



I CONGRESO NACIONAL COMEII 2015

Reunión anual de riego y drenaje

Jiutepec, Morelos, México, 23 y 24 de noviembre

RIEGO POR MELGAS-SURCOS PARA INCREMENTAR EL USO EFICIENTE DEL AGUA Y LA PRODUCTIVIDAD DEL ARROZ

Rutilo López-López¹, José Alfredo Jiménez-Chong¹, Leonardo Hernández- Aragón¹, Massimo Parietti²

¹ Investigadores del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas y Pecuarias en México (INIFAP). Campo Experimental Huimanguillo. Km 1. Carretera Huimanguillo Cárdenas. Ap. 86400. Huimanguillo, Tabasco, México. Tel: 01 800 0882222 ext. 87515.

² Productor de arroz. Rancho Kronos S.A. de C.V. Palizada Campeche, México.

Resumen

El arroz en el Sureste de México se cultiva en condiciones de temporal con problemas de déficit hídrico y en condiciones de riegos de auxilio con bajas eficiencias en el uso y manejo de agua y escasez de variedades con alto potencial de rendimiento de grano. Los objetivos del trabajo fueron: i) evaluar las características agronómicas de tres genotipos de arroz con alto potencial de rendimiento en condiciones de riego; ii) analizar la variación de la demanda de agua basada en la evapotranspiración del cultivo (ET_c) por etapa fenológica a partir de un balance hídrico y iii) cuantificar el uso eficiente del agua (UEA) en tres genotipos de arroz mediante el método de riego por melgas y drenaje superficial. Se sembraron tres genotipos de arroz: las variedades Aztecas e IRGA y el híbrido *Clearfield* XL745. La siembra directa en seco se realizó con una densidad de 80 kg ha⁻¹ para las variedades y 32 kg ha⁻¹ para el híbrido; el surco se realizó cada 9.3 m dentro de la melga. Las variables rendimiento de grano al 14 % de humedad, altura de planta, acame, manchado de grano, mancha café, días a floración y maduración fueron analizadas en un diseño completamente aleatorio y a través de pruebas de medias por Tukey ($\alpha=0.05$). Los genotipos IRGA y el híbrido *Clearfield*, resultaron ser materiales con buena productividad y características agronómicas. La variedad Aztecas expresó buena capacidad productiva, sin embargo, fue superada en un 15.2 % por la variedad IRGA y el híbrido *Clearfield*. La variación de la demanda de agua basada en la ET_c muestra evidencia en la aplicación óptima de láminas de riegos de 264 mm a 318 mm en genotipos de ciclo corto e intermedio, respectivamente. Se incrementó significativamente el UEA en los genotipos de arroz evaluados, con base en el riego aplicado (UEA_R) con un promedio de 2.2 kg m⁻³.

Palabras clave: Riego-drenaje superficial, características agronómicas, rendimiento de grano.



Introducción

La Cuenca Baja del Usumacinta de México es caracterizada por altas precipitaciones (1800 mm) que pueden ser abundantes pero irregulares en cuanto a su distribución. En esta región, el cultivo de arroz se maneja principalmente en condiciones de temporal, pero en zonas que cuentan con infraestructura hidráulica se puede sembrar en condiciones de riego o con riegos de auxilio.

En 2013, en México se sembraron 34,108.90 ha del cultivo arroz con una producción de 179,775.83 t. El rendimiento promedio fue 5.43 t ha⁻¹. El estado de Campeche en el mismo año, reportó una superficie sembrada de arroz de 7,438 ha con una producción de 31,181.2 t. En Otoño-Invierno (OI) se sembraron 4,300 ha y 3,138 ha en Primavera-Verano (PV), situándose en los últimos lugares en productividad con una media de 4.21 t ha⁻¹ (SIAP, 2014).

En esta zona del estado de Campeche, existen períodos en los que la ocurrencia de lluvias no coincide con los requerimientos hídricos de los cultivos por lo que es necesario el aprovechamiento de agua de riego para la obtención de los rendimientos potenciales. El balance hidrológico muestra que a partir de mediados de mayo hasta fines de octubre, la precipitación excede a las demandas de agua por el cultivo. Sin embargo, existe un período de seis meses en los que la curva de ofertas está por debajo de la demanda (diciembre a mayo).

Los problemas que limitan los rendimientos de arroz palay en esta región de México son: irregularidad pluvial que ocasiona pérdidas principalmente por sequía afectando el desarrollo vegetativo y reproductivo de las plantas, la falta de variedades propias para su cultivo en sistema de riego, la maleza y su control que es un serio problema en esta zona arrocera.

