i> (1988)
		Verano	75% kg/ha urea	
			85% Cc durante todo el ciclo y	
			150% kg/ha urea	
			85% Cc durante todo el ciclo y	
			225% kg/ha urea	
			75% Cc durante todo el ciclo	
			75% kg/ha urea	
			75% Cc durante todo el ciclo y	
			150% kg/ha urea	
		Solo riegos de germinación 75% kg/ha urea		
		Solo riegos de germinación 150% kg/ha urea		
		Solo riegos de germinación 225% kg/ha urea		

*85% Cc (limite productivo al 85% de la humedad correspondiente a la capacidad de campo)

Se procesaron los datos experimentales acorde con la metodología propuesta por Doorenbos y Kassam (1979) y se realizaron los análisis de correlación y regresión correspondientes.

Productividad del agua

La productividad del agua en los cultivos (WP) se define como la cosecha producida por unidad de agua consumida en la producción (t/m³ o kg/m³). El numerador puede ser expresado en términos de rendimiento del cultivo, mientras que en el denominador puede usarse la transpiración, la evapotranspiración, el agua aplicada o agua total entre otros (Stewart *et al.*, 1977; Molden, 1997; Dehghanianij *et al.*, 2009).

En este trabajo se utilizaron las siguientes definiciones de WP:

$$WP_I \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{R(kg)}{I \left(\frac{m^3}{m^3} \right)} \quad (1)$$

$$WP_T \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{R(kg)}{T \left(\frac{m^3}{m^3} \right)} \quad (2)$$

Donde: WP_I la 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% de la distribución de frecuencias de los datos experimentales.

Función de producción agua rendimiento (CWPF)

Para cuantificar el efecto del estrés hídrico utilizamos la relación lineal entre la disminución relativa del rendimiento y el déficit relativo de evapotranspiración, a través de un factor empírico denominado factor de respuesta del rendimiento (Kr):

$$(1 - Rr/Rm) = Kr(1 - ETr/ETm) \quad (3)$$

Donde:

- Rr-Rendimiento real;
- Rm-Rendimiento máximo;
- Kr-Factor de respuesta del rendimiento;
- ETr-Evapotranspiración real;
- ETm-Evapotranspiración máxima.

Un factor de respuesta Kr superior a uno indica que será proporcionalmente mayor la pérdida relativa de rendimiento que el decrecimiento relativo en evapotranspiración. Se puede tomar como un indicador de en cuanto el cultivo es tolerante al estrés hídrico (Kirda, 1999).

Doorenbos y Kassam (1979) ubican a los diferentes cultivos en cuatro grupos en dependencia del valor del factor de respuesta del rendimiento (Kr): Grupo I: Kr=0,7-0,8; Grupo II: Kr= 0,85-0,95; Grupo III: Kr=1,05-1,15; Grupo IV: Kr = 1,2.

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.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los máximos rendimientos obtenidos con el mejor tratamiento de riego (limite productivo al 85% de la humedad correspondiente a la capacidad de campo) fueron 8,3, 2,1 y 4,64 t/ha en la época de seca; mientras que en la época de lluvia fue de 6,22, 3,3 y 4,95 t/ha en maíz, soya y sorgo respectivamente (Tabla 3). En todos los cultivos y épocas la Et fue mayor que el agua aplicada como riego, y el aporte de la lluvia al consumo fue como promedio 25% en el periodo seco y 53% en el periodo lluvioso, lo que enfatiza el papel suplementario del riego en las condiciones subtropicales de la zona occidental de Cuba. Por otra parte los menores valores de rendimiento coinciden con los tratamientos de secano en todos los cultivos analizados.

Para la época de invierno el consumo de agua (Tabla 3) fue mayor en el maíz, después el sorgo y la soya, siguiendo la misma tendencia que la producción de granos, mientras que en el verano el consumo de agua fue mayor para el sorgo seguido de maíz y soya. La duración del ciclo del cultivo fue inferior en el verano en todos los cultivos donde las temperaturas promedio son superiores.

