

EFFECTO DEL RIEGO TRADICIONAL EN LA PRODUCCIÓN, EFICIENCIA HÍDRICA Y EMISIÓN DE METANO DEL CULTIVO DE ARROZ

Freddy C. Gavilánez Luna¹, César M. Barzola Ordinola¹, Cristhian J. Falconí Zambrano¹ y Aldo J. Loqui Sánchez²

RESUMEN

La generación de información que sirva de argumento en la búsqueda de alternativas de manejo sostenible de la irrigación en arroz es una importante demanda actual. Ante ello, este estudio tuvo como objetivo la evaluación del riego tradicional (inundación continua) a través de la producción del cultivo, la eficiencia de uso de agua (EUA) y la emisión de metano, tomando como referencia una alternativa de riego sin inundación (aeróbico), en la cual se mantuvo la humedad del suelo entre saturación y cerca de capacidad de campo. Con estas dos alternativas de riego se instaló un experimento de cuatro parcelas cuadradas de 25,0 m de lado, definiéndose nueve puntos de muestreo de 4,0 m² dentro de cada una de ellas. Se utilizó la variedad de arroz INIAP 11 de uso local, con siembra por trasplante. El manejo del riego se llevó a cabo empleando el método de la tina de evaporación, junto con el registro de tensiómetros para el control de la humedad. En el cultivo se evaluó el macollamiento, el porcentaje de granos vanos, el peso de 1000 granos y el rendimiento. En la medición del metano se utilizaron dos cámaras acrílicas de 1,0 m de lado y 1,2 m de altura, junto con un medidor portátil del gas. No se detectaron diferencias significativas en la producción del cultivo, pero se evidenció un incremento sustancial de la EUA de 3,649 a 0,312 m³·kg⁻¹. La tasa de emisión de metano fue significativamente superior en el riego tradicional, con un máximo de 4,33 mg·m⁻²·hora⁻¹; mientras que, en la irrigación aeróbica, este valor fue de 1,69 mg·m⁻²·hora⁻¹. Se concluye que la alternativa de riego sin inundación presenta ventajas en la EUA y emisión de metano respecto del riego tradicional, a la vez que mantiene inalterable la producción del cultivo.

Palabras clave adicionales: Anaerobiosis, contaminación de acuíferos, eficiencia de uso de agua, inundación continua, percolación

ABSTRACT

Effect of traditional irrigation on production, water efficiency and methane emission of rice crop

The generation of information that serves as an argument in the search for alternatives for sustainable management of irrigation in rice is an important current demand. Given this, the present study aimed to evaluate traditional irrigation (continuous flooding) through crop production, water use efficiency (WUE) and methane emission; taking as reference an irrigation alternative without flooding (aerobic), in which soil moisture was maintained between saturation and close to field capacity. With these two irrigation alternatives, an experiment of four-square plots of 25,0 m on each side was installed, defining nine sampling points of 4.0 m² within each of them. The INIAP 11 rice variety was used, with sowing by transplant. Irrigation management was carried out using the pan evaporation method, together with the registration of tensiometers for soil moisture control. In the crop, tillering, percentage of empty grains, weight of 1000 grains and yield were evaluated. For the measurement of methane, two acrylic chambers of 1.0 m side and 1.2 m high were used, together with a portable gas meter. No significant differences were detected in crop production, but a substantial increase in WUE from 3,649 m³·kg⁻¹ to 0,312 m³·kg⁻¹ was found. The methane emission rate was significantly higher in traditional irrigation, with a maximum of 4.33 mg·m⁻²·h⁻¹, while, in aerobic irrigation, this value was 1.69 mg/m²/h. It was concluded that the irrigation without flooding has advantages regarding WUE and methane emission with respect to traditional irrigation while keeping the crop production unchanged.

Additional keywords: Anaerobic condition, aquifer contamination, continuous flooding, percolation, water use efficiency

INTRODUCCIÓN

La irrigación es la actividad del hombre que mayor uso hace del agua dulce a nivel general, y su manejo no sostenible causa problemas de contaminación de fuentes hídricas por los lixiviados de agroquímicos que son movilizados en las pérdidas de percolación (Bilgili et al.,

2018). Así mismo, puede favorecer la salinización por causa del bombeo excesivo que deja espacios libres en los acuíferos para entrantes de agua salina en terrenos cercanos a zonas costeras (FAO, 2021). El método de riego por gravedad es la alternativa que más derroche de agua produce, cuya eficiencia, en la mayoría de los casos, no supera el 50 % (Díaz, 2017). Dentro de este tipo

Recibido: Mayo 8, 2023

Aceptado: Noviembre 23, 2023

¹Universidad Agraria del Ecuador. e-mail: fgavilanez@uagraria.edu.ec (autor de correspondencia); cesar.barzola98@gmail.com; cristhi_javi@hotmail.com

²Universidad Estatal de Guayaquil. e-mail: aldo.loquis@ug.edu.ec

de riego están las prácticas tradicionales de parcelas bajo inundación que se utilizan para el cultivo de arroz, posiblemente las actividades más ineficientes en cuanto al uso del agua de riego dentro de las explotaciones agrícolas en general.

Para el Ecuador, el arroz es uno de los cultivos de ciclo corto que más se desarrolla, ocupando una superficie de 176.380 ha, equivalente al 67,38 % del área de siembra de dichas especies a nivel nacional (INEC, 2021a). Por su forma tradicional de cultivo, es el que utiliza la mayor cantidad de agua; esto debido al método de riego (gravedad) y por representar el 62 % de los cultivos transitorios que están bajo irrigación (INEC, 2021b). En Ecuador se desconocen los volúmenes de uso de agua dulce que se emplean en el riego de esta gramínea respecto de las reales necesidades hídricas, contabilizadas a partir de su evapotranspiración; si bien se ha mencionado en la escasa bibliografía un volumen unitario y definido como consumo del cultivo de 15.000 m³/ha (Valdiviezo, 2007), es información no comprobada experimentalmente. Los reportes de eficiencia de uso de agua para este cultivo son muy poco disponibles, salvo estimaciones que se han realizado bajo la técnica denominada Sistema Intensivo del Cultivo de Arroz (SICA), con la cual se reportan ahorros del 40 al 60% de agua mediante una metodología que no mantiene los campos inundados (Ochoa et al., 2017).