Facon (2000) menciona que las necesidades hídricas totales y el uso específico del agua para la producción de arroz en condiciones de diferentes agroecosistemas pueden aproximarse en una evapotranspiración de 550-950 mm por cultivo en promedio, que es el agua realmente consumida por la planta; en arroz de secano se necesitan 5,500 m³ ha⁻¹ (solo evapotranspiración) con rendimiento de grano de 1.25 t ha⁻¹, el uso específico del agua es de 4.4 m³ kg; en arroz de riego de secano se necesitan 10,000 m³ ha⁻¹ (evapotranspiración + riego suplementario) con rendimiento de grano de 2.5 t ha⁻¹ el uso específico del agua es de 4.0 m³ kg⁻¹; en arroz de riego en terrenos bajos se requieren 16,500 m³ ha⁻¹ (evapotranspiración y riego completo), el rendimiento de grano es de 4.5 t ha⁻¹ y el uso específico del agua es de 3.77 m³ kg⁻¹.

El Uso Eficiente del Agua (UEA) es un concepto parcial de la productividad y denota la cantidad o el valor de producto o granos de arroz entre el volumen o valor del agua utilizada. Las diferencias en valores de UEA reportados por diversos autores se deben a



las grandes variaciones en la producción de arroz que van desde 3 a 8 t ha⁻¹ y los diferentes conceptos del uso del agua en la producción del cultivo. De esta forma el UEA puede ser definida como el peso del grano de arroz entre el volumen acumulado de agua usado para la transpiración (UEA_T), para la evapotranspiración (UEA_{ETc}), para el riego (UEA_R), para el riego más la precipitación (UEA_{R+P}) o para el riego, la precipitación más el ascenso capilar (UEA_{R+P+C}) (Bouman et al. 2007).

El UEA también puede variar cuando se evalúa a diferentes escalas espaciales debido a que influyen factores tales como la selección de cultivos, los patrones climáticos, tecnología de riego y gestión del agua en parcelas e insumos, incluyendo la mano de obra, fertilizantes y maquinaria (Rosegrant et al., 2002; Kijne et al., 2002). Debido a la variabilidad espacial en el UEA, existen opciones en la agricultura para mejorarla a nivel parcelario, las opciones pueden implicar investigación combinada en la fisiología de la planta, la agronomía y la ingeniería agrícola que se orientan en hacer la transpiración más eficiente o productiva, reduciendo la evaporación no productiva y mediante la aplicación de láminas de riego más precisas y eficientes (Molden et al., 2003).

El UEA en arroz con respecto a la entrada total del agua (riego más lluvia) varía de 0.2 a 1.2 g de grano por kg⁻¹ de agua (0.2 a 1.2 kg de grano por m³ de agua) con un valor promedio de 0.4, la cual es la mitad que el trigo (Tuong et al. 2005). Wokker et al. (2011) presentan un resumen de los estudios relacionados con el Uso Eficiente del Agua en arroz con énfasis especial en los países del sudeste asiático. Estos estudios tienen un enfoque en el uso del agua cuantificado por diferentes medidas de evapotranspiración real, potencial o de referencia, basados en datos de estaciones experimentales o experimentos de invernadero que no reflejan necesariamente las condiciones de la producción comercial de arroz. Los valores varían desde 0.04 kg m⁻³ en función de los aportes de agua de lluvia, riego, flujo superficial y subterráneo hasta 2.1 kg m⁻³ obtenido a partir de solo la lámina de riego.

Ante el desafío de producir más arroz con menos agua, en el presente trabajo se aplica una modalidad del método de riego por gravedad combinado melgas-surcos (Figura 1), para hacer un uso más eficiente del agua de riego, mejorar el control de malezas y el aprovechamiento de fertilizantes nitrogenados, facilitar la cosecha e incrementar la productividad del arroz. Los objetivos del trabajo fueron: i) evaluar las características agronómicas de tres genotipos de arroz con alto potencial de rendimiento en condiciones de riego; ii) analizar la variación de la demanda de agua basada en la evapotranspiración del cultivo (ETc) por etapa fenológica a partir de un balance hídrico y iii) cuantificar el uso eficiente del agua en tres genotipos de arroz mediante el método de riego por melgas y drenaje superficial.



Figura 1. Trazo de surcos para la conducción del agua de riego y drenaje superficial en melgas cultivadas de arroz en Palizada Campeche, México.

Materiales y métodos

Área de estudio y clima. Durante el ciclo primavera verano 2015 en condiciones de riego se cultivó arroz en el Rancho Kronos S. A. de C. V. en Palizada, Campeche, México, en una superficie de 520 ha, situado geográficamente a $18^{\circ} 3' 16.7''$ N y $91^{\circ} 56' 09.8''$ O a una altitud de 5 m, localizado en el Sureste de México. El clima es cálido húmedo con abundantes lluvias en verano (Am), con una precipitación promedio anual de 1877 mm y temperatura promedio de 27.0°C .