TABLA 3. Rendimientos máximos, valores de evapotranspiración total, agua aplicada, lluvias, número de riegos y duración del ciclo en las dos épocas de siembra para maíz, soya y sorgo

Cultivo	Época	Rendimiento máximo (t/ha)	Etr Total (m³/ha)	Agua aplicada (m³/ha)	Lluvia (m³/ha)	Lluvia Aprov. (m³/ha)	No. riegos	Total ciclo días
Maíz	Invierno	8,3	3 906	3 100	1 630	806	14	130
	Verano	6,22	3 886	2 080	4 663	1 912	11	114
Soya	Invierno	2,1	3 273	2 131	1 021	491	12	112
	Verano	3,3	3 013	1 600	3 774	1 585	8	100
Sorgo	Invierno	4,64	3 522	2 107	2 800	1 415	11	118
	Verano	4,95	4 583	1 868	6 620	2 715	7	95

Para el maíz los rendimientos estuvieron entre 1,98 y 8,3 t/ha a los que le correspondieron valores de 300 y 3100 de agua aplicada. Otros autores reportan en el cultivo del maíz rendimientos superiores entre 5 y 14 t/ha con valores de agua aplicada entre 5500 y 12000 m³/ha para zonas áridas, donde las precipitaciones son muy escasas y el riego suplente todas las necesidades del cultivo, además de las diferentes condiciones climáticas (Dehghanisani *et al.*, 2009).

Las correlaciones encontradas entre el rendimiento y el agua aplicada para todos los cultivos fueron positivas y con valores de R² aceptables, por lo que solamente se puede asumir que el rendimiento de estos cultivos se incrementa con

el aumento del agua aplicada (Figura 1). Los valores del coeficiente de determinación (R²) para estas relaciones fue alto en el sorgo (R²=0,73) y menor en la soya (R²=0,51) y el maíz (R²=0,45). Otros autores proponen una relación sigmoideal entre el rendimiento y el agua aplicada mediante el riego (Botzan, 1970; Musick y Dusek, 1971; Martin *et al.*, 1984, Santa Olalla y Valero, 1993); lo que para este estudio fue imposible determinar porque los rangos de agua aplicada no llegaron a ser aportes moderados ni excesivos, esto imposibilita determinar el límite técnico, incluso el límite económico, necesarios para obtener la curva completa.

