

Sostenibilidad de sistemas arroceros en Uruguay: una mirada integrada

Foto: INIA Uruguay

Ignacio Macedo¹, Alvaro Roel¹, José A. Terra¹ y Jesús Castillo¹.

1- Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Sistema Arroz-Ganadería, Ruta 8km 281, Treinta y Tres 33000, Uruguay.

1- Introducción

El arroz en Uruguay ocupa alrededor de 170.000 hectáreas bajo riego y constituye uno de los principales rubros agrícolas de exportación del país. Con una producción anual cercana a 1.4 millones de toneladas de arroz cáscara, de las cuales más del 90% se destina a mercados externos, Uruguay se ubica entre los diez principales exportadores de arroz del mundo. El sector se caracteriza por un fuerte grado de articulación entre productores e industria, con una cadena de valor integrada que ha permitido sostener altos estándares de calidad y acceder a nichos de exportación de alto valor.

A diferencia de lo que ocurre en la mayoría de las regiones productoras del mundo, el arroz en Uruguay se integra mayoritariamente con la ganadería a través de rotaciones con pasturas perennes. Este sistema de producción fue la base del crecimiento sostenido de la productividad y la conservación de los recursos naturales durante décadas, con un bajo uso relativo de insumos en el cultivo (Deambrosi, 2003; Pittelkow et al., 2016; Yuan et al., 2021). Aunque aún la rotación arroz-pasturas predomina en gran parte del área arrocera, existe una tendencia a intensificar los sistemas,

ya sea por aumento de la frecuencia del cultivo de arroz, la inclusión de otros cultivos, sobre todo, la soja y/o la incorporación de pasturas más cortas (Terra et al., 2014).

Durante varias décadas se registró un incremento sostenido en los rendimientos promedio nacionales, alcanzando valores que posicionan a Uruguay entre los países con mayor productividad del mundo. A fines de los 80s los rendimientos obtenidos eran de aproximadamente 5 Mg/ha, mientras que en la actualidad superan 9 Mg/ha (Carracelas et al., 2023). Este crecimiento estuvo impulsado por la adopción de variedades de alto rendimiento desarrolladas por INIA, junto con mejoras en el manejo agronómico. La cooperación entre la investigación, productores e industria facilitó la rápida difusión, transferencia y adopción de innovaciones y contribuyó a consolidar estos avances (Bica et al., 2022; Blanco et al., 2010).

Cabe destacar que este crecimiento no ha sido lineal a lo largo de estas décadas. Un ejemplo de ello fue el estancamiento del rendimiento durante 2013-2020 en torno a 8.2 Mg/ha (Carracelas et al., 2023). Este escenario planteó desafíos en torno a la mejora de la productividad y la sostenibilidad de los sistemas productivos, en particular frente a la presión de intensificación agrícola y a las fluctuaciones de los mercados internacionales. La tendencia hacia rotaciones con mayor proporción de cultivos anuales, así como un mayor uso de insumos puede comprometer algunos de los beneficios históricos de la integración arroz-pasturas, lo que exige evaluar cuidadosamente los efectos de la intensificación sobre los aspectos productivos, económicos y ambientales.

En este contexto, resulta fundamental analizar los sistemas arroceros de Uruguay desde una perspectiva integrada que contemple simultáneamente la productividad y la sostenibilidad. Este artículo resume brevemente las principales preguntas de investigación y los resultados más relevantes obtenidos en diversos estudios realizados durante la última década en el país. En primer lugar, se abordan aspectos relacionados con el rendimiento potencial del cultivo, la magnitud de la brecha de rendimiento y los factores que la explican. Luego, se presentan las tendencias nacionales en distintos indicadores de sostenibilidad. En tercer lugar, se analiza la relación entre rendimiento y sostenibilidad comparando productores de alto desempeño con el promedio nacional, así como los posibles impactos ambientales asociados con un aumento adicional del rendimiento. En cuarto lugar, se examinan las tensiones existentes entre distintos indicadores de sostenibilidad y la posibilidad de lograr un desempeño equilibrado en todos ellos de forma simultánea. Finalmente, se presentan resultados de análisis a nivel de rotación, evaluando cómo la sustitución de la rotación arroz-pastura por sistemas agrícolas más continuos afecta la estabilidad productiva y ambiental de los sistemas.