La ineficiencia del uso de agua en el cultivo de arroz no se debe tanto por su demanda, sino más bien a la búsqueda de una mayor rentabilidad que genera una explotación desmedida del recurso como, por ejemplo, el de controlar las malezas con la presencia permanente de una lámina de agua (Ricetto et al., 2017; Samoy et al., 2021) sin ningún criterio de sostenibilidad. Sin embargo, según varios estudios (Ochoa et al., 2017; Djaman et al., 2018), entre los cuales se encuentran el sistema SICA y el riego alternativo de humectación y secado, se ha comprobado que el arroz no necesita estar en condiciones de inundación para producir, más bien puede existir un efecto adverso que perjudica su producción potencial; por ejemplo, inhibe parcialmente la germinación, limita el macollamiento y alarga el tallo de las plántulas con lo cual se fomenta el volcamiento (González y Alonso, 2016). Además, los sistemas de cultivo sin inundación pueden favorecer una menor absorción de metales pesados

como el arsénico (Carracelas et al., 2019), a sabiendas de la mayor capacidad de este cereal respecto de otros para acumularlo en los granos (Das et al., 2004).

No obstante, la regulación más o menos adecuada de las láminas de riego en arroz que permitan disminuir su derroche requiere todavía de una exploración sistemática de la dosis ajustada a través de la combinación de métodos que, por un lado, mejoren la eficiencia de uso y, por otro, no favorezcan un déficit por falta de agua que vaya en desmedro de la producción. A este respecto, es importante indicar que existen también reportes en donde se menciona que los sistemas anaeróbicos del arroz pueden aumentar la disponibilidad de nutrientes (Dunn y Gaydon, 2011) y fomentar la menor incidencia de enfermedades (Cartwright y Lee, 2001), adicional a la garantía que podría ofrecer la inundación continua a situaciones de falta de agua ante una especie que es sensible al estrés por déficit (Parent et al., 2010).

Si bien la significativa ineficiencia en el manejo del riego del cultivo de arroz ya ha sido motivo de estudio para la búsqueda de alternativas que mejoren esta situación en varios países (González y Alonso, 2016; Sánchez et al., 2016; Li et al., 2018) dadas las circunstancias de escasez de agua que continuamente se acrecienta, otro aspecto que se ha empezado a valorar a nivel internacional es la producción de gases de efecto invernadero (GEI) generados en el proceso productivo de esta gramínea (Ishfaq et al., 2020). Entre éstos se destaca la producción de metano (CH₄), que es favorecida por la condición anaeróbica bajo la cual tradicionalmente se desarrolla este cereal (Herrera et al., 2014; Lagomarsino et al., 2016), cuya magnitud se estima oscila entre el 5 y el 20% del total de emisiones antropogénicas a nivel mundial (Hube et al., 2015) y que, en el contexto nacional, es un efecto colateral totalmente desconocido. Este es el principal gas que es emitido en el proceso de cultivo del arroz (Capurro, et al., 2015; Ishfaq et al., 2020) y su efecto invernadero, medido como potencial de calentamiento global (PCG), es de 25 a 28 veces más perjudicial que el del dióxido de carbono (CO₂) que se toma de referencia (Hernández y Corona, 2018).

Bajo el contexto mencionado se propuso y se desarrolló esta investigación con carácter experimental, en el que se buscó evaluar el riego

tradicional anaeróbico (inundación continua) en el cultivo de arroz tomando de referencia la alternativa de riego aeróbico, en ésta última, manteniendo el suelo entre saturación y humedad alrededor de capacidad de campo; de tal forma que se cuantificó el efecto de estas dos condiciones en la producción de la especie, en la eficiencia de uso del agua y en la emisión de metano.

MATERIALES Y MÉTODOS

Características del sitio de estudio. La investigación se desarrolló entre los meses de mayo a agosto del año 2021, dentro del campus de la Universidad Agraria del Ecuador en el cantón Milagro (02°07'39" S y 79°34'37" W), dentro de la provincia del Guayas en Ecuador. De acuerdo con la información observada para el sitio en la base de datos CLIMWAT de la FAO, existen condiciones climáticas medias de 82 % de humedad relativa, temperaturas mínima y máxima de 20,4 y 30,0 °C, respectivamente, 3,2 horas·día⁻¹ de insolación, 3,11 mm·día⁻¹ de evapotranspiración de referencia y una precipitación de 1210 mm·año⁻¹.

La zona presenta suelos de textura

mayoritariamente arcillosa, de formación aluvial y clasificados en su gran mayoría dentro del orden de los Inceptisoles. En el análisis de suelo la textura fue reportada como de 46 % de arcilla y 20 % de arena, densidad aparente de 1,31 g·cm⁻³ e infiltración básica de 2,26 mm·h⁻¹, además de 3,39 % de materia orgánica y pH de 7,4.

Tipo y diseño de la investigación. La investigación fue mayoritariamente experimental, en la cual se evaluó el método de riego tradicional del arroz bajo inundación continua. Para esta evaluación se tomó de referencia la aplicación del riego considerando la humedad del suelo alrededor de capacidad de campo y la saturación, delineándose un experimento de dos tratamientos (Cuadro 1). El área experimental estuvo compuesta de cuatro parcelas cuadradas de 25,0 m de lado, repartidas entre cada método de riego. En la parte central de cada una de estas parcelas se seleccionaron nueve unidades de muestreo (generando un global de 18 repeticiones por tratamiento), equidistantemente distribuidas y de 4,0 m², para la valoración de las variables agronómicas que se indican más adelante. Asimismo, dentro de cada una de las parcelas se instalaron dos cámaras estáticas para la cuantificación de la emisión de metano.