Suelo. El suelo se clasifica como Luvisol gleyíco, el análisis de las propiedades físicas del suelo, indicó que tiene una textura franco arcillosa; densidad aparente de 1.25 y 1.36 g cm^{-3} a 0.1 y 0.3 m de profundidad, respectivamente, densidad real de 2.3 a 0.1 m y de 2.4 g cm^{-3} a 0.3 m de profundidad; porcentaje de humedad a capacidad de campo (CC) de 29.6 % y a punto de marchitez permanente (PMP) de 16.5 %. La curva característica de humedad se determinó en el laboratorio con el método de la olla y membrana de presión, en muestras de suelos tomadas con la barrena *Uhland*, que luego se secaron en estufa a 105°C por 24 h, con el fin de obtener el espacio poroso o la humedad a saturación del suelo. Posteriormente, se determinó el contenido de humedad (W) por diferencia de pesos, en función de una sucesión de cambios de succión (ψ) en el proceso de secado. Estas características indican que el suelo es de mediana a alta capacidad de retención de humedad, con un espacio poroso o contenido volumétrico de humedad a saturación (θ_s) de 0.47 a 0.1 m de profundidad y 0.44 a 0.3 m de profundidad. El pH es de moderado a ligeramente ácido (5.1 a 6.2) con contenidos moderados a pobres de materia orgánica (0.8-1.2 %), fósforo ($5 - 10\text{ mg kg}^{-1}$) y potasio ($0.5 - 0.8\text{ mg kg}^{-1}$).

Preparación y nivelación del terreno. Una vez cosechada la soca del cultivo del ciclo anterior, en los meses de noviembre y diciembre de 2014 se inició inundando el terreno para realizar un desbrozamiento de la maleza mediante un arado rotatorio denominado “bolillo” (Figura 2). Posteriormente se aplicó glifosato en dosis de 3 L ha^{-1} , para eliminar la maleza que emerge. La nivelación de suelos se realiza con señal satelital, empleando geoposicionadores, equipo agrícola motriz de alto despeje e implementos de nivelación. La nivelación primaria se realizó 20 días después del desbrozamiento de la maleza mediante

el *Screpón* (pala mecánica que con el nivelador de rayos laser situado al centro de la melga transmite la señal satelital al receptor que calcula de forma automática los puntos de desnivel). Finalmente se realizó un paso de rastra para desmoronar los terrones y facilitar la siembra mecánica.



Figura 2. Preparación del terreno en húmedo (fangueo) con arado rotatorio (bolillo) posterior a la cosecha del arroz ciclo PV/2015.

Genotipos, siembra y densidad de población. Se utilizaron tres genotipos: las variedades Aztecas e IRGA y el híbrido *Clear field* CLXL 745, el rendimiento potencial, la densidad de siembra y días a maduración en condiciones de riego, así como el origen de los genotipos se presentan en el Cuadro 1. La siembra se realizó en forma directa con una sembradora mecánica de precisión con 24 hileras separadas a 20 cm.

Cuadro 1. Genotipos de arroz, rendimiento potencial y densidad de siembra utilizados en condiciones de riego.

Genotipo	Origen	Rendimiento potencial t ha ⁻¹	Densidad de siembra kg ha ⁻¹	Días a maduración
Clearfield XL 745	USA	10	32	100
IRGA	Brasil	8	80	122
Aztecas	México	8	80	122

Riego y drenaje superficial. El agua de riego es extraída del Rio Usumacinta mediante dos motobombas eléctricas de 150 HP con un gasto total de 850 L s⁻¹, para ser derivada en un embalse con cuatro motobombas instaladas de 75 HP cada una. Este gasto se conduce por el canal principal y se distribuyen en canales secundarios para el riego por melgas que varían de 5.5 a 22 ha. En cada melga se trazan surcos cada 9.3 m de separación (dos veces el ancho de la sembradora) de 0.3 m de profundidad y 0.5 m de ancho con la sanjeadora rotativa de doble rueda (Dondi®) que conducen el agua de riego y drenaje (figura 1). El drenaje se realiza después del riego de germinación, antes de la fertilización nitrogenada, antes de la aplicación de herbicidas o para el control de aves. Estos surcos son conectados al canal secundario y a los drenes parcelarios de las melgas que derivan a su vez al canal principal del riego. Esta labor es guiada a través de un equipo GPS que permite hacer surcos precisos, paralelos entre sí y a una misma profundidad.