2 – Fuente de información y descripción de bases de datos de los trabajos presentados

Los resultados presentados a continuación utilizaron fuentes de información provenientes de un experimento de largo plazo arrocero y de base de datos de productores pertenecientes a la empresa SAMAN (Sociedad Anónima Molinos Arroceros Nacionales).

2.1. Experimento de largo plazo de rotaciones arroceras

El experimento de largo plazo se estableció en 2012 en la Unidad Experimental del Paso de la Laguna del INIA Treinta y Tres (33°16'23" S; 54°10'24" O; 22 m s. n. m.), sobre un suelo clasificado como Argialbol típico con pen-

dientes menor a 0.5%. El sitio se ubica en la región Este de Uruguay, caracterizada por un clima templado húmedo con una temperatura media de 22.3 °C en verano y 11.5 °C en invierno, una precipitación anual promedio de 1.360 mm y una evapotranspiración potencial media anual de 1 138 mm.

El experimento se inició sobre un campo con más de tres décadas de rotación arroz-pastura, utilizando un diseño en bloques completos al azar con tres repeticiones y parcelas de 1.200 m² (60 × 20 m). Se evalúan seis rotaciones que difieren en la frecuencia del cultivo de arroz, la inclusión o no de pasturas perennes, así como la duración y la inclusión de otros cultivos.

Todas las fases de las rotaciones están presentes simultáneamente cada año, permitiendo evaluaciones comparativas de los efectos de la rotación sobre distintos atributos de los sistemas de producción.

2.2. Base de datos de productores

La otra fuente de información corresponde a una base de datos de manejo y rendimiento a nivel de chacra, provista por la empresa SAMAN. Los registros abarcan el período 2012–2021 e incluyen información de entre 2.000 y 4.000 chacras por año, con más de 6 000 observaciones individuales recopiladas por los agrónomos regionales de la empresa. La base contiene variables relacionadas con el manejo agronómico, uso de insumos, condiciones de campo y rendimiento del arroz. Esta información permite analizar los factores asociados al desempeño productivo y la sostenibilidad en condiciones reales de producción, complementando la evidencia experimental con datos provenientes de una amplia red de productores distribuidos en las principales regiones arroceras del país.

Cuadro 1. Esquema de las rotaciones evaluadas en el experimento.

AÑO	1		2		3		4		5		6	
ROTACIÓN	P-V	O-I	P-V	O-I	P-V	O-I	P-V	O-I	P-V	O-I	P-V	O-I
Arroz Continuo	Arroz	cc										
Arroz Soja	Arroz	cc	Soja	cc								
Arroz Cultivos	Arroz1	cc	Soja	cc	Arroz2	cc	Sorgo	cc				
Arroz Pastura Corta	Arroz	Pastura Permanente										
Arroz Soja Pastura	Arroz1	cc	Soja1	cc	Soja2	cc	Arroz2	Pastura Permanente				
Arroz Pastura Larga	Arroz1	cc	Arroz2	Pastura Permanente								

* cc = cultivo de cobertura, P-V= primavera-verano, O-I= otoño-invierno

3– Principales resultados de las investigaciones

3.1. Evolución de la productividad, potencial y brecha de rendimiento y factores asociados

En 1930 una hectárea de arroz producía aproximadamente 3000 kg/ha, mientras que en la actualidad el rendimiento supera 9000 kg/ha. Ese crecimiento no fue lineal y se ha caracterizado por varios hitos, como la introducción de la variedad Bluebelle en los 70, la investigación, desarrollo y adopción de cultivares nacionales como El Paso L144 (año deliberación, 1986), INIA Tacuarí (1992), INIA Olimar (2003) y más recientemente INIA Merín (2016), así como investigación aplicada al manejo del cultivo asociado a control de malezas y enfermedades, riego, nutrición y diseño de sistemas de producción (Blanco et al., 2010).

En un trabajo que analizó una serie temporal desde 1990 hasta 2020 se encontró que hasta 2013 los rendimientos de arroz en Uruguay crecieron a una tasa promedio de 159 kg/ha/año, pero en la última década (2013-2020) se observó una desaceleración con un rendimiento promedio nacional cercano a 8.3 t/ha. Este estudio también simuló el rendimiento potencial (Y_p), el cual se estimó en 13.9 t/ha, por lo que el promedio alcanzado hasta ese entonces representaba aproximadamente el 60 % de Y_p . La brecha explotable de rendimiento (diferencia entre el 80 % de Y_p y el rendimiento promedio) se calculó en 2.8 t ha⁻¹, lo que

confirma que aún existe margen significativo para aumentar la productividad (Carracelas et al., 2023).