Cuadro 1. Tratamientos para la evaluación de dos métodos de riego en arroz

N°	Tratamiento	Descripción
1	Riego tradicional	Parcelas con inundación continua desde el trasplante hasta la cosecha en condiciones anaeróbicas.
2	Riego sin inundación	Parcelas sin inundación, en condiciones aeróbicas, regadas por gravedad hasta mantener la humedad entre capacidad de campo y saturación.

Manejo del experimento. El suelo recibió la misma preparación en las dos alternativas de prueba, con arado y fanguero. Se utilizó la variedad INIAP 11, la misma que es una semilla certificada de uso mayoritario en el país y su siembra, dentro de las parcelas experimentales, se realizó por trasplante después de 20 días de almácigo, ubicando seis macollos (plantas) por sitio a 25 cm entre puntos de siembra e hileras. La dosificación de nutrientes se aplicó en base al análisis de suelo

y a las siguientes recomendaciones tomadas de Alcívar y Mestanza (2007): 100 kg de urea al inicio (10 días después del trasplante) y 100 kg de sulfato de amonio a los 20 días después de la primera aplicación. El control de malezas se realizó inicialmente con un herbicida pre-emergente y posteriormente, durante el desarrollo, su eliminación fue de forma manual. El control de plagas se realizó con productos químicos y la cosecha se llevó a cabo a los 123 días después del trasplante.

Medida de la evapotranspiración. La evapotranspiración se determinó de forma indirecta, basada parcialmente en la metodología del cenirómetro (Torres et al., 2004), que consistió en el uso de un recipiente cilíndrico y plástico, de 30 cm de diámetro y de 40 cm de altura, desde el cual se realizaban las medidas de evaporación. Este procedimiento se fundamenta a su vez en el método tradicional del tanque evaporímetro clase A (Allen et al., 2006). Dado que no se dispuso el uso de la tina de evaporación clase A, se utilizó el recipiente antes indicado en donde la evaporación es 9% mayor que en dicha tina (Torres et al., 2004). Con esta consideración, la evapotranspiración del cultivo (ET_C) se definió mediante la ecuación siguiente:

$$ET_C = 0.91 \times E_C \times K_{tan} \times K_C \quad (1)$$

Siendo E_C la evaporación medida en el recipiente señalado, K_{tan} el coeficiente de tanque y K_C el coeficiente de cultivo. Estos dos coeficientes se definieron siguiendo la metodología propuesta por Allen et al. (2006), de acuerdo con las características de las modalidades de riego y a las condiciones climáticas medias de la zona. Las lecturas de evaporación se realizaron cada 24 horas.

Manejo del riego. Para la cuantificación de los volúmenes de agua aplicados en las parcelas, se aforó previamente el caudal entregado por una bomba centrífuga de 76 mm en la descarga, considerando las condiciones de operación de todo el periodo de riego. En las parcelas de inundación continua se mantuvo una lámina de agua de 10 cm desde el trasplante hasta la etapa de maduración. En el caso de las parcelas cuya humedad se mantuvo entre la capacidad de campo y saturación, se utilizó una estación tensiométrica compuesta de dos tensiómetros marca Irrometer, con lecturas previamente calibradas para esta humedad; el primero ubicado a 25 cm y el segundo a 50 cm de profundidad, con el propósito de controlar y programar las aplicaciones del riego con el primero y de controlar las pérdidas por percolación con el segundo, tomando en cuenta la profundidad efectiva referencial del sistema radicular del arroz (Allen et al., 2006). Considerando los rangos de tensiometría adecuados para riego superficial (Ferreira et al., 2005) y cercanos a capacidad de campo (Pascual y Pascual, 2020), y a la condición arcillosa del

suelo, se tomó como límite la lectura de tensión de 30 centibares, a partir del cual se aplicaba la dosis de agua respectiva. Las pérdidas por percolación se estimaron por diferencia entre la lámina de agua aplicada y la evapotranspiración del cultivo, por cuanto en el riego tradicional y, al menos en los primeros momentos del riego sin inundación, el contenido hídrico del suelo superaba a la capacidad de campo.

Indicadores de producción del cultivo. Entre las variables de respuesta del cultivo se consideró el número de macollos por sitio de siembra, granos vanos, peso de 1000 granos y el rendimiento. El número de macollos por sitio de siembra se determinó al momento de la cosecha como promedio de la contabilización de cinco sitios por cada unidad de muestreo, seleccionados aleatoriamente. La cantidad relativa de granos vanos se obtuvo al contabilizar por triplicado, en cada unidad de muestreo, la cantidad de granos vacíos en 100 granos seleccionados de forma aleatoria. Para la obtención del peso de 1000 granos y del rendimiento se utilizó una balanza de precisión, cuyos datos fueron ajustados al 14 % por la diferencia de humedad de las muestras. El rendimiento se obtuvo por extrapolación a una hectárea a partir de 10 sitios de siembra. Este último dato sirvió para establecer la eficiencia de uso del agua aplicada en el riego, al relacionarlo con los volúmenes totales utilizados en todo el proceso, según los tratamientos evaluados.