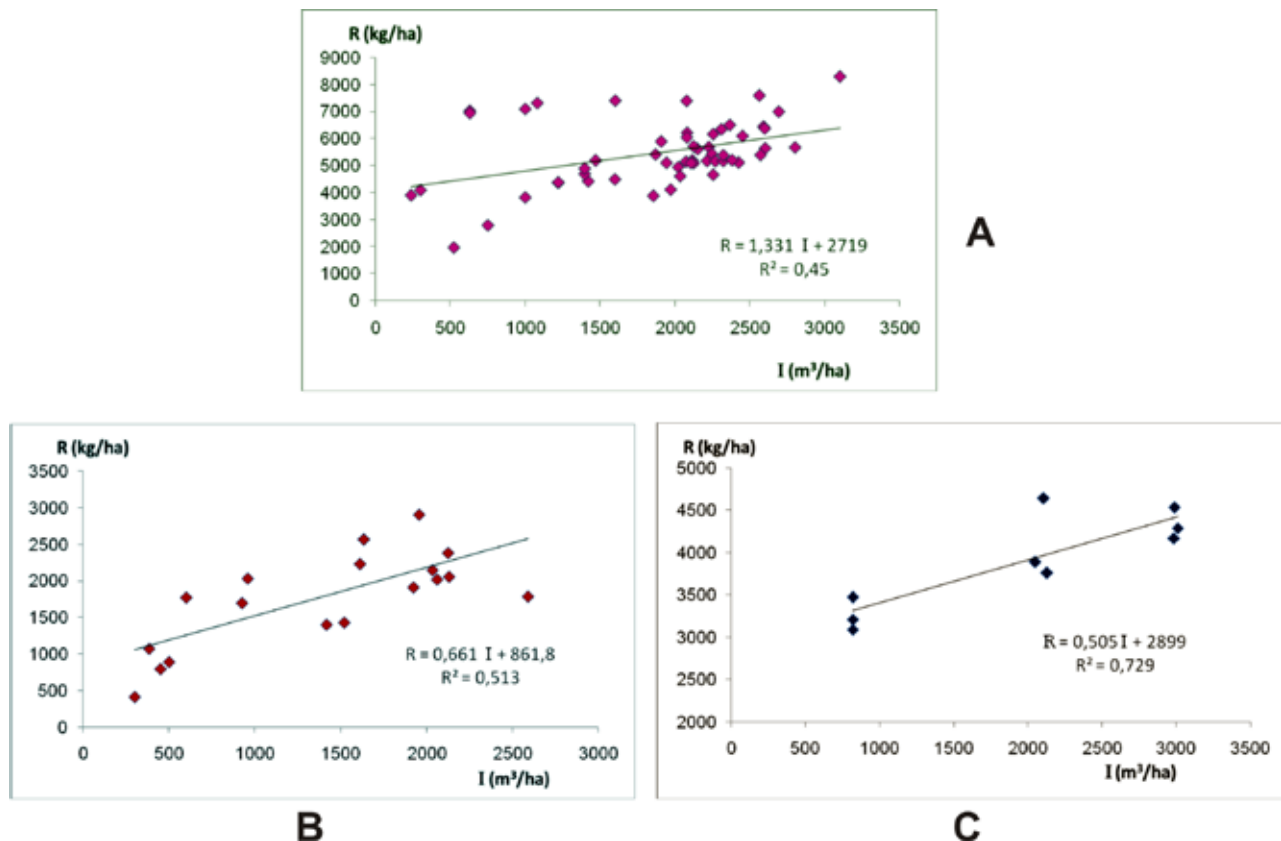


FIGURA 1. Relación entre el rendimiento (R) y el agua aplicada por riego (I): A: maíz, B: soya, C: sorgo.

En estudios previos relacionados con este trabajo se analizó la relación entre el rendimiento y la ET en estos cultivos y se obtuvieron valores altos del coeficiente de determinación, en el maíz $R^2=0,96$, para la soya $R^2=0,91$ y en el sorgo $R^2=0,81$, y sí quedó demostrado la linealidad de esta relación (González *et al.*, 2009).

Productividad del agua (WP)

Al realizar un análisis de la distribución de frecuencias de los valores de WP_1 a partir de los datos experimentales se encontró que los rangos variaron entre 2,09 y 11,2 kg/m^3 para el maíz, entre 0,96 y 9,62 kg/m^3 para la soya y entre 1,9 y 3,91 kg/m^3 para el sorgo (Tabla 4). La mayor frecuencia de valores de WP_1 se encontró en el rango de 1,0 hasta 3,0 kg/m^3 para los tres cultivos. Los coeficientes de variación son elevados en

todos los casos, mostrando la alta variabilidad de la WP_1 .

Los valores máximos de WP_1 (6-16 kg/m^3) se obtuvieron en los experimentos conducidos en invierno (diciembre-abril) y en los tratamientos donde se suspendieron los riegos después de la germinación. En las condiciones donde se realizaron estos experimentos, puede inferirse para un año medio un promedio de lluvias de 315,3 mm (Chaterlán *et al.*, 2007), 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 (2004) en experimentos con diferentes niveles de riego donde quedó demostrado que el riego deficitario usualmente tienen valores más altos de WP_1 que los tratamientos bajo riego durante todo el período vegetativo del cultivo.

