

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

CULTIVO DE ARROZ EN EL VALLE DEL RÍO SENEGAL. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA Y PROPUESTAS DE MEJORA

TRABAJO FIN DE MÁSTER UNIVERSITARIO EN GESTIÓN DE
LA SEGURIDAD Y CALIDAD ALIMENTARIA

ALUMNA: SANDRA COLEJO BLANCO

TUTORA ACADEMICA: NEUS SANJUÁN PELLICER
COTUTORA: GABRIELA CLEMENTE POLO

Curso Académico: 2016/2017

VALENCIA, JULIO DE 2017

TÍTULO: CULTIVO DE ARROZ EN EL VALLE DEL RÍO SENEGAL. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA Y PROPUESTAS DE MEJORA

Autora: Sandra Colejo Blanco
Tutora académica: Neus Sanjuán Pellicer
Cotutora: Gabriela Clemente Polo

RESUMEN

La base de la alimentación en la República de Senegal es el arroz, si bien la producción nacional de este cereal cubre solo el 30% de las necesidades. Por ello, promover la producción local de arroz es una opción estratégica para lograr la seguridad alimentaria. No obstante, esto se debe alcanzar bajo un punto de vista holístico que mejore la sostenibilidad del cultivo integrando criterios técnicos, económicos y ambientales.

El objetivo del estudio es realizar una evaluación ambiental del cultivo de arroz de la Unión de Mujeres de Ross-Béthio (Senegal) durante la campaña de la estación húmeda de 2016 mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ISO 14040, 2006). Los resultados se compararon con los de la primera campaña de 2016 a fin de comprobar la eficacia de las mejoras implementadas en la segunda campaña.

Las emisiones de campo constituyen la principal causa de gran parte de las categorías de impacto evaluadas, a excepción del agotamiento de combustibles fósiles y agotamiento de recursos minerales, generados principalmente por la producción de fertilizantes, y el agotamiento de la capa de ozono, causado mayoritariamente por la producción de herbicidas. Los resultados muestran que las mejoras implementadas disminuyen el impacto ambiental del cultivo, excepto la ecotoxicidad en algunas parcelas.

PALABRAS CLAVE: agricultura sostenible; análisis de ciclo de vida (ACV); arroz; impacto ambiental; Senegal.

ABSTRACT

Rice is the base of the diet in the Republic of Senegal, although the national production of this cereal covers only 30% of the needs. Thus, promoting the local production of rice is a strategic option to attain food security. Nevertheless, this must be achieved under a holistic point of view that improves the sustainability of the crop integrating technical, economic and environmental criteria.

The aim of this study is to carry out an environmental assessment of rice cultivation by the Union of Women Growers of Ross-Béthio (Senegal) during the wet season campaign of 2016 through a Life Cycle Assessment (ISO 14040, 2006). The results have been compared with the ones from the first campaign of 2016 to check the efficiency of the improvements implemented in the second campaign.

Field emissions constitute the main cause of most of the impact categories evaluated, except for fossil fuel depletion and mineral resources depletion, both generated mainly by the production of fertilizer, and ozone layer depletion, caused mostly by the production of herbicides. The results show that the implemented improvements diminish the environmental impact of the crop, except ecotoxicity in some plots.

KEY WORDS: sustainable agriculture; life cycle assessment (LCA); rice; environmental impact; Senegal.

RESUM

La base de l'alimentació en la República de Senegal és l'arròs, si bé la producció nacional d'aquest cereal cobreix solament el 30% de les necessitats. Per açò, promoure la producció local d'arròs és una opció estratègica per aconseguir la seguretat alimentària. No obstant açò, açò s'ha d'aconseguir sota un punt de vista holístic que millore la sostenibilitat del cultiu integrant criteris tècnics, econòmics i ambientals.

L'objectiu de l'estudi és realitzar una avaluació ambiental del cultiu d'arròs de la Unió de Dones de Ross-Béthio (Senegal) durant la campanya de l'estació humida de 2016 mitjançant la metodologia d'Anàlisi de Cicle de Vida (ISO 14040, 2006). Els resultats es van comparar amb els de la primera campanya de 2016 a fi de comprovar l'eficàcia de les millores implementades en la segona campanya.

Les emissions de camp constitueixen la principal causa de gran part de les categories d'impacte avaluades, a excepció de l'esgotament de combustibles fòssils i l'esgotament de recursos minerals, generats principalment per la producció de fertilitzants, i l'esgotament de la capa d'ozó, causat majoritàriament per la producció d'herbicides. Els resultats mostren que les millores implementades disminueixen l'impacte ambiental del cultiu, excepte l'ecotoxicitat en algunes parcel·les.

PARAULES CLAU: agricultura sostenible; anàlisi de cicle de vida (ACV); arròs; impacte ambiental; Senegal.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. El cultivo del arroz en África

El arroz (*Oryza* spp.) constituye uno de los tres cultivos de cereal más importantes del mundo. Aunque se cultiva en los cinco continentes, el 90% de su producción se centra principalmente en países asiáticos (Prasad et al., 2017). Actualmente se cultiva en 113 países con un nivel de producción según lo estimado por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) para la campaña 2016/2017 de 481,14 millones de toneladas de arroz a nivel mundial, un 1,88% más que la campaña precedente (USDA, 2017).

En África, su producción ha aumentado continuamente durante varias décadas, pasando de una tasa de crecimiento del 1,76% en 1991-2001 al 3,96% durante 2002-2013. Sin embargo, cerca de un tercio de las necesidades de la población son cubiertas a través de las importaciones (USAID, 2009). Concretamente, África Occidental es una de las principales importadoras de arroz del mundo, que asegura el 40% de sus necesidades con arroz importado de Asia. El arroz es, por tanto, uno de los cultivos alimentarios más valorados del continente africano, siendo muy importante para la seguridad alimentaria y la estabilidad política, ya que su escasez o fluctuación de precios podría dar lugar a disturbios civiles, como se vio durante la crisis del arroz en 2007-2008 (Seck et al., 2013). Dentro de esta región se encuentra la República de Senegal, país costero donde el arroz se considera la base de la alimentación. Sin embargo, la producción nacional de este cereal es insuficiente respecto a la demanda interior (Marc Mess, 2015), que permite cubrir tan sólo el 30% de las necesidades del país. Por ello, anualmente se importan entre 650.000 y 850.000 toneladas de arroz, lo que afecta duramente a la balanza comercial (Marc Mess, 2016).

Por ello, promover la producción local de arroz con el fin de aumentar el índice de autoabastecimiento, y de esta forma, alcanzar la seguridad alimentaria, es una opción estratégica para la República de Senegal, más aún si se tienen en cuenta las incertidumbres del mercado internacional de arroz y el potencial del país en cuanto a sus condiciones favorables para la producción de este cereal (tierra, agua y clima adecuados que permiten realizar dos cosechas al año). No obstante, esta estrategia debe abordarse bajo un punto de vista complejo que permita establecer una agricultura sostenible y, consecuentemente, mejore la rentabilidad económica, reduzca el impacto ambiental generado por las prácticas agrícolas del cultivo y garantice la justicia social. Resulta, por tanto, imprescindible contar con herramientas que permitan evaluar las distintas dimensiones de la sostenibilidad de la agricultura.

1.2. Análisis de Ciclo de Vida

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta de gestión medioambiental cuya finalidad es evaluar de forma objetiva, metódica, sistemática y científica el impacto ambiental generado por un producto o

proceso durante su ciclo de vida completo, esto es de la cuna a la tumba (ISO 14040, 2006).

La aplicación del ACV a la agricultura puede resultar complicada por la naturaleza de los procesos involucrados, puesto que ésta debe considerarse como una secuencia de procesos naturales que el hombre puede dirigir, pero no puede controlar por completo. Por lo tanto, se debe tener sumo cuidado al diseñar un ACV para un producto agrícola de manera que se asegure que todos los procesos implicados en su producción, tanto humanos como naturales, sean considerados con precisión (Blengini and Busto, 2009).

Para la evaluación de los impactos ambientales generados por la agricultura, diversos autores han empleado la metodología ACV. Entre estos estudios, algunos se han enfocado en la evaluación de un sistema de producción concreto (Wang et al., 2010), mientras que otros se han dedicado a comparar sistemas de producción distintos (Thanawong et al., 2014), así como la variabilidad existente dentro de cada sistema (Ribal et al., 2017). Si bien el ACV es una metodología establecida como evidencia su aplicación en campos como el ecoetiquetado o las declaraciones ambientales de producto, su aplicación en sistemas agrarios requiere la mejora de aspectos como son la modelización del destino de los plaguicidas en el campo (Luo et al., 2012, Renaud-Gentié et al., 2015), o el impacto derivado del consumo de agua (Boulay et al., 2017).

En el caso particular del cultivo de arroz, es necesario tener en cuenta que conlleva un consumo de recursos (agua, tierra, energía y productos químicos), en particular nitrógeno, así como la generación y liberación de emisiones a la atmósfera, suelo y agua. Estas emisiones incluyen gases de efecto invernadero (GEI) como CH₄, que puede reaccionar con radicales hidroxilo en la troposfera (IPCC, 2006; Bayer et al., 2015), y N₂O, que además de ser un potente GEI, también puede contribuir a la destrucción del ozono estratosférico (Akiyama et al., 2005).