Un análisis adicional con registros de manejo y rendimiento a nivel de campo de productores de la empresa SAMAN indicó que la brecha entre productores de alto desempeño (decil superior) y el promedio se ubicó en el rango de 16–22 %. Los factores de mayor impacto para reducirla fueron la fecha de siembra y la fertilización nitrógenada, entre otros, lo que demuestra que optimizar el manejo puede contribuir a seguir cerrando las brechas de rendimiento (Tseng, et al., 2021).

3.2. Indicadores de sostenibilidad a nivel nacional (evolución 1993-2013)

Utilizando datos de productores y promedios nacionales se realizó un estudio sobre la intensificación sostenible de los sistemas arroceros de Uruguay entre 1993 y 2013. Este trabajo evaluó indicadores de sostenibilidad como: las huellas de energía, nitrógeno, agua y carbono, así como el riesgo de contaminación por agroquímicos. Los resultados mostraron que durante este periodo el rendimiento aumentó un 38%, el rendimiento energético neto se incrementó un 50%, la productividad del agua mejoró un 41% y la eficiencia en el uso de nitrógeno se mantuvo. Además, la huella de carbono por unidad de rendimiento se redujo un 30%; el riesgo de contaminación por plaguicidas disminuyó, pero las pérdidas potenciales de nitrógeno aumentaron un 37% (Pittelkow et al., 2016).



Imagen aérea de experimento de largo plazo de rotaciones arroceras, Unidad Experimental Paso de la Laguna, Treinta y Tres, Uruguay. Crédito: INIA Uruguay.

3.3. *Empujando los límites de la productividad, ¿qué pasa con algunos indicadores de sostenibilidad ambiental si rompemos el techo de rendimiento?*

A raíz del estancamiento en el rendimiento antes mencionado durante 2013-2019 se evaluaron alternativas de manejo del cultivo que superasen el rendimiento de lo que ya obtenían los productores de punta (aprox. 9 Mg/ha), en un proyecto titulado “Rompiendo el techo de rendimiento del cultivo de arroz”. Además, se evaluó el desempeño ambiental de estos productores contra las prácticas que realizaba el “promedio” y esas alternativas de manejo que lograban romper el techo de rendimiento. Se integraron resultados de encuestas regionales y experimentos de campo para analizar los efectos sobre la productividad y la sostenibilidad en dos niveles de intensificación: productores promedio y de alto rendimiento o de punta. Los resultados de la encuesta mostraron que los productores de alto rendimiento obtuvieron un 14% más de rendimiento respecto al promedio regional (7.9 Mg/ha), con riesgos de contaminación por agroquímicos entre 25% y 99% menores, y eficiencias de uso de nitrógeno y huella de carbono similares. En ensayos a campo, las prácticas alternativas para producir más que los productores de punta incrementaron el rendimiento en torno al 7%, pero la evaluación ex post de indicadores ambientales evidenció una disminución significativa de las eficiencias en el uso de recursos y un aumento de la huella de carbono. En conjunto, los resultados indican que los incrementos de rendimiento más allá de lo que ya obtenían los productores de punta, no compensaron el mayor impacto ambiental, subrayando el desafío de avanzar hacia una intensificación sostenible en sistemas que se acercan a su techo productivo (Deambrosi et al., 2019; Tseng et al., 2020).

3.4. *¿Se puede obtener un excelente desempeño en varios indicadores de sostenibilidad al mismo tiempo? Compromisos y sinergias entre indicadores*

En este trabajo utilizando aproximadamente 4000 datos de chacras se cuantificaron cinco indicadores de desempeño del sistema arrocero a nivel de chacra entre 2012 y 2017, abarcando cerca del 40% del área nacional. Los resultados mostraron que maximizar un indicador suele implicar compromisos con otros, sin que ninguna chacra se ubicara simultáneamente entre el 10% superior en todos los indicadores. Las mayores brechas entre el promedio y los productores de mejor desempeño se observaron en el riesgo de contaminación por agroquímicos (33%) y las menores en rendimiento (11%). Se identificaron sinergias entre rendimiento y eficiencia en el uso de recursos, pero no con la huella de carbono ni el riesgo de contaminación. Estas sinergias fueron más marcadas en chacras de menor productividad, sugiriendo un margen limitado de mejora en sistemas de alto rendimiento (Tseng et al., 2021).