TABLA 4. Rango de valores y estadígrafos de la productividad del agua aplicada por riego obtenidos para este estudio y valores reportados por FAO 33 para maíz, soya y sorgo

Rango de WP_1 (kg/m^3)	Frecuencia de los datos		
	Maíz	Soya	Sorgo
0-1	0	6	0
1-2	0	10	5
2-3	36	9	7
3-4	11	5	2
4-5	1	1	1
5-6	0	0	3
6-7	1	1	0
7-8	1	3	
8-9	0	1	
9-10	0	4	
Superior a 10	4	1	
Rango de WP_1 (kg/m^3) ^a	2,09 – 11,2	0,96 – 9,62	1,9 - 3,91
Rango de WP (kg/m^3) reportado por FAO 33	0,8-1,6	0,4-0,7	0,6-1,0
	(10-13% humedad)	(6-10% humedad)	(12-15% humedad)
N	54	41	18
Mínimo	2,03	0,69	1,4
Máximo	16,43	12,21	5,48
Media	2,68	3,73	3,02
SD	2,91	3,1	1,31
CV (%)	79,3	83	43,4

^a Definido como el 5 y 95 percentiles del rango completo

En el maíz la productividad fue superior al resto de los cultivos. La WP_1 del maíz fue de 16,43 kg/m^3 para un agua aplicada de 266,8 m^3 , para la soya fue de 2,96 kg/m^3 con 600 m^3 y el sorgo 4,23 kg/m^3 con 800 m^3 . Estos valores de WP_1 pueden considerarse como niveles óptimos para la producción de estos cultivos en la época de invierno (Figura 2).

Estos altos resultados de productividad no son un buen indicador de eficiencia del uso del agua para las condiciones de la zona de estudio, donde se reportan porcentos de lluvia aprovechable de hasta el 41% y donde la lluvia suple una parte importante de las necesidades de los cultivos agrícolas.

Sin embargo, si para el calculo de la productividad se utiliza el agua total (agua aplicada por riego más precipitación, WP_T) en lugar de agua aplicada solamente (Tabla 5), los rangos son más cercanos a los valores reportados por Doorenbos y Kassam (1979) y permitirán un análisis mas objetivo de la eficiencia del uso del agua por el cultivo.

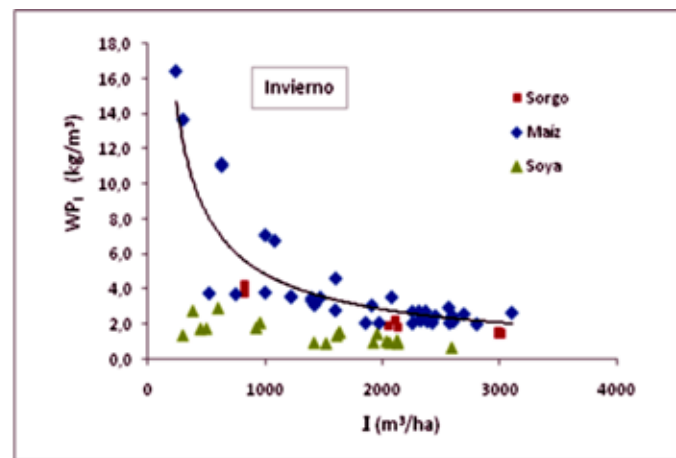


FIGURA 2. Relación entre la productividad del agua (WP_1) y la cantidad de agua aplicada por riego (I) para maíz, soya y sorgo en la época de invierno.

TABLA 5. Rango de valores y estadígrafos de la productividad del agua total (WP_T) y valores reportados por FAO 33 para el maíz

Maíz Rango de WP_T (kg/m^3)	Frecuencia de los datos
0-0,4	0
0,4-0,8	0
0,8-1,2	10
1,2-1,6	10
1,6-2,0	6
2,0-2,4	9
2,4-2,8	16
2,8-3,2	3
3,2-3,6	0
Rango de WP_T (kg/m^3) *	0,86 – 2,9
Rango de WP (kg/m^3) reportado por FAO 33	0,8-1,6 (10-13% humedad)
N	54
Mínimo	0,84
Máximo	2,99
Media	1,93
SD	0,66
CV (%)	34

* Definido como el 5 y 95 percentiles del rango completo

El intervalo para la WP_T para el maíz fue mas amplio que los reportados y varió entre 0,86 y 2,9 kg/m^3 , lo que puede explicarse por las diferentes condiciones climáticas y el manejo del riego. La mayor amplitud de estos rangos indica según Zwart y Bstiaanssen (2004) mayores oportunidades de incrementar la

producción agrícola con menos agua y se espera además que aumente con el incremento de la latitud. En el intervalo entre 2,4-2,8 kg/m^3 se encontró la mayor frecuencia de los datos. Por cada metro cúbico de agua total el maíz produce como promedio 1,93 kg. El máximo valor 2,99 corresponde al tratamiento 85% Cc durante todo el ciclo en la época de verano.