Se han realizado diversos estudios sobre la evaluación ambiental del cultivo del arroz en varios países como son Italia (Blengini and Busto, 2009; Fusi et al., 2014), China (Wang et al., 2010), Japón (Hokazono and Hayashi, 2012), Estados Unidos (Brodt et al., 2014), Irán (Khoshnevisan et al., 2014), Tailandia (Thanawong et al., 2014; Yodkhum et al., 2017) e India (Soam et al., 2017); sin embargo, no se ha encontrado ninguno realizado en algún país de África.

1.3. Justificación y objetivo del estudio

Actualmente, investigadores de la Universitat Politècnica de València (UPV) están llevando a cabo un proyecto financiado por el Centro de Cooperación al Desarrollo (CCD) de la UPV (Programa ADSIDEO Cooperación 2015) en colaboración con Cáritas Española y Cáritas Senegal. El título del proyecto es “Contribución a la sostenibilidad del cultivo de arroz en la región de Saint Louis (Senegal)” y tiene como objetivo aumentar la sostenibilidad del cultivo del arroz en Senegal mediante la mejora del rendimiento, disminución del impacto ambiental y aumento del beneficio

económico del cultivo de arroz realizado por la Unión de Mujeres Productoras de Ross-Béthio, en la región de Saint Louis (Senegal). La primera parte del proyecto consiste en la realización de un diagnóstico inicial del cultivo del arroz a través de una evaluación económica y medioambiental de las prácticas agrícolas desarrolladas en las dos campañas del año 2016, para así proponer alternativas que contribuyan a la sostenibilidad del cultivo y que serán implementadas y evaluadas en las campañas sucesivas. Como se ha indicado en el apartado 1.1, la climatología permite realizar dos cosechas al año; la primera campaña corresponde a la denominada “estación seca”, por el bajo índice de precipitación, se inicia entre febrero y marzo y finaliza en el mes de junio o julio. La segunda campaña corresponde a la “estación húmeda” y se lleva a cabo entre los meses de julio-agosto y diciembre. Fruto de los resultados de la evaluación ambiental correspondiente a la estación seca de 2016, se han realizado una serie de propuestas que se han implementado durante la estación húmeda de 2016 y que se han de evaluar.

El objetivo del presente estudio es llevar a cabo una evaluación medioambiental del cultivo de arroz realizado por la Unión de Mujeres Productoras en la localidad de Ross-Béthio, en la región de Saint Louis (Senegal) durante la campaña correspondiente a la “estación húmeda” de 2016. Esta evaluación se realizará mediante un ACV. Los resultados se compararán con los obtenidos durante la primera campaña a fin de comprobar la eficacia de las propuestas de mejora planteadas previamente.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La evaluación de los impactos medioambientales generados por el cultivo de arroz en la zona de estudio se ha realizado según la metodología de ACV descrita en la norma internacional ISO 14040:2006. De acuerdo a esta norma, un ACV comprende cuatro fases principales: definición del objetivo y el alcance del estudio, análisis de inventario, evaluación del impacto ambiental e interpretación de los resultados obtenidos (ISO 14040, 2006). El programa informático que se utilizó en el presente estudio fue GaBi 6.1 (Thinkstep AG, Leinfelden-Echterdingen, Alemania).

2.1. Definición del objetivo y el alcance

2.1.1. DEFINICIÓN DEL OBJETIVO

Como ya se ha comentado en el apartado 1, el objetivo del estudio es la evaluación medioambiental de un cultivo de 30 ha de arroz de la Unión de Mujeres Productoras de Ross-Béthio. Estas productoras se encuentran divididas en 7 Grupos de Interés Económico (GIE), es decir, en 7 agrupaciones de mujeres organizadas para la realización de dos campañas arroceras anuales. En este caso, la evaluación se realizará a partir de los datos recogidos sobre las prácticas agrícolas realizadas durante la estación húmeda de 2016 y se compararán con los obtenidos en la campaña previa.

2.1.2. DEFINICIÓN DEL ALCANCE

La Unidad Funcional (UF) es el elemento clave del ACV que describe la función principal del sistema estudiado. En sistemas agrícolas, esta función es la producción de alimentos, por tanto, en el presente estudio se ha definido como UF 1 kg de arroz cáscara a la salida de la explotación agrícola. De esta forma, la UF proporciona una referencia para todas las entradas y salidas, permitiendo la comparabilidad de los resultados entre sistemas similares (Brentrup et al., 2004).

Los límites del sistema son aquellos criterios que determinan qué procesos y etapas del sistema se incluyen dentro del ACV y cuáles no (ISO 14040, 2006). En el presente trabajo se consideró, dentro de estos límites, todos los procesos del cultivo, desde la producción de las materias primas hasta la salida del arroz de la explotación. Esto incluye, además de las prácticas de campo, la producción de fertilizantes y herbicidas, así como su transporte hasta la plantación, la producción de semillas y el uso de la maquinaria requerida, sin tener en cuenta procesos posteriores como son el procesamiento, almacenamiento, envasado, transporte y consumo del arroz (Figura 1).

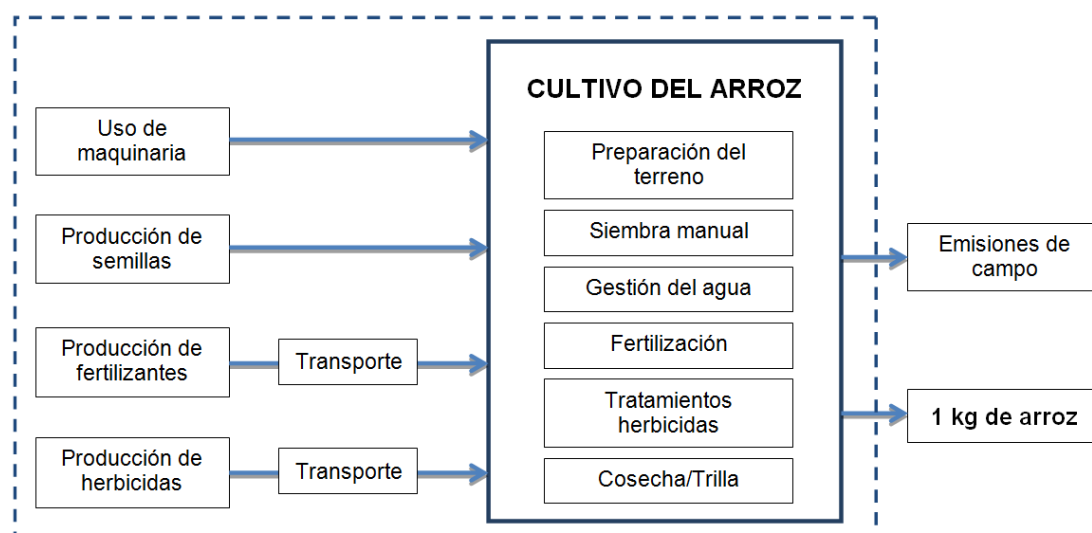


FIGURA 1. Límites del sistema de estudio para el ACV del cultivo de arroz en Ross-Béthio (Senegal).

2.1.3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA A ESTUDIAR

Ross-Béthio es un municipio localizado a unos 47 m sobre el nivel del mar en la región de Saint Louis, al noroeste de Senegal (Figura 2). Se encuentra en una zona rural del delta del río Senegal cuya principal actividad económica es el cultivo de arroz, que se riega con el agua de este río. Esta región presenta un clima saheliano caracterizado por temperaturas elevadas y una estación de lluvia corta (de julio hasta octubre) con precipitaciones débiles (menos de 350 mm/año) (Oumar y Romagosa, 2013). La precipitación total en la zona durante la campaña estudiada (agosto-diciembre 2016) fue de 168 mm (Tabla 1).

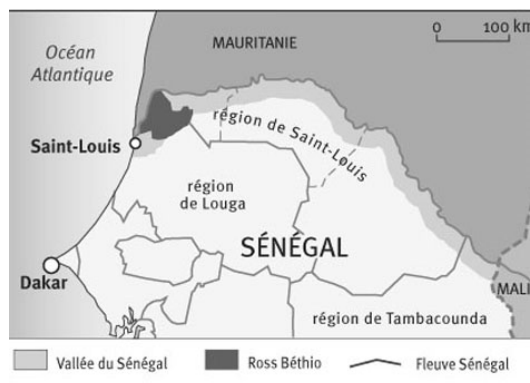


FIGURA 2. Situación de Ross Béthio al noreste de Senegal (África Occidental). Fuente: D'Aquino et al., 2002.

TABLA 1. Precipitación durante la campaña “estación húmeda” de 2016 en Saint Louis (Senegal). Fuente: FAO, 2017.

