

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**CALIDAD DE SUELOS Y EFICIENCIA DE USO DE ENERGÍA
EN ROTACIONES ARROCERAS CONTRASTANTES**

por

Ignacio MACEDO YAPOR

TESIS presentada como uno de los
requisitos para obtener el título de
Magíster en Ciencias Agrarias
Opción Ciencias del Suelo

(MONTEVIDEO)
URUGUAY
(octubre 2018)

Tesis aprobada por el tribunal integrado por Ing. Agr. Dra. Lucía Salvo, Ing. Agr. PhD Virginia Pravia y Bioq. Dr. Leonidas Carrasco, el 9 de octubre de 2018. Autor: Ing. Agr. Ignacio Macedo Yapor. Director Ing. Agr. PhD. José Alfredo Terra Fernández, Co-director Ing. Agr. PhD. Guillermo Siri Prieto.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer al Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), particularmente al INIA Treinta y Tres por permitirme realizar el trabajo de tesis en sus instalaciones.

A la Facultad de Agronomía de la Universidad de la República (Udelar), por contar con un programa de Posgrado, poder realizar mi maestría en esta casa de estudios y así mejorar mi formación académica.

A la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) por financiar esta maestría a través de una beca de posgrados nacionales (POS_NAC_2015_1_109776).

Agradezco a los Ing. Agr. José Terra y Guillermo Siri por orientarme en este trabajo.

A las Ing. Agr. Virginia Pravia y Lucía Salvo y al Bioq. Leonidas Carrasco por aceptar ser parte del tribunal de evaluación.

A Irma, Matías, Alexander y Adán, mis compañeros de sección, por el apoyo en las tareas de campo y laboratorio, por la paciencia y la calidad del trabajo realizado.

Al profesor Jorge Franco por el apoyo en el análisis estadístico de este trabajo.

A la Lic. Belky Mesones por su ayuda en la búsqueda de material bibliográfico.

A la Lic. Andrea Rodríguez y las Ing. Agr. Carolina Leoni, Virginia Pravia y Lucía Salvo por enseñarme a desarrollar algunas de las técnicas utilizadas respecto a calidad de suelos y al Bioq. Leonidas Carrasco por enseñarme e introducirme en la temática de análisis de ciclo de vida.

Al Ing. Agr. José Ignacio Velazco por su colaboración en la estimación de producción de carne.

Agradecer a mi familia y amigos, por el apoyo y por estar siempre.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN	II
AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	VI
SUMMARY	VII
1. <u>INTRODUCCIÓN GENERAL</u>	1
1.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN ARROCEROS EN URUGUAY	1
1.2. EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN	2
1.2.1. <u>Materia orgánica como indicador de calidad del suelo</u>	2
1.2.2. <u>Eficiencia y uso de energía en sistemas de producción</u>	3
1.3. CONTENIDO Y OBJETIVOS DEL TRABAJO DE TESIS	4
2. <u>TRANSICIÓN DESDE UNA ROTACIÓN ARROZ-PASTURAS HACIA DISTINTOS ESCENARIOS DE INTENSIFICACIÓN: CAMBIOS EN LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO</u>	6
2.1 RESUMEN	6
2.2 SUMMARY	7
2.3 INTRODUCCIÓN	8
2.4 MATERIALES Y MÉTODOS	10
2.4.1 <u>Descripción del sitio</u>	10
2.4.2 <u>El experimento de largo plazo</u>	10
2.4.3 <u>Manejo agronómico</u>	11
2.4.4 <u>Muestreo y análisis de suelo</u>	12
2.4.5 <u>Expresión de C y N en forma de masa</u>	14
2.4.6 <u>Análisis estadístico</u>	15
2.5 RESULTADOS	16
2.5.1 <u>Carbono y nitrógeno en profundidad</u>	16
2.5.2 <u>Carbono en la materia orgánica particulada</u>	17

2.5.3 <u>Nitrógeno en la materia orgánica particulada</u>	20
2.5.4 <u>Relación C/N</u>	23
2.5.5 <u>Indicadores biológicos</u>	24
2.6 DISCUSIÓN.....	25
2.7 CONCLUSIONES	27
2.8 AGRADECIMIENTOS	28
2.9 BIBLIOGRAFÍA	28
3. <u>ALTERNATIVAS DE INTENSIFICACIÓN A SISTEMAS DE ARROZ- PASTURAS: EFICIENCIA EN EL USO DE ENERGÍA</u>	34
3.1 RESUMEN	34
3.2 SUMMARY.....	35
3.3 INTRODUCCIÓN.....	35
3.4 MATERIALES Y MÉTODOS.....	37
3.4.1 <u>Descripción del sitio y el experimento</u>	37
3.4.2 <u>Manejo de las rotaciones y recolección de la información</u> ...	38
3.4.3 <u>Perfiles energéticos</u>	40
3.5 RESULTADOS	42
3.5.1 <u>Producción de arroz, soja, forraje y carne</u>	42
3.5.2 <u>Balance energético a nivel de rotación</u>	42
3.5.3 <u>Balance energético en las fases de las rotaciones</u>	44
3.5.4 <u>Balance energético del cultivo de arroz bajo distintos sistemas de rotación</u>	47
3.6 DISCUSIÓN.....	50
3.7 CONCLUSIONES	52
3.8 AGRADECIMIENTOS	52
3.9 BIBLIOGRAFÍA	53
4. <u>DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES GLOBALES</u>	59
5. <u>BIBLIOGRAFÍA GENERAL</u>	60

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue evaluar el impacto de alternativas de intensificación a la rotación arroz-pasturas sobre la calidad del suelo (CS) y la eficiencia en el uso de la energía (EUE). Sobre un experimento iniciado en 2012 en INIA Treinta y Tres, Uruguay (33° 16' 23" S; 54° 10' 24" O; 22 MSNM), se evaluaron seis rotaciones con todas sus fases presentes cada año y replicadas 3 veces. Los tratamientos evaluados fueron: Monocultivo de arroz (Az-Continuo, 1 año); arroz en rotación con soja (Az-Soja, 2 años) y con soja y sorgo (Az-Cultivos, 4 años); arroz en rotación con soja y pasturas de corta duración (Az-Soja-PPcorta, 6 años); arroz en rotación con pasturas corta duración (Az-PPcorta, 2 años) y de larga duración (Az-PPlarga, 5 años). Durante octubre de 2016 y abril de 2017 se determinó, el carbono orgánico total del suelo (TCOS), nitrógeno total (NT), así como sus fracciones, materia orgánica particulada (C-MOP y N-MOP) y asociada a la fracción mineral (C-MOAM y N-MOAM), respiración, biomasa microbiana y potencial de mineralización de nitrógeno (0-15 cm prof.). Se muestreó hasta los 60 cm para TCOS y NT solo el primer año. Para evaluar la EUE se analizó información de 2 zafra (2015-2016 y 2016-2017) mediante un enfoque sistémico. El inventario de ciclo de vida incluyó desde la cuna hasta la portera, usando como unidad funcional: MJ ha⁻¹ de biomasa cosechable. Se calculó la tasa de retorno de energía invertida (EROI), la energía producida y energía invertida. No hubo diferencias en TCOS y NT entre rotaciones a ninguna profundidad. Sin embargo, el sistema Az-PPlarga tuvo 17,6% más de C-MOP (0-15 cm) que el promedio Az-Soja y Az-Cultivos (6,05 Mg ha⁻¹). La rotación Az-PPcorta y Az-Continuo redujeron la EROI 8% y 6,5% comparado a Az-PPlarga (6,1 MJ MJ⁻¹) respectivamente; mientras que Az-Soja aumentó 18%. Concluimos que, para una rotación arroz-pasturas estabilizada, existen alternativas de intensificación del uso del suelo que, en el mediano plazo, no afectaron la calidad del suelo o mejoraron la EUE, aunque es necesario una evaluación conjunta de los indicadores para evaluar la sostenibilidad.

Palabras clave: Calidad de suelo, energía, intensificación sostenible, rotaciones.

SOIL QUALITY AND ENERGY USE EFFICIENCY IN RICE

ROTATIONS

SUMMARY

The main objective of the present research was to evaluate the impact of intensification alternatives to the rice-pasture rotation system on soil quality and energy use efficiency (EUE). Six rotation systems were evaluated, and all phases were replicated three times, in a long-term experiment installed in 2012 in INIA Treinta y Tres, Uruguay (33° 16' 23" S; 54° 10' 24" O; 22 MSNM). Rotations treatments were: continuous rice (ContRc, 1 yr.); rice-soybean (Rc-Sy; 2 yrs.); rice-soybeans-rice-sorghum (Rc-Sy-Sg; 4 yrs.); rice-soybeans-pasture (Rc-Sy-Past; 6 yrs.); and rice-pasture, with short (Rc-SPast; 2 yrs.) and long-term pastures (Rc-LPast; 5 yrs.). Soil samples were collected 0-15 cm depth after 5 yrs. and analyzed for soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN) and their fractions, particulate organic matter (C-POM y N-POM) and associated to the mineral fraction (C-MAOM y N-MAOM), microbial biomass and nitrogen mineralization potential. Additional samples (15-60 cm) were analyzed for SOC and TN. The EUE was evaluated from a systemic prospective using data from two years. Life cycle assessment inventory is expressed in MJ ha⁻¹ as the functional unit and includes all activities from the cradle to gate. Energy return on investment (EROI), energy output and energy input were calculated for ContRc, Rc-Sy, Rc-SPast and Rc-LPast. No SOC and TN differences were found between rotations at any soil depth. However, Rc-LPast had 17.6% higher C-POM (0-15 cm depth) than the average of Rc-Sy and Rc-Sy-Sg (6.05 Mg ha⁻¹). A 6.5 and 8% EROI reduction was observed in ContRc and Rc-SPast respectively, compared with Rc-LPast (6.1 MJ MJ⁻¹); but Rc-Sy increased EROI 18%. For a steadied rice-pasture rotation system, such as Rc-LPast, there are soil use intensification alternatives that did not affect soil quality or improved EUE in the mid-term, although is required an integrated evaluation for sustainability assessment.

Keywords: Soil quality, energy, sustainable intensification, rotations

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN ARROCEROS EN URUGUAY

El área del cultivo de arroz en Uruguay es de aproximadamente 160 mil hectáreas en la actualidad, el cultivo se realiza bajo riego por inundación, se siembra en seco y aproximadamente 30-40 días después de la siembra se inunda. La productividad es una de las mayores a nivel mundial, con rendimientos que evolucionaron desde 5 Mg ha⁻¹ a fines de los 80s hasta más de 8 Mg ha⁻¹ en las últimas zafas (DIEA, 2017). Históricamente el cultivo de arroz se ha caracterizado por alternar el uso del suelo con pasturas. Previo a la década de los 70s la rotación se caracterizaba por ser muy laxa, donde se realizaba un cultivo de arroz y se dejaba regenerar la pastura, la cual duraba entre 8-10 años (Chebataroff, 1982). Durante la década de los 70s, en la Estación Experimental de Este se probó y recomendó una secuencia de 2 años de arroz seguidos de 4 años de pasturas sembradas (gramíneas y leguminosas). Estos cambios iniciales en la rotación se tradujeron en mejoras significativas en la producción en la etapa ganadera (Méndez, 1993). Durante la primera década del siglo XXI en la Unidad Experimental del Paso de la Laguna se condujo un sistema arroz-pasturas a escala semi comercial donde el cultivo de arroz ocupaba un 40% del tiempo de la rotación, con el objetivo de evaluar la sostenibilidad productiva, económica y de los recursos naturales (Deambrosi, 2009). Estos sistemas de rotación fueron 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). Aunque actualmente la rotación arroz-pasturas predomina en la mayor 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 productivas más cortas (DIEA, 2014; Terra et al., 2014).

1.2. EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

La intensificación sostenible es el desafío de producir más alimentos y aumentar la eficiencia en el uso de los recursos, mientras se conservan los recursos naturales y se minimizan los impactos ambientales como, la pérdida de nutrientes o emisión de gases de efecto invernadero (Godfray y Garnett, 2014). Los agroecosistemas son los encargados de producir alimentos y se prevé que para el año 2050 la producción de alimentos deberá aumentar 70% para cubrir la demanda que se generará por un incremento en la población mundial (FAO, 2009).

Existen diversas formas de evaluar la sostenibilidad de los sistemas de producción y son muchos los atributos que pueden ser evaluados, entre ellos se encuentran: la rentabilidad, la productividad, la calidad del suelo, el agua y el aire, la eficiencia en el uso de energía, el hábitat de la vida salvaje, la calidad de vida y la aceptabilidad social y cultural (Stockle et al., 1994).

De los atributos mencionados, en nuestro trabajo se evaluaron indicadores de calidad del suelo relacionados a la materia orgánica y la eficiencia en el uso de la energía.

1.2.1. Materia orgánica como indicador de calidad del suelo

Las funciones del suelo son muy variadas, entre ellas se encuentran: hábitats para organismos, regulación de inundaciones, fuente de farmacéuticos y recursos genéticos, provisión de materiales para la construcción, provisión de alimentos, fibra y madera, secuestro de carbono (FAO, 2015).

La calidad del suelo se define como la capacidad del suelo para funcionar, y se ve reflejada a través de sus propiedades físicas, químicas y biológicas. La materia orgánica del suelo (MOS) es considerada como uno de los principales indicadores de calidad de suelo debido a su influencia en muchas de sus propiedades, tales como, estabilidad de agregados, disponibilidad de nutrientes (Larson y Pierce, 1994; Doran y Parkin, 1994; Karlen et al, 1997). La MOS presenta una alta estabilidad temporal, de todas maneras, existen algunos indicadores relacionados a ésta que son mas sensibles y permiten detectar cambios en periodos cortos de tiempo, tales como, la materia orgánica particulada, así como la biomasa microbiana (Franzluebbers et al., 2000).

Las rotaciones de cultivos de secano y pasturas son poco comunes a nivel mundial, Argentina, Brasil y Uruguay son claros ejemplos donde se desarrollaron este tipo de sistemas (Díaz-Zorita, Duarte y Grove, 2002; Vilrla et al., 2003; García Préchac et al., 2004) y aún se encuentran a pesar de los procesos de intensificación. Numerosos trabajos a lo largo de muchos años se han enfocado en estudiar los contenidos de MOS bajo diferentes usos del suelo en sistemas agrícolas y/o agrícolas-ganaderos de secano en la región (Andriulo, Guérif y Mary, 1999; Bayer et al., 2000; Terra et al., 2006; Salvo, Hernández y Ernst, 2010).

El cultivo de arroz en términos generales también rota con pasturas en el Uruguay. Sin embargo, la información generada para estos sistemas en el país es más escasa. Deambrosi (2009) no observó cambios en la MOS luego de 10 años bajo una rotación arroz-pasturas (2 y 3 años respectivamente) intensa en parcelas demostrativas de escala semi-comercial en Treinta y Tres, Uruguay. No obstante, existen trabajos realizados en la región que muestran aumentos en los contenidos de MOS y en la biomasa microbiana en rotaciones de arroz-pasturas respecto a sistemas de cultivos continuos (Benintende et al., 2008).

1.2.2. Eficiencia y uso de energía en sistemas de producción

En un escenario futuro de aumento en la demanda de alimentos, donde la energía fósil es un recurso finito, se plantea el desafío de mejorar la eficiencia y/o disminuir la dependencia en el uso de energía para lograr sistemas de producción sostenibles.

La agricultura moderna es altamente dependiente de la energía producida por combustibles fósiles, ya sea la utilizada directamente en la agricultura (ej. Combustible para el funcionamiento de maquinaria), así como la utilizada para la fabricación de fertilizantes y pesticidas que han contribuido al aumento en la producción de alimentos desde 1960 (Woods et al., 2010).

La eficiencia en el uso de energía ha sido reportada por varios autores con el fin de caracterizar cultivos, prácticas de manejo agronómicas o sistemas de producción (Franzuebbers y Francis, 1995; Rathke et al., 2007; Theisen et al., 2017). El uso de energía puede ser muy diferente, dependiendo del sistema de producción, desde menos

de 1 GJ ha⁻¹ en grandes extensiones de África, hasta más de 30 GJ ha⁻¹ en sistemas de alta utilización de insumos como en Estados Unidos (Pimentel, 2009).

Los parámetros energéticos sirven de indicadores para evaluar el impacto ambiental de las prácticas agrícolas, también son utilizados para evaluar la eficiencia de los sistemas de producción y hacer comparaciones entre éstos (Conforti y Giampietro, 1997; Haciseferogullari, Acaroglu y Gezer, 2003; Kelm, 2004).

1.3. CONTENIDO Y OBJETIVOS DEL TRABAJO DE TESIS

Existen alternativas de intensificación y diversificación de la rotación arroz-pasturas, mediante una mayor frecuencia de arroz, otros cultivos o pasturas cortas de alta producción, que es esperable que permitan mantener la calidad del suelo y la eficiencia del uso de la energía. El objetivo general fue evaluar el impacto de distintas alternativas de intensificación a la rotación arroz-pasturas sobre indicadores de calidad de suelos vinculados a la materia orgánica y sobre parámetros energéticos. El primer objetivo específico fue cuantificar el contenido de carbono orgánico y nitrógeno total del suelo, así como sus distintas fracciones físicas y algunos indicadores biológicos, en la transición de una rotación arroz-pasturas a rotaciones de mayor intensidad de uso del suelo. En segundo lugar, se evaluó la eficiencia en el uso de energía, la energía producida y la energía invertida en algunos de estos modelos de intensificación. El tercer objetivo específico abordado en la discusión general de este trabajo fue relacionar la información de calidad de suelos con la de eficiencia del uso de energía con el fin de entender relaciones/balances entre estos dos atributos de la sostenibilidad de los sistemas de producción.

Este documento consta de dos artículos con formato de la Revista Agrociencia Uruguay. El primer artículo se titula: “Transición desde una rotación arroz-pasturas hacia distintos escenarios de intensificación: cambios en la materia orgánica del suelo” y el segundo artículo se titula: “Alternativas de intensificación a sistemas de arroz-pasturas: eficiencia en el uso de energía”.

Este trabajo fue financiado por un proyecto del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) (SA_20) y una beca de Maestría de la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) (POS_NAC_2015_1_109776).