Emisión de metano. Siguiendo el procedimiento publicado por Seiler et al. (1984) y Capurro et al. (2015), para la cuantificación de la emisión de metano se diseñaron dos cámaras acrílicas transparentes de 1,0 m² de base y 1,2 m de altura, cada una equipada con un ventilador de mezcla. Éstas se asentaron sobre una base de 15,0 cm de altura que fue hincada en los puntos de muestreo, de tal forma que se tuvo un cierre hermético entre la superficie del suelo y las cámaras. Las mediciones se realizaron cada siete días por triplicado (en la mañana, al mediodía y en la tarde), luego de lo cual las cámaras se vaciaban para inmediatamente volverlas a instalar y tomar los siguientes registros acumulados. Las valoraciones al interior de la cámara se realizaron con un equipo portátil, marca Inspectra Laser, con capacidad de lectura de 0 a 10.000 ppm de CH₄ y de la temperatura ambiental. El flujo de emisión de CH₄ se determinó mediante la ecuación

propuesta por Naser et al. (2010):

$$F_E = \rho \times h \times \frac{\Delta C}{\Delta t} \times \frac{273}{T} \quad (2)$$

Siendo F_E el flujo de emisión de CH_4 en unidades de $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{hora}^{-1}$, considerando la densidad ρ del gas en $0,716 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ para condición estándar (Naser et al. 2010). Igualmente, la altura h de la cámara se expresó en m y el incremento de la concentración del gas $\Delta C/\Delta t$ en $\text{ppm}\cdot\text{hora}^{-1}$. La temperatura T se expresó en unidades absolutas (grados kelvin, K).

Análisis estadístico de la información. La valoración estadística de la información se realizó con la ayuda del paquete estadístico *R-Commander* del software R y con el Excel de Microsoft. En este caso, se aplicó la prueba t de Student para muestras independientes, previa comprobación de la homocedasticidad de los datos de cada grupo (tratamiento), considerando una

probabilidad de error tipo I del 5 %.

RESULTADOS

Consumo hídrico. En el Cuadro 2 se detalla el acumulado semanal, tanto de la evaporación como de la evapotranspiración del cultivo durante 11 semanas posteriores al trasplante, previo a su cosecha. De acuerdo con lo indicado en el cuadro, los límites inferior y superior de evaporación medidos durante el estudio fueron 11 y 25 $\text{mm}\cdot\text{semana}^{-1}$, respectivamente, y equivalentes a 1,6 y 3,6 $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$. Al aplicar la ecuación 1 con la información detallada, se pudo establecer un consumo hídrico total del cultivo (evapotranspiración acumulada) de 147,3 mm, con una demanda mínima de 1,5 y una máxima de 3,1 $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$.

Cuadro 2. Evaporación y evapotranspiración por semana del arroz durante el periodo de estudio

Semana	Evaporación ($\text{mm}\cdot\text{semana}^{-1}$)	K_{tan}^*	K_c	ET_c	
				$\text{mm}\cdot\text{semana}^{-1}$	$\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$
1	21	0,85	1,05	17,1	2,4
2	14	0,85	1,05	11,4	1,6
3	25	0,85	1,13	21,9	3,1
4	12	0,85	1,13	10,5	1,5
5	14	0,85	1,20	13,0	1,9
6	17	0,85	1,20	15,8	2,3
7	11	0,85	1,20	10,2	1,5
8	12	0,85	1,20	11,1	1,6
9	15	0,85	1,20	13,9	2,0
10	13	0,85	1,20	12,1	1,7
11	18	0,85	0,75	10,4	1,5
Total				147,3	

*Valor seleccionado según condiciones climáticas de la zona (velocidad del viento $< 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; humedad relativa $> 70 \%$).

Las láminas de riego entre las dos alternativas de prueba fueron sustancialmente diferentes, según se observan los valores acumulados para el riego tradicional y en el que la parcela se mantenía sin inundación indicados en el Cuadro 3, reportándose un total de 2162,5 mm para el primero y 172,5 mm para el segundo. Esta diferencia sustantiva se debe a que en el primer tratamiento se buscaba mantener una lámina invariable de 10 cm sobre la superficie del suelo, de allí que cada semana se hacía una reposición constante de 216,3 mm; no obstante que en el

segundo tratamiento se definía el momento del riego cuando el tensiómetro ubicado a 25 cm de profundidad indicaba una tensión aproximada de 30 cbar, reponiendo la evapotranspiración acumulada de los días que le tomaba al suelo llegar a la tensión antes indicada.

Así también, en el Cuadro 3 se detallan las pérdidas estimadas por percolación, deducidas por sustracción del consumo hídrico de la planta (evapotranspiración) de las láminas de riego aplicadas, dado que no existieron pérdidas por escorrentía.

Cuadro 3. Láminas de riego, consumo hídrico y pérdidas por percolación por semana en dos métodos de riego en arroz

Semana	Láminas de riego (mm)		Consumo hídrico (mm)	Pérdidas por percolación (mm)	
	Riego tradicional	Riego sin inundación		Riego tradicional	Riego sin inundación
1	216,3	20,7	17,1	199,2	3,7
2	216,3	14,0	11,4	204,9	2,6
3	216,3	25,2	21,9	194,4	3,4
4	216,3	12,2	10,5	205,8	1,7
5	216,3	14,0	13,0	203,3	1,0
6	216,3	17,5	15,8	200,5	1,7
7	216,3	10,8	10,2	206,0	0,6
8	216,3	12,2	11,1	205,1	1,0
9	216,3	14,9	13,9	202,3	0,9
10	216,3	13,1	12,1	204,2	1,0
11	0,0	18,0	10,4	0,0	7,6
Total	2162,5	172,5	147,3	2025,7	25,2

Lecturas de tensión. Durante el periodo de estudio se trató de mantener como límite máximo una tensión de 30 cbar antes de la aplicación del riego en el método sin inundación, según las lecturas registradas por el tensiómetro de 30 cm e indicadas gráficamente en la Figura 1. En esta figura también se describen los registros del tensiómetro de 60 cm, cuyos valores se mantuvieron, en la mayoría del tiempo, entre 0 y 10 cbar, es decir, lecturas muy próximas a la saturación (Medina, 2000). Los registros en este último tensiómetro declaraban aparentes pérdidas por percolación debido al mantenimiento de lecturas relativamente bajas (Tarjuelo, 2005), lo cual también podría ser favorecido por la propia condición arcillosa del suelo (Saxton y Rawls, 2006) y por el incremento de la densidad aparente con la profundidad (Mousavi et al., 2009) que fomentan la retención de agua en las capas interiores.