MES	AGOSTO			SEPTIEMBRE			OCTUBRE			NOVIEMBRE			DICIEMBRE		
DECENA	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
PRECIP (mm)	1	29	26	44	42	14	0	0	0	7	1	1	0	2	1
PRECIP Mensual (mm)	56			100			0			9			3		

La construcción de la presa de Diama en 1986, pensada para permitir el desarrollo de una agricultura intensiva en zonas más interiores, supuso una alteración en el ciclo hidrológico del río Senegal al modificar las condiciones del flujo del agua del mismo, ocasionando un aumento de su salinidad y, por ello, la de suelos en muchas zonas de la provincia. En 2003 la situación se agravó tras la creación de una apertura artificial en la denominada “Lengua de Barbarie”, realizada con el fin de evitar inundaciones en la isla de Saint Louis (Oumar y Romagosa, 2013).

El sistema a analizar consiste en un cultivo de arroz en campos inundados. Antes del inicio de cada campaña es necesario realizar una adecuada preparación del terreno, cuyo objetivo es disponer de un suelo en condiciones óptimas para el crecimiento del cultivo que permita alcanzar altos rendimientos (Heros, 2013). Esta preparación consiste en la limpieza y reparación de diques y canales, la realización de un laboreo superficial empleando un tractor con grada de discos, y, por último, la nivelación del terreno utilizando palas niveladoras arrastradas por animales.

En el sistema estudiado se cultiva la variedad de arroz Sahel 108, una variedad de ciclo corto (aproximadamente 120 días) que permite la realización de dos campañas anuales. El método de siembra más empleado en la región, y el utilizado por las GIE, es la siembra directa a voleo de semillas pregerminadas sobre suelo enfangado, con una densidad de siembra de 120 kg semillas·ha⁻¹. La pregerminación de las semillas consiste en sumergirlas en agua durante 24 horas y, a continuación, incubarlas a temperatura ambiente durante 24-36 horas (SAG y DICTA, 2003; SAED, 2009).

Para el control químico de malas hierbas, la parcela se drena completamente 24 horas antes de la aplicación de los herbicidas. Tras 48 horas desde su aplicación, los campos se vuelven a inundar. En cuanto a la fertilización del cultivo, se realizan dos abonados de cobertera sobre una fina lámina de agua de aproximadamente 3 cm, o un abonado de fondo y otro de cobertera. Después de un mínimo de 24 horas tras la aplicación del abonado, la lámina de agua se vuelve a elevar.

La altura de la lámina de agua varía en función de la fase de desarrollo en que se encuentra el cultivo. Desde la siembra hasta la iniciación de la panícula (IP) se va a mantener una altura de lámina de agua de 5 cm, mientras que desde la IP hasta el llamado estado pastoso (EP) la altura asciende hasta 10 cm. Quince días después de la floración (cuando la planta está en el EP) las parcelas son drenadas en su totalidad. En este momento, se necesitarán dos semanas más de maduración antes de la cosecha que se realiza manualmente o mediante una cosechadora-trilladora. El rendimiento medio alcanzado siguiendo estas prácticas es de 5 t·ha⁻¹.

El ciclo productivo del cultivo del arroz, así como las necesidades de agua en cada etapa de desarrollo, se muestran en la Figura 3.

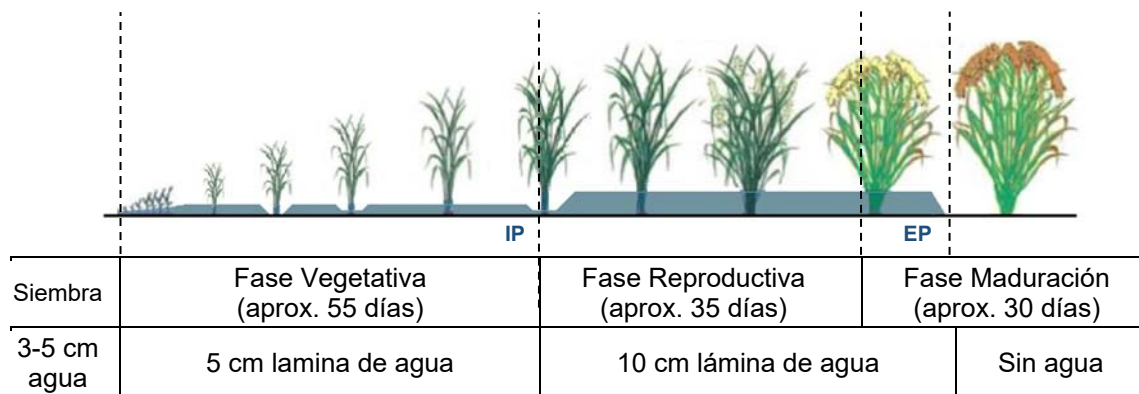


FIGURA 3. Fases de desarrollo del cultivo de arroz y necesidades de agua.

2.2. Análisis de Inventario

El análisis de Inventario de Ciclo de Vida (ICV) consiste en la recopilación detallada de todos los insumos ambientales (materiales y energía) y salidas (aire, agua y emisiones sólidas) asociados a cada etapa incluida dentro de los límites del sistema y expresados en base a la UF. Toda la información sobre las prácticas de campo realizadas así como las características de la maquinaria utilizada durante la campaña fue obtenida mediante la realización de encuestas a las productoras.

Durante la campaña correspondiente a la estación húmeda de 2016 se han estudiado cuatro parcelas distintas: parcela control, parcela experimental 1, parcela experimental 2 y parcela experimental 3. En ellas se realizaron las prácticas agrícolas que se muestran en la Tabla 2.

TABLA 2. Prácticas agrícolas realizadas durante la campaña invernal del cultivo de arroz en Ross-Béthio (Senegal) durante el año 2016.

ACTIVIDADES		PARCELA EX.1	PARCELA EX.2	PARCELA EX.3	PARCELA CONTROL
Preparación del suelo		Limpieza y reparación de diques y canales, laboreo superficial y nivelación del terreno)			
Riego de la parcela		Irrigación realizada un día antes de la siembra (5 cm de agua). Los riegos sucesivos se realizarán cada 7 días hasta la IP, y a partir de este momento hasta dos semanas antes de la cosecha, cada 10 días.			
Siembra		Siembra directa a voleo (dosis 120 kg·ha ⁻¹) sobre una lámina de agua.			
Tratamiento herbicida	1º	3,4 l·ha ⁻¹ Alligator 400EC previo al primer riego o a los 5 días tras la siembra		1 l·ha ⁻¹ Londax sobre lámina de agua (5 días tras la siembra)	
	2º	1 l·ha ⁻¹ Londax sobre lámina de agua (5 días tras la siembra)		8 l·ha ⁻¹ Propanil + 1 l·ha ⁻¹ Weedone (20 días tras la siembra)	
	3º	8 l·ha ⁻¹ Propanil (20 días tras la siembra)			
Tratamiento fertilizante	1º	Abonado de fondo: 100 kg·ha ⁻¹ DAP + 50 kg·ha ⁻¹ urea (tras preparar el suelo)	Abonado de cobertera: 100 kg·ha ⁻¹ DAP + 50 kg·ha ⁻¹ urea (30 días tras la siembra)	Abonado de fondo: 100 kg·ha ⁻¹ DAP + 50 kg·ha ⁻¹ urea (tras preparar el suelo)	Abonado de cobertera: 100 kg·ha ⁻¹ DAP + 150 kg·ha ⁻¹ urea (30 días tras la siembra)
	2º	150 kg·ha ⁻¹ de urea en la iniciación panicular (55 días tras la siembra).			
Drenaje		Drenaje completo de la parcela (15 días tras la floración).			
Recolección		Recolección del arroz (15 días tras el drenaje total).			

La maquinaria empleada en las operaciones incluidas en el sistema consume diésel, recurso no renovable que ocasiona emisiones por su combustión. El consumo de este combustible debido al uso del tractor con grada de discos, la cosechadora y la trilladora, es de 12,5, 7,5 y 2,5 l·ha⁻¹, respectivamente (datos facilitados por las productoras). En el caso de la bomba de riego, para el cálculo del consumo de diésel se siguió el procedimiento descrito por Armanuos et al. (2016). Las emisiones de la combustión del diésel por la maquinaria y la bomba empleada en el cultivo se obtuvieron de la base de datos GaBi 6.1 (Thinkstep AG, Leinfelden-Echterdingen, 2017).

Las entradas y salidas asociadas a la producción de semillas se han tomado de la base de datos de Ecoinvent 3.1 (Weidema et al., 2013).

En cuanto a los datos correspondientes a los procesos de fabricación y transporte de fertilizantes y herbicidas, en los cuales se consumen recursos y se producen emisiones, se tomaron de la base de datos de Ecoinvent 3.1 (Weidema et al., 2013). Para el transporte de fosfato diamónico (DAP) y

urea, se asumió que éstos provenían de Dakar y Lagos, respectivamente. En el caso de los herbicidas, se supuso que eran transportados en barco desde China y Francia hasta Dakar (Senegal).