2. TRANSICIÓN DESDE UNA ROTACIÓN ARROZ-PASTURAS HACIA DISTINTOS ESCENARIOS DE INTENSIFICACIÓN: CAMBIOS EN LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO

2.1 RESUMEN

Los sistemas mixtos cultivos-pasturas conservan o mejoran la materia orgánica del suelo (MOS), principal indicador de su calidad. Se evaluó el impacto a mediano plazo de la intensificación en sistemas de producción de arroz sobre indicadores vinculados a la dinámica de la MOS. Estos incluyen (0-15 cm de profundidad): el carbono orgánico total (TCOS), nitrógeno total (NT), MOS particulada (C-MOP y N-MOP) y asociada a la fracción mineral, biomasa microbiana y potencial de mineralización de nitrógeno. Se evaluaron seis alternativas de intensificación sobre un suelo con una rotación arroz-pasturas estabilizada. Los tratamientos incluyen: arroz-continuo (Az-Continuo, 1-año); arroz-soja (Az-Soja, 2-años); arroz-soja-arroz-sorgo (Az-Cultivos, 4-años); arroz-soja-pasturas (Az-Soja-PPcorta, 6-años); arroz-pasturas cortas (Az-PPcorta, 2-años); arroz-pasturas largas (Az-PPlarga, 5-años); todas incluyen cultivos de cobertura en invierno. Las fases de las rotaciones estuvieron presentes simultáneamente y replicadas espacialmente. Luego de 5 años no se encontraron diferencias en TCOS y NT (29,3 Mg C ha⁻¹ y 3,16 Mg N ha⁻¹). No se detectaron diferencias en C-MOP y N-MOP cuando se comparó Az-PPlarga con Az-PPcorta o Az-Soja-PPcorta. No obstante, Az-PPlarga tuvo 18 y 19% más de C-MOP y N-MOP respectivamente, que el promedio de Az-Cultivos y Az-Soja (6,06 Mg C ha⁻¹ y 0,48 Mg N ha⁻¹), representado 23,6% y 20% del TCOS para Az-PPlarga y Az-Cultivos_Az-Soja respectivamente. Para suelos en zonas templadas, concluimos que existen alternativas de intensificación de los sistemas de producción que permiten conservar TCOS en el mediano plazo. Sin embargo, la ausencia de pasturas perennes en la rotación podría hacer al TCOS más vulnerable a pérdidas en el largo plazo.

Palabras clave: sustentabilidad, intensificación sostenible, secuestro de carbono, suelos inundados, salud del suelo

TRANSITION FROM A RICE-PASTURE ROTATION SYSTEM TO DIFFERENT INTENSIFICATION SCENARIOS: SOIL ORGANIC MATTER CHANGES

2.2 SUMMARY

Crop-pasture mixed systems improve soil organic matter (SOM), a key soil quality indicator. We evaluated mid-term rice production systems intensification impacts on SOM dynamics. Indicators (0-15 cm depth) included: soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), particulate SOM (C-MOP y N-MOP) and associated with the mineral fraction, microbial biomass and nitrogen mineralization potential. We evaluated six rotation intensification alternatives on a soil with a stabilized rice-pasture rotation. Treatments included: continuous rice (ContRc, 1 yr.); rice-soybean (Rc-Sy; 2 yrs.); rice-soybeans-rice-sorghum (Rc-Sy-Sg; 4 yrs.); rice-soybeans-pasture (Rc-Sy-Past; 6 yrs.); and rice-pasture, with short (Rc-SPast; 2yrs) and long-term pastures (Rc-LPast; 5 yrs.); all with annual cover crops in winter. All rotation phases coexisted and were replicated 3 times in space. No SOC ($29,3 \text{ Mg C ha}^{-1}$) or TN ($3,16 \text{ Mg N ha}^{-1}$) differences were observed between rotations after five years. Neither C-MOP nor N-MOP contents were different between treatments that have perennial pastures in the rotation. However, Rc-LPast had 18 and 19% greater C-MOP and N-MOP respectively than the average of Rc-Sy and Rc-Sy-Sg, ($6,06 \text{ Mg C ha}^{-1}$ and $0,48 \text{ Mg N ha}^{-1}$) representing 23,6 and 20% of SOC for Rc-LPast and rice-crops, respectively. For soils in temperate zones, under a stable rice-pasture rotation, there are intensification alternatives which preserved SOC in the midterm. However, the lack of perennial pastures in the rotation may make SOC more vulnerable to losses in the long term.

Keywords: sustainability, sustainable intensification, soil carbon sequestration, flooded soils, soil health

2.3 INTRODUCCIÓN

La materia orgánica del suelo (MOS) es uno de los principales indicadores de calidad de suelo debido a su influencia en muchas de sus propiedades (Larson y Pierce, 1994; Doran y Parkin, 1994; Karlen et al., 1997). El concepto de calidad del suelo refiere a la capacidad del suelo para funcionar y se ve reflejado mediante propiedades químicas, físicas y biológicas. Otros conceptos, como el de salud y seguridad del suelo, han sido desarrollados recientemente y presentan un enfoque más amplio respecto al de calidad y abarcan aspectos relacionados al ambiente, sustentabilidad energética y climática y la biodiversidad (McBratney, Field y Koch, 2014; Larkin, 2015). El suelo es un importante sumidero de carbono: los contenidos de éste son cuatro veces mayores a los que existentes en la biota, y tres veces mayores a los de la atmósfera (Lal, 2004). Mantener o aumentar los contenidos de MOS es un objetivo importante para desarrollar sistemas productivos sustentables (Reeves, 1997).

Los indicadores de calidad de suelo son utilizados para reflejar el estado de situación y/o cambios en algunas de sus propiedades. Estos deben ser fáciles de medir e interpretar, accesibles a muchos usuarios y sensibles (Moron, 2005). Una característica de la MOS es su estabilidad temporal, por lo que es difícil detectar modificaciones debido a prácticas de manejo del suelo en el corto plazo (Wander y Drinkwater, 2000; Wander, 2004). De todas maneras, la MOS se puede separar en varias fracciones que varían desde muy activas a estables, tanto en términos químicos como biológicos (Parton et al., 1987; Cambardella y Elliot, 1992; Christensen 2001). La materia orgánica particulada (MOP) (53-2000 μm), así como la biomasa microbiana (BM), son reportados como indicadores de suelo sensibles a las prácticas de manejo (Franzluebbers et al., 2000).

Las rotaciones de cultivos-pasturas son inusuales en el mundo, algunas partes de Argentina y Uruguay son la excepción, donde históricamente existieron rotaciones de cultivos y pasturas por sobre sistemas de cultivos continuos (Díaz-Zorita, Duarte y Grove, 2002) y persisten a pesar del proceso de intensificación agrícola de la región. La inclusión de pasturas en la rotación recupera, conserva y en algunos casos mejora los contenidos de carbono orgánico del suelo (COS) en comparación a sistemas de

cultivos continuos (García Préchac et al., 2004; Salvo, Hernández y Ernst, 2010). En Uruguay el arroz alterna el uso del suelo con pasturas regeneradas o sembradas de gramíneas y leguminosas destinadas a la ganadería. Esta rotación arroz-pasturas se presenta como una alternativa ventajosa en comparación a otros sistemas de arroz utilizados en el mundo (Deambrosi, 2003; Pittelkow et al., 2016). Trabajos conducidos en Entre Ríos, Argentina, mostraron que las rotaciones de arroz con pasturas mejoraron los contenidos de COS y carbono en la biomasa microbiana (C-BM) en comparación a otros sistemas de cultivos continuos (Benintende et al., 2008). En parcelas demostrativas de escala semi-comercial conducidas durante 10 años bajo una rotación arroz-pasturas (33% arroz y 66% pasturas) en Treinta y Tres, Uruguay, los contenidos de COS se mantuvieron en niveles similares a los registrados en la etapa inicial del trabajo (Deambrosi, 2009).

La intensificación agrícola podría tener impactos negativos sobre la erosión y la fertilidad de suelos, la biodiversidad, la contaminación de cursos de agua (Matson et al., 1997), así como balances negativos de carbono y nitrógeno y pérdida en la calidad del suelo (Studdert y Echeverria, 2000). Tanto la intensificación como la expansión agrícola se han dado en parte debido al aumento de la demanda global de alimentos, fibra y energía (Tilman et al., 2011).

Hipotetizamos que es posible mantener el contenido de MOS de los sistemas arroz-pasturas en sistemas de producción mediante su intensificación y diversificación con rotaciones que incluyan mayor frecuencia de arroz, otros cultivos o pasturas cortas de alta producción. El objetivo de este trabajo fue evaluar el contenido de COS y nitrógeno total (NT), el COS y el NT en las distintas fracciones físicas de la MOS, así como también algunos indicadores biológicos en la transición de una rotación arroz-pasturas hacia rotaciones que hacen un uso más intenso del suelo, utilizando un experimento de rotaciones de largo plazo.

2.4 MATERIALES Y MÉTODOS

2.4.1 Descripción del sitio

El experimento se ubicó en el departamento de Treinta y Tres, Uruguay, (33° 16' 23" S; 54° 10' 24" O; 22 m s. n. m.). La temperatura media mensual promedio es de $22,3 \pm 0,85$ °C durante el verano y $11,5 \pm 0,82$ °C para el invierno. La precipitación promedio anual es de 1360 ± 315 mm, con una gran variación tanto dentro como entre años y la evapotranspiración potencial total anual es de 1138 ± 177 mm, para una serie de datos que va desde 1971 hasta 2016 (INIA-Unidad GRAS, 2017). Previo al comienzo del experimento, el sitio estuvo durante 34 años (1979-2012) bajo una rotación de 2 años de arroz y 3 años con pasturas, con pequeñas variaciones. El suelo predominante del sitio es un Argialboll con pendientes menores a 0,5% (Durán et al., 2006). Para los primeros 15 cm de profundidad del suelo, los contenidos iniciales de C y N en el sitio experimental fueron de 14,2 y 1,4 g kg⁻¹ de suelo, respectivamente. Los contenidos de arena, limo y arcilla fueron de 190, 510 y 300 g kg⁻¹ de suelo, respectivamente, el pH (H₂O) del suelo fue 5,7 y los contenidos de bases fueron de 7; 2,8; 0,25 y 0,35 cmol kg⁻¹ de suelo para Ca, Mg, K y Na respectivamente.

2.4.2 El experimento de largo plazo

En el año 2012 se inició un experimento de largo plazo (ELP). Se utilizó un diseño básico (Patterson, 1964) en bloques completos al azar (DBCA) con tres repeticiones, donde se contrastaron seis rotaciones. Las parcelas individuales fueron de 60 m de largo por 20 m de ancho.

Los tratamientos de rotaciones fueron: arroz (*Oriza sativa* L.) con *Trifolium alexandrinum* (TA) durante el invierno (Az-Continuo, 1 año); arroz-soja (*Glycine max* (L.) Merr) con *Lolium multiflorum* (LM) después del arroz y TA después de soja (Az-Soja, 2 años); arroz1-soja-arroz2-sorgo (*Sorghum bicolor* L.), con TA después de soja, arroz2 y sorgo, y LM después de arroz1 (Az-Cultivos, 4 años); arroz1-soja1-soja2-arroz2 seguido de una pastura de dos años y medio compuesta por *Festulolium sp* y *Lotus corniculatus*, con LM después de arroz1 y soja1 y TA después de soja2 (Az-

Soja-PPcorta, 6 años); arroz, seguido de una pastura de un año y medio compuesta por LM y *Trifolium pratense* (Az-PPcorta, 2 años); arroz1-arroz2 seguido de una pastura de tres años y medio compuesta por *Festuca arundinacea*, *Lotus corniculatus* y *Trifolium repens* y entre los dos cultivos de arroz se sembró LM (Az-PPlarga, 5 años) (Tabla 1).

Tabla 1. Sistemas de rotación contrastados y largo de la rotación (años).

Rotación	Duración de la rotación (años)											
	1		2		3		4		5		6	
	PV	OI	PV	OI	PV	OI	PV	OI	PV	OI	PV	OI
Az-Continuo	Arroz - TA											
Az-Soja	Arroz - LM - Soja - TA											
Az-Cultivos	Arroz - LM - Soja - TA Arroz - TA - Sorgo - TA											
Az-Soja-PPcorta	Arroz - LM - Soja - LM Soja - TA - Arroz - PP - PP - PP - PP - PP											
Az-PPcorta	Arroz - PP - PP - PP											
Az-PPlarga	Arroz - LM - Arroz - PP											

Az=Arroz, TA= Trébol alejandrino, LM= Raigrás, PV=primavera-verano, OI=otoño-invierno.

2.4.3 Manejo agronómico

El sitio experimental fue sistematizado, nivelado y drenado al inicio del experimento con rastras y landplane. La siembra de los cultivos se realizó generalmente sin laboreo entre el 15 de octubre y el 15 de noviembre; el arroz se inundó antes de 30 días postemergencia. Las pasturas perennes y las forrajeras anuales fueron sembradas en cobertura sobre los rastrojos de los cultivos inmediatamente antes o después de la cosecha en abril.

La fertilización de los cultivos y pasturas fue ajustada anualmente y varió según las rotaciones. Las dosis de P y K se ajustaron por balance en Az-Continuo y Az-Soja, mientras que para las otras rotaciones se ajustó por nivel de suficiencia. La dosis de N para el arroz se ajustó en base al potencial de mineralización de nitrógeno del suelo, excepto para el Az-Continuo que se basó para una expectativa de rendimiento de 10 t ha⁻¹.

Las labores agrícolas se realizaron con maquinaria comercial, las prácticas agronómicas se basaron en recomendaciones existentes para estos cultivos/pasturas en el país. Las parcelas de las rotaciones que incluyeron pasturas perennes fueron pastoreadas en forma rotativa con ovinos durante todo el año.

2.4.4 Muestreo y análisis de suelo

Los muestreos se concentraron entre el cuarto y el quinto año de iniciado el experimento. En octubre del 2016, previo a la siembra de los cultivos de verano, se realizaron muestreos de suelo utilizando un calador manual. Se definieron las siguientes profundidades: 0-5, 5-15, 0-10 y 0-15 cm, según análisis a realizar y se tomaron 21 muestras para generar una muestra compuesta por parcela. También se realizaron tomas con un calador hidráulico de 3 muestras por parcela generando una muestra compuesta para el cálculo de densidad aparente (DAP) para las profundidades de, 0-5,5-15,15-30,30-45 y 45-60cm y 6 tomas por parcela para las últimas tres profundidades para análisis químicos. Durante abril del 2017 se repitieron los muestreos, a excepción de los muestreos con el calador hidráulico. Se realizaron dos muestreos para saber si existía algún momento que fuera mas sensible a detectar cambios en las variables analizadas. El valor promedio de cada variable estudiada para una rotación, se compone de todas las parcelas que incluyen esa rotación y los dos años de muestreo.

Para todas las profundidades se determinaron los contenidos de C en el suelo por combustión seca a 900°C y detección mediante infrarrojo del CO₂ emitido por la muestra, y N total del suelo detectado mediante conductividad térmica en analizador elemental LECO (TruSpec NC), acorde a Wright y Bailey (2001).

Para las profundidades de 0-5 y 5-15cm se determinaron los contenidos de C y N en la materia orgánica particulada (C-MOP > 53 µm y N-MOP > 53 µm), realizando el fraccionamiento físico según Marriot y Wander, (2006), con algunas modificaciones. Las muestras se pasaron por un tamiz de 2000 µm retirando los residuos mayores a esta dimensión. Veinte gramos de suelo fueron colocados en botellas plásticas de 60

ml, a las cuales se le agregaron 30 ml de hexametáfosfato de sodio al 0,5 % (m/v) y se las dejó durante 12-18 hs para que el suelo disperse. La boca de la botella se cubrió con tela de malla de 53 μm y luego se selló con tapas con agujeros perforados en la parte superior. La botella de 60 ml se colocó dentro de un frasco de 250 ml al que se agregaron 120 ml de hexametáfosfato de sodio 0,5 % (m/v). La muestra fue sacudida por 1 hora en un agitador. El hexametáfosfato de sodio y las partículas finas de suelo suspendidas fueron retiradas y reemplazadas con 150 ml de agua destilada y la muestra se agitó durante 20 min. Este paso fue repetido dos veces más, lo que resultó en un total de 120 minutos de tiempo de agitación. Los últimos 150 ml de agua y las partículas finas suspendidas fueron desechadas y la fracción de suelo que quedó dentro de la botella de 60 ml ($> 53 \mu\text{m}$) fue transferida a un trozo de tela mas grande de malla de 53 μm y se enjuago con agua destilada hasta que el agua saliera limpia. Luego se colocó la fracción de suelo resultante ($> 53 \mu\text{m}$) en platillos de aluminio y se secó en estufa durante 48 hs a 45 °C. Finalmente las muestras fueron pesadas y se determinaron los contenidos de C y N de la fracción. Los contenidos de C y N de la materia orgánica asociada a la fracción mineral (C-MOAM $<53 \mu\text{m}$ y N-MOAM $<53 \mu\text{m}$) se calcularon por la diferencia entre C o N total y C o N de la MOP.

Para el cálculo de respiración microbiana (RM) y carbono en la biomasa microbiana (C-BM) se utilizó la metodología propuesta por Jenkinson y Powlson, (1976) para los primeros 10 cm de profundidad. Sobre muestras frescas, tamizadas a 2 mm, se colocaron dos submuestras de 50 g en placas de petri, una de ella se expuso a vapores de cloroformo en un desecador durante 24 hs. Luego se retiraron los vapores de cloroformo en campana extractora y se pasaron las muestras a recipientes para evaluar el desprendimiento de CO_2 . Paralelamente se determinó contenido gravímetro de agua en 20 g de suelo, para al momento de la incubación llevar las muestras a 70% de capacidad de campo. Se corrigió la humedad de las muestras y se inocularon con 0,25 g de suelo fresco y dentro del recipiente (sobre el suelo) se colocó un vasito con 20 ml de NaOH (0,5 N). Se llevaron las muestras a incubación en estufa a 28 °C durante 10 días. Después de este periodo, se retiraron los recipientes con NaOH y se colocó la solución en frascos Erlenmeyer para su titulación. A la solución se le agregaron 5 ml

BaCl₂ y 2 gotas de fenolftaleína y se titularon con HCl (0,5 N) hasta obtener un color blanquecino, se contabilizó el consumo de HCl en una bureta aforada. Para el cálculo de liberación de CO₂ se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{mg C-CO}_2 \text{ 100 g}^{-1} \text{ suelo seco} = (\text{GB-GM}) \text{ N(HCL)} \text{ 6 x h x 100/ peso de la muestra.}$$

Donde:

GB= gasto de HCl por el blanco (sin suelo)

GM= gasto de la muestra (fumigada o sin fumigar)

N(HCl)= normalidad del ácido clorhídrico

6= el equivalente en C a el gasto de 1 ml de HCl 1N

h= factor de corrección de humedad para llevar los cálculos a suelo seco

Los valores obtenidos de las muestras sin fumigar se utilizaron como medida de la RM. Para el cálculo del C-BM se restó el valor de las muestras fumigadas menos las muestras sin fumigar y se dividió entre una constante (k= 0,45), que representa la fracción de la biomasa que se mineraliza en estas condiciones (10 días a 28 °C).

El potencial de mineralización de nitrógeno (PMN) se realizó para la profundidad de 0-15 cm. Cinco gramos de suelo fresco, previamente desmenuzado y tamizado a 2 mm se incubaron en condiciones anaeróbicas a 40 °C durante 7 días. La resta entre el contenido de amonio final y el inicial previo a la incubación es el PMN, expresado como mg N-NH₄ kg⁻¹ de suelo (Waring y Bremmer, 1964).