Indicadores agronómicos del cultivo. Tanto el macollamiento como los granos vanos, así como el peso de 1000 granos y el rendimiento, no presentaron diferencias significativas ($P > 0,05$) por el efecto de los dos métodos de riego (Cuadro 4). La dispersión de los datos, expresada mediante

el coeficiente de variación de cada una de las variables, indica la consistencia y cuidado del experimento en el sentido de que ninguna presentó un valor por encima del 30 % (Balzarini et al., 2011).

Los resultados mostrados en el Cuadro 4 destacan que la condición de inundación continua, correspondiente al riego tradicional en arroz, no favorece la producción de este cereal con respecto de aplicar el riego sin la presencia constante de una lámina de agua.

Eficiencia de uso del agua de riego. Una vez obtenidos los datos de las láminas totales aplicadas, tanto en el riego tradicional como en el que se manejó sin inundación (Cuadro 3), junto con los rendimientos medios de arroz en cáscara indicados en el Cuadro 4 para cada uno de estos tratamientos, la diferencia en la eficiencia de uso de agua (EUA) fue sustancial debido a la gran pérdida por percolación que se produce en el riego con inundación continua (Cuadro 3). En el riego tradicional se obtuvo un volumen de uso de 3,649 m³ de agua para producir 1,0 kg de arroz, mientras que en la alternativa sin inundación, esta eficiencia fue de 0,312 m³ de agua por cada kg de arroz producido.

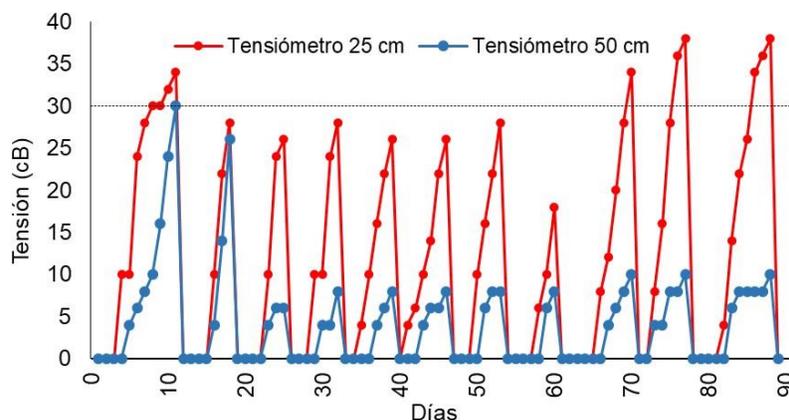


Figura 1. Registros de tensión (cBar) a 25 y 50 cm de profundidad durante 90 días en el tratamiento de riego sin inundación en arroz

Cuadro 4. Estadígrafos de las variables agronómicas evaluadas en dos métodos de riego en arroz

Variable	Estadístico	Tratamientos	
		Riego tradicional	Riego sin inundación
Macollamiento	Media (macollos/sitio)	19,50±1,40	18,67±1,07
	Coefficiente de variación (%)	14,4	11,5
	P-valor	0,324 ns	
Granos vanos	Media (%)	13,95±1,88	12,49±1,82
	Coefficiente de variación (%)	27,1	29,3
	P-valor	0,247 ns	
Peso de 1000 granos	Media (g)	32,13±0,59	32,14±1,02
	Coefficiente de variación (%)	3,7	6,4
	P-valor	0,984 ns	
Rendimiento	Media (kg·ha ⁻¹)	5925±481	5536±547
	Coefficiente de variación (%)	16,3	19,9
	P-valor	0,268 ns	

ns: no significativo

Producción de metano. Previo a la cosecha del cultivo, se logró registrar un período de 10 semanas de emisión de metano aplicando el procedimiento descrito en la metodología. En la emisión de metano del riego sin inundación se observó una disminución del 63,4% respecto del riego tradicional (Cuadro 5). Durante el tiempo indicado, el valor máximo del metano para el riego tradicional fue de 4,33 mg·m⁻²·h⁻¹, mientras que en el riego sin inundación fue de 1,69 mg·m⁻²·h⁻¹. Así mismo, el intervalo de la tasa de emisión del gas varió de 1,78 a 3,56 mg·m⁻²·hora⁻¹ en las parcelas que fueron regadas de forma tradicional, valores significativamente diferentes ($P \leq 0,01$) respecto a las parcelas en donde el riego se mantuvo sin inundación, en las cuales el

intervalo fue de 0,74 a 1,40 mg·m⁻²·hora⁻¹. Se observa en el Cuadro 5 que los datos presentaron una notoria variabilidad (39,9 % para el riego tradicional y 43,3 % para el riego sin inundación), atribuido a diferentes factores del suelo, cultivo y clima que pueden influir en la tasa de emisión del gas (Islam et al., 2020).

La irregularidad de la tasa de emisión de metano durante el tiempo de registro se grafica en la Figura 2. Sin embargo y a pesar de esta variabilidad, puede evidenciarse en la figura la clara diferencia en la tasa de emisión entre el riego tradicional y el riego sin inundación; además de cierta tendencia a incrementarse con el tiempo en el método de riego tradicional.