Las emisiones de campo generadas por el cultivo incluyen las causadas por la aplicación de fertilizantes y herbicidas, así como las emisiones directas al aire de CH₄. Los fertilizantes aplicados son la urea y el DAP, los cuales liberan emisiones de óxido nitroso y amoníaco a la atmósfera, y nitratos y fosfatos al agua. Los productos fitosanitarios aplicados en este estudio han sido los herbicidas Weedone, Londax, Propanil y Alligator, cuyas materias activas son 2,4-D, bensulfurón metil, propanil y pendimetalina, respectivamente. La metodología empleada para el cálculo de estas emisiones, así como el origen y destino de las mismas, se muestran en la Tabla 3.

TABLA 3. Origen y destino de las emisiones de campo generadas por el cultivo de arroz y metodología empleada para su cálculo.

ORIGEN	EMISIONES	DESTINO	METODOLOGÍA
Materia orgánica (arrozales inundados)	Metano (CH ₄)	Aire	IPCC (2006)
Fertilizantes	Óxido nitroso (N ₂ O)	Aire	IPCC (2006)
	Amoníaco (NH ₃)		EMEP/EEA (2013)
	Nitratos (NO ₃) Fosfatos (PO ₄ ⁻³)	Agua	Nemecek et al. (2014)
Herbicidas	2,4-D	Aire	Combinación de métodos descrita por Berthoud et al. (2011) (Audsley, 2003 y EMEP/EEA, 2009).
	Propanil	Agua	
	Bensulfurón metilo	Suelo	
	Pendimetalina		

2.3. Evaluación de impacto ambiental e interpretación de resultados

La Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida (EICV) consiste en la interpretación del inventario, analizando y evaluando los impactos producidos por las cargas ambientales identificadas en éste. El método empleado para la realización de esta fase es Recipe 1.08 (Goedkoop et al., 2013), a excepción de los indicadores de impacto de toxicidad humana y ecotoxicidad que se realizarán mediante el método USEtox 2.1 (Rosenbaum et al, 2008).

Para la EICV se han seleccionado las categorías de impacto ambiental a utilizar, y a continuación, se ha llevado a cabo una clasificación que consiste en la asignación de los resultados del inventario con los impactos a los que contribuyen. Por último, con ayuda del programa informático GaBi 6.1 (Thinkstep GaBi, Leinfelden-Echterdingen, 2017), se han calculado los impactos producidos por el sistema.

En la Tabla 4 se muestran las distintas categorías de impacto ambiental consideradas en el estudio, así como las unidades de referencia o indicadores de categoría asociados a cada una de ellas.

TABLA 4. Categorías de impacto ambiental consideradas en el estudio.

CATEGORÍA DE IMPACTO		DESCRIPCIÓN	UNIDADES*
Cambio climático	CC	Fenómeno observado por el aumento en la temperatura media de la atmósfera terrestre y de los océanos en las últimas décadas. Se debe al aumento de emisiones de gases invernadero de origen antropogénico. Estas emisiones absorben la radiación solar y aumentan la temperatura de la atmósfera	kg de CO ₂ equivalentes
Agotamiento de recursos minerales	RM	Consumo de materiales extraídos de la naturaleza a mayor velocidad que su producción.	kg de Fe equivalentes
Agotamiento combustibles fósiles	CF	Consumo de combustibles extraídos de la naturaleza a mayor velocidad que su producción.	kg de petróleo equivalentes
Acidificación	AC	Pérdida de la capacidad neutralizante del suelo y del agua, como consecuencia del retorno a la superficie de la tierra, en forma de ácidos, de los óxidos de azufre y nitrógeno descargados a la atmósfera.	kg de SO ₂ equivalentes
Eutrofización	EU	Crecimiento excesivo de la población de algas (disminución del contenido de O ₂) originado por el enriquecimiento artificial de las aguas de ríos y embalses como consecuencia del empleo masivo de fertilizantes y detergentes que provoca un alto consumo del oxígeno del agua.	kg de P equivalentes
Agotamiento de la capa de ozono	AO	Efectos negativos sobre la capacidad de protección frente a las radiaciones ultravioletas solares de la capa de ozono estratosférico.	kg de CFC-11 equivalentes
Formación de oxidantes fotoquímicos	OF	La formación de oxidantes fotoquímicos sucede bajo la influencia de la radiación solar, donde los óxidos de nitrógeno reaccionan con los Compuestos Orgánicos Volátiles presentes en la atmósfera para producir ozono troposférico. Provocan efectos nocivos sobre la salud humana, los ecosistemas y la agricultura.	kg de NMVOC
Ecotoxicidad	EC	Categoría de impacto ambiental relativa a los impactos tóxicos que afectan a un ecosistema, que son nocivos para distintas especies y que cambian la estructura y función del ecosistema. Es resultado de una serie de mecanismos toxicológicos diferentes provocados por la liberación de sustancias con un efecto directo sobre la salud del ecosistema.	CTUe
Toxicidad humana	TH	Hace referencia a los efectos nocivos sobre la salud humana debidos a la absorción de sustancias tóxicas mediante la inhalación de aire, la ingesta de alimentos o agua, o la penetración a través de la piel, en la medida en que estén relacionados con el cáncer y efectos no cancerígenos.	CTUh

*Donde NMVOC: Compuestos orgánicos volátiles distintos del metano, CTUe: Unidad de Toxicidad en los Ecosistemas (PAF m³·día·kg⁻¹ emitido), PAF: Fracción Potencialmente Afectada de especies, y CTUh: Unidad de Toxicidad Humana (Casos de toxicidad·kg emisión⁻¹).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A fin de comparar el impacto generado por las dos campañas de arroz de 2016, se incluyen en este trabajo los resultados referentes a la primera campaña (Julbe, 2016). Es importante mencionar que durante ésta se llevaron a cabo unas prácticas agrícolas similares a las realizadas en la parcela control de la estación húmeda, sin embargo, debido a la escasa precipitación (11 mm/campaña seca) se requirió un mayor volumen de agua para el riego en comparación con la segunda campaña.

3.1. Emisiones de campo

La Tabla 5 muestra las emisiones generadas durante el cultivo de arroz en los distintos escenarios estudiados por la aplicación de fertilizantes y herbicidas, así como las emisiones directas de metano a la atmósfera.

TABLA 5. Emisiones de campo generadas por el cultivo de arroz en Ross-Béthio (Senegal) durante las dos campañas de 2016. Unidad funcional 1 kg de arroz.

DESTINO	EMISIÓN	UNIDADES *	Estación seca	Estación húmeda**			
				CONT	EX1	EX2	EX3
(unidades/kg de arroz)							
Aire	Metano (CH ₄)	kg CH ₄	0,0173	0,0162	0,0162	0,0162	0,0162
	N ₂ O	kg N-N ₂ O	4,14·10 ⁻⁴	3,52·10 ⁻⁴	2,51·10 ⁻⁴	2,51·10 ⁻⁴	2,51·10 ⁻⁴
	NH ₃	kg N-NH ₃	7,31·10 ⁻³	6,39·10 ⁻³	4,55·10 ⁻³	4,55·10 ⁻³	4,55·10 ⁻³
	Weedone (2,4-D)	kg (m.a.)	1,80·10 ⁻⁶	1,80·10 ⁻⁶	0	0	1,80·10 ⁻⁶
	Propanil (propanil)	kg (m.a.)	3,86·10 ⁻⁶	3,86·10 ⁻⁶	3,86·10 ⁻⁶	3,86·10 ⁻⁶	3,86·10 ⁻⁶
	Londax (Bensulfurón metil)	kg (m.a.)	5,60·10 ⁻¹³	5,60·10 ⁻¹³	5,60·10 ⁻¹³	5,60·10 ⁻¹³	5,60·10 ⁻¹³
	Alligator (Pendimetalina)	kg (m.a.)	0	0	3,88·10 ⁻⁴	3,88·10 ⁻⁴	0
Agua	Nitratos (NO ₃)	kg N-NO ₃	0,0312	0,0259	0,0186	0,0186	0,0186
	Fosfatos (PO ₄)	kg P	5,30·10 ⁻⁵	5,30·10 ⁻⁵	5,30·10 ⁻⁵	5,30·10 ⁻⁵	5,30·10 ⁻⁵
	Weedone (2,4-D)	kg (m.a.)	7,20·10 ⁻⁷	7,20·10 ⁻⁷	0	0	7,20·10 ⁻⁷
	Propanil (propanil)	kg (m.a.)	3,84·10 ⁻⁶	3,84·10 ⁻⁶	3,84·10 ⁻⁶	3,84·10 ⁻⁶	3,84·10 ⁻⁶
	Londax (Bensulfurón metil)	kg (m.a.)	6,00·10 ⁻⁸	6,00·10 ⁻⁸	6,00·10 ⁻⁸	6,00·10 ⁻⁸	6,00·10 ⁻⁸
	Alligator (Pendimetalina)	kg (m.a.)	0	0	1,36·10 ⁻⁶	1,36·10 ⁻⁶	0
Suelo	Weedone (2,4-D)	kg (m.a.)	1,42·10 ⁻⁴	1,42·10 ⁻⁴	0	0	1,42·10 ⁻⁴
	Propanil (propanil)	kg (m.a.)	7,26·10 ⁻⁴	7,26·10 ⁻⁴	7,26·10 ⁻⁴	7,26·10 ⁻⁴	7,26·10 ⁻⁴
	Londax (Bensulfurón metil)	kg (m.a.)	1,18·10 ⁻⁵	1,18·10 ⁻⁵	1,18·10 ⁻⁵	1,18·10 ⁻⁵	1,18·10 ⁻⁵
	Alligator (Pendimetalina)	kg (m.a.)	0	0	1,35·10 ⁻⁴	1,35·10 ⁻⁴	0

*m.a.: hace referencia a la materia activa del herbicida.