2.4.5 Expresión de C y N en forma de masa

Varios autores han discutido como expresar los contenidos totales de COS (TCOS) (Ellert y Battany, 1995; Alvarez y Steinbach, 2006; Lee et al., 2009), si a profundidad constante o a una masa de suelo dado. Esto refiere a que si un suelo esta compactado respecto a otro, y se calculan los contenidos de TCOS a una profundidad fija, se estará

sobrestimando los valores de TCOS para ese suelo. Para sortear esta problemática, se estimó la masa de suelo de cada tratamiento, tomando como base a Az-PPlarga, y se estimó las profundidades a las que deberían haber sido muestreados el resto de los tratamientos para incluir la misma masa de suelo en cada uno de ellos. Para las profundidades de 0-5 y 5-15 cm, la profundidad mínima a ser muestreados fue de 4,6 y 14,3 cm respectivamente. Para las profundidades de 15-30, 30-45 y 45-60 cm la profundidad mínima y máxima a ser muestreados fue de 29,7 y 31,2 cm, 44,8 y 45,2 cm, y 59,8 y 60,1 cm respectivamente. No se encontraron diferencias significativas por lo que dio lo mismo realizar los cálculos a profundidad constante o expresarlos en masa equivalente de suelo. Al no detectar diferencias en la DAP, se utilizó el dato de cada parcela para calcular los contenidos de TCOS.

2.4.6 Análisis estadístico

El modelo propuesto para el análisis estadístico fue el siguiente:

$$Y_{ijkl} = \mu + \beta_i + A_j + (\beta * A)_{ij} + T_k + (A * T)_{jk} + \varepsilon_{ijkl}$$

Donde:

- Y_{ijkl} , es el valor observado de la variable de respuesta
- μ , es la media general del experimento
- β_i , efecto de la i-esimo bloque
- A_j , efecto del j-esimo año
- $(\beta * A)_{ij}$, es la interacción bloque por año, donde se testeó el efecto año
- T_k , efecto del k-esimo tratamiento
- $(A * T)_{jk}$, efecto de la interacción año por tratamiento
- ε_{ijkl} , error experimental

Se realizaron análisis de la varianza utilizando modelos lineales generales con Infostat (Di Rienzo et al., 2017). Para la comparación de medias se realizaron contrastes (Tabla 2) según la prueba de Scheffé, ya que permite evaluar un conjunto de contrastes que

no son ortogonales (Steel y Torrie, 1989). Los contrastes se plantearon con el fin de responder las siguientes preguntas con foco en los indicadores de calidad de suelo evaluados. Sin afectar los indicadores de calidad de suelo estudiados: 1) ¿Es posible acortar la fase de pasturas?, 2) Además de acortar la fase de pasturas, ¿se puede incluir al cultivo de soja en la rotación?, 3) ¿Son necesarias las pasturas o solo alcanza con rotar cultivos?, 4) ¿Es necesario rotar cultivos o se puede hacer monocultivo de arroz? El nivel de significancia utilizado fue de $p \leq 0,05$.

Tabla 2. Contrastes evaluados.

Contraste	Rotaciones comparadas
1)	Az-PPlarga vs Az-PPcorta
2)	Az-PPlarga vs Az-Soja-PPcorta
3)	Az-PPlarga vs (Az-Soja + Az-Cultivos)
4)	(Az-Soja + Az-Cultivos) vs Az-Continuo

2.5 RESULTADOS

2.5.1 Carbono y nitrógeno en profundidad

No se encontraron diferencias entre los sistemas evaluados en los contenidos de TCOS para ninguna de las profundidades estudiadas. Los contenidos de TCOS registrados fueron de 80 Mg ha^{-1} en todo el perfil del suelo (0-60 cm), representando en el perfil el 36, 22, 27 y 15 % para 0-15, 15-30, 30-45 y 45-60 cm respectivamente (Figura 1). Tampoco se observaron diferencias para los contenidos de NT, los valores registrados en todo el perfil fueron $8,54 \text{ Mg ha}^{-1}$, representando en este el 35, 19, 29 y 17 % para 0-15, 15-30, 30-45 y 45-60 cm respectivamente.

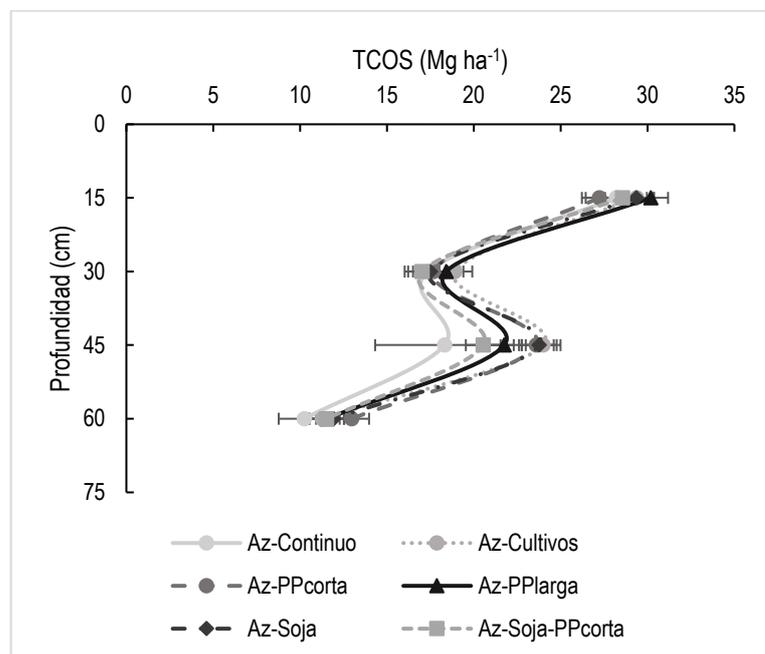


Figura 1. Contenidos de carbono orgánico del suelo (TCOS) (Mg ha^{-1}) según rotación y profundidad del perfil. Arroz en rotación con: pasturas de larga duración (Az-PPlarga), de corta duración (Az-PPcorta), en rotación con soja y pasturas de corta duración (Az-Soja-PPcorta), con soja y sorgo (Az-Cultivos), con soja (Az-Soja) y bajo monocultivo de arroz (Az-Continuo). Las barras de dispersión corresponden al error experimental $p\text{-valor} \leq 0,05$.

2.5.2 Carbono en la materia orgánica particulada

No se registraron diferencias para la interacción año por tratamiento para el C-MOP y C-MOAM tanto para los 0-15 cm como para los 0-5 cm de profundidad. El contenido medio de C-MOP (0-15 cm) de todos los tratamientos fue de $6,47 \text{ Mg ha}^{-1}$, y estos variaron entre $7,12$ y $5,97 \text{ Mg ha}^{-1}$ para Az-PPlarga y Az-Soja respectivamente. El C-MOP representó entre 21 y 24 % del TCOS en este estrato. No se detectaron diferencias entre las rotaciones para los contenidos de C-MOAM ($22,86 \text{ Mg ha}^{-1} \pm 2,44$), los cuales variaron entre 21 y 23 Mg ha^{-1} (Figura 2).

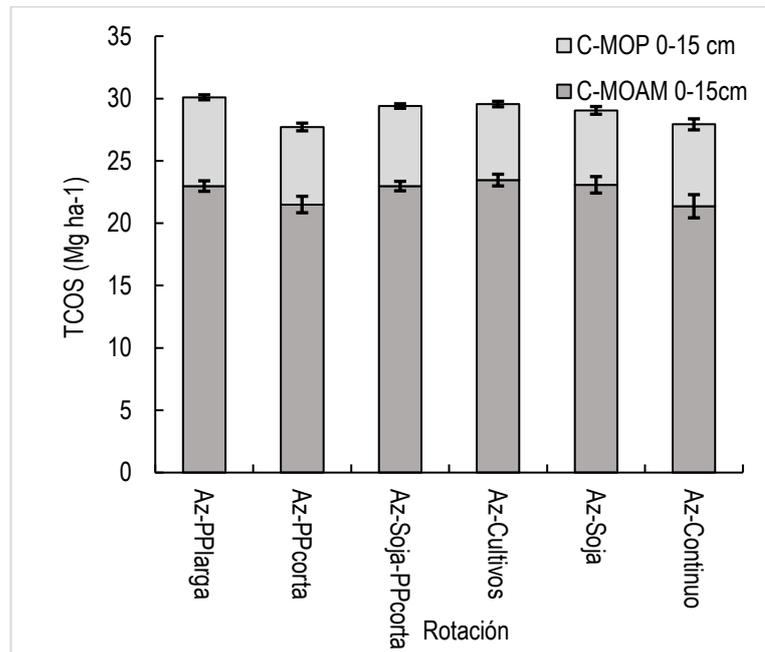


Figura 2. Contenidos de carbono orgánico del suelo en la materia orgánica particulada (C-MOP) y en la materia orgánica asociada a la fracción mineral (C-MOAM) (Mg ha⁻¹) según rotación. Arroz en rotación con: pasturas de larga duración (Az-PPlarga), de corta duración (Az-PPcorta), en rotación con soja y pasturas de corta duración (Az-Soja-PPcorta), con soja y sorgo (Az-Cultivos), con soja (Az-Soja) y bajo monocultivo de arroz (Az-Continuo). Las barras de dispersión corresponden al error experimental p-valor $\leq 0,05$.

Luego de cinco años no se encontraron diferencias en el C-MOP (0-15 cm de profundidad) al acortar la fase de pasturas, así como tampoco al acortar la fase de pasturas e incluir al cultivo de soja en rotación (contrastos 1 y 2). En cambio, sustituir las pasturas largas de la rotación por otros cultivos en rotación con arroz, significó una reducción del C-MOP del 15 %. No existieron diferencias en el C-MOP entre hacer arroz continuo o rotar arroz con soja o con soja y sorgo (Tabla 3).

Tabla 3. Diferencia y error estándar en los contenidos de C-MOP del suelo (0-15 cm de profundidad) para diferentes rotaciones contrastadas.

Contraste* ¹	Diferencia		Error Estándar	Significancia
	C-MOP (Mg ha ⁻¹)			
1) Az-PPlarga vs Az-PPcorta	0,91	±	0,37	NS
2) Az-PPlarga vs Az-Soja-PPcorta	0,70	±	0,27	NS
3) Az-PPlarga vs (Az-Cultivos y Az-Soja)	1,07	±	0,27	*
4) (Az-Cultivos y Az-Soja) vs Az-Continuo	-0,51	±	0,48	NS

* Significativo para un p-valor ≤ 0,05. NS= no significativo. *¹ Arroz en rotación con: pasturas de larga duración (Az-PPlarga), de corta duración (Az-PPcorta), en rotación con soja y pasturas de corta duración (Az-Soja-PPcorta), con soja y sorgo (Az-Cultivos), con soja (Az-Soja) y bajo monocultivo de arroz (Az-Continuo).

El contenido medio del C-MOP (0-5 cm) en todos los sistemas fue de 4 Mg ha⁻¹; el máximo se registró en Az-PPlarga (4,51 Mg ha⁻¹), mientras que el menor fue en Az-Soja (3,56 Mg ha⁻¹). El C-MOP representó el 36 y el 30% del TCOS para Az-PPlarga y Az-Soja respectivamente. No hubo diferencias en el C-MOAM (7,91 Mg ha⁻¹ ± 1,26) entre las rotaciones evaluadas (Figura 3).

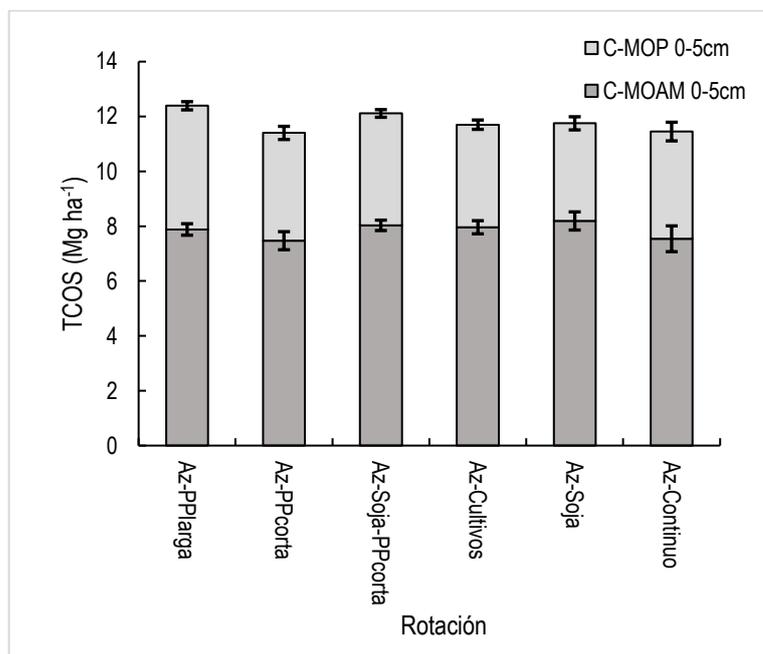


Figura 3. Contenidos de carbono orgánico del suelo en la materia orgánica particulada (C-MOP) y en la materia orgánica asociada a la fracción mineral (C-MOAM) (Mg ha⁻¹) según rotación. Arroz en rotación con: pasturas de larga duración (Az-PPlarga), de corta duración (Az-PPcorta), en rotación con soja y pasturas de corta duración (Az-Soja-PPcorta), con soja y sorgo (Az-Cultivos), con soja (Az-Soja) y bajo monocultivo de arroz (Az-Continuo). Las barras de dispersión corresponden al error experimental p-valor ≤ 0,05.

No se observaron cambios en C-MOP al comparar Az-PPlarga contra Az-PPcorta o contra Az-Soja-PPcorta. Por otro lado, los contenidos promedios de C-MOP de los sistemas de Az-Cultivos y Az-Soja fueron 18 % menores en relación con Az-PPlarga. No se registraron diferencias en C-MOP al comparar arroz continuo contra sistemas de rotación de arroz con otros cultivos (Tabla 4).

Tabla 4. Diferencia y error estándar en los contenidos de C-MOP del suelo (0-5 cm de profundidad) para diferentes rotaciones contrastadas.

Contraste* ¹	Diferencia		Error Estándar	Significancia
	C-MOP (Mg ha ⁻¹)			
1) Az-PPlarga vs Az-PPcorta	0,58	±	0,29	NS
2) Az-PPlarga vs Az-Soja-PPcorta	0,43	±	0,21	NS
3) Az-PPlarga vs (Az-Cultivos y Az-Soja)	0,83	±	0,21	*
4) (Az-Cultivos y Az-Soja) vs Az-Continuo	-0,23	±	0,37	NS

* Significativo para un p-valor $\leq 0,05$. NS= no significativo. *¹ Arroz en rotación con: pasturas de larga duración (Az-PPlarga), de corta duración (Az-PPcorta), en rotación con soja y pasturas de corta duración (Az-Soja-PPcorta), con soja y sorgo (Az-Cultivos), con soja (Az-Soja) y bajo monocultivo de arroz (Az-Continuo).

2.5.3 Nitrógeno en la materia orgánica particulada

No se encontraron diferencias para la interacción año por tratamiento para el N-MOP y N-MOAM tanto para los 0-15 cm como para los 0-5 cm de profundidad. El contenido medio de N-MOP (0-15 cm) de todos los tratamientos fue de 0,53 Mg ha⁻¹, representando el 17% del NT. No se detectaron diferencias de N-MOAM entre las rotaciones y los valores estuvieron entre 2,41 y 2,72 Mg ha⁻¹ (Figura 4).

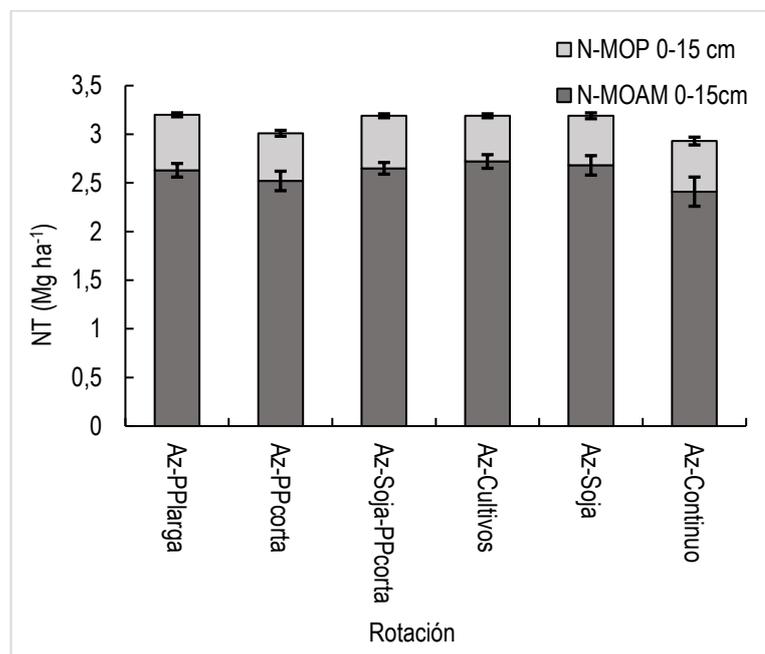


Figura 4. Contenidos de nitrógeno total del suelo en la materia orgánica particulada (N-MOP) y en la materia orgánica asociada a la fracción mineral (N-MOAM) (Mg ha^{-1}) según rotación. Arroz en rotación con: pasturas de larga duración (Az-PPlarga), de corta duración (Az-PPcorta), en rotación con soja y pasturas de corta duración (Az-Soja-PPcorta), con soja y sorgo (Az-Cultivos), con soja (Az-Soja) y bajo monocultivo de arroz (Az-Continuo). Las barras de dispersión corresponden al error experimental $p\text{-valor} \leq 0,05$.

La reducción del largo de la fase de pastura con o sin la inclusión de soja en la rotación no mostró cambios en los contenidos de N-MOP respecto a Az-PPlarga. En cambio, la sustitución de pasturas por otros cultivos en rotación con arroz implicó una disminución de N-MOP del 15 % respecto a Az-PPlarga ($0,57 \text{ Mg ha}^{-1}$). No existieron diferencias en los contenidos de N-MOP al contrastar arroz continuo con sistemas que incluyen otros cultivos en la rotación (Tabla 5).

Tabla 5. Diferencia y error estándar en los contenidos de N-MOP del suelo (0-15 cm) para diferentes rotaciones contrastadas.

Contraste* ¹	Diferencia		Error Estándar	Significancia
	N-MOP (Mg ha ⁻¹)			
1) Az-PPlarga vs Az-PPcorta	0,082	±	0,033	NS
2) Az-PPlarga vs Az-Soja-PPcorta	0,037	±	0,024	NS
3) Az-PPlarga vs (Az-Cultivos y Az-Soja)	0,089	±	0,024	*
4) (Az-Cultivos y Az-Soja) vs Az-Continuo	-0,034	±	0,042	NS

* Significativo para un p-valor $\leq 0,05$. NS= no significativo. *¹ Arroz en rotación con: pasturas de larga duración (Az-PPlarga), de corta duración (Az-PPcorta), en rotación con soja y pasturas de corta duración (Az-Soja-PPcorta), con soja y sorgo (Az-Cultivos), con soja (Az-Soja) y bajo monocultivo de arroz (Az-Continuo).