3.5. *Una mirada a nivel de la rotación y múltiples indicadores*

En estos estudios se analizó el efecto de la intensificación de la rotación arroz-pastura mediante la incorporación de cultivos anuales. Se analizaron los primeros 7-8 años del experimento de largo plazo antes descrito, evaluando el rendimiento de arroz, la evolución del carbono orgánico, productividad de la rotación, uso de energía y nitrógeno, huella de carbono, eficiencia de uso de recursos, ingresos, costos y margen bruto. Con el fin de tener una mirada integrada del desempeño de la sostenibilidad de las rotaciones se generó un índice multicriterio (0-1). Finalmente, se analizó la estabilidad de este índice como una medida de la estabilidad de la sostenibilidad de los sistemas de producción. El rendimiento de arroz promedio fue de 9400 kg/ha. Los cultivos de arroz que fueron antecidos por una pastura o por soja fueron los que lograron los mayores rendimientos (9800 kg/ha). El segundo arroz de la rotación arroz-pastura tuvo un rendimiento 12% inferior al primer arroz de la misma rotación. El arroz del sistema arroz-continuo obtuvo un rendimiento inferior a las mejores situaciones, pero un 6% superior que el segundo arroz de arroz-pastura. El sistema arroz-soja mostró una productividad y uso de energía intermedios, con la mayor eficiencia en uso de nitrógeno y energía, y una baja huella de carbono. El arroz-pastura compensó cerca del 50% de sus emisiones gracias al aumento del carbono orgánico en el suelo (0.6 Mg/ha/año), mostrando además una menor variabilidad en el margen bruto y menores costos de producción. En contraste, el arroz-continuo tuvo mayores ingresos, pero también los costos más altos, resultando en el menor margen bruto. El índice multicriterio fue mayor en el sistema arroz-soja, un 7% mayor que arroz-pasturas (0.56). El sistema arroz-continuo obtuvo el menor desempeño (0.35), 38% y 42% menor que arroz-pasturas y arroz-soja, respectivamente. Respecto a la estabilidad del índice multicriterio o “estabilidad de la sostenibilidad”, el sistema de arroz-pasturas registró el mejor desempeño, seguido por arroz-soja y arroz-continuo (Macedo, et al., 2022a; Macedo, et al., 2022b).

4– Mensajes finales

- La evolución de los rendimientos del arroz en Uruguay ha sido sostenida, alcanzado altas productividades en el último lustro (9 Mg/ha). Si bien aún existe oportunidad para continuar cerrando brechas; lograr nuevos aumentos será cada vez más desafiante a medida que se incrementa la productividad y se sitúa en la zona de incrementos decrecientes de la productividad.
- Durante dos décadas (1993-2013), la intensificación del arroz uruguayo logró aumentar el rendimiento y la eficiencia en el uso de recursos, reduciendo la huella de carbono y

el riesgo de contaminación por agroquímicos.

- Los productores de punta lograron mayor rendimiento y mejor desempeño ambiental que el promedio; sin embargo, intentar superar ese nivel generó aumentos en el impacto ambiental en alguno de los indicadores evaluados.
- Maximizar un indicador suele implicar compromisos con otros indicadores; existen sinergias entre rendimiento y eficiencia de recursos, pero mejorar todos simultáneamente sigue siendo un desafío en sistemas de alto rendimiento.
- La intensificación de las rotaciones arroz-pastura con cultivos anuales mejoró ciertos indicadores productivos, pero redujo la estabilidad global de la sostenibilidad.
- Nuestro desafío es desarrollar sistemas productivos y con mayores servicios ecosistémicos. Para ello, trabajamos en fortalecer la integración agrícola-ganadera-arrocera mediante rotaciones y secuencias diversificadas que generen sinergias, reduzcan riesgos, mejoren la rentabilidad y promuevan la salud de los recursos naturales, apoyándonos en indicadores y métricas alineadas con certificaciones globales y políticas públicas.