**CONT: Parcela control; EX1: Parcela experimental 1; EX2: Parcela experimental 2; EX3: Parcela experimental 3.

Las emisiones a los distintos compartimentos resultaron relativamente homogéneas, siendo ligeramente inferiores durante la estación húmeda, especialmente en las parcelas experimentales. Esto indica que las mejoras implementadas en la estación húmeda han conllevado una disminución de las emisiones de campo. Las emisiones de 2,4-D y pendimetalina fueron la excepción, puesto que no se aplicaron en todos los escenarios analizados.

3.2. Evaluación de Impacto

Los valores absolutos de impacto ambiental para cada una de las categorías de impacto consideradas y para cada escenario estudiado se muestran en la Tabla 6.

TABLA 6. Resultados de la evaluación de impacto ambiental del cultivo de arroz en Ross-Béthio (Senegal) en los distintos escenarios estudiados durante las dos campañas realizadas en 2016. Valores por UF (1 kg de arroz).

CATEGORÍA DE IMPACTO			E. HÚMEDA CONTROL	E. HÚMEDA EX 1	E. HÚMEDA EX 2	E. HÚMEDA EX 3	E. SECA
Cambio climático	kg CO ₂ equivalente	CC	0,621	0,58	0,58	0,58	0,642
Agotamiento combustibles fósiles	kg petróleo equivalente	CF	0,0727	0,0563	0,0563	0,0562	0,0812
Eutrofización de agua dulce	kg P equivalente	EU	9,33·10 ⁻⁵	8,70·10 ⁻⁵	8,70·10 ⁻⁵	8,73·10 ⁻⁵	9,64·10 ⁻⁵
Agotamiento de recursos minerales	kg Fe equivalente	RM	0,0125	0,0101	0,0101	0,0101	0,0137
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC-11 equivalente	AO	8,65·10 ⁻⁸	7,97·10 ⁻⁸	7,97·10 ⁻⁸	7,99·10 ⁻⁸	8,98·10 ⁻⁸
Formación de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC	OF	0,0018	0,00151	0,00151	0,00151	0,002
Acidificación del suelo	kg SO ₂ equivalente	AC	0,0206	0,0149	0,0149	0,0149	0,0235
Ecotoxicidad	CTUe	EC	2,46	4,11	4,11	2,46	2,46
Toxicidad humana	CTUh	TH	5,27·10 ⁻¹⁰	4,07·10 ⁻¹⁰	4,07·10 ⁻¹⁰	4,88·10 ⁻¹⁰	5,47·10 ⁻¹⁰

Con el fin de comparar mejor los resultados obtenidos en cada uno de los escenarios analizados, en la Figura 4 se muestran gráficamente los indicadores de impacto para cada categoría con los correspondientes a la parcela control de la estación húmeda.

En general, el cultivo de arroz durante la estación seca presenta un mayor impacto en comparación con los escenarios de la estación húmeda, especialmente con las parcelas experimentales. Con respecto a la parcela control supone un incremento del 14% en la AC, un 12% en el CF y un 11% en la OF, entre otros.

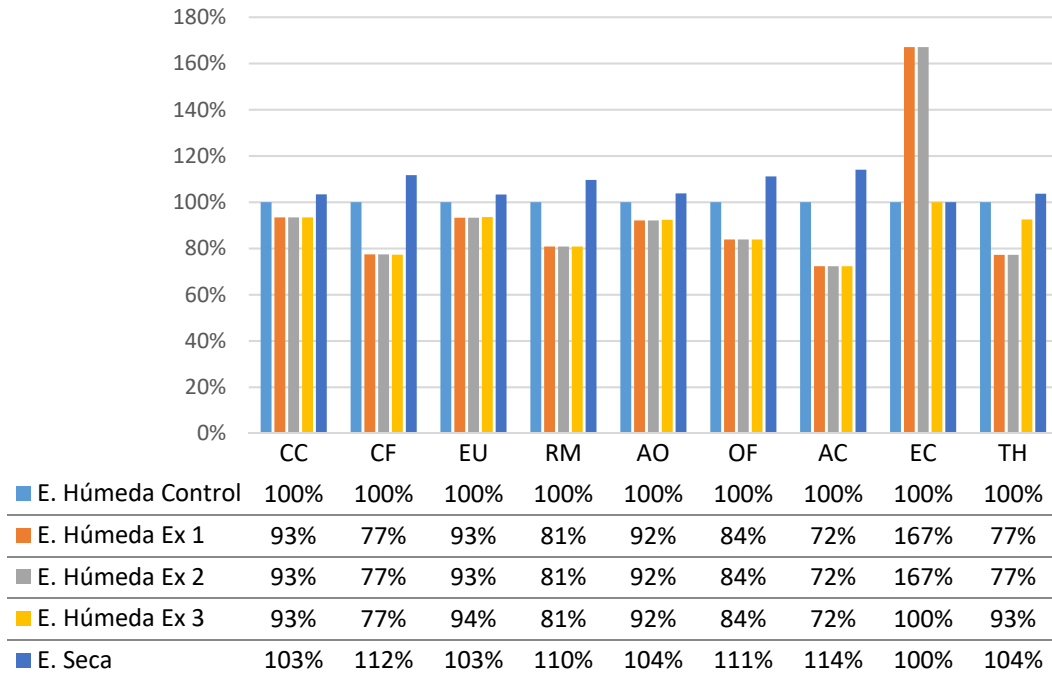


FIGURA 4. Comparación relativa entre los distintos escenarios estudiados durante las dos campañas realizadas en 2016.

En cambio, las parcelas experimentales obtuvieron, en general, menores valores de impacto. Entre las categorías de impacto que presentan mayores reducciones en comparación con los valores obtenidos para la parcela control, se encuentra la AC con una reducción del 28% y, el CF y RM con valores un 23 y 19% menores, respectivamente.

La variabilidad en los valores de las categorías de CC, CF, EU, RM y AC depende principalmente de la cantidad de fertilizantes aplicada, concretamente de la urea. Esto justifica que durante la estación seca (aplicación de 350 kg urea/ha) se alcancen mayores valores de estas categorías de impacto, en comparación con la parcela control (300 kg urea/ha) y las experimentales (200 kg urea/ha) de la estación húmeda.

En cuanto a la categoría de impacto OF, la principal causa de las diferencias encontradas entre los distintos escenarios estudiados es el mayor volumen de riego empleado durante la estación seca, lo que supone un mayor consumo de combustible usado por la bomba de riego. Otra causa sería las diferencias en la dosis de fertilizante aplicado entre escenarios, ya que esto modifica el consumo de combustible durante su transporte. Un mayor consumo de combustible supone mayores emisiones de NO_x y compuestos orgánicos volátiles generados durante su combustión, emisiones que contribuyen a la OF.

La principal causa de las categorías de EC y TH es la aplicación de herbicidas. Todos los escenarios estudiados emplearon como productos fitosanitarios el Londax (bensulfurón metil) y Propanil (propanil). Sin embargo, en las parcelas experimentales 1 y 2 de la estación húmeda se aplicó además el herbicida Alligator (pendimetalina), y en el resto de escenarios analizados (parcela control y experimental de la estación húmeda, y estación seca), el Weedone (2,4-D). Esta diferencia ha supuesto la variabilidad en los indicadores de impacto entre los distintos escenarios. En el caso de la categoría de TH, el empleo del producto fitosanitario Weedone (2,4-D) supuso un mayor impacto en comparación con las parcelas que no lo utilizaban, ya que presenta un mayor factor de caracterización en comparación al herbicida Alligator (pendimetalina), empleado como sustituto de éste en los otros escenarios. Sin embargo, en el caso de la EC ocurre lo contrario. En este caso, las parcelas experimentales 1 y 2 presentan valores muy superiores al resto de escenarios, suponiendo un aumento del 67% con respecto al control. Esto es debido a la aplicación del herbicida Alligator, cuya materia activa, la pendimetalina, presenta un factor de caracterización mayor al asociado al producto fitosanitario Weedone (2,4-D).

En general, el cultivo de arroz durante la estación seca presenta un mayor impacto en comparación con los escenarios de la estación húmeda, especialmente con las parcelas experimentales. Esto indica que con la implementación de las propuestas de mejora se consigue una disminución del impacto ambiental.