No se encontraron diferencias en los contenidos de N-MOP y N-MOAM para los primeros 5 cm de profundidad. En términos promedios el N-MOP fue de 0,30 Mg ha⁻¹, con un rango entre 0,26 y 0,34 Mg ha⁻¹, que representó el 22 y 28% del NT (Figura 5).

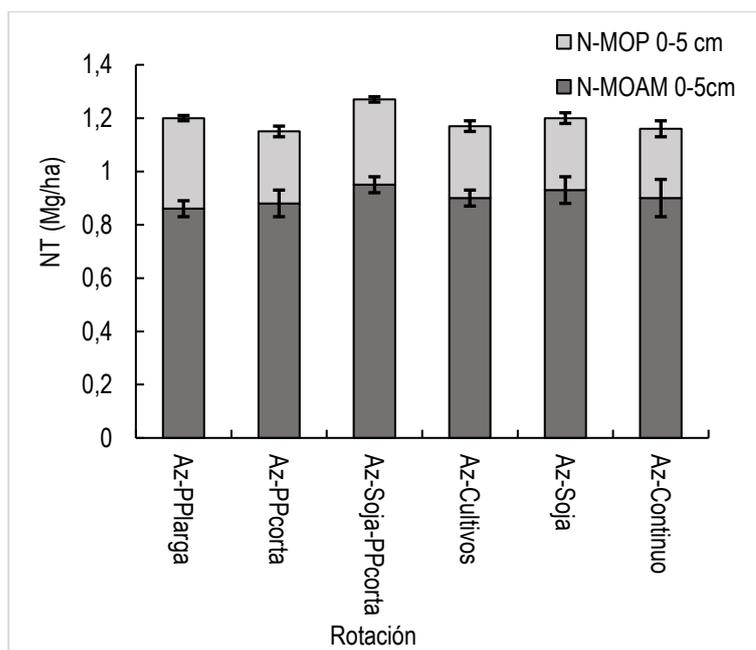


Figura 5. Contenidos de nitrógeno total del suelo en la materia orgánica particulada (N-MOP) y en la materia orgánica asociada a la fracción mineral (N-MOAM) (Mg ha⁻¹) según rotación para la profundidad de 0-5 cm. Arroz en rotación con: pasturas de larga duración (Az-PPlarga), de corta duración (Az-PPcorta), en rotación con soja y pasturas de corta duración (Az-Soja-PPcorta), con soja y sorgo (Az-Cultivos), con soja (Az-Soja) y bajo monocultivo de arroz (Az-Continuo). Las barras de dispersión corresponden al error experimental p-valor $\leq 0,05$.

Al igual que para los indicadores anteriormente mencionados, no se detectaron cambios en los contenidos de N-MOP al comparar Az-PPlarga contra Az-PPcorta o Az-Soja-PPcorta. Existió una tendencia (p -valor $\leq 0,1$) cuando se comparó el sistema de Az-PPlarga con los que rotan arroz y otros cultivos (Az-Cultivos y Az-Soja). Tampoco existieron cambios cuando se comparó el sistema de monocultivo de arroz contra sistemas de arroz en rotación con soja y con soja y sorgo (Tabla 6).

Tabla 6. Diferencia y error estándar en los contenidos de N-MOP del suelo (0-5 cm) para diferentes rotaciones contrastadas.

Contraste*1	Diferencia		Error Estándar		Significancia
	N-MOP (Mg ha ⁻¹)				
1) Az-PPlarga vs Az-PPcorta	0,064	±	0,027		NS
2) Az-PPlarga vs Az-Soja-PPcorta	0,019	±	0,020		NS
3) Az-PPlarga vs (Az-Cultivos y Az-Soja)	0,062	±	0,020		NS
4) (Az-Cultivos y Az-Soja) vs Az-Continuo	0,011	±	0,035		NS

* Significativo para un p -valor $\leq 0,05$. NS= no significativo. *1 Arroz en rotación con: pasturas de larga duración (Az-PPlarga), de corta duración (Az-PPcorta), en rotación con soja y pasturas de corta duración (Az-Soja-PPcorta), con soja y sorgo (Az-Cultivos), con soja (Az-Soja) y bajo monocultivo de arroz (Az-Continuo).

2.5.4 Relación C/N

No se detectaron diferencias en la relación C/N para los contrastes evaluados. De todas maneras, se puede observar en la tabla 7, que los sistemas con mayor relación C/N en la MOP (p -valor= 0,052) fueron aquellos con mayor frecuencia de arroz en la rotación y baja o nula frecuencia de soja. En estos sistemas la relación C/N fue 7,5% mayor que el promedio de Az-Soja y Az-Soja-PPcorta (11,95).

Tabla 7. Relación carbono-nitrógeno total, en la materia orgánica particulada y en la asociada a la fracción mineral del suelo (0-15 cm) según rotación.

Rotación*1	Relación C/N								
	Total			MOP			MOAM		
Az-PPlarga	9,5	±	0,1	12,5	±	0,3	8,9	±	0,1
Az-PPcorta	9,4	±	0,2	12,8	±	0,4	8,7	±	0,2
Az-Soja-PPcorta	9,3	±	0,1	12,2	±	0,2	8,8	±	0,1
Az-Cultivos	9,3	±	0,1	13,2	±	0,3	8,7	±	0,2
Az-Soja	9,2	±	0,2	11,7	±	0,4	8,7	±	0,2
Az-Continuo	9,6	±	0,3	12,9	±	0,6	9,0	±	0,3

*1 Arroz en rotación con: pasturas de larga duración (Az-PPlarga), de corta duración (Az-PPcorta), en rotación con soja y pasturas de corta duración (Az-Soja-PPcorta), con soja y sorgo (Az-Cultivos), con soja (Az-Soja) y bajo monocultivo de arroz (Az-Continuo).

2.5.5 Indicadores biológicos

Los valores medios de RM fueron de 155,5 $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1}$ suelo, con valores entre 110,9 y 183,2 $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1}$ suelo para Az-Continuo y Az-Soja respectivamente. Por otro lado, los valores de BM estuvieron entre 301,9 $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1}$ suelo para Az-Soja y 574 $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1}$ suelo para Az-PPcorta. El PMN medio fue 12,7 $\text{mg N-NH}_4 \text{ kg}^{-1}$ suelo, Az-PPlarga registró el mayor valor, mientras que Az-PPcorta el valor más bajo (Tabla 8). No se encontró un efecto de la interacción año por rotación para las variables de RM y PMN. En cambio, la BM si fue sensible a la interacción.

Tabla 8. Media y error estándar de respiración microbiana, biomasa microbiana y potencial de mineralización de nitrógeno según rotación.

Rotación*	RM			BM			PMN		
	$\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1}$ suelo			$\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1}$ suelo			$\text{mg N-NH}_4 \text{ kg}^{-1}$ suelo		
Az-PPlarga	177,2	±	12,60	442,9	±	39,90	15,40	±	1,57
Az-PPcorta	122,9	±	19,90	574,0	±	63,00	10,17	±	2,48
Az-Soja-PPcorta	158,4	±	11,50	377,6	±	36,40	11,50	±	1,43
Az-Cultivos	180,4	±	14,10	289,7	±	44,60	12,63	±	1,75
Az-Soja	183,2	±	19,90	301,9	±	63,00	13,83	±	2,48
Az-Continuo	110,9	±	28,20	445,8	±	89,10	13,00	±	3,50

*Arroz en rotación con: pasturas de larga duración (Az-PPlarga), de corta duración (Az-PPcorta), en rotación con soja y pasturas de corta duración (Az-Soja-PPcorta), con soja y sorgo (Az-Cultivos), con soja (Az-Soja) y bajo monocultivo de arroz (Az-Continuo). RM= respiración microbiana, BM= biomasa microbiana y PMN= potencial de mineralización de nitrógeno. p-valor $\leq 0,05$.

Ni el acortamiento de la fase de pasturas, ni su sustitución por otros cultivos en rotación con arroz mostraron cambios en las propiedades evaluadas. Tampoco existieron diferencias entre el monocultivo de arroz y las rotaciones Az-Soja y Az-Cultivos (Tabla 9).

Tabla 9. Diferencia y error estándar de respiración microbiana, biomasa microbiana y potencial de mineralización de nitrógeno para diferentes contrastes evaluados.

Contraste	*1Dif	E. E	Dif.	E.E	Dif.	E.E	Significancia
	RM		BM		PMN		
	(µg C-CO ₂ g ⁻¹ suelo)		(mg N-NH ₄ kg ⁻¹ suelo)				
1) Az-PPlarga vs Az-PPcorta	5,4	± 2,4	-131	± 75	5,23	± 2,9	NS
2) Az-PPlarga vs Az-Soja-PPcorta	1,9	± 1,7	65	± 54	3,90	± 2,1	NS
3) Az-PPlarga vs (Az-Cultivos y Az-Soja)	-0,4	± 1,7	149	± 54	2,37	± 2,1	NS
4) (Az-Cultivos y Az-Soja) vs Az-Continuo	7,0	± 3,0	-152	± 96	0,03	± 3,8	NS

Significativo para un p-valor ≤ 0,05. NS= no significativo. RM= respiración microbiana, BM= biomasa microbiana y PMN= potencial de mineralización de nitrógeno. *1Dif. = Diferencia. E.E= Error estándar p-valor ≤ 0,05.

2.6 DISCUSIÓN

La intensificación del uso del suelo durante cinco años sobre una rotación arroz-pasturas estabilizada durante más de tres décadas no provocó cambios significativos en el contenido de MOS. La estabilidad de la rotación previa del sitio, la diversidad de las rotaciones evaluadas, así como el alto aporte de residuos y la reducción del laboreo en el experimento, podrían explicar estos resultados.

Es posible que, debido a la baja intensidad de uso del suelo del sitio previo a la instalación del experimento, así como también la alta estabilidad temporal de la MOS, como mencionan Wander (2004) y Wander y Drinkwater (2000), hicieran que no se detectaran grandes cambios en el TCOS y NT al intensificar la rotación de arroz-pasturas predominante del sitio. También, según Janzen et al. (1998), las ganancias en COS debido a prácticas de manejo son probablemente muy pequeñas y dependerán del COS inicial, la producción primaria neta potencial y el clima. En el mismo sentido, no se encontraron cambios en el C-MOAM en los sistemas. Según mencionan Parton et al. (1987) y Paustian, Parton y Persson (1992), esta fracción de la MO está asociada a fracciones más estables y se requieren mayores escalas temporales para detectar cambios en ella debido al uso y manejo del suelo.

Es probable que el aporte de residuos por parte de rastrojos de cultivos de arroz de alta productividad y el rastrojo de otros cultivos (Macedo et al., 2017), así como el aporte realizado por cultivos de coberturas y pasturas más cortas (Ayala et al., 2017), hayan

cubierto en parte la contribución realizada por las pasturas de larga duración sustituidas. Según estos trabajos se estimó una producción de residuos aéreos y subterráneos de 8-10 Mg ha⁻¹ año⁻¹ de materia seca.

En el mismo sentido, es esperable que las pérdidas de MOS no hayan sido diferentes entre las rotaciones evaluadas considerando el bajo riesgo de erosión del sitio, la ausencia de laboreo y periodos importantes de suelo saturado con agua en todas ellas. Se puede considerar que las pérdidas estimadas de MOS vinculadas a la erosión son mínimas debido a la escasa pendiente del sitio. Por otro lado, las relacionadas a la mineralización por laboreo se ven disminuidas por el uso generalizado de siembra directa en todos los sistemas como reporta Lal, (2004). Además, la saturación del perfil del suelo por la inundación del arroz o por excesos hídricos en él invierno durante periodos de las secuencias hace que las perdidas por mineralización se vean disminuidas como mencionan Olk et al. (1996) y Sahrawat (2004).

Es posible que la presencia de pasturas perennes en las rotaciones haya sido más importante que el tiempo que ocupan en las mismas, ya que no se diferenciaron en los contenidos de C-MOP y N-MOP, similar a lo reportado por Morón y Sawchik, (2002) en sistemas agrícolas-ganaderos de secano luego de 40 años y por Terra et al., (2006) luego de ocho años.

Los mayores contenidos de C-MOP y N-MOP de la rotación que incluye pasturas de larga duración respecto a las rotaciones de arroz con otros cultivos, podrían explicarse por la composición y la partición (parte aérea/raíz) de los residuos generados. De acuerdo con Benintende et al. (2008), las pasturas estarían haciendo un mayor aporte de C y N a través de sus raíces y de la fijación biológica del N. Además, la calidad de residuos aportados por éstas generaría diferencias en la descomposición de los restos frescos. A su vez, coincidiendo con otros autores, (Cambardella y Elliot, 1992; Wander, 2004; Marriot y Wander, 2006; Salvo, Hernández y Ernst, 2010) el C-MOP al igual que el N-MOP, demostraron ser indicadores sensibles a cambios de uso del suelo en periodos cortos de tiempo.

A diferencia de lo reportado por Witt et al. (2000), donde sistemas de arroz y cultivos presentaron menores valores de MOS que arroz continuo, atribuibles a mayores tasas de mineralización (33-41%), en nuestro trabajo no se detectaron esas diferencias.

Existió una tendencia en la relación C/N de la MOP, donde sistemas con alta frecuencia de arroz y baja o nula frecuencia de soja en la rotación presentaron las relaciones más altas, esto coincide con los resultados reportados por Benintende et al. (2008), que muestran mayores relaciones de C/N en la BM en sistemas de arroz continuo. Esto también estaría influenciado por el tiempo de inundación de un sistema y otro, ya que, la relación C/N en sistemas con alta frecuencia de arroz inundado tiende a ser mayor que en sistemas aerobios, debido a que la tasa de descomposición de residuos se ve retrasada (Sahrawat, 2004).

El C-BM responde rápidamente a la adición de C de sustratos provenientes de la rizodeposición y los residuos de cosecha (Franzluebbbers, Hons y Zuberer, 1995), probablemente, como se mencionó anteriormente, el aporte de residuos al intensificar la rotación arroz pasturas con otros cultivos y/o pasturas más cortas haya sido similar en los sistemas evaluados, no encontrándose cambios en el C-BM. En este sentido, Campbell et al. (1992), no encontraron diferencias en C-BM entre sistemas de rotación, niveles de fertilización y frecuencias de cultivos en un experimento de 31 años en Canadá. Tampoco Li et al. (2012), en China, luego de tres años de una rotación arroz-canola con cuatro manejos de laboreo, ni Martins et al. (2017), en el sur de Brasil, luego de 18 meses contrastando sistemas de rotaciones arroceros encontraron diferencias en este indicador. Sin embargo, Benintende et al. (2008), en Argentina, luego de 4 años, encontraron mayor C-BM en una rotación arroz-pasturas respecto a arroz continuo y arroz-cultivos. Resultados similares encontraron Shao et al. (2009), en China, luego de 15 años de intensidades de laboreo contrastantes en sistemas arroceros.

2.7 CONCLUSIONES

Los contenidos de carbono orgánico y nitrógeno total del perfil del suelo no fueron afectados por la intensificación de la rotación arroz-pasturas durante 5 años.

La intensificación del sistema manteniendo las pasturas perennes en la rotación, con o sin soja, no afectó la fracción lábil de la MOS en los primeros 15 cm, en el mediano plazo. No obstante, los sistemas que sustituyeron las pasturas con otros cultivos, tanto soja, como sorgo y soja, perdieron un 15% de la fracción lábil de la MOS.

Los resultados sugieren que, para Argialbolls en zonas templadas, bajo un sistema arroz-pasturas estabilizado, existen alternativas de intensificación sostenible de la rotación que permiten mantener el contenido de MOS en el mediano plazo. Sin embargo, la sustitución de las pasturas perennes en la rotación podría hacer la MOS más vulnerable a pérdidas en el largo plazo.

2.8 AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer al Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) y a la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) por financiar este trabajo a través de una beca de posgrados nacionales (POS_NAC_2015_1_109776).

2.9 BIBLIOGRAFÍA

- Alvarez, R. y Steinbach, H.S.** (2006). Efecto del sistema de labranza sobre la materia orgánica. En Pascale, A.J. (Ed.), *Materia orgánica: valor agronómico y dinámica en suelos pampeanos*. (pp. 69-78). Buenos Aires, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
- Ayala, W., Serron, N., Macedo, I. y Terra, J.A.** (2017). ¿Cuánto producen las pasturas en diferentes secuencias de arroz? En: Zorrilla, G.; Martínez, S.; Saravia, H. (Eds.) *Arroz 2017*. (pp.83-85). Montevideo, INIA. (Serie Técnica, 233)
- Benintende, S.M., Benintende, M.C., Sterren, M.A. y De Battista J.J.** (2008). Soil microbiological indicators of soil quality in four rice rotations systems. *Ecological indicators*, 8(5), 704-708.
- Cambardella, C.A. y Elliot, E.T.** (1992). Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal*, 56, 777-783.

- Campbell, C.A., Biederbeck, V.O., Moulin, A.P., Bowren, K.E., Townley-Smith, L. y Janzen, H.H.** (1992). Effect of crop rotations on microbial biomass, specific respiratory activity and mineralizable nitrogen in a black chernozemic soil. *Canadian Journal of Soil Science*, 72(4), 417-427.
- Christensen, B.T.** (2001). Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. *European Journal of Soil Science*, 52:345–353.
- Deambrosi, E.** (2003). Rice production system in Uruguay and its sustainability. *En Proceedings of the III International Conference of Temperate Rice*, Punta del Este, Uruguay, INIA. s.p.
- Deambrosi, E.** (2009). 10 años de la unidad de producción arroz-ganadería. En **Deambrosi, E., Montossi, F., Saravia, H., Blanco, P.H. y Ayala, W.** (Eds.). *10 años de la Unidad de Producción Arroz-Ganadería*. (pp. 9-12). Montevideo, INIA. (Serie Técnica; 180)
- Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Tablada, M., Robledo, C.W.** (2017). *InfoStat software estadístico: versión 2017*. Córdoba, Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
Recuperado de <http://www.infostat.com.ar>
- Díaz-Zorita, M., Duarte, G.A. y Grove, J.H.** (2002). A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil and Tillage Research*, 65(1), 1-18.
- Doran, J.W. y Parkin, T.B.** (1994). Defining and assessing soil quality. En Doran, J.W. et al. (Eds.). *Defining soil quality for a sustainable environment*. (pp.3-21). Boca Raton, FL, ASA and SSSA. (SSSA Special Publication, 35)
- Durán, A., Califra, A., Molfino, J.H. y Lynn, W.** (2006). *Keys to soil taxonomy for Uruguay*. (77 p.). Washington, D.C., United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- Ellert, B.H. y Battany, J.R.** (1995). Calculation of organic matter and nutrient stored under contrasting management regimes. *Canadian Journal of Soil Science*, 75, 529–538.