Otros autores reportan para USA, China, y algunos países de Europa rendimientos del maíz por encima de 6,0 t/ha con una WP_T superior a los 1,5 kg/m^3 , mientras que en muchos países de África los rendimientos fueron inferiores a los 2,0 t/ha y una baja productividad de 1 kg/m^3 (Liu *et al.*, 2008)

Para la soya la WP_T varió entre 0,28 y 0,81 kg/m^3 y produce como promedio 0,49 kg por cada metro cúbico de agua total. La productividad máxima se obtuvo con 2101 m^3/ha de agua aplicada.

Por su parte el sorgo tuvo una productividad del agua total entre 0,49 y 0,96 kg/m^3 . Por cada metro cúbico de agua total el sorgo produce como promedio 0,68 kg. La productividad máxima se obtuvo con 3620 m^3 .

Función de producción agua rendimiento (CWPF)

Los modelos lineales encontrados que relacionan la disminución relativa del rendimiento y el déficit relativo de evapotranspiración en los tres cultivos estudiados presentaron coeficientes de determinación superiores al 79%. Ninguno de los 3 cultivos sobrepasa el déficit de agua de entre 0-0,5, supuesto por Doorenbos y Kassam (1979) como rango válido para la relación lineal encontrada entre el déficit hídrico y la pérdida relativa de rendimiento (Figura 3).

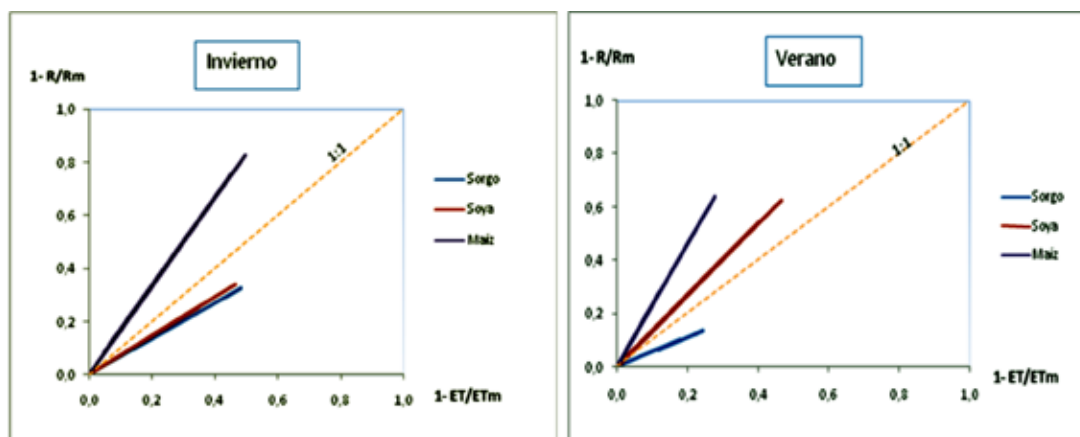


FIGURA 3. Tendencias encontradas entre la disminución del rendimiento relativo y el déficit de evapotranspiración relativa de los cultivos estudiados en las épocas de invierno y verano.

La pendiente K_r 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) (Tabla 6). El maíz fue el único cultivo que en las dos épocas la pérdida relativa de rendimiento resultó más que proporcional al déficit hídrico (K_r superior a 1) (Figura 3). Estos resultados confirman la baja tolerancia a la escasez de agua del maíz, bajo condiciones de déficit moderado e incluso severo (Pandey *et al.*, 2000).