La evapotranspiración del cultivo de arroz (ET_c) se relaciona con la evapotranspiración de un pasto tomado como referencia (ET_0), con el empleo de los coeficientes de cultivo (K_c). Primero se obtuvo la evapotranspiración de referencia mediante el método de Penman Monteith (Allen et al. 2006).

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

donde: R_n es la radiación neta en la superficie del cultivo ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$); G es la densidad de flujo de calor del suelo ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$); T es la temperatura media diaria del aire ($^{\circ}C$); u_2 es la velocidad del viento a 2 m de altura ($m\ s^{-1}$); e_s es la presión de vapor a saturación (kPa); e_a es la presión de vapor actual (kPa); Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor ($kPa\ ^{\circ}C^{-1}$) y γ es la constante psicrométrica ($kPa\ ^{\circ}C^{-1}$). Los datos del clima fueron extraídos de una estación meteorológica automatizada ubicada en Juncal Palizada, Campeche a una distancia de 0.5 km de la parcela experimental.

La evapotranspiración del cultivo se calculó como sigue:

$$ET_c = K_c ET_0 \quad (2)$$

Donde los valores de K_c dependen de la etapa fenológica del cultivo. Los valores usados para el cultivo de arroz fueron: 1.05 en la etapa vegetativa, 1.2 en la etapa reproductiva y 0.9 a 0.6 en la etapa de maduración (Allen et al. 2006).

Se usaron vertedores o compuertas aplicándose diferentes gastos unitarios (gasto disponible por metro lineal de ancho de melga). Mientras mayor es el gasto por unidad de ancho, mayor eficiencia de aplicación y menor tiempo de riego, aunque se debe observar que este gasto no erosione el suelo.

Para determinar la lámina de riego (Lr) a partir de las condiciones iniciales de humedad del suelo ($\theta_0 = W\ \rho_a$), se procedió a calcular el contenido volumétrico de humedad a saturación (θ_s) asumido igual a el espacio poroso del suelo (0.47), mediante la densidad real (ρ_r) y la densidad aparente (ρ_a) según la ecuación (3):

$$\theta_s = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_r} \quad (3)$$

Se considera que la profundidad de 0.3 m del suelo se encuentra la mayor proporción de raíces (70 %) en el cultivo de arroz. Por lo tanto, conociendo la profundidad de raíces (Pr), se obtiene la lámina de riego:

$$Lr = (\theta_s - \theta_0) Pr \quad (4)$$



Con el gasto fijo (Q) y conociendo el área (A), se calculó el volumen del agua de riego aplicada por unidad de superficie (V), que permite conocer el tiempo de riego (t):

$$V = Lr A \quad (5)$$

$$t = \frac{V}{Q} \quad (6)$$

donde Q es el gasto que entra a la melga estimada a partir de la velocidad por el área de la sección.

Se aplicaron seis riegos con láminas que variaron entre 46 a 54 mm, para un total de 318 mm. El riego de germinación (RG) se realizó el 18 de abril de 2015, y los siguientes cinco riegos se aplicaron en un intervalo promedio de 15 días (Figura 3).