- Franzluebbers, A.J., Hons, F.M. y Zuberer, D.A.** (1995). Soil organic carbon, microbial biomass, and mineralizable carbon and nitrogen in sorghum. *Soil Science Society of America Journal*, 59(2), 460-466.
- Franzluebbers, A.J., Haney, R.L., Honeycutt, C.W., Schomberg, H.H. y Hons F.M.** (2000). Flush of carbon dioxide following rewetting of dried soil relates to active organic pools. *Soil Science Society of America Journal*, 64, 613–623.
- García-Préchac, F., Ernst, O., Siri-Prieto, G y Terra JA.** (2004). Integrating no-till into crop–pasture rotations in Uruguay. *Soil and Tillage Research*, 77(1), 1-13.
- INIA-Unidad GRAS.** (2017). Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, Unidad de Agroclima y Sistemas de Información (GRAS). Montevideo, INIA. Recuperado de <http://www.inia.uy/gras/Clima/Banco-datos-agroclimatico>
- Janzen, H.H., Campbell, C.A., Izaurrealde, R.C., Ellert, B.H., Juma, N., McGill, W.B. y Zenter, R.P.** (1998). Management effects on soil carbon storage on the Canadian prairies. *Soil and Tillage Research*, 47, 181–195.
- Jenkinson, D.S. y Powlson, D.S.** (1976). The effects of biocidal treatments on metabolism in soil—V: a method for measuring soil biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 8(3), 209-213.
- Karlen, D.L., Mausbach, M.J., Doran, J.W., Cline, R.G., Harris, R.F. y Schuman, G.E.** (1997). Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Science Society of America Journal*, 61, 4-10.
- Lal, R.** (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123, 1–22.
- Larkin, R.P.** (2015) Soil health paradigms and implications for disease management. *Annual Review of Phytopathology*, 53 199–221.
- Larson, W.E. y Pierce, F.J.** (1994). The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. (pp. 37–51). En J.W. Doran et. al. (Ed.) *Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison, WI, SSSA and ASA. (SSSA Special Publication, 35).

- Lee, J., Hopmans, J.W., Rolston, D.E., Baer, S.G. y Six J.** (2009). Determining soil carbon stock changes: simple bulk density corrections fail. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 134(3), 251-256.
- Li, C.F., Yue, L.X., Kou, Z.K., Zhang, Z.S., Wang, J.P. y Cao, C.G.** (2012). Short-term effects of conservation management practices on soil labile organic carbon fractions under a rape–rice rotation in central China. *Soil and Tillage Research*, 119, 31-37.
- Macedo, I., Castillo, J., Saldain, N.E., Martínez, S., Bordagorri, P., Hernández, J., Terra, J.A.** (2017). Cerrando un ciclo de las rotaciones arroceras: rendimiento del cultivo de arroz y cultivos alternativos. En Zorrilla, G., Martínez, S. y Saravia, H. (Eds.) *Arroz 2017*. (pp.63-65) Montevideo, INIA, (Serie Técnica, 233)
- Marriott, E.E. y Wander, M.M.** (2006). Total and labile soil organic matter in organic and conventional farming systems. *Soil Science Society of America Journal*, 70:950-959.
- Martins, A.P., Denardin, L.G.D.O., Borin, J.B.M., Carlos, F.S., Barros, T., Ozório, D.V.B. y Carvalho P.C.D.F.** (2017). Short-term impacts on soil-quality Assessment in Alternative land uses of traditional paddy fields in southern Brazil. *Land Degradation & Development*, 28(2), 534-542.
- Matson, P.A., Parton, W.J., Power, A.G. y Swift, M.J.** (1997). Agricultural intensification and ecosystem properties. *Science*, 277(5325), 504-509.
- McBratney, A., Field, D.J. y Koch, A.** (2014). The dimensions of soil security. *Geoderma*, 213:203–213.
- Morón, A., Sawchik, J.** (2002). Soil quality indicators in a long-term crop pasture rotation experiment in Uruguay. *17th World Congress of Soil Science, 14-21 Aug. 2002*. 1-11. Thailand.
- Moron, A.** (2005). Indicadores para el diagnóstico de la calidad de suelos en sistemas agrícolas. En: Marelli, H.J. (Ed.). *Indicadores de Calidad de Suelo*. Seminario Internacional. Marcos Juarez, Argentina.
- Olk, D.C., Cassman, K.G., Randall, E.W., Kinchesh, P., Sanger, L.J. y Anderson, J.M.** (1996). Changes in chemical properties of organic matter

- with intensified rice cropping in tropical lowland soil. *European Journal of Soil Science*, 47(3), 293-303.
- Parton, W.J., Schimel, D.S., Cole, C.V. y Ojima, D.S.** (1987). Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands. *Soil Science Society of America Journal* 51:1173-1179.
- Patterson, H.D.** (1964). Theory of cyclic rotation experiments. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 1-45.
- Paustian, K., Parton, W.J. y Persson, J.** (1992). Modeling soil organic matter in organic-amended and nitrogen-fertilized long-term plots. *Soil Science Society of America Journal*, 56(2), 476-488.
- Pittelkow, P., Zorrilla, G., Terra, J., Ricetto, 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.
- Reeves, D.W.** (1997). The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil and Tillage Research*, 43, 131–167.
- Sahrawat, K.L.** (2004). Organic matter accumulation in submerged soils. *Advances in Agronomy*, 81, 170-203.
- Salvo, L., Hernández, J. y Ernst, O.** (2010) Distribution of soil organic carbon in different size fractions, under pasture and crop rotations with conventional tillage and no-till systems. *Soil and Tillage Research*, 109(2), 116-122.
- Shao, J.A., Li, Y., Wei, C. y Xie, D.** (2009). Effects of land management practices on labile organic carbon fractions in rice cultivation. *Chinese Geographical Science*, 19(3), 241-248.
- Steel, R.G.D. y Torrie, J.H.** (1989). Comparaciones múltiples. En Steel, R.G.D. & Torrie, J.H. *Bioestadística: principios y procedimientos*. (pp. 166-186). Bogotá, McGraw-Hill.
- Studdert, G.A. y Echeverria, H.E.** (2000). Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. *Soil Science Society of America Journal*, 64(4), 1496-1503.

- Terra, J. A., García Préchac, F., Salvo, L., y Hernández, J.** (2006). Soil use intensity impacts on total and particulate soil organic matter in no-till crop-pasture rotations under direct grazing. *Advances in Geoecology*, 38, 233-241.
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J. y Befort, B.L.** (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(50), 20260-20264.
- Wander, M.M. y Drinkwater, L.E.** (2000). Fostering soil stewardship through soil quality assessment. *Applied Soil Ecology*, 15:61–73.
- Wander, M.** (2004). Soil organic matter fractions and their relevance to soil function. En Magdoff, F y Weil, R (Eds.). *Soil organic matter in sustainable agriculture*. Boca Raton, FL, CRC Press. 67-102.
- Waring, S.A. y Bremner, J.M.** (1964). Ammonium production in soil under waterlogged conditions as an index of nitrogen availability. *Nature*, 20, 951–952.
- Witt, C., Cassman, K.G., Olk, D.C., Biker, U., Liboon, S.P., Samson, M.I. y Ottow, J.C.G.** (2000) Crop rotation and residue management effects on carbon sequestration, nitrogen cycling, and productivity of irrigated rice systems. *Plant Soil*, 225:263–278.
- Wright, A.F. y Bailey, J.S.** (2001). Organic carbon, total carbon, and total nitrogen determinations in soils of variable calcium carbonate contents using a Leco CN-2000 dry combustion analyzer. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 32: 3243–3258.

3. ALTERNATIVAS DE INTENSIFICACIÓN A SISTEMAS DE ARROZ-PASTURAS: EFICIENCIA EN EL USO DE ENERGÍA

3.1 RESUMEN

Los agroecosistemas proveen alimentos, fibra y energía a la población. El consumo y la eficiencia en el uso de la energía es clave para lograr sistemas ambiental y económicamente sostenibles. Este trabajo explora alternativas de intensificación de la rotación arroz-pasturas evaluando la tasa de retorno de energía invertida (EROI), la energía producida (EP) e invertida (EI) de cuatro sistemas de producción. Los mismos fueron: arroz continuo (Az-Continuo, 1-año); arroz-soja (Az-Soja, 2-años); arroz-pasturas cortas (Az-PPcorta, 2-años) y arroz-pasturas largas (Az-PPlarga, 5-años); todas incluyen cultivos de cobertura en invierno. Se analizaron datos de dos ejercicios agrícolas de un experimento iniciado en 2012. Para el análisis se usó un enfoque sistémico, el inventario de ciclo de vida incluye desde la cuna hasta la portera, usando como unidad funcional: MJ ha⁻¹ de biomasa vegetal y/o animal cosechable. El Az-PPcorta y Az-Continuo disminuyeron la EROI en 8 y 6,5% respectivamente comparado con Az-PPlarga (6,1 MJ MJ⁻¹). El Az-Soja tuvo el mayor EROI (7,2 MJ MJ⁻¹). La EP en los sistemas que solo incluyen cultivos fue 79% mayor que aquellos que rotan arroz-pasturas (72 GJ ha⁻¹ año⁻¹). Sin embargo, los sistemas Az-PPlarga y Az-PPcorta presentaron una EI 40% menor que Az-Soja y Az-Continuo (20,6 GJ ha⁻¹ año⁻¹). La reducción de la fase de pasturas o el uso de monocultivo de arroz para intensificar la rotación arroz pasturas, redujo la eficiencia energética. Solo Az-Soja logró mejorar la eficiencia respecto a Az-PPlarga. La rotación Az-PPlarga logró el menor consumo de energía, lo cual la postula como las más sostenible.

Palabras clave: arroz, EROI, rotaciones, sustentabilidad, producción de alimentos

INTENSIFICATION ALTERNATIVES TO RICE-PASTURE SYSTEMS: ENERGY USE EFFICIENCY

3.2 SUMMARY

Agroecosystems provide food, fiber and energy to the population. Energy consumption and use efficiency is key for environmental and economical sustainable systems. This work evaluated four rice-pasture rotation intensification alternatives impacts on energy return on investment (EROI), energy output (EO) and energy input (EI). Rotations were: continuous rice (ContRc, 1 yr.); rice-soybean (Rc-Sy; 2 yrs); rice-pasture, with short (Rc-SPast; 2yrs) and long-term pastures (Rc-LPast; 5 yrs.); all included winter cover crops. We analyzed two years data from an experiment initiated in 2012. A systemic analysis approach, including all activities from the cradle to the gate and MJ ha⁻¹ of biomass and animal production as the functional unit, was used. A 6.5 and 8% EROI reduction was observed in ContRc and Rc-SPast respectively, compared with Rc-LPast (6.1 MJ MJ⁻¹). The highest EROI was observed in Rc-Sy (7.2 MJ MJ⁻¹). Energy output in rotations that include only crops was 79% higher compared with those that rotate with pastures (72 GJ ha⁻¹ yr⁻¹). However, rice-pasture rotations had 40% lower EI than the average of Rc-Sy and ContRc (20.6 GJ ha⁻¹ yr⁻¹). The intensification of the rotation including short pastures or rice monocropping reduced the EROI. Only Rc-Sy increased the EROI compared with Rc-LPast. The lowest energy consumption was observed in Rc-LPast suggesting this system was the most sustainable.

Keywords: rice, EROI, rotations, sustainability, food production

3.3 INTRODUCCIÓN

Los agroecosistemas son los encargados de proveer alimentos, fibra y energía a la población (Hoang y Alauddin, 2011). Se prevé que para 2050 la demanda global de alimentos aumente debido a un incremento en la población mundial y un mayor ingreso per cápita (Godfray et al., 2010; Tilman et al., 2011). Para cubrir esta demanda, se estima que el 90% del incremento en la producción agrícola mundial se deba a

aumentos de rendimiento e intensificación de cultivos (FAO, 2009). Debido a esta intensificación y a la mayor productividad se espera que el consumo de energía en los sistemas de producción se incremente (Maraseni et al., 2015).

La energía consumida es un componente importante en los sistemas de producción y ha aumentado a lo largo de los años en muchas regiones del mundo (Conforti y Giampietro, 1997; Woods et al., 2010). El uso de la energía en los sistemas de producción puede ser muy diferente, dependiendo de las características de los sistemas, desde menos de 1 GJ ha⁻¹ en grandes extensiones de África, hasta más de 30 GJ ha⁻¹ en sistemas de alta utilización de insumos como en Estados Unidos (Pimentel, 2009). Las vías para mejorar la eficiencia en el uso de la energía pueden ser dos, disminuir el uso de energía como fertilizantes, pesticidas, combustible o aumentar la energía producida mediante el rendimiento de cultivos (Swanton et al., 1996).

Muchos de estos trabajos con foco en balances de energía se han basado en el análisis de un solo cultivo (Franzluebbbers y Francis, 1995; Pittelkow et al., 2016), otros han incorporado al análisis los efectos de las prácticas de manejo y/o la rotación de cultivos (Rathke et al., 2007) y algunos han considerado el estudio de sistemas de producción o la rotación como un todo (Theisen et al., 2017).

Las rotaciones son diseñadas para diversificar ingresos, minimizar riesgos, mantener la fertilidad del suelo, interrumpir con el ciclo de malezas (Liebman y Janke, 1990), plagas y enfermedades (Bird et al., 1990). Además, la inclusión de leguminosas en la rotación reduce la necesidad de nitrógeno y la dependencia de la energía incluida en fertilizantes comerciales (Heichel y Barnes, 1984).

Los sistemas integrados de cultivos y pasturas son inusuales en el mundo, excepto en algunas partes de Argentina (Díaz-Zorita, Duarte y Grove, 2002), Brasil (Vilrla et al., 2003; Carvalho et al., 2018) y Uruguay (García Préchac et al., 2004), donde históricamente predominaron y actualmente persisten en menor proporción a pesar de los procesos de intensificación agrícola de la región. El cultivo de arroz en Uruguay rota en buena proporción con pasturas perennes de gramíneas y leguminosas, una alternativa ventajosa si se compara con otros sistemas de arroz utilizados en el mundo (Deambrosi, 2003; Pittelkow et al., 2016).

La hipótesis de este trabajo fue que, existen alternativas de intensificación de la rotación arroz-pasturas que permiten mejorar y/o mantener la eficiencia en el uso de energía, tanto en el sistema productivo como en el cultivo de arroz que lo integra. El objetivo fue cuantificar los cambios en la sostenibilidad evaluando la eficiencia en el uso de energía, la energía producida y la energía invertida en cuatro sistemas de producción que incluyen al cultivo de arroz en rotación con pasturas de distinta duración, en rotación con soja y bajo monocultivo de arroz.

3.4 MATERIALES Y MÉTODOS

3.4.1 Descripción del sitio y el experimento

El experimento fue conducido en el Departamento de Treinta y Tres, Uruguay, (33° 16' 23" S; 54° 10' 24" O; 22 m s. n. m. La precipitación promedio anual es de 1360 ± 315 mm, con una gran variación tanto dentro como entre años y la evapotranspiración potencial total anual es de 1138 ± 177 mm. La temperatura media mensual promedio es de $22,3 \pm 0,85$ °C durante el verano y $11,5 \pm 0,82$ °C para el invierno, para una serie de datos que va desde 1971 hasta 2016 (INIA-Unidad GRAS, 2017). El suelo predominante en el sitio es un Argialboll (Soil Taxonomy) con pendientes menores a 0,5 % (Durán et al., 2006).

El experimento estudiado tiene un diseño en bloques completos al azar con tres repeticiones, que contrasta seis rotaciones, cuyas fases se encuentran sincronizadas (Patterson, 1964). Esta plataforma de largo plazo fue iniciada en 2012, cuyos datos poseen un registro centralizado en INIA Treinta y Tres. Las parcelas experimentales tienen 60 m de largo por 20 m de ancho y se manejan con maquinaria comercial para realizar las labores (aplicaciones de pesticidas, siembra, fertilizaciones, cosecha). Las pasturas permanentes de estas rotaciones se pastorearon con ovinos en forma rotativa.

A los efectos de este trabajo, se analizaron cuatro rotaciones. Los tratamientos incluidos (Tabla 1) fueron: arroz continuo con *Trifolium alexandrinum* (TA) durante el invierno (Az-Continuo, 1 año); arroz-soja con *Lolium multiflorum* (LM) después del arroz y TA después de soja (Az-Soja, 2 años); arroz, seguido de una pastura de un año

y medio compuesta por LM y *Trifolium pratense* (Az-PPcorta, 2 años); arroz1-arroz2 seguido de una pastura de tres años y medio compuesta por *Festuca arundinacea*, *Lotus corniculatus* y *Trifolium repens* y entre los dos cultivos de arroz se sembró LM (Az-PPlarga, 5 años).

Tabla 1. Sistemas de rotación contrastados y largo de la rotación (años).

Rotación	Duración de la rotación (años)									
	1		2		3		4		5	
	PV	OI	PV	OI	PV	OI	PV	OI	PV	OI
Az-Continuo	Arroz	- TA								
Az-Soja	Arroz	- LM	- Soja	- TA						
Az-PPcorta	Arroz	- PP	- PP	- PP						
Az-PPlarga	Arroz	- LM	- Arroz	- PP						

Az=Arroz, TA= Trébol alejandrino, LM= Raigrás, PV=primavera-verano, OI=otoño-invierno.

3.4.2 Manejo de las rotaciones y recolección de la información

Este trabajo utilizó la información correspondiente a dos ejercicios agrícolas 2015-2016 y 2016-2017. El inventario de ciclo de vida consideró las tareas realizadas, tales como: siembra, fertilización, aplicación de pesticidas, cosecha e insumos utilizados. El cultivo de arroz fue sembrado en el mes de octubre, mientras que el de soja durante el mes de noviembre. Las pasturas, al igual que el trébol alejandrino y el raigrás fueron sembradas en cobertura luego de la cosecha del cultivo de arroz y soja durante el mes de abril.

El agregado de fósforo (P) y potasio (K) a través de la fertilización para Az-Continuo y Az-Soja fue realizado según la extracción del cultivo anterior, mientras que los cultivos de arroz en rotación con pasturas fueron fertilizados según nivel de suficiencia, utilizando un nivel crítico para P de 7 ppm según Bray I (Hernández et al., 2013) y para K de 0,20 cmol kg⁻¹ por acetato de amonio pH 7 (Deambrosi, Méndez y Castillo, 2015). Las pasturas se fertilizaron a la siembra, y la rotación Az-PPlarga fue refertilizada con fosforo (34,5 kg ha⁻¹ de P₂O₅) al cumplir su segundo y tercer año. Las coberturas de TA y LM no fueron fertilizadas. La fertilización con nitrógeno (N) en el sistema de Az-Continuo se realizó según la necesidad de este nutriente para un

rendimiento de 10 t ha⁻¹. Para el resto de los cultivos de arroz de las otras rotaciones la fertilización nitrogenada se realizó según nivel de suficiencia (Castillo, Terra y Méndez, 2015). En todos los casos el nitrógeno fue fraccionado en dos etapas: macollaje (aplicación en seco) e inicio de desarrollo de la panícula (aplicación con el cultivo ya inundado), utilizando urea en ambos casos. En la tabla 2 se muestra las unidades de N, P₂O₅ y K₂O utilizadas para cada componente de las rotaciones.