Los valores de K_r calculados para la soya y el sorgo en invierno están muy por debajo de lo reportado en la literatura. Estos resultados los ubican en el grupo I ($K_r=0,7-0,8$). En estos dos cultivos el déficit de agua incide en menor cuantía sobre el rendimiento que en el maíz.

La soya en verano tuvo un comportamiento diferente al invierno lo que puede estar dado por la mayor demanda evaporativa de la atmósfera en esta época, lo que indica un efecto significativo de la época de siembra sobre la productividad de este cultivo.

La soya es más sensible al déficit que el sorgo. Las plantas C4 (sorgo) son consideradas como las mejor adaptadas al estrés hídrico y poseen mayor eficiencia de uso de agua debido a su mayor capacidad de asimilar el CO₂ por su metabolismo y morfología (Nelson et al., 2004).

TABLA 6. Factor de respuesta y rendimiento máximo esperado de maíz, soya y sorgo para un déficit hídrico planificado

Cultivo	Época	Factor de respuesta Kr	Déficit Hídrico Planificado (%)	Perdida relativa de rendimiento (%)	Rendimiento máximo esperado (t/ha)
Maíz	Invierno	1,67	10	16,7	6,9
			20	33,4	5,5
			30	50,1	4,1
	Verano	2,31	10	23,1	4,78
			20	46,2	3,35
			30	69,3	1,91
Soya	Invierno	0,73	10	7,3	2,68
			20	14,6	2,47
			30	21,9	2,26
	Verano	1,34	10	13,4	2,86
			20	26,8	2,41
			30	40,2	1,97
Sorgo	Invierno	0,67	10	6,7	4,32
			20	13,4	4,01
			30	20,1	3,7
	Verano	0,56	10	5,6	4,67
			20	11,2	4,39
			30	16,8	4,12

Un factor de respuesta superior a uno indica que será proporcionalmente superior la pérdida relativa de rendimiento que el decrecimiento relativo en evapotranspiración (Kirda *et al.*, 1999). En este estudio 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%, lo que equivale a un rendimiento máximo esperado de un 5,5 t/ha (Tabla 6). Si el déficit se planifica de un 30% en el invierno la pérdida relativa de rendimiento podría llegar a ser de un 50,1% en el maíz, mientras que en la soya y el sorgo estaría alrededor de un 20%. Sin embargo, en el verano el maíz y la soya alcanzarían pérdidas del 69,3 y 40,2% respectivamente. El sorgo tiene un comportamiento diferente al tener un factor de respuesta al rendimiento muy inferior (0,56).

Kirda C. (s.a) obtuvo para el maíz un factor de respuesta Kr=0,74 y para un déficit hídrico planificado del 25%, reporta un rendimiento relativo esperado de 0,82, mientras que en el cultivo del sorgo reporta un Kr=0,58 con un rendimiento relativo esperado de 0,86. Mientras que Rosadi *et al.* (2007) obtuvo para la soya en un ultisol en Indonesia un valor de Kr= 0,804.

Dehghanisani *et al.* (2009) encontraron en 5 regiones de Irán valores de Kr para el cultivo del maíz entre 1,03 y 1,46, inferiores a los obtenidos en este trabajo. Según este autor 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.

CONCLUSIONES

- En el maíz la productividad del agua aplicada por riego (WP_I) fue superior al resto de los cultivos, de 16,43 kg/m³ para un

agua aplicada de 266,8 m³, para la soya fue de 2,96 kg/m³ con 600 m³ y el sorgo 4,23 kg/m³ con 800 m³. Estos valores de WP_I pueden considerarse como niveles óptimos para la producción de estos cultivos en la época de invierno.