Bibliografía

Bica, M. E.; Carmona, L.; Fariña, M. F.; Gussoni, A.; y Zorrilla, G. (2022). Más Arroz más margen, transferencia de tecnología para reducir brechas de rendimientos y mejorar ingresos de la producción arrocera. Resumen zafra 2021-2022. *Serie Técnica, INIA, ST-264*, 59.

Blanco, P.; Roel, A.; Deambrosi, E.; Bonilla, C.; Cantou, G.; y Molina, F. (2010). *Closing the yield gap in rice production in Uruguay: Impact of technological changes. Proc. Intl. Rice Congr., Hanoi, Vietnam.*

Carracelas, G.; Guilpart, N.; Cassman, K. G.; y Grassini, P. (2023). *Distinguishing between yield plateaus and yield ceilings: A case study of rice in Uruguay. Field Crops Research*, 292, 108808. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.108808>

Deambrosi, E. (2003). *Rice production system in Uruguay and its sustainability. Proceedings of the III International Conference of Temperate Rice, Punta del Este, Uruguay, INIA.*

Deambrosi, E.; Zorrilla, G.; Lauz, M.; Blanco, P.; Terra, J.; Deambrosi, E.; Zorrilla, G.; Lauz, M.; Blanco, P.; y Terra, J. (2019). Rompiendo el techo de rendimiento del cultivo de arroz. *presencia*, 10, 3.

Macedo, I.; Roel, A.; Ayala, W.; Pravía, M. V.; Terra, J. A.; y Pittelkow, C. M. (2022). *Irrigated rice rotations affect yield and soil organic carbon sequestration in temperate South America. Agronomy Journal*, 114(2), 961-975. <https://doi.org/10.1002/agj2.20964>

Macedo, I.; Roel, A.; Velazco, J. I.; Bordagorri, A.; Terra, J. A.; y Pittelkow, C. M. (2022). *Intensification of rice-pasture rotations with annual crops reduces the stability of sustainability across productivity, economic, and environmental indicators. Agricultural Systems*, 202, 103488. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103488>

Pittelkow, C. M.; Zorrilla, G.; Terra, J.; Riccetto, S.; Macedo, I.; Bonilla, C.; y Roel, A. (2016). *Sustainability of rice intensification in Uruguay from 1993 to 2013. Global Food Security*, 9, 10-18. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2016.05.003>

Terra, J. A.; Castillo, J.; Bonilla, F.; Amaral, R.; Lucas, T.; y Macedo, I. (2014). Soja en sistemas arroceros. *Revista Arroz (ACA)*. v. 16, no. 78, p. 24-27, 2014. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/3360/1/RevistaArroz-2014-78-p.24-27.pdf>

Tseng, M.-C.; Roel, A.; Deambrosi, E.; Terra, J. A.; Zorrilla, G.; Riccetto, S.; y Pittelkow, C. M. (2020). *Towards actionable research frameworks for sustainable intensification in high-yielding rice systems. Scientific Reports*, 10(1), 9975. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63251-w>

Tseng, M.-C.; Roel, Á.; Macedo, I.; Marella, M.; Terra, J. A.; y Pittelkow, C. M. (2021). *Synergies and tradeoffs among yield, resource use efficiency, and environmental footprint indicators in rice systems. Current Research in Environmental Sustainability*, 3, 100070. <https://doi.org/10.1016/j.crsust.2021.100070>

Tseng, M.-C.; Roel, Á.; Macedo, I.; Marella, M.; Terra, J.; Zorrilla, G.; y Pittelkow, C. M. (2021). *Field-level factors for closing yield gaps in high-yielding rice systems of Uruguay. Field Crops Research*, 264, 108097. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108097>

Yuan, S.; Linquist, B. A.; Wilson, L. T.; Cassman, K. G.; Stuart, A. M.; Pede, V.; Miro, B.; Saito, K.; Agustiani, N.; Aristya, V. E.; Krisnadi, L. Y.; Zanon, A. J.; Heinemann, A. B.; Carracelas, G.; Subash, N.; Brahmanand, P. S.; Li, T.; Peng, S.; & Grassini, P. (2021). *Sustainable intensification for a larger global rice bowl. Nature Communications*, 12(1), 7163. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-27424-z>