Tabla 2. Fertilización (N, P y K) utilizada en cada fase de rotación.

Rotación	Fase	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
		Kg ha ⁻¹		
Az-Continuo	Arroz	166	75	51
Az-Soja	Arroz	79	61	63
	Soja	5	91	45
Az-PPcorta	Arroz	99	15	72
	Pastura	23	45	22
Az-PPlarga	Arroz 1	79	15	31
	Arroz 2	83	15	44
	Pastura	23	137	23

El riego se realizó mediante bombeo (bomba a gasoil de 150 caballos de fuerza) con un caudal de 220 L s⁻¹ y un consumo de gasoil de 14 L h⁻¹. Se asumió que el consumo de agua para el cultivo de arroz en este experimento fue de 10000 m³ ha⁻¹ (Roel, 1999). Por lo cual el consumo de gasoil por riego fue de 176,76 L ha⁻¹.

Las pasturas permanentes correspondientes a Az-PPcorta y Az-PPlarga fueron pastoreadas con ovinos, pero la producción de carne no pudo ser cuantificada debido a que los periodos de pastoreo fueron de 7-10 días en cada parcela. Por este motivo, ésta fue estimada en función de la producción de forraje de las pasturas para carne vacuna, asumiendo utilidades variables (40-70%) en función de la edad y la estación de crecimiento de la pastura para Az-PPlarga y 60% de utilización para Az-PPcorta (Rovira, Velazco y Bonilla, 2009). Para la pastura de Az-PPcorta se utilizó un coeficiente de 14 kg de MS para producir un kg de carne, mientras que para Az-PPlarga este varió entre 12 y 14 kg MS kg⁻¹ de carne (NRC, 2000). Las cargas iniciales fueron

de 320 kg de peso vivo (PV) (dos terneros de 160 kg c/u). Para Az-PPcorta los animales salieron al cabo de 1,5 años con 290 kg de PV c/u. En el caso de Az-PPlarga, salieron luego de 2,5 años con 537 kg de PV c/u e ingresaron dos animales más de 160 kg de PV, que al cabo de 1 año salieron con 293 kg de PV.

3.4.3 Perfiles energéticos

El análisis energético realizado comparó la energía invertida (EI), la energía producida (EP) y la tasa de retorno de energía invertida (EROI: EP/EI), para cuatro sistemas de rotaciones, para las fases que componen cada rotación y para el cultivo de arroz en cada una.

La metodología de estudio utilizada fue un enfoque sistémico de análisis de ciclo de vida, generando un inventario de ciclo de vida de todos los insumos utilizados y todas las tareas realizadas. Los límites del estudio fueron “desde la cuna hasta la portera”. No se consideró la energía involucrada en el transporte de los insumos, de los productos, en la mano de obra, la radiación solar ni la de la fijación biológica del nitrógeno.

La determinación de la EI de los insumos utilizados se realizó a partir de la dosis de los mismos y un factor de conversión energético obtenido de la bibliografía (Tabla 3). Para cuantificar la EI de las operaciones realizadas, se consultó la Cámara Uruguaya de Servicios Agropecuarios (CUSA, 2017) y también a empresas de referencia que realizan algunas de estas operaciones (ej: aplicaciones aéreas). Para identificar como se distribuía la EI se usaron siete categorías: riego, combustible, maquinaria, fertilización P y K, fertilización N, pesticidas (herbicidas, insecticidas y fungicidas) y otros como, semilla, mangas de riego, animales.

Tabla 3. Coeficientes energéticos de los insumos utilizados.

Insumo	Coeficiente energético	Referencia
Semillas (MJ kg ⁻¹)		
Arroz	17,60	Medido por el autor
Soja	23,50	Medido por el autor
Leguminosa forrajera	17,20	Muhammad et al. (2014)
Gramínea forrajera	36,10	Fuksa, Halk y Brant, (2013)
Fertilizante (MJ kg ⁻¹)		
Nitrógeno	51,47	Hill et al. (2006)
Fosforo	9,17	Hill et al. (2006)
Potasio	5,96	Hill et al. (2006)
Combustible (MJ lt ⁻¹)		
Gasoil	43,99	Nagy, (1999)
Nafta de avión	34,78	(Characteristic of petroleum stored and dispensed) (2017)
Pesticidas (MJ kg ⁻¹) i.a.		
Glifosato	454	Audsley et al. (2009)
2-4D amina	87	Audsley et al. (2009)
Fluroxipyr metil	518	Audsley et al. (2009)
Herbicidas	303,80	Pimentel y Pimentel (2007)
Insecticidas	418,40	Pimentel y Pimentel (2007)
Fungicidas	115	Pishgar-Komleh, Sefeedpari y Rafiee, (2011)

La EP o salidas de los sistemas evaluados fueron el rendimiento en grano de arroz cáscara, grano de soja y en el caso de los sistemas que incluyen pasturas, se hizo el análisis tomando en cuenta la producción de forraje y la producción de carne estimada a partir de la MS producida por las pasturas, todos expresados en MJ ha⁻¹. Para la carne y el forraje se utilizaron valores de la bibliografía del poder calorífico, siendo 19,6 MJ kg⁻¹ para el forraje (Portugal-Pereira et al., 2015) y 9,3 MJ kg⁻¹ para la carne (Restle et al., 2001). El poder calorífico del grano de arroz cascara y del grano de soja fue medido con una bomba calorimétrica según: PEC.FORES.007 basado en la norma ASTM D 4442-07 – “Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-Base Materials, Method “A” y se obtuvieron valores de 17,6 y 23,5 MJ kg⁻¹ para arroz y soja respectivamente. Debido a que la duración de cada rotación fue diferente entre los sistemas evaluados, tanto la EI como la EP fueron expresados en MJ ha⁻¹ año⁻¹.

3.5 RESULTADOS

3.5.1 Producción de arroz, soja, forraje y carne

La productividad media del cultivo de arroz fue 10.147 kg ha⁻¹. El mayor rendimiento de arroz se obtuvo en rotación con soja, que fue 7,9% superior al obtenido en el monocultivo de arroz, que fue el menor. La producción de forraje en Az-PPlarga fue un 49% superior a la de Az-PPcorta, lo que se tradujo en una mayor producción estimada de carne (Tabla 4).

Tabla 4. Rendimiento y desvío estándar en grano de arroz cascara y soja (13% H), producción de forraje y producción de carne según rotación.

Rotación*	Arroz	Soja	Forraje	Carne
	kg ha ⁻¹		kg ha ⁻¹ año ⁻¹	
Az-PPlarga	10103 ± 943		6636 ± 678	294 ± 30
Az-PPcorta	10276 ± 792		5159 ± 1169	221 ± 50
Az-Soja	10512 ± 534	2868 ± 797		
Az-Continuo	9741 ± 572			

*Arroz en rotación con: pasturas de larga duración (Az-PPlarga), de corta duración (Az-PPcorta), con soja (Az-Soja) y bajo monocultivo de arroz (Az-Continuo).

3.5.2 Balance energético a nivel de rotación

El único sistema que mejoró la EROI respecto a Az-PPlarga fue Az-Soja, que fue 11% superior. Sin embargo, La EROI de Az-PPlarga y Az-PPcorta fue 74 y 36% mayor respectivamente, cuando no se consideró la producción animal (Figura 1).

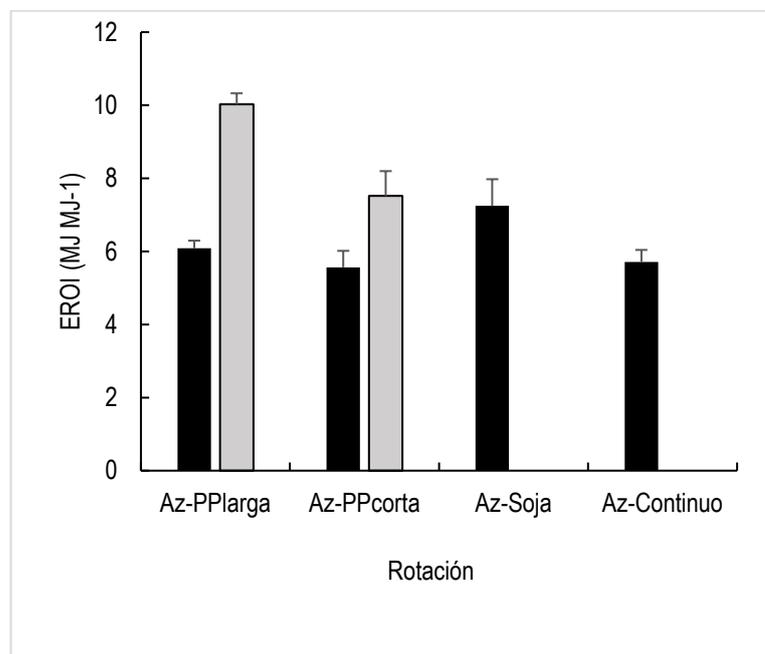


Figura 1. Tasa de retorno de energía invertida (EROI) según rotación. Para las rotaciones Az-PPlarga y Az-PPcorta considerando la participación de la producción animal (barras negras) y su exclusión del cálculo (barras grises). Las barras de dispersión corresponden al desvío estándar.

Las rotaciones de arroz con pasturas presentaron 44% menos EP respecto a las agrícolas puras; Az-Continuo tuvo 231% más EP que Az-PPlarga. Sin embargo, cuando no se incluye la producción animal, la EP de estos sistemas aumenta y logran valores similares a la rotación Az-Soja. Por otro lado, el arroz continuo fue el que presentó mayor EI que fue 246% superior que Az-PPlarga (Tabla 5).

Tabla 5. Energía producida, energía invertida y desvío estándar según rotación.

Rotación*1	Energía Producida		Energía Producida Sin Animales*2		Energía invertida
	MJ ha ⁻¹ año ⁻¹				
Az-PPlarga	64.540	± 2.309	106.361	± 2.901	10.607
Az-PPcorta	80.697	± 6.117	109.010	± 10.135	14.500
Az-Soja	109.803	± 11.279			15.153
Az-Continuo	149.158	± 8.765			26.117

*1Arroz en rotación con: pasturas de larga duración (Az-PPlarga), de corta duración (Az-PPcorta), con soja (Az-Soja) y bajo monocultivo de arroz (Az-Continuo). *2Energía producida sin tomar en cuenta la producción de carne del sistema.

Tres componentes explicaron aproximadamente 60% de la EI en todos los sistemas: el riego, el uso de combustible y la fertilización nitrogenada (Figura 2). En el sistema Az-Soja cobró mayor importancia la EI en pesticidas (17%) y la fertilización fosfatada y potásica (7%) en comparación a los otros sistemas que variaron entre 6-10% y alrededor del 4%, respectivamente. La EI en la fertilización nitrogenada para la rotación Az-Continuo fue 33%, mientras que en los otros sistemas varió entre 14-22%.

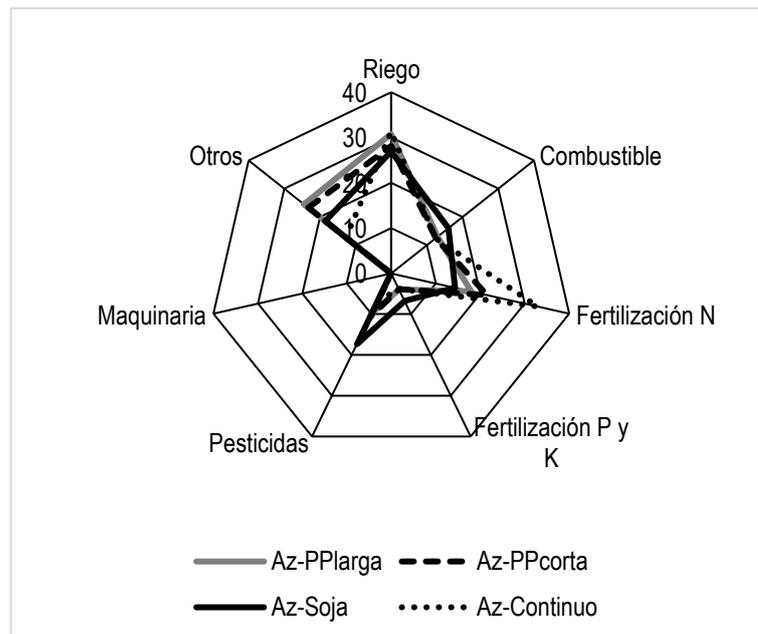


Figura 2. Distribución porcentual de la energía invertida en cuatro sistemas de producción de arroz. Arroz en rotación con: pasturas de larga duración (Az-PPlarga), de corta duración (Az-PPcorta), con soja (Az-Soja) y bajo monocultivo de arroz (Az-Continuo).

3.5.3 Balance energético en las fases de las rotaciones

De las fases que componen a las diferentes rotaciones, los cultivos de arroz registraron valores de EROI aproximados de 7 MJ MJ^{-1} , a excepción de Az-Continuo que registró un valor de $5,7 \text{ MJ MJ}^{-1}$. El cultivo de soja tuvo un EROI de $7,3 \text{ MJ MJ}^{-1}$. La EROI de las fases con pastura cuando fue tomada en cuenta la producción animal, fueron las más bajas entre todas las fases, en cambio, cuando no se tomó en cuenta la producción animal y se contabilizó solo la producción de forraje, los valores obtenidos fueron los mayores (Figura 3).

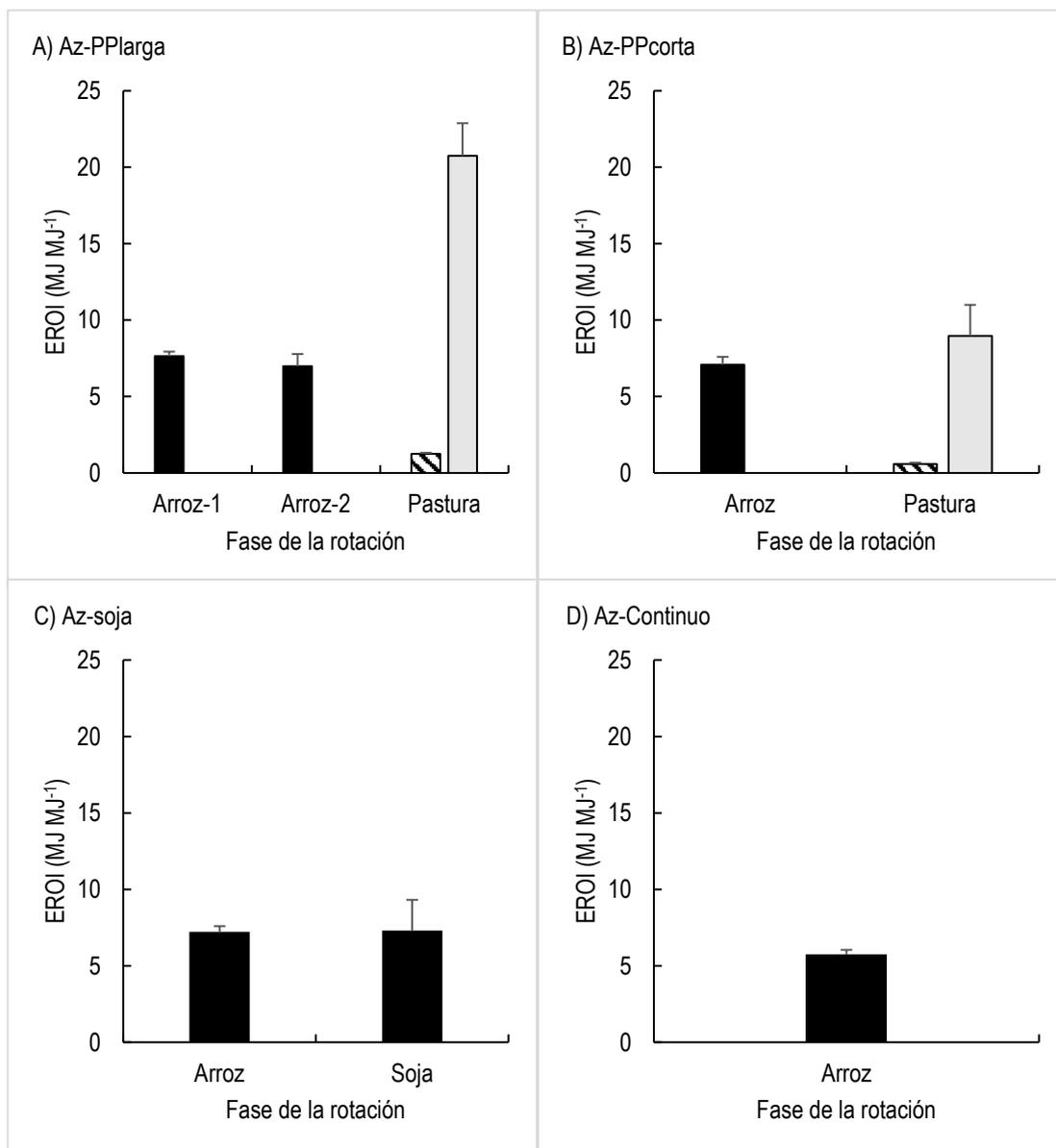


Figura 3. Tasa de retorno de energía invertida (EROI) según fase de rotación. Para la fase de pasturas de las rotaciones Az-PPlarga (A) y Az-PPcorta (B) considerando la participación de la producción animal (barras textura blancas y negras) y su exclusión del cálculo (barras grises). Las barras de dispersión corresponden al desvío estándar.

La EP por el cultivo de soja fue de 63% menor que el promedio de las fases con cultivos de arroz ($155.374 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). Cuando no se tomó en cuenta la producción animal en las fases de pasturas, el cálculo de la EP aumentó 15 y 17 veces para Az-PPcorta y Az-PPlarga respectivamente. Las fases correspondientes al cultivo de soja como a pasturas tuvieron una EI 64 y 77 % menor que la correspondiente al cultivo de arroz (Tabla 6).

Tabla 6. Energía producida, energía invertida y desvío estándar según fase de rotación.

Rotación*1	Fase de la rotación	Energía Producida		Energía Producida Sin Animales*2		Energía invertida
				MJ ha ⁻¹ año ⁻¹		
Az-PPlarga	Arroz-1	161.809	± 6.986			21.183
	Arroz-2	147.583	± 16.981			21.134
	Pastura	4.435	± 279	74.137	± 7.577	3.573
Az-PPcorta	Arroz	157.353	± 12.120			22.230
	Pastura	4.040	± 466	60.666	± 13.752	6.771
Az-Soja	Arroz	160.967	± 8.179			22.276
	Soja	58.640	± 16.295			8.031
Az-Continuo	Arroz	149.158	± 8.765			26.117

*1Arroz en rotación con: pasturas de larga duración (Az-PPlarga), de corta duración (Az-PPcorta), con soja (Az-Soja) y bajo monocultivo de arroz (Az-Continuo). *2Energía producida sin tomar en cuenta la producción de carne del sistema.