- El intervalo para la productividad calculada en base al agua total WP_T para el maíz fue mas amplio que lo reportado por FAO y varió entre 0,86 y 2,9 kg/m³. Por cada metro cúbico de agua total el maíz produce como promedio 1,93 kg. Para la soya la WP_T varió entre 0,28 y 0,81 kg/m³ y produce como promedio 0,49 kg por cada metro cúbico de agua total. La productividad máxima se obtuvo con 2101 m³/ha de agua aplicada. Para el sorgo la productividad del agua total estuvo entre 0,49 y 0,96 kg/m³. Por cada metro cúbico de agua total el sorgo produce como promedio 0,68 kg y la productividad máxima se obtuvo con 3620 m³.
- El cálculo de la productividad en base al agua aplicada por riego para las condiciones climáticas del área de estudio no es un indicador objetivo de la eficiencia del uso del agua por el cultivo; el uso del agua total resulta un indicador más efectivo.
- La pendiente Kr en la función de producción encontrada para el maíz en el invierno fue de 1,67 mientras que en el verano fue 2,31 por lo que se ubican en el grupo IV, mientras que los valores de Kr calculados para la soya y el sorgo en invierno se ubicaron en el grupo I (Kr=0,7-0,8). En estos dos cultivos el déficit de agua incide en menor cuantía sobre el rendimiento que en el maíz.
- La soya en verano tuvo un comportamiento diferente al invierno con un valor de la pendiente Kr de 1,34, lo que indica un efecto significativo de la época de siembra sobre la productividad de este cultivo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOTZAN, M.: "Determination quantitatives de la consommation d'eau des sols irrigués", *L'irrigazione*, 112: 3-8, 1970.
- CASTELLANOS, A.; R. REY; R. AMORO: "Efecto del riego sobre el rendimiento de la soya", *Cienc. Tec. Agric. Riego y Drenaje*, 7(2): 39-51, 1984.
- CASTELLANOS, A.: "Evapotranspiración real de la soya (Glicine max) sembrada en tres épocas del año", *Cienc. Tec. Agric. Riego y Drenaje*, vol.11(1): 73-85, 1988.
- CID, G: *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, La Habana, Cuba, 1995.
- CHATERLÁN, Y.; C. DUARTE; M. LEÓN; L. S. PEREIRA; R. TEODORO; R. GARCÍA: Coeficientes de cultivo de cebolla y su determinación con el modelo ISAREG. In: E. Ruíz and L. S. Pereira (eds) **Modernización de Tecnologías de Información (Taller Internacional, La Paz, Bolivia, sept. 2007), CYTED and PROCISUR/1**, pp. 23 – 25 + CD – Rom paper 1.4, **Montevideo**, 2007.
- DEHGHANISANI, H.; M. NAKHJAVANI; Z. TAHIRI; H. ANYOJI: "Assessment of wheat and maize water productivities and production function for cropping system decisions in arid and semiarid regions", *Irrig. And Drain*, 58: 105-115, 2009.
- DOORENBOS, J.; A.H. KASSAM: *Yield response to water*, 193pp., Irrigation and Drainage Paper N° 33. FAO: Rome; 1979.
- GIRALT, T. E.: *Respuesta del cultivo del maíz sembrado en primavera a diferentes niveles de humedad en el suelo*, 20pp., Informe técnico, IIRD, La Habana, Cuba, 1984.
- GONZÁLEZ, R. F.; J. HERRERA; T. LÓPEZ: "Factor de respuesta al agua de cultivos de interés agrícola en suelo Ferralítico Rojo del sur de La Habana", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 18(3): 7-13, 2009.
- HERRERA, P. J.; M.A. OSORIO: *Efecto de diferentes niveles de humedad del suelo sobre el rendimiento del sorgo*, 30pp., Informe técnico, IIRD, La Habana, Cuba, 1988.
- HOWELL, T.A.; D. SCHNEIDER; R. EVETT: "Subsurface and surface microirrigation of corn Southern High Plains", *Transactions of the ASAE*, 40(3): 635-641, 1997.
- INSTITUTO DE SUELOS. MINAG.: Nueva versión de la Clasificación Genética de los Suelos de Cuba, Editorial Academia, La Habana, 102 pp, 1996.