3.3. Análisis de Contribución

El ciclo de vida del cultivo de arroz se ha dividido en las siguientes etapas o subsistemas:

- Operaciones sobre el terreno (incluye el diésel consumido por la maquinaria empleada en el laboreo del suelo, la cosecha y la trilla, así como el consumido por la bomba de riego).
- Producción de fertilizantes.
- Producción de herbicidas.
- Transporte (incluye el transporte de fertilizantes y herbicidas).
- Producción de semillas.
- Emisiones de campo (incluye las emisiones de metano y las generadas por la aplicación de fertilizantes y herbicidas).

La Figura 5 permite evaluar la contribución de cada una de estas etapas en las distintas categorías de impacto ambiental. Como esta contribución es muy similar para todos los escenarios estudiados se muestran como ejemplo en la figura los resultados correspondientes a la parcela experimental 1.

Las emisiones de campo (69,9%) es el subsistema del cultivo estudiado que mayor influencia tiene sobre la categoría de impacto CC. El metano y N₂O emitidos a la atmósfera son las principales causas del valor de esta categoría de impacto, ya que tienen un alto poder de absorción de la radiación solar. El segundo subsistema que más contribuye a este impacto es la producción de fertilizantes (12,6%). Esto es debido al elevado consumo

de energía requerido en este proceso, el cual genera una gran cantidad de emisiones de GEI.

La etapa del ciclo de vida del cultivo de arroz que contribuye en mayor medida a la categoría de impacto de CF es la producción de fertilizantes (53,7%), debido al elevado consumo de energía requerido. En segunda posición, con un 14,8% del impacto total, se encuentra el transporte de fertilizantes y herbicidas debido al combustible utilizado por los vehículos empleados. En cuanto a las operaciones del terreno, constituyen la tercera etapa que más contribuye a este impacto (13,4%), siendo el combustible consumido para el riego el principal responsable de ello.

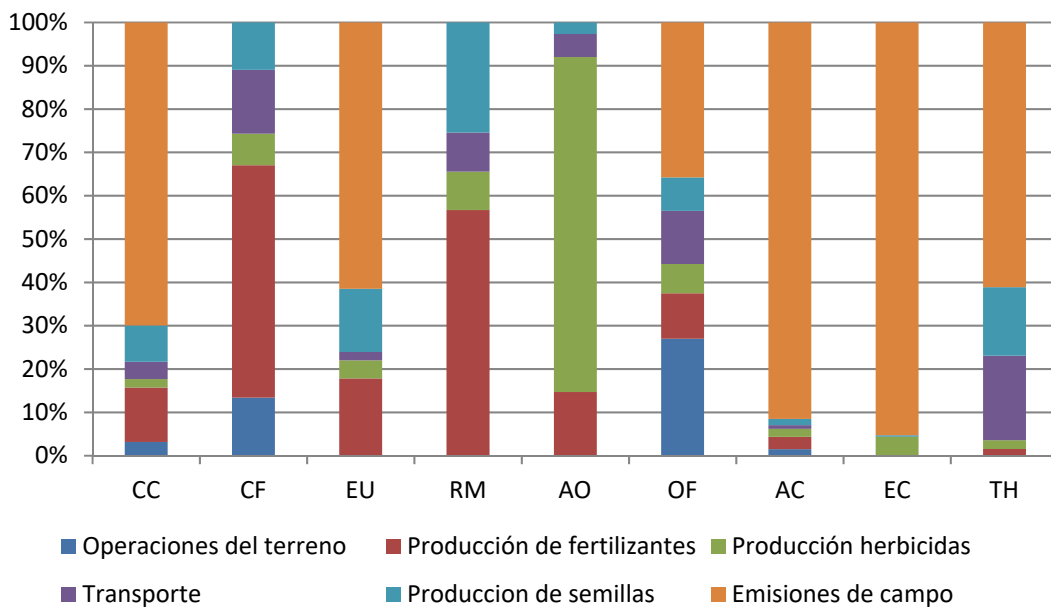


FIGURA 5. Contribución a las categorías de impacto ambiental por los subsistemas del cultivo de arroz durante la estación húmeda en la parcela experimental 1.

En el caso de la EU, la etapa que más le influye son las emisiones de campo (61,5%), principalmente por la lixiviación de nitratos y fosfatos debida a la aplicación de una elevada dosis de fertilizantes nitrogenados, así como a la textura franco-arenosa del suelo y el riego del mismo. Debido a la generación de vertidos durante la producción de fertilizantes, dicho subsistema supone un 17,7% del impacto total.

La categoría de impacto RM se encuentra influenciada principalmente por la producción de fertilizantes, contribuyendo hasta un 56,56% del total del impacto. La producción de semillas también contribuye notablemente a esta categoría (25,5%).

La producción de herbicidas es la etapa que más impacto causa en cuanto a la categoría AO (77,3%). Esto es a causa de la emisión de compuestos fluorocarbonados, compuestos que contribuyen a la destrucción de la capa de ozono. Estos compuestos se generan principalmente en la producción de electricidad utilizada para la fabricación de los herbicidas. La producción del herbicida Propanil ($6,14 \cdot 10^{-8}$ kg CFC-11 eq·kg arroz⁻¹) contribuye en mayor medida a este impacto que la correspondiente de los

herbicidas Weedone (2,4-D), Londax (bensulfurón metil) y Alligator (pendimetalina) ($2,62 \cdot 10^{10}$, $9,49 \cdot 10^{11}$ y $8,32 \cdot 10^{11}$ kg de CFC-11 eq, respectivamente). Esto es así, ya que el Propanil es el herbicida que se aplica en mayor cantidad, aparte de que su producción requiere un mayor aporte de energía para la elaboración de su materia activa, en comparación con el resto de productos fitosanitarios.

Las principales etapas que contribuyen a la categoría de impacto de OF son las emisiones de campo y las operaciones sobre el terreno, alcanzando una importancia sobre el total del impacto del 35,8 y 27%, respectivamente. Esto es a causa de las emisiones de CH₄ producidas por la descomposición de materia orgánica en condiciones anaeróbicas en las parcelas inundadas, y por las emisiones de NO_x y compuestos orgánicos volátiles generados durante la combustión del diésel usado por la maquinaria empleada.

En el caso de las categorías de AC y EC, las emisiones de campo contribuyen en más de un 90% del total de estos impactos, específicamente en un 91,5% y 95,3%, respectivamente. En el caso de la AC se debe a las emisiones de NH₃ generadas por la aplicación de fertilizantes nitrogenados, y en la EC, por la aplicación de herbicidas.

La categoría de TH se encuentra principalmente influenciada por las emisiones de campo, suponiendo un 61,1% del impacto total.

En general, las emisiones de campo constituyen la principal causa de gran parte de las categorías de impacto consideradas en el estudio, a excepción de las categorías de CF, RM, que están generadas principalmente por la producción de fertilizantes y AO, generada mayoritariamente por la producción de herbicidas.

3.4. Comparativa con otros estudios

Los resultados más importantes obtenidos en el presente estudio han sido comparados con los obtenidos en una serie de artículos científicos sobre el ACV del cultivo de arroz realizados en diversos países del mundo, concretamente Italia (Blengini and Busto, 2009; Fusi et al., 2014), Japón (Hokazono and Hayashi, 2012), Irán (Khoshnevison et al., 2014) y Tailandia (Thanawong et al., 2014; Yodkhum et al., 2017). Los límites del sistema descritos por Blengini and Busto (2009), Hokazono and Hayashi (2012) y Fusi et al. (2014), no coinciden con los del presente estudio ya que incluyen procesos posteriores a la cosecha como el transporte, almacenamiento y secado del arroz y, en algunos casos, la gestión de la paja. Al ser los límites del sistema más amplios en estos estudios, es posible que los impactos ambientales obtenidos sean mayores.

Los resultados obtenidos en la categoría de impacto CC se encuentran dentro del rango 0,58-0,64 kg CO₂ eq·kg de arroz⁻¹, valores similares a los indicados por Khoshnevison et al. (2014) y Yodkhum et al. (2017) de 0,762 y 0,58 kg CO₂ eq·kg de arroz⁻¹, respectivamente. Sin embargo, los obtenidos por otros autores como Hokazono and Hayashi (2012), Blengini and Busto (2009) y Thanawong et al. (2014), muestran valores muy superiores a estos (1,46, 2,76 y 4,87 kg CO₂ eq·kg de arroz, respectivamente). Señalar que los mayores valores de CC de Hokazono and Hayashi (2012) y Blengini and

Busto (2009) se deben en parte a que los límites del sistema consideran más etapas. Las diferencias observadas en esta categoría de impacto se deben, mayoritariamente, a la cantidad de metano emitido por el cultivo, por lo que a mayor emisión de este GEI mayor impacto producido. En el presente estudio la cantidad emitida por kg de arroz (17,3 y 16,2 g CH₄·kg de arroz⁻¹ durante la estación seca y húmeda, respectivamente) resultó notablemente inferior a la descrita por otros autores, obteniendo valores de 48 g CH₄·kg de arroz⁻¹ en Italia (Blengini y Busto, 2009), 57 g CH₄·kg de arroz⁻¹ en Japón (Hokazono and Hayashi, 2012) y 158,56 g CH₄·kg de arroz⁻¹ en Tailandia (Thanawong et al., 2014). Sin embargo, Khoshnevison et al. (2014) estimaron valores de emisión de metano de únicamente 2 g CH₄·kg de arroz⁻¹. La elevada emisión de metano producida en Tailandia (Thanawong et al., 2014) se debe, principalmente, al bajo rendimiento alcanzado (2,63 t·ha⁻¹) y a la utilización en los cálculos de un factor de emisión (Efc) específico para el noreste de Tailandia (nivel 3), mientras que, en el presente estudio, así como el resto mencionado previamente, se empleó el Efc general o de nivel 1 propuesto por el IPCC (2006). No obstante, el bajo impacto producido en Khoshnevison et al. (2014) y Yodkhum et al. (2017), así como en el presente estudio, también puede deberse a la ausencia de fertilizantes orgánicos en el suelo, los cuales pueden duplicar (Thanawong et al., 2014) o incluso cuadruplicar (Hokazono and Hayashi, 2012) estas emisiones.