El riego, el combustible y la fertilización nitrogenada explicaron aproximadamente el 70% de la EI de las fases con arroz (Figura 4). Tanto las pasturas como el cultivo de soja tuvieron una baja demanda de EI relacionada a la fertilización nitrogenada, en cambio, la EI en fertilización fosfatada y potásica estuvo entre 8 y 14%, mientras que para las fases con arroz este componente estuvo entre 2 y 4%. La EI en pesticidas en la fase de soja fue del 38%, mientras que para el resto de las fases varió entre 7 y 14%. En las fases de pasturas cobró mayor relevancia el componente otros, que tuvo valores de 63% para Az-PPlarga y de 55% para Az-PPcorta. La EI en la depreciación de la maquinaria fue irrelevante y no superó el 1% en ninguna de las fases evaluadas.

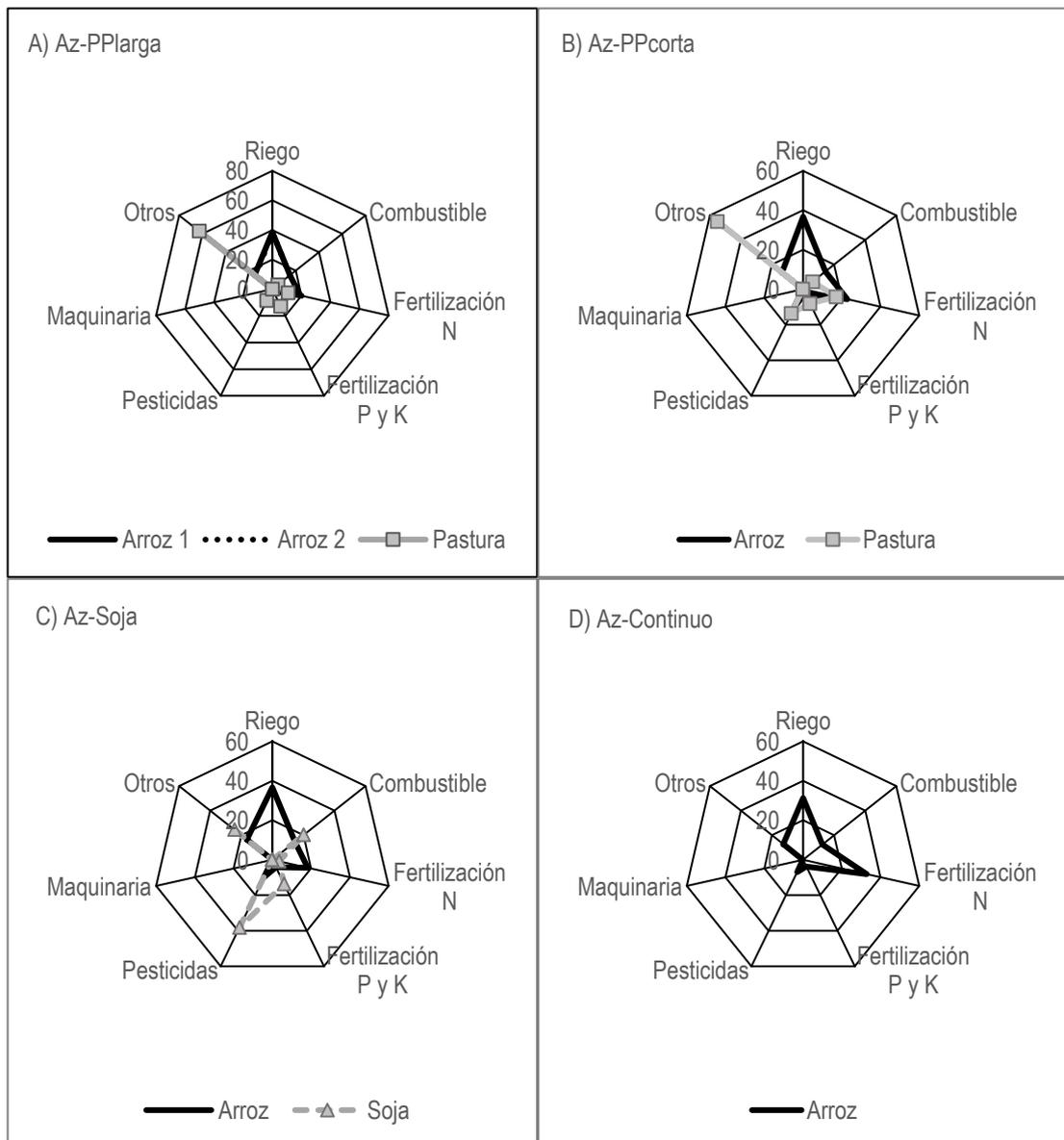


Figura 4. Distribución porcentual de la energía invertida según fase de rotación. A y B corresponden a las rotaciones de arroz con pastura, C a la rotación de arroz con soja y D a el monocultivo de arroz.

3.5.4 Balance energético del cultivo de arroz bajo distintos sistemas de rotación

Las mayores EROI se lograron en el primer arroz (sembrado sobre pasturas) de la rotación Az-PPlarga y en el cultivo de arroz en rotación con soja. Arroz en rotación con pasturas de corta duración, así como el segundo arroz (sembrado sobre rastrojo de arroz) de Az-PPlarga, obtuvieron valores similares de EROI (7,1 y 7 MJ MJ⁻¹

respectivamente). Por último, el valor de EROI estimado en el monocultivo de arroz fue 21% menor respecto al promedio de los cultivos de arroz en rotación (Figura 5).

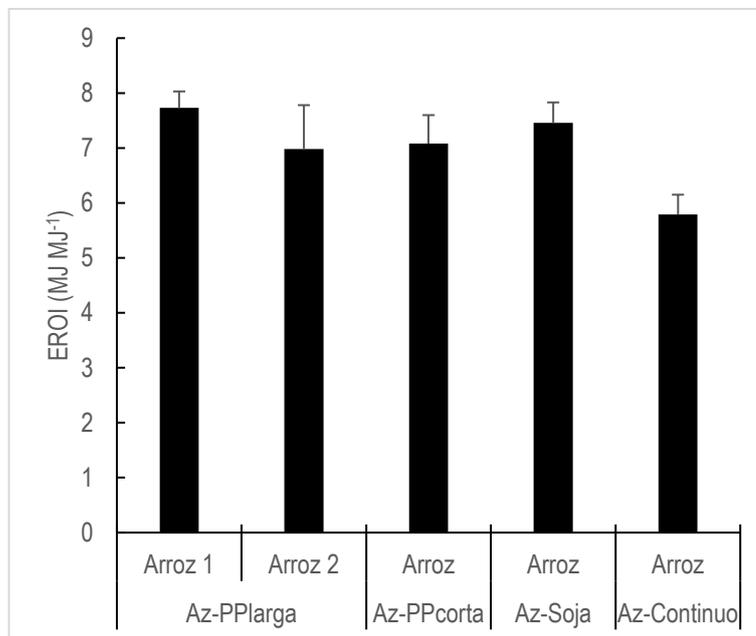


Figura 5. Tasa de retorno de energía invertida (EROI) según cultivo de arroz en rotación con pasturas de larga duración (Az-PPlarga), de corta duración (Az-PPcorta), en rotación con soja (Az-Soja) y bajo monocultivo de arroz (Az-Continuo). Las barras de dispersión corresponden al desvío estándar.

No existieron grandes variaciones en la EP para los cultivos de arroz entre diferentes rotaciones. En promedio este valor fue de 155.374 MJ ha⁻¹, el máximo valor fue encontrado en el Arroz 1 de Az.PPlarga que fue 9,6% mayor que el Arroz 2 de la misma rotación (Tabla 7). El cultivo de arroz de menor EI fue el Arroz 1 correspondiente a Az-PPlarga. El Arroz 2, arroz en rotación con pasturas de corta duración y en rotación con soja incrementaron en 1, 6 y 3% respectivamente la EI comparado con Arroz 1. El cultivo de arroz correspondiente a Az-Continuo fue el que registró mayor EI que fue 23% mayor respecto a Arroz 1.

Tabla 7. Energía producida, energía invertida y desvío estándar según cultivo de arroz en rotación.

Rotación*1	Fase	Energía producida			Energía invertida
		MJ ha ⁻¹			
Az-PPlarga	Arroz 1	161.809	±	6.986	20.920
	Arroz 2	147.583	±	16.981	21.134
Az-PPcorta	Arroz	157.353	±	12.120	22.230
Az-Soja	Arroz	160.967	±	8.179	21.580
Az-Continuo	Arroz	149.158	±	8.765	25.762

*1 Arroz en rotación con pasturas de larga duración (Az-PPlarga), de corta duración (Az-PPcorta), en rotación con soja (Az-Soja) y bajo monocultivo de arroz (Az-Continuo).

El consumo de energía por el riego, el combustible y la fertilización nitrogenada explicaron aproximadamente el 70% de la EI en el cultivo de arroz en todas las rotaciones. La EI en la fertilización nitrogenada fue mayor en el monocultivo de arroz respecto a los otros cultivos de arroz en rotación, representando el 33% de la EI. Mientras tanto, la EI en la fertilización fosfatada y potásica fue 4% en los cultivos de arroz correspondientes a Az-Soja y Az-Continuo, mientras que para los cultivos de arroz en rotación con pasturas este valor fue del 2%.

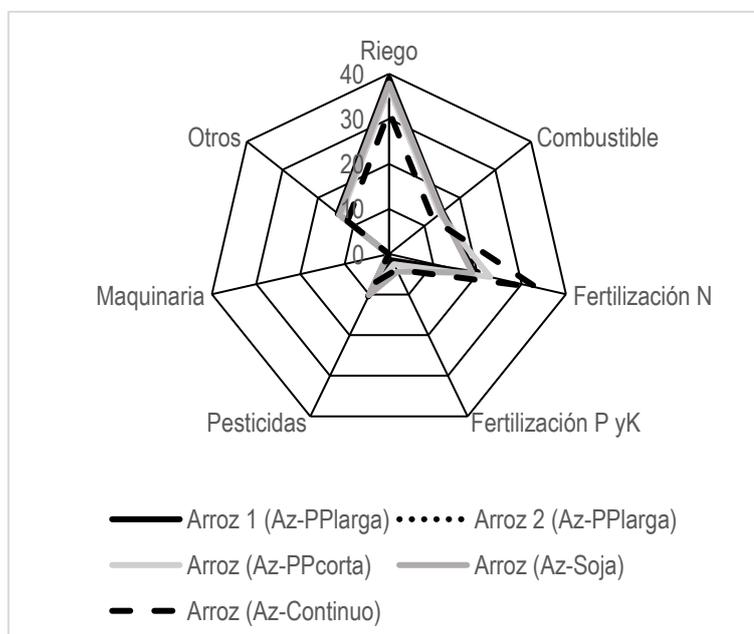


Figura 6. Distribución porcentual de la energía invertida según cultivo de arroz en rotación.

3.6 DISCUSIÓN

Cuando no se consideró la producción animal, la intensificación de la rotación arroz-pasturas de larga duración, acortando la duración de las pasturas o sustituyéndolas por otros cultivos, disminuyó la eficiencia energética del sistema. Estos resultados coinciden con algunos trabajos donde mostraron que sistemas menos intensos son más eficientes en el uso de la energía (Hülsbergen et al., 2001; Rathke et al., 2007). Similar a lo reportado por Borin, Menini y Sartori, (1997) y Küsters y Lammel (1999). En nuestro trabajo, el incremento de la EI elevó la EP. Este incremento no fue lineal y la eficiencia energética se redujo al intensificar la rotación. El monocultivo de arroz tuvo la mayor EP; sin embargo, la eficiencia lograda fue menor a los sistemas bajo rotación con pasturas o con soja. Resultados similares fueron encontrados por Franzluebbbers y Francis (1995) con sorgo y maíz y por Rathke et al. (2007), con soja y maíz bajo monocultivo o en rotación. La fertilización nitrogenada representa entre un 16-35% del total de la EI (Pimentel y Burgess, 1980), en nuestro trabajo fue uno de los componentes de mayor relevancia dentro de la EI. Esto varió según las rotaciones, fluctuando entre 14% en Az-Soja y 33% en Az-Continuo. El incremento de la EI vinculada al consumo del fertilizante nitrogenado fue superior al incremento de la EP en sistemas más intensos. Franzluebbbers y Francis (1995) obtuvieron resultados similares donde la eficiencia energética se redujo a con la aplicación de nitrógeno. En sentido contrario, Theisen et al. (2017) reportan mejoras en la eficiencia energética al intensificar la rotación con la inclusión de soja o pasturas, partiendo de un sistema donde realizan tres años seguidos de arroz y tres años de barbecho, donde a veces entran animales. Nuestro trabajo logra resultados similares cuando se toma en cuenta la producción animal, donde el único sistema que mejoró la eficiencia energética fue Az-Soja. La EI reportada por Theisen et al. (2017) fue superior a la registrada en nuestro trabajo, posiblemente debido a la fertilización nitrogenada utilizada. Por otro lado, la EP mencionada por Theisen et al. (2017) fue menor, probablemente por los rendimientos logrados en el cultivo de arroz, que fueron 26% menores que los obtenidos en nuestro estudio ($10.147 \text{ kg ha}^{-1}$).

Otro componente importante dentro de la EI fue la energía destinada al bombeo de agua para riego del cultivo de arroz. Las fases correspondientes a cultivos de arroz

tuvieron 264% más EI que las fases con pasturas o soja las cuales no fueron regadas. Franzluebbbers y Francis (1995), informan que sistemas de maíz y sorgo manejados bajo riego tuvieron entre 200-300% más costo energético que los mismos sistemas bajo condiciones de secano. Sin embargo, Franzluebbbers y Francis (1995) reportan mejores eficiencias energéticas en condiciones de secano, y en nuestro estudio, si bien estamos comparando diferentes cultivos/fases, los cultivos de arroz lograron similares eficiencias que el cultivo de soja bajo secano (7,3 MJ MJ⁻¹). La EI en pesticidas en el cultivo de soja (38%) fue mayor que en las otras fases estudiadas. Swanton et al. (1996) y Rathke et al. (2007), mencionan para este cultivo porcentajes de EI en pesticidas en rangos de 17-20% y 7-31%. Respecto a la producción de carne en las fases con pasturas, la EI fue de 7,5 y 15,8 MJ kg⁻¹ de PV para Az-PPlarga y Az-PPcorta respectivamente, resultados similares fueron reportados por Modernel, Astigarraga y Picasso, (2013) para pasturas sembradas. El largo de la fase con pastura correspondiente a Az-PPlarga, permitió que algunos componentes de la EI (combustible, fertilización nitrogenada y pesticidas), costos en común a ambas pasturas para implantarlas, fuesen menores en comparación a la pastura de Az-PPcorta. La eficiencia energética promedio del cultivo de arroz obtenida en nuestro trabajo fue de 7 MJ MJ⁻¹ aproximadamente. En un estudio realizado para el mismo cultivo utilizando información proveniente de productores en Uruguay para una serie de 20 años de información, reportaron resultados similares (6,88 MJ MJ⁻¹, EI= 17 GJ ha⁻¹ y energía neta= 100 GJ ha⁻¹) para el final del periodo (2009-2013) (Pittelkow et al., 2016). Otro trabajo realizado en Vietnam menciona eficiencias similares, pero con la diferencia que toma como EP a la energía contenida en los rastrojos además del grano (Truong et al., 2017). La EP en grano estuvo entre 74.526-82.964 MJ ha⁻¹ (Truong et al., 2017), mientras que en nuestro estudio fue de 155.368 MJ ha⁻¹ en promedio, estas diferencias se deben a que los rendimientos del cultivo de arroz en nuestro trabajo promediaron las 10 t ha⁻¹, casi el doble que el que mencionan Truong et al. (2017) (5-5,6 t ha⁻¹). La EI para el cultivo de arroz en rotación con pasturas o soja fue menor a la del arroz en monocultivo con valores similares a los reportadas por Pittelkow et al. (2016) de 17-20 GJ ha⁻¹. En cambio, en China central (Yuan y Peng, 2017) y Vietnam (Truong et al., 2017), donde existe una alta frecuencia del cultivo de arroz, los valores

de EI reportados fueron de 25-34 GJ ha⁻¹ (China) y 25-32 GJ ha⁻¹ (Vietnam), similares a los obtenidos en este trabajo en el sistema de Az-Continuo (25,7 GJ ha⁻¹). Esto estaría indicando una mayor dependencia de insumos en sistemas de alta intensidad, explicado fundamentalmente por la mayor fertilización nitrogenada, 5,9-11,9 GJ ha⁻¹ (Yuan y Peng, 2017), 8,7-11,9 GJ ha⁻¹ (Truong et al., 2017) similares a los encontrados en este trabajo. En nuestro trabajo la EI en la fertilización nitrogenada del arroz en monocultivo (8,6 GJ ha⁻¹) fue 95% superior a la EI en el cultivo de arroz rotando con pasturas o soja. Del total de la EI, la destinada al bombeo de agua para riego fue aproximadamente del 40%. A diferencia de nuestros resultados, Pittelkow et al. (2016), mencionan valores de entre 15-20% para el final del periodo, estas diferencias quizá estén explicadas a que en la mayoría de las situaciones utilizaban bombeo eléctrico en vez de bombeo a gasoil.

3.7 CONCLUSIONES

La mayor producción de energía de los sistemas más intensos que utilizaron mayores niveles de energía en insumos debe ser balanceada en el largo plazo en un escenario donde el recurso energía no renovable es finito.

Se identificaron alternativas de intensificación que mejoraron la eficiencia en el uso de la energía respecto a la rotación arroz-pasturas largas. La rotación de arroz con soja mejoró la tasa de retorno de energía invertida en comparación a la rotación de arroz con pasturas largas.

De todas maneras, la rotación arroz-pasturas fue la que consumió menos energía, lo que lo hace más sostenible en términos energéticos. Por otro lado, los cultivos de arroz que rotaron tanto con soja como con pasturas requirieron menos inversión de energía y lograron mejor eficiencia del uso de la energía que el monocultivo de arroz.

3.8 AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer al Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) y a la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) por financiar este trabajo a través de una beca de posgrados nacionales (POS_NAC_2015_1_109776).