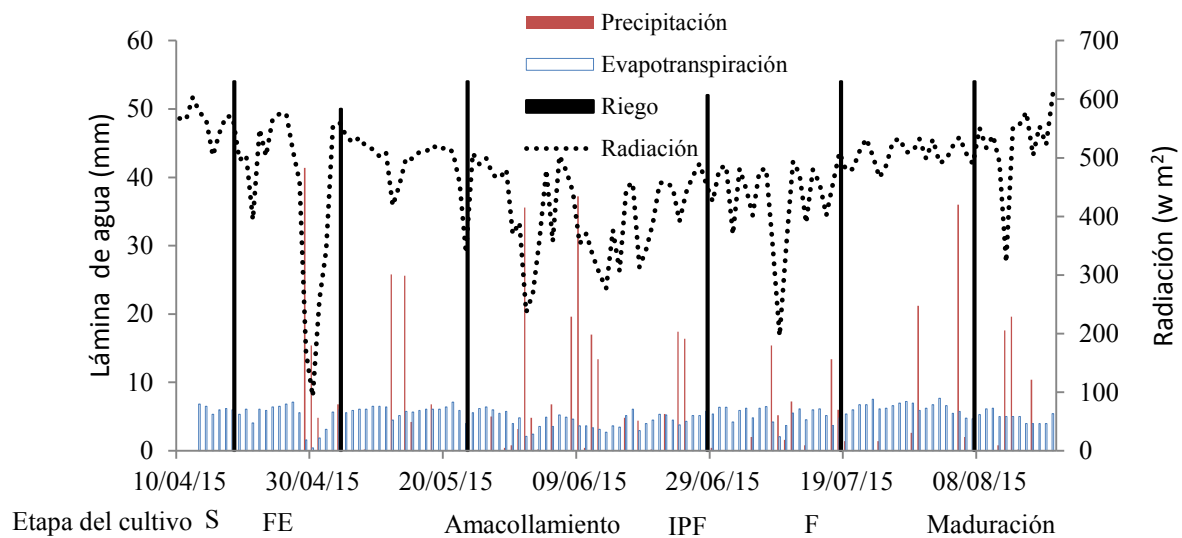


Figura 3. Láminas de riego en función de la evapotranspiración del cultivo, radiación global y la precipitación, en siembra (S) del 14 de abril de 2015. RG: riego de germinación, FE: fecha de emergencia, IPF: inicio del primordio floral, F: floración.

Control de malezas. El control de malezas inicia desde la preparación del terreno con el desbrozamiento del terreno, aunada a la aplicación de pre-emergente basados en Pendimetalina (Prowl® H2O 3.0 L ha⁻¹) y una segunda aplicación de glifosato en dosis de 3 a 4 L ha⁻¹ más Melsufuron (Accurate®) a razón de 14 g ha⁻¹ adicionándose un adherente y acidificante a razón de 50 ml ha⁻¹ en ambos productos. A los 20 días después de la emergencia de la planta, se aplicó Propanil en dosis de 4 L ha⁻¹ para el control de zacates más Melsufuron a razón de 4 g ha⁻¹ o Triclopyr en dosis de 600 ml ha⁻¹ para el control de malezas de hoja ancha.



Fertilización. En la etapa de preparación de suelos o antes de la siembra, se aplicó la fertilización base de 100 kg de fosfato di-amónico (18-46-00) y 85 kg de cloruro de potasio (00-00-60). A los 30 días después de la siembra, se aplicaron 300 kg ha⁻¹ de urea (46-00-00) con la voleadora mecánica, que resulta en una fórmula de 154-46-51, sin embargo, poco antes de la floración, se realiza una aplicación complementaria de 80 kg ha⁻¹ de urea en las áreas donde se observan deficiencias de nitrógeno (N) para completar la fórmula de 193-46-51 de nitrógeno, fósforo y potasio, respectivamente.

Control de plagas y enfermedades. A los 20 días después de la emergencia junto con los herbicidas postemergentes se aplicó cipermetrina en dosis de 250 ml ha⁻¹ para el control de la *rosquilla* (*Spodoptera frugiperda*). En la etapa del inicio de la floración al llenado del grano se aplicó Imidacloprid más Lambda cialotrina en dosis de 100 g L⁻¹ (250 ml ha⁻¹) y una segunda aplicación de Sulfoxaflor en dosis de 240 g de i.a. L⁻¹ (Toretto™) para el control de chinche café (*Oebalus insularis*). El control de pyricularia y mancha café causados por *Maganoprote griseae* y *Hemiltonsporium oryzae*, respectivamente se realizaron con Fenpropimorph + Epoxiconazole + Kresoxym methyl (Juwel®) a razón de 125 g L⁻¹ ha⁻¹.

Variables de medición y análisis estadístico. La cosecha manual y registro de variables continuas se realizaron seleccionando cinco surcos centrales (unidad experimental) de 5 m de largo (5 m²). Una vez cortado el arroz de la parcela útil, se procedió a golpear las panículas en tambos limpios, para evitar la contaminación de la semilla. Los granos fueron expuestos al sol por espacio de dos días, para después limpiarlos con ventilador, eliminando de esta manera paja e impurezas. En una balanza se pesó el contenido de granos de cada repetición por genotipo y posteriormente se tomaron 100 g para determinar el contenido de humedad corregido del rendimiento de grano al 14 %. Las variables altura de plantas, días a floración y maduración, manchado de grano y acame también se midieron en cada unidad experimental y se analizaron a nivel de promedios. Las variables estudiadas se analizaron bajo un diseño completamente aleatorio con cinco repeticiones donde la parcela experimental fueron lotes 100 m de largo. Se realizaron análisis de varianza de las variables medidas y la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$) para la comparación múltiple de medias.

El Uso Eficiente del Agua se obtuvo en función de la evapotranspiración del cultivo (UEA_{ETc}), del agua de riego (UEA_R) y del agua de riego más la precipitación (UEA_{R+P}), dividiendo el rendimiento de grano al 14 % de humedad en kg ha⁻¹ por el volumen de agua consumido en m³ ha⁻¹.