Cuadro 5. Estadísticos registrados respecto de la producción de metano en dos métodos de riego en arroz durante 10 semanas de registro desde el momento del trasplante

Estadístico	Tratamientos	
	Riego tradicional	Riego sin inundación
Producción de metano ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)	2,92±0,83	1,07±0,33
Coefficiente de variación (%)	39,9	43,3
P-valor	0,0002**	

** : altamente significativo

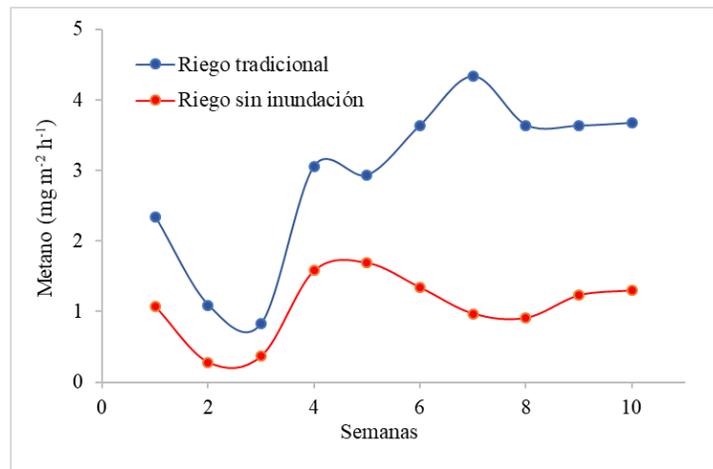


Figura 2. Evolución de la emisión de metano durante 10 semanas desde el momento del trasplante en dos métodos de riego en arroz

DISCUSIÓN

El consumo de agua total del arroz durante las 11 semanas de evaluación, sin considerar el tiempo de almácigo, fue de 147,3 mm (Cuadro 2), registrándose un mínimo en la demanda diaria de $1,5 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ y un máximo de $3,1 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$, valores que ocurren parcialmente dentro del rango de las tasas de evapotranspiración de esta especie para zonas tropicales-húmedas, similares a la zona donde se desarrolló esta investigación y en las cuales la humedad del aire (mayor al 70 % de humedad relativa) es uno de los elementos climáticos importantes en la regulación de la evapotranspiración del cultivo (Allen et al., 2006). No obstante, esta demanda hídrica del cultivo es satisfecha por el método tradicional de manera excesiva, aplicándose una lámina de 2162,5 mm (Cuadro 3), desde la cual el consumo antes indicado apenas representa un 6,8 %. Considerando el hecho de la no existencia de

fugas de agua dentro de las parcelas de estudio que hubiesen generado escorrentía, en este experimento se tuvieron unas pérdidas absolutas por percolación superiores al 90 %, posiblemente atribuibles a la diversidad espacial de la intensidad de infiltración y a la carga hidráulica que influye sobre ésta (Alvarado y Barahona, 2017), así como a la presencia de raíces finas que pueden incrementar la infiltración (Cui et al., 2019), todo lo cual probablemente influyó en obtener una percolación superior al 60 % que mencionan varios autores (Covay et al., 1992).

Contrario al método tradicional, en la propuesta de riego sin inundación las pérdidas por percolación fueron sustancialmente menores, con un valor acumulado de 25,2 mm, equivalente al 14,6 % del total aplicado (Cuadro 3). Parte de estas pérdidas podrían asumirse como el agua correspondiente a una mínima fracción de las láminas de riego que humedecieron el suelo por encima de su capacidad de campo. Esta humedad

y la que se mantenía retenida al interior del suelo (Mousavi et al., 2009), es la que se supone fue captada por el tensiómetro ubicado a 50 cm, el mismo que continuamente registraba lecturas entre 0 y 10 cbar (Figura 2).

La respuesta del cultivo no fue afectada significativamente por la alternativa de riego sin inundación (Cuadro 4), obteniéndose índices similares entre los dos métodos de irrigación tanto en el macollamiento como en los de producción (granos vanos, peso de 1000 granos y rendimiento); todo lo cual concuerda con las comparaciones realizadas entre el método tradicional de riego en arroz con procedimientos como el de humectación y secado alternativo (AWD, por sus siglas en inglés), que se ha venido evaluando especialmente en países asiáticos (Ishfaq et al., 2020; Samoy et al., 2021). Por otro lado, estos resultados en alguna manera contradicen lo manifestado por González y Alonso (2016), quienes indican que las condiciones de saturación afectan el potencial de producción del arroz, o lo indicado por (Dunn y Gaydon, 2011) respecto de que las condiciones anaeróbicas mejoran el acceso de nutrientes para el arroz. Esto es, además, reforzado por los rendimientos obtenidos en los dos métodos de riego (5925,8 kg·ha⁻¹ con inundación y 5536,6 kg·ha⁻¹ sin inundación), los mismos que están muy cercanos a los 6000 kg·ha⁻¹ que indica la ficha técnica del arroz para la zona.

Tomando en cuenta la pérdida mayoritaria ocurrida por percolación en el riego tradicional, se pudo establecer que la producción de 1,0 kg de arroz en cáscara requiere de 3,649 m³ de agua, coincidiendo con lo publicado por González y Alonso (2016), quienes han manifestado que la EUA de esta gramínea puede llegar hasta los 5 m³·kg⁻¹ bajo esta forma de regadío. Sin embargo, al observar el reducido valor de 0,312 m³·kg⁻¹ como EUA en el riego sin inundación, y al considerar la semejanza en los rendimientos obtenidos entre estas dos alternativas de riego (Cuadro 4), se comprueba que no es necesario mantener una lámina constante de agua (Samoy et al., 2021), las cuales producen altas pérdidas por percolación y potenciales problemas de contaminación de fuentes subterráneas (Bilgili et al., 2018). Por el contrario, haciendo un control racional en el manejo del riego, se puede lograr

una alta eficiencia de uso del recurso (Sriphirom et al., 2019).

Otro de los hechos destacables del manejo tradicional del riego en arroz es la importante tasa de producción de metano de esta gramínea en su proceso de cultivo respecto de un manejo del riego sin presencia de lámina constante. Si bien estos índices de emisión han presentado una sustancial variabilidad (Herrera et al., 2014), se ha podido demostrar la disminución significativa que puede lograrse cuando el riego en arroz se realiza bajo condiciones aerobias, lo cual concuerda con los resultados de varios autores (Islam et al., 2020; Cowan et al., 2021).