3.9 BIBLIOGRAFÍA

- Audsley, E., Stacey, K. F., Parsons, D. J. y Williams, A. G. (2009).** *Estimation of the greenhouse gas emissions from agricultural pesticide manufacture and use.* Peterborough, Crop Protection Association. 14.
- Bird G.W., Edens, T., Drummond, F. y Groden, E. (1990).** Design of pest management systems for sustainable agriculture. En Francis, C.A, Flora, C.B. y King, L.D. (Eds.). *Sustainable agriculture in temperate zones.* (pp. 55-110). New York, Wiley.
- Borin, M., Menini, C. y Sartori, L. (1997).** Effects of tillage systems on energy and carbon balance in north-eastern Italy. *Soil and Tillage Research*, 40(3-4), 209-226.
- Carvalho, P. C. D. F., Barro, R. S., Barth Neto, A., Nunes, P. A. D. A., Moraes, A. D., Anghinoni, I., ... y Santos, D. T. D. (2018).** Integrating the pastoral component in agricultural systems. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 47. <http://dx.doi.org/10.1590/rbz4720170001>
- Castillo, J., Terra, J., y Méndez, R. (2015).** Indicadores objetivos para la recomendación de fertilización N en arroz. En: *XII Conferência Internacional de Arroz para América Latina e Caribe.* (12º, 2015, Porto Alegre). Resúmen. Porto Alegre, RS, Brasil. 125.
- Characteristic of petroleum stored and dispensed. Petroleum Products Division – GN. (2017).** pp. 122-132. Recuperado de <https://web.archive.org/web/20170116182103/http://ftp.nirb.ca/01-SCREENINGS/COMPLETED%20SCREENINGS/2016/16XN003-GN-CGS-Tank%20Farm%20Expansion/01-APPLICATION/160204-16XN003-Petroleum%20Products%20Stored%20and%20Dispensed-IA2E.pdf>
- Conforti, P. y Giampietro, M. (1997).** Fossil energy use in agriculture: an international comparison. *Agriculture, ecosystems & environment*, 65(3), 231-243.
- CUSA (Cámara Uruguaya de Servicios Agropecuarios).** 2017. Recuperado de http://www.cusa.org.uy/cusa/precios_servicios_agricolas

- Deambrosi, E.** (2003). Rice production system in Uruguay and its sustainability. *In Proceedings of the III International Conference of Temperate Rice*, Punta del Este, Uruguay, INIA. s.p.
- Deambrosi, E., Méndez, R. y Castillo, J.** (2015). Elementos a considerar en la inclusión de potasio en la fertilización de arroz. En Seminario de Actualización Técnica en Fertilización de Arroz (2015, Treinta y Tres, Uruguay). *Puesta a punto y avances de información sobre la nutrición del cultivo de arroz*. Montevideo, INIA. 1-11.
- Díaz-Zorita, M., Duarte, G.A. y Grove J.H.** (2002). A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil and Tillage Research*, 65(1), 1-18.
- Durán, A., Califra, A., Molfino, J.H. y Lynn, W.** (2006). *Keys to soil taxonomy for Uruguay*. (77 p.). Wahington, D.C., United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- FAO.** (2009). *Foro de expertos de alto nivel. Cómo alimentar al mundo 2050. La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050*. (4 p.). Roma, FAO.
- Franzluebbers, A. J. y Francis, C. A.** (1995). Energy output: input ratio of maize and sorghum management systems in eastern Nebraska. *Agriculture, ecosystems & environment*, 53(3), 271-278.
- Fuksa, P., Hakl, J. y Brant, V.** (2013). Energy balance of catch crops production. *Zemdirbyste-Agriculture*, 100(4), 355-362.
- García-Préchac, F., Ernst, O., Siri-Prieto, G. y Terra J.A.** 2004. Integrating no-till into crop-pasture rotations in Uruguay. *Soil and Tillage Research*, 77(1), 1-13.
- Godfray, H. C. J., Beddington, J. R., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., ... y Toulmin, C.** (2010). Food security: the challenge of feeding 9 billion people. *science*, 327(5967), 812-818.
- Heichel, G.H y Barnes, D.K.** (1984). Opportunities for meeting crop nitrogen needs from nitrogen fixation. Bezdicek, F., Power, J.F., Keeney, D.R. y Whight, M.J. (Eds.). *Organic farming: current Technology and its role in a sustainable*

- agriculture. (pp. 49-59). Madison, WI, *American Society of Agronomy*. (ASA Special Publication, 46)
- Hernández, J., Berger, A., Deambrosi, E. y Lavecchia, A.** (2013). Soil phosphorus tests for flooded rice grown in contrasting soils and cropping history. *Communications in soil science and plant analysis*, 44(7), 1193-1210.
- Hill, J., Nelson, E., Tilman, D., Polasky, S. y Tiffany, D.** (2006). Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels. *Proceedings of the National Academy of sciences*, 103(30), 11206-11210.
- Hoang, V. N. y Alauddin, M.** (2011). Analysis of agricultural sustainability: A review of exergy methodologies and their application in OECD countries. *International Journal of Energy Research*, 35(6), 459-476.
- Hülsbergen, K. J., Feil, B., Biermann, S., Rathke, G. W., Kalk, W. D. y Diepenbrock, W.** (2001). A method of energy balancing in crop production and its application in a long-term fertilizer trial. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 86(3), 303-321.
- INIA-Unidad GRAS.** (2017). Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, Unidad de Agroclima y Sistemas de Información (GRAS). Montevideo,. INIA. Recuperado de <http://www.inia.uy/gras/Clima/Banco-datos-agroclimatico>.
- Küsters, J. y Lammel, J.** (1999). Investigations of the energy efficiency of the production of winter wheat and sugar beet in Europe. *European Journal of Agronomy*, 11(1), 35-43.
- Liebman, M. y Janke, R. R.** (1990). Sustainable weed management practices. En Francis, C.A., Butler Flora, C. y King, L.D. (eds). Sustainable agriculture in temperate zones, (pp. 111-143) New York, Wiley.
- Maraseni, T., Chen, G., Banhazi, T., Bundschuh, J. y Yusaf, T.** (2015). An assessment of direct on-farm energy use for high value grain crops grown under different farming practices in Australia. *Energies*, 8(11), 13033-13046.
- Modernel, P., Astigarraga, L. y Picasso, V.** (2013). Global versus local environmental impacts of grazing and confined beef production systems. *Environmental Research Letters*, 8(3), 035052.

- Muhammad, D., Misri, B., EL-Nahrawy, M., Khan, S. y Serkan, A.** (2014). *Egyptian clover (Trifolium alexandrinum) king of forage crops*. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-i3500e.pdf>
- Nagy, C.** (1999). Energy coefficients for agricultural inputs in western Canada. Centre for Studies in Agriculture, Law and the Environment, University of Saskatchewan, Saskatoon, SK, p. 280.
- NRC (National Research Council).** (2000). *Nutrient Requirements of beef cattle: 7th rev. ed., Update 2000*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/9791>
- Patterson, H.D.** (1964). Theory of cyclic rotation experiments. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 1-45.
- Pimentel, D. y Burgess, M.** (1980). Energy inputs in corn production. *Energy inputs in corn production*, 67-84.
- Pimentel, D., y Pimentel, M. H. (Eds.).** (2007). *Food, energy, and society*. CRC press. Boca Rato, FL. Taylor & Francis Group. 110.
- Pimentel, D.** (2009). Energy inputs in food crop production in developing and developed nations. *Energies*, 2(1), 1-24.
- Pishgar-Komleh, S. H., Sefeedpari, P. y Rafiee, S.** (2011). Energy and economic analysis of rice production under different farm levels in Guilan province of Iran. *Energy*, 36(10), 5824-5831.
- Pittelkow, P., 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.
- Portugal-Pereira, J., Soria, R., Rathmann, R., Schaeffer, R. y Szklo, A.** (2015). Agricultural and agro-industrial residues-to-energy: Techno-economic and environmental assessment in Brazil. *Biomass and bioenergy*, 81, 521-533.
- Rathke, G. W., Wienhold, B. J., Wilhelm, W. W. y Diepenbrock, W.** (2007). Tillage and rotation effect on corn–soybean energy balances in eastern Nebraska. *Soil and Tillage Research*, 97(1), 60-70.
- Restle, J., Cerdótes, L., Vaz, F. N. y Brondani, I. L.** (2001). Características de carcaça e da carne de novilhas Charolês e 3/4 Charolês 1/4 Nelore,

terminadas em confinamento. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 30(3), 1065-1075.

- Roel, A.** (1999). *Riego en arroz: manejo eficiente de la inundación*. (16 p.) Montevideo, INIA. (Boletín de Divulgación, 67).
- Rovira, P.J., Velazco, J.I. y Bonilla, O.** (2009). Efecto de la estrategia de suplementación (Autoconsumo vs. Suplementación infrecuente) y el nivel de sal en el suplemento sobre el desempeño productivo de novillos en terminación durante el verano. En Deambrosi, E., Montossi, F., Saravia, H., Blanco, P.H. y Ayala, W. (Eds.). *10 años de la Unidad de Producción Arroz-Ganadería*. (pp.99-104). Montevideo, INIA. (Serie Técnica,180)
- Swanton, C. J., Murphy, S. D., Hume, D. J. y Clements, D. R.** (1996). Recent improvements in the energy efficiency of agriculture: case studies from Ontario, Canada. *Agricultural Systems*, 52(4), 399-418.
- Theisen, G., Silva, J. J. C., Silva, J. S., Andres, A., Anten, N. P. y Bastiaans, L.** (2017). The birth of a new cropping system: towards sustainability in the sub-tropical lowland agriculture. *Field Crops Research*, 212, 82-94.
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J. y Befort, B. L.** (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(50), 20260-20264.
- Truong, T. T. A., Fry, J., Van Hoang, P. y Ha, H. H.** (2017). Comparative energy and economic analyses of conventional and System of Rice Intensification (SRI) methods of rice production in Thai Nguyen Province, Vietnam. *Paddy and Water Environment*, 15(4), 931-941.
- Vilra, L., Motta Macedo, M.C., Martha Junior, G.B. y Kluthcouski, J.** (2003). *Crop-livestock integration benefits*. In: Integração lavoura-pecuaria. EMBRAPA. Recuperado de http://www.fao.org/ag/agp/agpc/doc/integration/papers/integration_benefits.htm
- Woods, J., Williams, A., Hughes, J. K., Black, M. y Murphy, R.** (2010). Energy and the food system. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1554), 2991-3006.

Yuan, S. y Peng, S. (2017). Input-output energy analysis of rice production in different crop management practices in central China. *Energy*, *141*, 1124-1132.

4. DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES GLOBALES

En este capítulo se trata de relacionar los principales resultados obtenidos en los dos artículos de esta tesis. El cálculo utilizado para realizar este análisis fue el propuesto por Fan et al. (2018), donde lo que plantean es corregir el análisis de eficiencia en el uso de energía por la variación en el stock de carbono, considerando un poder calorífico de la MOS de $22,6 \text{ MJ kg}^{-1}$. Si existe un aumento en el stock de carbono, este se contabiliza como energía producida en el sistema y si se registra una disminución, contabiliza como energía invertida en el sistema.

Los cambios en stock de carbono del suelo de 0-15 cm de profundidad (sin diferencias significativas) respecto a Az-PPlarga ($30,1 \text{ Mg ha}^{-1}$) fueron de $-0,47$; $-0,21$ y $-0,43 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (5 años) para Az-PPcorta, Az-Soja y Az-Continuo respectivamente y la EROI de Az-PPlarga de $6,1 \text{ MJ MJ}^{-1}$. Esto implicó una disminución en la tasa de retorno de energía invertida (EROI) debido a esa pérdida de carbono y los valores de EROI pasaron de $5,6$; $7,0$ y $5,7$ (sin tomar en cuenta el cambio de stock de carbono) a $2,5$; $4,7$; y $3,5 \text{ MJ MJ}^{-1}$ (tomando en cuenta el stock de carbono) para Az-PPcorta, Az-Soja y Az-Continuo respectivamente. Resultados similares obtuvieron Fan et al. (2018) en sistemas de rotaciones de cultivos (trigo, canola, leguminosas) bajo mínimo o nulo laboreo con valores que variaron entre $6,4$ - $12,9 \text{ MJ MJ}^{-1}$ a $3,0$ - $8,7 \text{ MJ MJ}^{-1}$ en los sistemas que perdieron carbono.

Esto sugiere que para analizar la sostenibilidad global de los sistemas de producción es necesario contemplar simultáneamente más de un atributo o indicador en los mismos. Considerar las variaciones de stock de carbono en suelo implicó cambios en la eficiencia energética global de los sistemas. El desafío está en encontrar el balance entre estos atributos y que las ganancias obtenidas por un lado no signifiquen perder por otro y así lograr sistemas de producción sostenibles.

5. BIBLIOGRAFÍA GENERAL

- Andriulo, A., Guérif, J. y Mary, B.** (1999). Evolution of soil carbon with various cropping sequences on the rolling pampas. Determination of carbon origin using variations in natural ^{13}C abundance. *Agronomie*, 19(5), 349-364.
- Bayer, C., Mielniczuk, J., Amado, T. J., Martin-Neto, L. y Fernandes, S. V.** (2000). Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. *Soil and tillage research*, 54(1-2), 101-109.
- Benintende, S.M., Benintende, M.C., Sterren, M.A. y De Battista J.J.** (2008). Soil microbiological indicators of soil quality in four rice rotations systems. *Ecological indicators*, 8(5), 704-708.
- Conforti, P. y Giampietro, M.** (1997). Fossil energy use in agriculture: an international comparison. *Agriculture, ecosystems & environment*, 65(3), 231-243.
- Chebataroff, N.** (1982). *Manejo de suelos en el cultivo de arroz y posibilidades de incorporación de nuevos cultivos en la rotación*. Montevideo: CIAAB. (12 p.). (CIAAB Miscelánea, 47)
- Deambrosi, E.** (2003). Rice production system in Uruguay and its sustainability. *In Proceedings of the III International Conference of Temperate Rice*, Punta del Este, Uruguay, INIA. s.p.
- Deambrosi, E.** (2009). 10 años de la unidad de producción arroz-ganadería. En **Deambrosi, E., Montossi, F., Saravia, H., Blanco, P.H. y Ayala, W.** (Eds.). *10 años de la Unidad de Producción Arroz-Ganadería*. (pp. 9-12). Montevideo, INIA. (Serie Técnica; 180)
- Díaz-Zorita M, Duarte G.A. y Grove J.H.** (2002). A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil and Tillage Research*, 65(1), 1-18.
- DIEA** (Dirección de Estadísticas Agropecuarias). 2014. Producción. En: *Encuesta Arrocería 2014*. Montevideo: MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y

- Pesca). Recuperado de <http://www2.mgap.gub.uy/portal/page.aspx?2,diea,diea-pub-arroz,O,es,0>,
- DIEA** (Dirección de Estadísticas Agropecuarias). (2017). Producción. En: *Anuario estadístico agropecuario 2017*. Montevideo: MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca). Recuperado de <http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/diea-anuario2017web01a.pdf>
- Doran, J.W. y Parkin T.B.** (1994). Defining and assessing soil quality. En J.W. Doran et al. (Eds.). *Defining soil quality for the sustainable environment*. (pp.3-21). Boca Raton, FL, ASA and SSSA (SSSA Special Publication, 35)
- Fan, J., McConkey, B. G., Janzen, H. H., y Miller, P. R.** (2018). Emery and energy analysis as an integrative indicator of sustainability: A case study in semi-arid Canadian farmlands. *Journal of Cleaner Production*, 172, 428-437.
- FAO.** (2009). *Foro de expertos de alto nivel. Cómo alimentar al mundo 2050. La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050*. (4 p). Roma: FAO.
- FAO.** (2015). *Soil Functions*. Recuperado de <http://www.fao.org/resources/infographics/infographics-details/en/c/284478/>
- Franzluebbers, A. J. y Francis, C. A.** (1995). Energy output: input ratio of maize and sorghum management systems in eastern Nebraska. *Agriculture, ecosystems & environment*, 53(3), 271-278.
- Franzluebbers, A.J., Haney, R.L., Honeycutt, C.W., Schomberg, H.H. y Hons F.M.** (2000). Flush of carbon dioxide following rewetting of dried soil relates to active organic pools. *Soil Science Society of America Journal*, 64, 613–623.
- García-Préchac, F., Ernst, O., Siri-Prieto, G, y Terra J.A.** 2004. Integrating no-till into crop–pasture rotations in Uruguay. *Soil and Tillage Research*, 77(1), 1-13.
- Godfray, H. C. J. y Garnett, T.** (2014). Food security and sustainable intensification. *Phil. Trans. R. Soc. B*, 369(1639), 20120273.
- Haciseferogullari, H., Acaroglu, M. y Gezer, İ.** (2003). Determination of the energy balance of the sugar beet plant. *Energy Sources*, 25(1), 15-22.

- Karlen D.L., Mausbach M.J., Doran J.W., Cline R.G., Harris R.F. y Schuman G.E.** (1997). Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Science Society of America Journal* 61, 4-10.
- Kelm, M.** (2004). *Strategies for sustainable agriculture with particular regard to productivity and fossil energy use in forage production on organic arable farming*. Thesis Doctoral. Kiel, University of Kiel.
- Larson W.E. y Pierce F.J.** (1994). The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. En J.W. Doran et. al. (ed.) *Defining soil quality for a sustainable environment*. (pp. 37–51). Madison, WI, SSSA and ASA. (Special Publication, 35)
- Méndez, R.** (1993). Rotación Arroz-Pasturas. *Análisis físico-económico del cultivo*. INIA. Montevideo, INIA (21 p.). (Serie Técnica, 38).
- Pimentel, D.** (2009). Energy inputs in food crop production in developing and developed nations. *Energies*, 2(1), 1-24.
- Pittelkow, P., 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.
- Rathke, G. W., Wienhold, B. J., Wilhelm, W. W. y Diepenbrock, W.** (2007). Tillage and rotation effect on corn–soybean energy balances in eastern Nebraska. *Soil and Tillage Research*,97(1), 60-70.
- Salvo, L., Hernández, J. y Ernst, O.** (2010) Distribution of soil organic carbon in different size fractions, under pasture and crop rotations with conventional tillage and no-till systems. *Soil and Tillage Research*, 109(2), 116-122.
- Stockle, C. O., Papendick, R. I., Saxton, K. E., Campbell, G. S., y Van Evert, F. K.** (1994). A framework for evaluating the sustainability of agricultural production systems. *American Journal of Alternative Agriculture*, 9(1-2), 45-50.
- Terra, J. A., García Préchac, F., Salvo, L., y Hernández, J.** (2006). Soil use intensity impacts on total and particulate soil organic matter in no-till crop-pasture rotations under direct grazing. *Advances in Geoecology*, 38, 233-241.

- Terra, J., Castillo, J., Bonilla, F., Amaral, R., Lucas, T. y Macedo, I.** (2014). Soja en sistemas arroceros. *Revista Arroz* 78:24-27.
- Theisen, G., Silva, J. J. C., Silva, J. S., Andres, A., Anten, N. P. y Bastiaans, L.** (2017). The birth of a new cropping system: towards sustainability in the sub-tropical lowland agriculture. *Field Crops Research*, 212, 82-94.
- Vilra, L., Motta Macedo, M.C., Martha Junior, G.B. y Kluthcouski, J.** (2003). *Crop-livestock integration benefits*. In: Integração lavoura-pecuaria. Brasília, EMBRAPA. Recuperado de http://www.fao.org/ag/agp/agpc/doc/integration/papers/integration_benefits
- Woods, J., Williams, A., Hughes, J. K., Black, M. y Murphy, R.** (2010). Energy and the food system. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1554), 2991-3006.