Resultados

Rendimiento de grano y sus componentes. El análisis de varianza indican que existen diferencias significativas ($P<0.05$) para las variables rendimiento de grano, días a floración, días a maduración, altura de plantas, manchado de grano, mancha café, excepto para el acame, los genotipos evaluados presentan alta resistencia al volcamiento de plantas



(Cuadro 2). La prueba de medias por Tukey ($\alpha=0.05$) separa los genotipos en grupos estadísticos, donde se puede notar que los rendimientos obtenidos son aceptables. Estos materiales genéticos registraron una altura de planta de 97 a 110 cm, de 80 a 97 días a floración, 100 a 122 días a madurez, no presentaron problemas de acame, sus fenotipos son buenos, presentaron ligeros daños en hojas y granos ocasionados por *Helminthosporium oryzae* principalmente en las variedades IRGA y Aztecas. Los genotipos IRGA y *Clearfield* XL745, resultaron ser materiales con buena productividad obteniéndose en ambos rendimiento promedio de 7400 kg ha^{-1} comparado con la variedad Aztecas con rendimiento promedio de 6350 kg ha^{-1} . Esta variedad expresó buena capacidad productiva, sin embargo, fue superada en un 15.2 % por la productividad promedio que registraron la variedad IRGA y el híbrido *Clearfield* XL745.

Cuadro 2. Rendimiento de grano y sus componentes para genotipos de arroz en condiciones de riego-drenaje superficial controlado para el Sureste de México.

Genotipo	Rendimiento de grano kg ha ⁻¹	Días a floración	Días a maduració n	Manchado de grano*	Altura de planta (cm)	Manch a café*
Aztecas	6350 b	95 a	122 a	4.0 a	103 ab	3.0 a
IRGA	6900 ab	97 a	122 a	4.5 a	110 a	3.0 a
Clearfield XL 745	7900 a	80 b	98 b	2.0 b	97 b	2.0 a

*Escala del Sistema de Evaluación Estándar para Arroz (IRRI 1996).

Balance hídrico. De acuerdo con el Cuadro 3, la precipitación total ocurrida durante el ciclo del cultivo fue de 467 a 513 mm, las necesidades de evapotranspiración del cultivo fueron de 511 a 635 mm, para genotipos de ciclo corto (Híbrido) e intermedio (IRGA y Aztecas), respectivamente. Se aplicaron seis riegos de auxilio (incluye riego de germinación) con una lámina total de 318 mm para las variedades intermedias y 264 mm para el genotipo de ciclo corto.

El análisis de la variación de la demanda de agua basada en la evapotranspiración del cultivo (ET_c) a partir del balance hídrico en el ciclo primavera – verano (PV) 2015 muestra que en términos de láminas de agua, presentan valores altos de ET_c por las relativamente más altas temperaturas y alta radiación global. En la Figura 3 se observa que la demanda y la aplicación de la lámina de riego corresponde a fluctuaciones en la cantidad de precipitación que alcanzó un valor máximo de 41.4 mm y la evapotranspiración del cultivo que varió de 0.42 mm a 7.68 mm. De acuerdo con el balance hídrico, las siembras de arroz en el ciclo PV necesariamente requieren de suplemento de riego para garantizar la obtención de aceptables rendimientos. El valor de ET_c obtenido a partir de la ET₀ por el método de Penman Monteith y los K_c de la FAO fue en promedio de 5.2 mm d⁻¹ durante el periodo del cultivo. Al respecto, Facon (2000) señala que para la producción del cultivo de arroz en condiciones de diferentes agroecosistemas pueden aproximarse en promedio de



550 - 950 mm. Según Tabbal et al. (2002) la tasa de ETc en arroz son de 4–5 mm d⁻¹ en la estación húmeda y de 6–7 mm d⁻¹ en la estación seca, pero puede ser tan alta como de 10–11 mm d⁻¹ en regiones subtropicales. Durante el periodo de crecimiento del cultivo, alrededor del 30–40 % de la ETc es evaporación (Bouman et al. 2005, Simpson et al. 1992).

También se puede notar que existe una relación muy estrecha entre la radiación global y la precipitación y su influencia en los requerimientos hídricos del cultivo, cuando ocurre precipitación, la radiación global disminuye y por consecuencia las necesidades hídricas del cultivo disminuyen.

La diferencia entre la lámina total de riego aplicada más la lluvia y las necesidades de ETc fueron de 196 a 226 mm, que puede ser considerado como pérdidas por infiltración o percolación en el suelo. Los valores típicos combinados de la infiltración y percolación varía de 1-5 mm d⁻¹ en suelos arcillosos pesados y de 25 – 30 mm d⁻¹ en suelos arenosos y francos arenosos (Bouman and Tuong 2001). Estos valores muestran evidencia de la alta eficiencia en la aplicación de láminas de riegos por el método combinado melgas-surcos. La percolación ocurre cuando la cantidad de agua infiltrada en el suelo es mayor que la capacidad de almacenamiento de la zona radical (después de una intensa lluvia o la aplicación del riego), por lo tanto no es un flujo que ocurre diariamente como en el arroz de terrenos bajos.