Respecto a la EU, en el presente estudio se alcanzaron valores de impacto entre $8,70 \cdot 10^{-5}$ y $9,64 \cdot 10^{-5}$ kg P eq·kg arroz⁻¹. En comparación con los datos aportados por otros autores, que oscilan entre $6,78 \cdot 10^{-3}$ kg P eq·kg de arroz⁻¹ en Italia (Blengini and Busto, 2009), $7,6 \cdot 10^{-3}$ kg P eq·kg de arroz⁻¹ en Japón (Hokazono and Hayashi, 2012) y 0,08 kg P eq·kg de arroz⁻¹ en Tailandia (Thanawong et al., 2014), son valores que resultan significativamente menores. Señalar que estos autores calculan esta categoría con la metodología CML (2002), que difiere de la propuesta en ReCiPe (2013) en cuanto a las sustancias consideradas y sus factores de caracterización. Además, como se indicó anteriormente, Blengini and Busto, 2009) y Hokazono and Hayashi (2012) consideran más etapas en los límites del sistema. Sin embargo, Fusi et al. (2014) obtuvieron valores similares al del presente estudio ($7,55 \cdot 10^{-5}$ kg P eq·kg de arroz⁻¹). Esta categoría de impacto se produce principalmente a causa de la lixiviación de nitratos y fosfatos. De acuerdo con las estimaciones realizadas en el presente estudio, la cantidad de nitratos lixiviados durante la estación húmeda para las parcelas control y experimentales es de 25,9 y 18,6 g NO₃⁻·kg de arroz⁻¹, respectivamente. Estos valores resultan inferiores a los 38,76 g NO₃⁻·kg de arroz⁻¹ obtenidos por Thanawong et al. (2014) para la estación húmeda. En el caso del fósforo lixiviado (0,053 g P·kg de arroz⁻¹) resultó inferior a los valores alcanzados en Japón (0,7 g P·kg de arroz⁻¹) y Tailandia (21,94 g P·kg de arroz⁻¹). Esto se debe a la baja aplicación de fósforo en Ross-Béthio, 18 kg P₂O₅·ha⁻¹, en comparación a los 165 kg P₂O₅·ha⁻¹ aplicados en Japón (Hokazono and Hayashi, 2012).

Los resultados del estudio en cuanto a la AC (0,015-0,024 kg SO₂ eq·kg de arroz⁻¹) son inferiores a los 0,05 kg SO₂ eq·kg de arroz⁻¹ de Thanawong et

al. (2014). Sin embargo, resultaron similares a los $0,011 \text{ kg SO}_2 \text{ eq}\cdot\text{kg de arroz}^{-1}$ de Hokazono and Hayashi (2012) y superiores a los $6,15\cdot 10^{-3}$, $6,16\cdot 10^{-3}$ y $3,46\cdot 10^{-3}\text{kg SO}_2 \text{ eq}\cdot\text{kg de arroz}^{-1}$ de Fusi et al. (2014), Blengini and Busto (2009) y Khoshenevisev et al. (2014), respectivamente. Esta categoría de impacto está favorecida principalmente por las emisiones de NO_x y NH_3 debidas a la utilización de fertilizantes nitrogenados. Por tanto, el elevado impacto producido en el cultivo de Tailandia se debe a la gran cantidad de fertilizantes aplicada en el mismo ($687,5 \text{ kg fertilizante}\cdot\text{ha}^{-1}$ para un rendimiento de $2,63 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$), lo que supone una emisión de $24,41 \text{ g N-NH}_3\cdot\text{kg de arroz}^{-1}$ (Thanawong et al., 2014). En cambio, en la parcela control de la estación húmeda del presente estudio, se incorporaron al terreno $400 \text{ kg fertilizante}\cdot\text{ha}^{-1}$ (rendimiento de $5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$), por lo que las emisiones de NH_3 ($7,31 \text{ g N-NH}_3\cdot\text{kg de arroz}^{-1}$) fueron notablemente menores a las registradas en Tailandia. En el caso de Japón, estas emisiones fueron menores en comparación a los dos casos anteriores, liberando a la atmósfera $4,67 \text{ g N-NH}_3\cdot\text{kg de arroz}^{-1}$. A parte de la dosis de fertilizante empleada, es necesario tener en cuenta el tipo de fertilizante utilizado, puesto que el factor de emisión (FE), así como su contenido en N, puede variar significativamente de unos a otros. En el presente estudio se han empleado como fertilizantes la urea y el DAP. Aunque el DAP presenta un FE ligeramente superior al de la urea ($0,293$ y $0,243$, respectivamente), esta última produce más emisiones de NH_3 . Esto se debe a que la urea está constituida por un 46% de N, mientras que el DAP tan solo por un 18% N. En el estudio realizado en Japón, el fertilizante más empleado es el sulfato amónico que presenta un FE ($0,27$) similar a los mencionados previamente, sin embargo, se encuentra constituido por tan solo un 7% de N (Hokazono and Hayashi, 2012).

El consumo de agua es un factor muy importante en este tipo de cultivos, ya que se encuentran totalmente inundados durante casi todo su ciclo. En el presente estudio, el consumo de agua de riego para todo el ciclo de cultivo asciende a $2,99 \text{ m}^3\cdot\text{kg arroz}^{-1}$. Este valor resultó similar a los $3 \text{ m}^3\cdot\text{kg arroz}^{-1}$ de Thanawong et al. (2014), aunque inferior a los $4,9 \text{ m}^3\cdot\text{kg arroz}^{-1}$ de Blengini and Busto (2009).

En general, los impactos producidos por el cultivo de arroz en Ross-Béthio resultaron menores que los indicados en estudios similares. A grandes rasgos, esto puede ser debido, aparte de a las mencionadas diferencias en cuanto a los límites del sistema, a la ausencia de fertilizantes orgánicos que puedan aumentar las emisiones de metano, y a un rendimiento superior al conseguido en otros países.

4. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos de la evaluación ambiental del cultivo de arroz en Ross-Béthio (Senegal) se concluye que, en general, el cultivo de arroz durante la estación seca presenta un mayor impacto en comparación con los escenarios de la estación húmeda, especialmente con las parcelas experimentales. Esto indicaría que con la implementación de las propuestas de mejora se consigue una disminución del impacto ambiental. Sin embargo,

en el caso de la categoría de EC, las parcelas experimentales 1 y 2 de la estación húmeda obtuvieron valores muy superiores al resto de escenarios debido a la aplicación del producto fitosanitario Alligator (pendimetalina), en sustitución al herbicida Weedone (2,4-D).

En cuanto al análisis de contribución, se observó que las emisiones de campo constituyen la principal causa de gran parte de las categorías de impacto consideradas en el estudio, a excepción de las categorías de CF y RM, que están generadas principalmente por la producción de fertilizantes, y AO, generada mayoritariamente por la producción de herbicidas.

Los resultados obtenidos muestran la importancia de ajustar la dosis de fertilizante y herbicida aplicada al cultivo a fin de, no solo reducir las emisiones producidas por su aplicación, sino también las generadas durante su producción y transporte. También es importante elegir los productos fitosanitarios que generen un menor impacto. Por ello se pretende seguir profundizando en el estudio de posibles mejoras que contribuyan a aumentar la sostenibilidad del cultivo.

5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece la financiación recibida por el Centro de Cooperación al Desarrollo de la UPV bajo el programa ADSIDEO 2015.