Así también, un efecto que es relevante en el riego tradicional del arroz es la relación positiva entre el incremento de la tasa de emisión de metano y el crecimiento del cultivo (Figura 2), sugiriendo que si bien hay una mayor producción de este gas en las condiciones anaerobias (Cuadro 5), esta generación progresiva estaría asociada aparentemente a la actividad de las bacterias metanogénicas de la rizósfera cuya proliferación se ve favorecida por tejidos en descomposición o los exudados radiculares que se incrementan con el desarrollo de la planta (Bossio et al., 1999) y por la difusión creciente del gas en la atmósfera mediante el transporte a través del aerénquima de la planta de acuerdo a su crecimiento (Aulakh et al., 2002; Scavino et al., 2021; Scivittaro et al., 2021).

CONCLUSIÓN

La producción de arroz bajo condiciones tradicionales de riego no se ve afectada por el riego aeróbico sin presencia de lámina continua, manteniendo al suelo entre saturación y capacidad de campo. Así también, con la alternativa de riego propuesta, se pudo mejorar sustancialmente la eficiencia de uso de agua, cuyo volumen por unidad producida se redujo desde 3,649 m³·kg⁻¹ en la irrigación tradicional a 0,312 m³·kg⁻¹ en la que no se mantuvo inundación continua. En cuanto a la emisión de metano, el riego sin inundación es capaz de generar, aproximadamente, un 63,4 % menos del gas que el riego tradicional. En resumen, el riego sin inundación no afecta el rendimiento del arroz, mejora la eficiencia de uso del agua y genera menos metano que el método de riego tradicional.

AGRADECIMIENTO

Al Departamento de Ingeniería Agrícola de la Universidad Agraria del Ecuador.

LITERATURA CITADA

- Alcívar, C. y S. Mestanza. (2007). Nutrición mineral del cultivo de arroz. *In: Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) (Ed.). Manual del cultivo de arroz.* INIAP, Quito. pp. 40-58. <https://n9.cl/n5gf9>
- Allen, R., L. Pereira, D. Raes y M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. FAO, Roma.
- Alvarado, C. y M. Barahona. 2017. Comparación de tres métodos de infiltración para calcular el balance hídrico del suelo, en la Cuenca del río Suquiapa, El Salvador. *Cuadernos de Investigación UNED* 9(1): 23-33.
- Aulakh, M.S., R. Wassmann y H. Rennenberg. 2002. Methane transport capacity of twenty-two rice cultivars from five major Asian rice growing countries. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 91: 59-77.
- Balzarini, M., J.Di Rienzo, L. Gonzalez y C. Bruno. 2011. Introducción a la bioestadística: aplicaciones con Infostat en agronomía. Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba. <https://n9.cl/jznxv>
- Bilgili, A.V., I. Yesilnacar, K. Akihiko, T. Nagano, A. Aydemir, H. Sefa y A. Bilgili. 2018. Post-irrigation degradation of land and environmental resources in the Harran plain, southeastern Turkey. *Environmental monitoring and assessment* 190(11): 660.
- Bossio, D., W. Horwath, R. Mutters y C. Kessel. 1999. Methane pool and flux dynamics in a rice field following straw incorporation. *Soil Biology and Biochemistry* 31(9): 1313-1322.
- Capurro, M., S. Tarlera, P. Irisarri, G. Cantou, S. Ricchetto, A. Fernández y A. Roel. 2015. Cuantificación de emisiones de metano y óxido nitroso bajo dos manejos del riego contrastantes en el cultivo de arroz. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Montevideo. <https://n9.cl/v56af>
- Carracelas, G., J. Hornbuckle, M. Verger, R. Huertas, S. Ricchetto, F. Campos y A. Roel. 2019. Irrigation management and variety effects on rice grain arsenic levels in Uruguay. *Journal of Agriculture and Food Research* 1:100008.
- Covay, K., A. Sturrock y D.C. Sasser. 1992. Water requirements for growing rice in southwestern Louisiana, 1985-86. Louisiana Department of Transportation and Development, Louisiana. <https://n9.cl/jfqq19>
- Cowan, N., A. Bhatia, J. Drewer, N. Jain, R. Singh, R. Tomer et al. 2021. Experimental comparison of continuous and intermittent flooding of rice in relation to methane, nitrous oxide and ammonia emissions and the implications for nitrogen use efficiency and yield. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 319(1): 1-11.
- Cui, Z., G.L. Wu, Z. Huang y Y. Liu. 2019. Fine roots determine soil infiltration potential than soil water content in semi-arid grassland soils. *Journal of hydrology* 578(1): 1-8.
- Das, H., A. Mitra, P. Sengupta, A. Hossain, F. Islam y G. Robbani. 2004. Arsenic concentrations in rice, vegetables, and fish in Bangladesh: a preliminary study. *Environment International* 30(3): 383-387.
- Díaz, J. 2017. Riego por gravedad (Edición digital). Universidad del Valle, Cali. <https://n9.cl/gb20f>
- Djaman, K., V. Mel, L. Diop, A. Sow, R. El-Namaky, B. Manneh, et al. 2018. Effects of alternate wetting and drying irrigation regime and nitrogen fertilizer on yield and nitrogen use efficiency of irrigated rice in the Sahel. *Water* 10(6): 1-20.
- Dunn, B.W. y D.S. Gaydon. 2011. Rice growth yield and water productivity responses to irrigation scheduling prior to the delayed application of continuous flooding in South-East Australia. *Agricultural Water Management* 98(12): 1799-1807.