Se puede observar que los valores de Kc en las variedades de ciclo intermedio varían de 1.05, 1.29 y 0.83 en las etapas vegetativa, reproductiva y madurez, respectivamente. Los valores de Kc para el genotipo de ciclo corto fueron similares, lo cual indican que tanto en las etapas vegetativas y reproductivas los valores de ETc superan los valores de ET₀.

Cuadro 3. Balance hídrico del cultivo de arroz en función del ciclo vegetativo y etapa fenológica.

Ciclo vegetativo	Etapas	Días	Precipitación (mm)	ET ₀ (mm)	ETc (mm)	Kc	L. R. (mm)
Intermedio (IRGA, Aztecas)	Vegetativa	64	324	303.2	318.3	1.05	158
	Reproductiva	34	78.6	167.5	215.3	1.29	106
	Madurez	24	110.2	123.0	101.7	0.83	54
Total		122	512.8	593.7	635.2		318
Corto (Clearfield)	Vegetativa	54	280.2	260.4	273.4	1.05	158
	Reproductiva	26	76.4	117.7	141.2	1.20	106
	Madurez	20	110.2	116.9	96.2	0.82	0
Total		100	466.8	495.0	510.8		264

ET₀: evapotranspiración de referencia, estimada por el método de Penman-Monteith; ETc: evapotranspiración del cultivo; Kc: coeficiente de cultivo; L.R.: lámina de riego.



Uso eficiente del agua (UEA). En el Cuadro 4 se presenta el Uso eficiente del agua con base en la evapotranspiración del cultivo, solo riego y el riego más la precipitación para los genotipos de arroz evaluados en el ciclo PV/2015. Los resultados obtenidos muestran que el UEA en función de la ET_c , de solo riego y el riego más la precipitación en los genotipos evaluados fueron en promedio de 1.0, 2.0 y 0.8 $kg\ m^{-3}$, respectivamente, los cuales son similares a los reportados por Tuong et al. (2005), con valores máximos de 1.2 $kg\ m^{-3}$ a partir del volumen acumulado de riego aplicado más precipitación.

El híbrido *clearfield* presenta el valor más alto en Uso Eficiente del Agua debido a que se obtuvo rendimientos promedio de 7.9 $t\ ha^{-1}$ y son de ciclo más corto (98 días), por lo tanto la ET_c total es menor que en los demás genotipos. En cuanto al Uso Eficiente del Agua basado en la aplicación de láminas de riego, con valores de 1.81, 2.17 y 2.48 $kg\ m^{-3}$, para la variedad Aztecas, IRGA y el híbrido *Clearfield*, respectivamente, los cuales superan el promedio mundial que reporta Tuong et al. (2005) de 0.4 $kg\ m^{-3}$. No obstante, los resultados obtenidos son similares a los reportados por Wokker et al. (2011). Los valores de UEA obtenidos corroboran el incremento en el uso eficiente del agua de riego para el actual sistema de producción de arroz comparado con sistemas de producción de inundación continua donde se riegan con láminas de riego acumulados mayores que un metro en esta región de México.

Cuadro 4. Uso Eficiente del Agua en función de la evapotranspiración del cultivo (UEA_{ET_c}), del riego aplicado (UEA_R) y del riego más la precipitación (UEA_{R+P}) para tres genotipos de arroz en Palizada Campeche, México.

Genotipos	UEA_{ET_c}	UEA_R	UEA_{R+P}
	$kg\ m^{-3}$		
Aztecas	1.03	1.99	0.78
IRGA	1.13	2.17	0.85
Clear field			
CLXL 745	1.54	2.48	0.98
Promedio	1.23	2.21	0.87

UEA_{ET_c} = Uso Eficiente del Agua basado en la ET_c , UEA_R = Uso Eficiente del Agua basado en el riego aplicado, UEA_{R+P} =Uso Eficiente del Agua basado en el riego más la precipitación.

Cabe señalar que además del ahorro de agua que genera el método de riego y drenaje superficial utilizado, se reducen las pérdidas del fertilizante nitrogenado, al observarse en campo que la dosis de 154 kg de N aplicado al cultivo alcanza el rendimiento potencial esperado y la planta presenta mayor vigor y coloración verde intenso. Esto concuerda con los trabajos desarrollados por Shao et al. (2015) sobre riego y drenaje controlado en las diferentes etapas del cultivo donde encontraron que las pérdidas de nitratos y nitrógeno amoniacal disminuyen significativamente en el escurrimiento superficial.