- IWMI: *¿Cómo se pueden producir más alimentos con menos agua? Water Management and Environment*. International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka, [en línea], Disponible en: <http://www.iwmi.org> [Consulta: 6 de julio 2009].
- KIRDA, C.; R. KANBER; K. TULUCU: *Yield response of cotton, maize, soybean, sugar beet, sunflower and wheat to deficit irrigation*. In: C. Kirda, P. Moutonnet, C. Hera & D.R. Nielsen, eds. *Crop yield response to deficit irrigation*, Dordrecht, Kluwer Academic, The Netherlands, 1999.
- KIRDA, C. (s.a): *Deficit irrigation scheduling based on plant growth stages showing water stress tolerance*, [en línea], In: *Deficit irrigation practices. Resources Management and Environment Department*. FAO Corporate Document Repository, 10pp, Disponible en: <http://www.fao.org> [Consulta: 23 noviembre 2009].
- KIPKORIR, E.C.; D. RAES; B. MASSAWE: "Seasonal water production function and yield response factors for maize and onion in Perkerra, Kenya", *Agricultural Water Management*, 56(3): 229-240, 2002.
- LIU, J.; A.J.B. ZEHNDER; H. YANG: "Drops for crops: modelling crop water productivity on a global scale", *Global NEST Journal*, 10(3): 295-300, 2008.
- MARTIN, D. L.; D.G. WATTS; J.R. GILLEY: "Model and production function for irrigation management", *J. of Irrig. and Drain. Eng., ASCE*, 110: 149-164, 1984.
- MOLDEN, D.: *Accounting for water use and productivity*, 16pp., SWIM Paper 1. International Irrigation Management Institute: Colombo, Sri Lanka, 1997.
- MOLDEN, D.; H. MURRAY-RUST; R. SAKTHIVADIVEL; I. MAKIN: *A water-productivity framework for understanding and action*, pp.1-18, In: *Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement*, Wallingford/Colombo, Sri Lanka, 2003.
- MUSICK, J. T.; DUSEK, D.A.: "Grain sorghum response to number, timing and size of irrigations in the Southern High Plains", *Trans. of the ASAE*, 14: 401-410, 1971.
- NELSON, D.M.; F. SHENG HU; J. TIAN; I. STEFANOVA; T.A. BROWN: "Response of C3 and C4 plants to middle-Holocene climatic variation near the prairie-forest ecotone of Minnesota", *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 13: 562-567, 2004.
- PANDEY, R. K.; J.W. MARANVILLE; A. ADMOU: "Deficit irrigation and nitrogen effect on maize in a Sahelian environment: I. Grain yield and yield components", *Agricultural Water Management*, 46(1): 1-13, 2000.
- SÁNCHEZ, M.A.; E. RAMÍREZ: "Evapotranspiración máxima y coeficientes bioclimáticos del maíz sembrado en primavera", *Cienc. Tec. Agric. Riego y Drenaje*, 11(1): 23-34, 1988.
- RIJSBERMAN, F.; N. MANNING; S. DE SILVA: 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, En: **IV Foro Mundial del Agua**, Instituto Internacional para Manejo del Agua (IWMI), 2006.
- ROSADI, R.A.B; AFANDI; M. SENGE; K. ITO; J. T. ADOMAKO: "The Effect of Water Deficit in Typical Soil Types on the Yield and Water requirement of Soybean (*Glycine max* [L.] Merr.) in Indonesia", *JARQ*, 41(1): 47-52, 2007.
- SANTA OLALLA MAÑAS, M; J.A.J. VALERO: *Las funciones de producción versus agua*, pp. 448-519, Capítulo VII. En: *Agronomía del riego*, Ediciones Mundi Prensa, Madrid, España, 1993.
- STEWART, J. I.: *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, 1977.
- TZENOVA, L.E.: *Sobre la evapotranspiración y métodos para su determinación*. Serie I. Ing. Agronómica. Ciencias Agropecuarias, Universidad de La Habana, La Habana, Cuba, 1976.
- ZWART, S. J.; W.G.M. BSTITAANSSEN: "Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize", *Agricultural Water Management*, 69(2): 115-133, 2004.