6. REFERENCIAS

- Akiyama, H.; Yagi, K.; Yan, X.Y. (2005). Direct N₂O emissions from rice paddy fields: summary of available data. *Global Biogeochemical Cycles*, 19, article GB1005.
- Armanuos, A.; Negm, A.; Hamid, A. (2016). Life Cycle Assessment of Diesel Fuel and Solar Pumps in Operation Stage for Rice Cultivation in Tanta, Nile Delta, Egypt. *Int Procedia Technology*; 22: 478-485.
- Audsley, E.; Alber, S.; Clift, R.; Cowell, S.; Crettaz, P.; Gaillard, G.; Hausheer, J.; Jolliett, O.; Kleijn, R.; Mortensen, B.; Pearce, D.; Roger, E.; Teulon, H.; Weidema, B.; Van Zeijts, H. (2003). Harmonisation of environmental life cycle assessment for agriculture. Final Report. Concerted action AIR3-CT94-2028. European Commission DG VI Agriculture, Brussels.
- Bayer, C.; Zschornack, T.; Pedroso, G.M.; Rosa, C.M.; Camargo, E.S.; Boeni, M.; Marcolin, E.; Reis, C.E.S.; Santos, D.C. (2015). A seven-year study on the effects of fall soil tillage on yield-scaled greenhouse gas emission from flood irrigated rice in a humid subtropical climate. *Soil and Tillage Research*, 145:118-125.
- Berthoud, A.; Maupu, P.; Huet, C.; Poupert, A. (2011). Assessing freshwater ecotoxicity of agricultural products in life cycle assessment (LCA): a case study of wheat using French agricultural practices databases and USEtox model. *The International Journal of Life Cycle Assessment*; 16:841-847.
- Blengini, G.A. and Busto, M. (2009). The life cycle of rice: LCA of alternative agri-food chain management systems in Vercelli (Italy). *Journal of Environmental Management*, 90:1512–1522.
- Boulay, A.M.; Bare, J.; Benini, L.; Berger, M.; Lathuillière, M.J.; Manzardo, A.; ... Ridoutt, B. (2017). The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: Assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE). *Int J Life Cycle Assess* 1-11.
- Brentrup, F.; Küsters, J.; Lammel, J.; Kuhlmann, H. (2004). Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment (LCA)

- methodology: I. Theoretical concept of a LCA method tailored to crop production. *European Journal of Agronomy*, 20:247–264.
- Brodth, S.; Kendall, A.; Mohammadi, Y.; Arslan, A.; Yuan, J.; Lee, I-S.; Linquist, B. (2014). Life cycle greenhouse gas emissions in California rice production. *Field Crops Research*, 169:89–98.
- CML (2002). LCA: an operational guide to the ISO standards. In: Guinée, J. (Ed.), *Centrum Milieukunde Leiden (CML)*. Leiden University, Kluwer publisher, Dordrecht, Netherlands.
- D'Aquino, P.; Seck, S.M.; Camara, S. (2002). Un SIG conçu par les acteurs: l'opération pilote POAS au Sénégal. *L'Espace Géographique*, 1: 23-37.
- EMEP/EEA; Hutchings, N.; Webb, J.; Amon, B. (2013). Crop production and agricultural soils. Emission inventory guidebook.
- EMEP/EEA; Webb, J.; Hutchings, N.; Amon, B. (2009). Air pollutant emission inventory guidebook. Technical report n°. 6/2009 Part B-4G. European Environment Agency, Copenhagen.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) (2017).
- Fusi, A.; Bacenetti, J.; González-García, S.; Vercesi, A.; Bocchi, S.; Fiala, M. (2014). Environmental profile of paddy rice cultivation with different straw management. *Science of the Total Environment*, 494–495: 119–128.
- Goedkoop, M.; Heijungs, R.; Huijbregts, M.; Schryver, A.; Struijs, J.; van Zelm, R. (2013). ReCiPe 2008: a lifecycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. First edition (revised), Report I: Characterisation.
- Heros, E. (2013). Manejo integrado en el cultivo de arroz. *Guía Técnica*. Agrobanco. San Martín, Perú, pp. 26.
- Hokazono, S. and Hayashi, K. (2012). Variability in environmental impacts during conversion from conventional to organic farming: a comparison among three rice production systems in Japan. *Journal of Cleaner Production*. 28:101-112.
- IPCC (2006). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Dirección URL: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/index.html>> [Consulta: 15 de mayo de 2017]
- ISO 14040 (2006). *Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Principios y marco de Referencia*. AEN/CTN 150 Gestión Medioambiental.
- Julbe, L. (2016). Estudio medioambiental del cultivo de arroz en Ross-Béthio (Senegal). Trabajo fin de carrera. Universitat Politècnica de València, Valencia, España.
- Khoshnevisan, B.; Rajaeifar, M.A.; Clark, S.; Shamahirband, S.; Anuar, N.B.; Mohd Shuib, N.L.; Gani, A. (2014). Evaluation of traditional and consolidated rice farms in Guilan Province, Iran, using life cycle assessment and fuzzy modeling. *Science of the Total Environment*, 481: 242–251.
- Luo, Y.; Spurlock, F.; Gill, S.; Goh, K.S. (2012). Modeling complexity in simulating pesticide fate in a rice paddy. *Water Research*, 46:6300-6308.
- Marc Mess (2015). Dinámicas campesinas 37. Los efectos de la importación de arroz en dos países del África Occidental. *Dinámicas campesinas* 37. Los efectos de la importación de arroz en dos países del África Occidental.
- Marc Mess (2016). Dinámicas campesinas 42. Balance del sector del arroz en cinco países del África Occidental.
- Nemecek, T.; Bengoa, X.; Lansche, J.; Mouron, P.; Rossi, V.; Humbert, S. (2014). Methodological Guidelines for the Life Cycle Inventory of Agricultural Products. Version 2.0. World Food LCA Database (WFLDB). Quantis and Agroscope, Lausanne and Zurich, Switzerland.
- Núñez, M.; Pfister, S.; Antón, A.; Muñoz, P.; Hellweg, S.; Koehler, A. (2012). Assessing the environmental impact of water consumption by energy crops grown in Spain. *Journal of Industrial Ecology*, 17(1): 90-102.
- Oumar, E. and Romagosa, F. (2013). El impacto del turismo en la Lengua de Barbarie (delta del río Senegal). *Cuadernos de Turismo*, 31:289-309.
- Prasad, R.; Shivay, Y.S.; Kumar, D. (2017). Current Status, Challenges, and Opportunities in Rice Production. B.S. Chauhan et al. (eds.), *Rice Production Worldwide*. Springer. Pp. 1–32.

- Renaud-Gentié, C.; Dijkman, T.J.; Bjørn, A.; Birkved, M. (2015). Pesticide emission modelling and freshwater ecotoxicity assessment for Grapevine LCA: adaptation of PestLCI 2.0 to viticulture. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 20:1528–1543.
- Ribal, J.; Ramírez-Sanz, C.; Estruch, V.; Clemente, G.; Sanjuán, N. (2017). Organic versus conventional citrus. Impact assessment and variability analysis in the Comunitat Valenciana (Spain). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(4): 571-586.
- Rosenbaum, R.K.; Bachmann, T.M.; Gold, L.S.; Huijbregts, M.A.; Jolliet, O.; Juraske, R; et al. (2008). USEtox—the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. *The International Journal of Life Cycle Assess*; 13(7): 532-546.
- SAED (2009). Riz Irrigué: le potentiel technico-économique pour l'atteinte de l'autosuffisance en riz vers l'horizon 2012. MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, République du Sènegal.
- SAG (Secretaria de agricultura y ganadería) y DICTA (Dirección de Ciencias y Tecnología Agropecuari) (2003). Manual técnico del cultivo de arroz (*Oryza sativa*) para extensionistas y productores. Comayagua, Honduras, pp. 59.
- Seck, P.A.; Touré, A.; Coulibaly, J.Y.; Diagne, A.; Woperies, C.S. (2013). Africa's rice economy before and after the 2008 rice crisis. In: Wopereis, M.C.S., Johnson, D. E., Ahmadi, N., Tollens, E., Jalloh, A.(Eds.), *Realizing Africa's Rice Promise*. CAB International, Wallingford, UK, pp. 24–34.
- Soam, S.; Borjesson. P.; Sharma, P.K.; Gupta, R.P.; Tuli, D.K.; Kumar, R. (2017). Life cycle assessment of rice straw utilization practices in India. *Bioresource Technology*, 228:89–98.
- Thanawong, K.; Perret, S.R.; Basset-Mens, C. (2014). Eco-efficiency of paddy rice production in Northeastern Thailand: a comparison of rain-fed and irrigated cropping systems. *Journal of Cleaner Production*, 73:204-217.
- USAID (2009). Global food security response: West Africa rice value chain analysis. United States Agency for International Development, Washington, DC (Micro- Report nº. 161).
- USDA (2017). U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Dirección URL <<https://www.usda.gov/>> [Consulta: 03 de mayo de 2017].
- Wang, M.; Xia, X.; Zhang, Q.; Liu, J. (2010). Life cycle assessment of a rice production system in Taihu region, China. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 17 (2):157-161.
- Weidema, B.P.; Bauer, C.; Hischer, R.; Mutel, C.; Nemecek, T.; Reinhard, J.; Vadenbo, C.O.; Wernet, G. (2013). Overview and methodology. Data quality guideline for the ecoinvent database version 3. *Ecoinvent Report 1(v3)*. St. Gallen: The ecoinvent Centre.
- Yodkhum, S.; Gheewala, S.H.; Sampattagul, S. (2017). Life cycle GHG evaluation of organic rice production in northern Thailand. *Journal of Environmental Management* 196: 217-223.