Por otro lado, la nivelación del terreno es un factor importante en el uso eficiente del agua al disminuirse el tiempo de riego, ahorro de combustible y mayor eficiencia del equipo de bombeo, ya que significa hasta un 40 % menos de gastos en comparación con suelos no nivelados y una reducción considerable en el uso de herbicidas para el control de malezas. Los surcos en las melgas del cultivo de arroz mejoran las eficiencias de aplicación y de uniformidad del riego y el drenaje se realiza en el momento que se requiere.

Conclusiones

Los genotipos IRGA y el híbrido Clearfield, resultaron ser materiales con buena productividad y características agronómicas en condiciones de riego superficial, las cuales registraron un comportamiento productivo alto. La variedad Aztecas expresó buena capacidad productiva, sin embargo, fue superada en un 15.2 % por la productividad promedio que registraron la variedad IRGA y el híbrido *Clearfield*.

La variación de la demanda de agua basada en la ETC a partir del balance hídrico por etapa fenológica del cultivo de arroz, muestra evidencia en la aplicación óptima de láminas de riegos de 264 mm a 318 mm en genotipos de ciclo corto e intermedio, respectivamente.

El método de riego por melgas-surcos, incrementó significativamente el uso eficiente del agua en los genotipos de arroz evaluados, con base en el riego aplicado ($UEAR$) con un promedio de 2.2 kg m^{-3} .

Referencias Bibliográficas

- Allen G, R Pereira, S. L, Raes D and Smith M. (2006) Crop Evapotranspiration. FAO Irrigation and Drainage UEAPER No. 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy.
- Bouman BAM, Tuong TP. (2001). Field water management to save water and increase its productivity in irrigated rice. *Agriculture Water Management*. 49:11-30.
- Bouman BAM, Peng S, Castaneda AR, Visperas RM. (2005). Yield and water use of irrigated tropical aerobic rice systems. *Agriculture Water Management*. 74:87-105.
- Bouman BAM, LamUEAyan RM, and Tuong TP. (2007). Water Management in Irrigated Rice: Coping with Water Scarcity. International Rice Research Institute (IRRI). Los Baños Philippines. 54 p.
- Facon T. (2000) Water Management in Rice in Asia: Some issues for the future. *In: Bridging the Rice Yield Gap in the Asia-Pacific Region*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Eds. M. K. Papademetriou; F. J. Dent, E. M. Herath. Bangkok, Thailand. 220 p.
- IRRI (1996). Sistema de Evaluación Estándar para Arroz. International Rice Research Institute, Manila, Filipinas. 4a. Edición.



- Kijne JW, Tuong TP, Bennett J, Bouman B and Oweis T. (2002) Ensuring Food Security via Improvement in Crop Productivity of water. Challenge Program on Water and Food. Background Paper 1. CGIAR, 44 p.
- Molden D, Murray-Rust H, Sakthivadivel R and Makin I. (2003) A water-productivity framework for understanding and action. In: Kijne W, Barker R and Molden D (eds) Water productivity in agriculture: Limits and opportunities for improvements. CAB International, Wallingford, UK.
- Rosegrant MW, Cai X and Cline SA. (2002) World Water and Food to 2025, Dealing with Scarcity. International Food Policy Research Institute, Washington D.C. 322 p.
- SIAP-SAGARUEA (2014). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera-Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca (Agricultural Information Service and Fisheries, Ministry of Agriculture, Livestock, Rural Development, Fisheries). www.siap.gob.mx (revisado 06 agosto de 2015)
- Simpson HJ, Herczeg A L, Meyer W S. (1992). Stable isotope ratios in irrigation water can estimate rice crop evaporation. Geophys. Res. Lett. 19:377-380
- Shao GC, Wang MH, Yu SE, Liu, N, Xiao, MH, and Yuan M. (2015). Potential of controlled irrigation and drainage for reducing nitrogen emission from rice paddies in Southern China. Journal of Chemistry.
- Tabbal DF, Bouman BAM, Bhuiyan SI, Sibayan EB, Sattar MA. (2002). On-farm strategies for reducing water input in irrigated rice: case studies in the Philippines. Agriculture Water Management. 56:93-112.
- Tuong TP, Bouman BAM, Mortimer M. (2005). More rice, less water: integrated approaches for increasing water productivity in irrigated rice-based systems in Asia. Plant Prod. Sci. 8:231-241.
- Wokker C, Santos P, Bansok R and Griffiths K. (2011). Irrigation water productivity in Cambodian rice systems. Cambodian's leading independent development policy research institute (CDRI). Working UEAper series No. 51. 40 p.