17. Ferreyra, R., G. Sellés, R. Ahumada, P. Maldonado, P. Gil y C. Barrera. 2005. Manejo del riego localizado y fertirrigación. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, La Cruz. <https://n9.cl/cyd87>
18. González, M. y A. Alonso. 2016. Tecnologías para ahorrar agua en el cultivo de arroz. *Nova* 14(26): 111-126.
19. Hernández-Medrano, J. y L. Corona. 2018. El metano y la ganadería bovina en México: ¿parte de la solución y no del problema? *Agroproductividad* 11(2): 46-51.
20. Herrera, J., V. Beita, D. Solórzano, H. Argüello y A. Rodríguez. 2014. Determinación de emisiones de metano y óxido nitroso generadas en plantaciones de arroz en Guanacaste, Costa Rica. *Ciencias Ambientales* 46(2): 5-14.
21. Hube, S., M. Alfaro, L. Ramírez, G. Donoso y M. Paredes. 2015. Contribución del cultivo de arroz al cambio climático. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chile. <https://n9.cl/v9egr>
22. INEC (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos). 2021a. Encuesta de superficie y producción agropecuaria continua. INEC, Quito. <https://n9.cl/ynlxb>
23. INEC (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos). 2021b. Módulo de información agroambiental y tecnificación. INEC, Quito. <https://n9.cl/8dy3c>
24. Ishfaq, M., M. Farooq, U. Zulfiqar, S. Hussain, N. Akbar, A. Nawaz y S. Ahmad. 2020. Alternate wetting and drying: A water-saving and ecofriendly rice production system. *Agricultural Water Management* 241(1): 106363.
25. Islam, S.M., Y.K. Gaihre, M.R. Islam, M. Akter, A.A. Mahmud, U. Singh y B.O. Sander. 2020. Effects of water management on greenhouse gas emissions from farmers' rice fields in Bangladesh. *Science of the Total Environment* 734(1): 1-8.
26. Lagomarsino, A., A. Agnelli, B. Linqvist, M. Adviento-Borbe, G. Gavina, S. Ravaglia y R. Ferrara. 2016. Alternate wetting and drying of rice reduced CH₄ emissions but triggered N₂O peaks in a clayey soil of central Italy. *Pedosphere* 26(4): 533-548.
27. Li, Z., Z. Li, P. Letuma, H. Zhao, Z. Zhang, W. Lin et al. 2018. A positive response of rice rhizosphere to alternate moderate wetting and drying irrigation at grain filling stage. *Agricultural Water Management* 203(1): 26-36.
28. Medina, J. A. 2000. Riego por goteo: teoría y práctica (4ta. Ed.). Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
29. Mousavi, S.F., S. Yousefi, B. Mostafazadeh, A. Hemmat y M.R. Yazdani 2009. Effect of puddling intensity on physical properties of a silty clay soil under laboratory and field conditions. *Paddy Water Environment* 7: 45-54.
30. Naser, H.M., O. Nagata, S. Tamura y R. Hatano. 2010. Methane emissions from five paddy fields with different amounts of rice straw application in central Hokkaido, Japan. *Soil Science and Plant Nutrition* 53(1): 95-101.
31. Ochoa, E., E. Álava y E. Chica. 2017. Comparación de un sistema de intensificación del cultivo de arroz (SICA) con sistemas tradicionales de siembra en la zona de Churute, Ecuador. *Ciencia y tecnología* 10(1): 1-6.
32. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2021. El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura. FAO, Roma. <https://n9.cl/akurn>
33. Parent, B., B. Suard, R. Serraj y F. Tardieu. 2010. Rice leaf growth and water potential are resilient to evaporative demand and soil water deficit once the effects of root system are neutralized. *Plant, Cell and Environment* 33: 1256-1267.
34. Pascual, B. y N. Pascual. 2020. Riegos de gravedad y a presión (4ta. Ed.). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia. <https://n9.cl/vuy2k>
35. Riccetto, S., M. Capurro y A. Roel. 2017. Estrategias para minimizar el consumo de agua del cultivo de arroz en Uruguay manteniendo su productividad. *Agrociencia Uruguay* 21(1): 109-119.
36. Samoy-Pascual, K., S. Yadav, G. Evangelista, M.A. Burac, M. Rafael, R.

- Cabangon et al. 2021. Determinants in the adoption of alternate wetting and drying technique for rice production in a gravity surface irrigation system in the Philippines. *Water* 2022 14(1): 1-15.
37. Sánchez, M., Y. Muñoz, J. Dell'Amico y R. Polón. 2016. Manejo del agua de riego en el cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) por trasplante, su efecto en el rendimiento agrícola e industrial. *Cultivos Tropicales* 37(3): 178-186.
38. Saxton, K. y W. Rawls. 2006. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 1569-1578.
39. Scavino, F., C. Ghiazza, M. Bellini y D. Oreggioni. 2021. Caracterización de variables biológicas que controlan la producción de metano en planta, en el cultivo de arroz. Agencia Nacional de Investigación e Innovación, Uruguay. <https://n9.cl/lm2g7y>
40. Scivittaro, W., R. De Sousa, R. Da Silva, S. Cuadra y A. Heinemann. 2021. Emisiones de gases de efecto invernadero en producción de arroz de riego. *In*: M. Paredes, V. Becerra, y G. Donoso. 100 años del cultivo del arroz en Chile: En un contexto internacional: 1920-2020. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Chillán. pp. 652-673.
41. Seiler, W., A. Holzapfel-Pschron, R. Conrad y D. Scharffe. 1984. Methane emission from rice paddies. *Journal of atmospheric chemistry* 1: 241-268.
42. Sriphirom, P., A. Chidthaisong y S. Towprayoon. 2019. Effect of alternate wetting and drying water management on rice cultivation with low emissions and low water used during wet and dry season. *Journal of Cleaner Production* 223: 980-988.
43. Tarjuelo, J.M. 2005. El riego por aspersión y su tecnología. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
44. Torres, J., R. Cruz y F. Villegas. 2004. Avances técnicos para la programación y manejo del riego en caña de azúcar (2da. Ed.). Centro de Investigación de la Caña de Azúcar (CENICAÑA), Cali. <https://n9.cl/c1v2i>
45. Valdiviezo, E. 2007. Manejo y necesidades de agua en el cultivo de arroz. *In*: Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) (Ed.), Manual del cultivo de arroz. INIAP, Quito. pp. 33-38. <https://n9.cl/n5gf9>