

# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA  
AGRONÒMICA I DEL MEDI NATURAL



## ***Evaluación del impacto del uso del agua en el cultivo de arroz en Ross-Béthio (Senegal)***

TRABAJO FIN DE MÁSTER UNIVERSITARIO EN CIENCIA E  
INGENIERÍA DE LOS ALIMENTOS

ALUMNA: LAURA FERRANDIS MARTÍNEZ

TUTORA ACADÉMICA: NEUS SANJUÁN PELLICER

COTUTORA ACADÉMICA: NEUS ESCOBAR LANZUELA

*Curso Académico: 2015/16*

VALENCIA, 14 de Septiembre de 2016



**TITLE:** Assessing the impact of water use in rice cultivation in Ross-Béthio (Senegal).

**ABSTRACT:** Rice is the main food source in the Republic of Senegal. However, 80% of the rice consumed in the country is imported. A boost to local production of rice is a key factor to reach food security in the country. Nevertheless, this goal should be carried out under a global perspective to attain a sustainable agriculture. The aim of this study is to assess the impacts derived from water use in rice cultivation in the region Ross-Béthio. This requires carrying out an inventory of water consumption considering all the life cycle stages of rice farming. Furthermore, different impact indicators for the consumption of blue water, green water and gray water have been calculated. The estimations have been focused on the dry season cultivation of rice for the year 2016 (from March to July).

The inventory analysis highlighted the importance of the irrigation stage, since it involves the major consumption of the crop in terms of water use. The results of the blue water indicator show that May is the most critical month for maintaining an irrigated crop. However, green water resources are not affected by the crop, while the impacts of gray water consumption focus on problems associated with eutrophication and ecotoxicity. These are mainly due to the use of fertilizers and herbicides.

In future crop seasons, different alternatives will be explored to decrease the impacts associated to water use, such as crop rotation practices, or a reduction in the use of fertilizers and herbicides by, for exemple, indirect sowing in seedbeds.

**KEY WORDS:** Water use, rice, life cycle assessment, blue water, green water, grey water.

**Author of the TFM:** Mrs Laura Ferrandis Martinez

**Academic tutor:** Prof. Dr. Neus Sanjuán Pellicer

**Cotutor:** Dr. Neus Escobar Lanzuela

September, 2016 Valencia

**TÍTULO:** Evaluación del impacto del uso del agua en el cultivo de arroz en Ross-Béthio (Senegal).

**RESUMEN:** El arroz es la principal fuente de alimentación de la República de Senegal. Sin embargo, el 80% del arroz que se consume en el país es importado. Un impulso en la producción local de arroz supondría un factor clave para garantizar la seguridad alimentaria del país. Sin embargo, este propósito ha de llevarse a cabo bajo una perspectiva global para conseguir una agricultura sostenible. Concretamente, el objetivo de este estudio es evaluar los impactos derivados del uso del agua en el cultivo de arroz en la región de Ross-Béthio. Para ello es necesario llevar a cabo una evaluación exhaustiva, mediante la realización de un inventario del consumo de agua considerando las diferentes etapas del ciclo de vida de la producción de arroz. Asimismo, se han calculado diferentes indicadores de impacto asociados al consumo de *agua azul*, *agua verde* y *agua gris*. Las estimaciones se han centrado en la campaña de cultivo correspondiente a la estación seca del año 2016 (Marzo a Julio).

Los resultados del inventario de agua manifestaron la importancia de la etapa de riego, ya que esta supone el consumo de agua mayoritario en el cultivo de arroz. Los resultados del consumo de *agua azul* ponen de manifiesto que el mes de mayo resulta el mes más crítico para el mantenimiento de un cultivo irrigado como es el caso de estudio. Sin embargo, los recursos de *agua verde* no se ven afectados por el cultivo, mientras que los impactos derivados del consumo de *agua gris* son debidos principalmente a la aplicación de fertilizantes y herbicidas y se centran en problemas asociados a la ecotoxicidad y eutrofización del agua dulce.

En futuras campañas se pretende explorar diferentes alternativas para alcanzar una mayor sostenibilidad del cultivo, como son las prácticas de cultivo rotacional o la disminución del uso de fertilizantes y pesticidas con técnicas como la siembra indirecta en semilleros.

**PALABRAS CLAVE:** Uso del agua, arroz, análisis de ciclo de vida, agua azul, agua verde, agua gris.

**Autora del TFM:** Dña. Laura Ferrandis Martínez

**Tutora académica:** Prof. Dña. Neus Sanjuán Pellicer

**Cotutora:** Dña. Neus Escobar Lanzuela

Valencia, septiembre 2016

# ÍNDICE

<b>1.INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Marco de trabajo y objetivo .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Evaluación del impacto del uso del agua: huella hídrica .....</b>	<b>2</b>
<b>2. MÉTODOS.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1. Definición del objetivo y alcance .....</b>	<b>4</b>
<b>2.2. Descripción del sistema.....</b>	<b>5</b>
<b>2.3. Análisis de Inventario.....</b>	<b>7</b>
<b>2.4. Evaluación del impacto ambiental.....</b>	<b>7</b>
2.4.1. Evaluación del consumo de agua azul.....	8
2.4.2. Evaluación del consumo de agua verde .....	8
2.4.3. Evaluación del consumo de agua gris.....	10
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>10</b>
<b>3.1. Inventario de agua .....</b>	<b>10</b>
<b>3.2. Impacto ambiental .....</b>	<b>12</b>
3.2.1. Impacto derivado del consumo de Agua Azul y Agua Verde.....	12
3.2.1.1. Impacto derivado del consumo de Agua Azul .....	13
3.2.1.2. Impacto derivado del consumo de Agua Verde.....	14
3.2.2. Impacto derivado del consumo de Agua Gris.....	15
<b>4. PROPUESTAS DE MEJORA .....</b>	<b>16</b>
<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>17</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>18</b>
<b>7. ANEXOS .....</b>	<b>21</b>
<b>Anexo 1. Análisis del suelo.....</b>	<b>21</b>

## Índice de figuras y tablas

**Figura 1.** Situación de Ross-Béthio al noroeste de Senegal.

**Figura 2.** Etapas incluidas en el sistema de estudio para el ACV del cultivo de arroz en Ross-Béthio.

**Figura 3.** Fases de desarrollo del cultivo de arroz para la variedad SAHEL 108.

**Figura 4.** Resultados del inventario de flujo de agua: volumen de agua consumido en cada etapa para producir una tonelada de arroz (A), volumen de agua consumido en las etapas minoritarias para producir una tonelada de arroz (B).

**Figura 5.** Impacto derivado del consumo de Agua Azul (IAA). Las líneas corresponden a la dosis de riego ( $m^3/ha$ , en el eje secundario).

**Figura 6.** Resultados de los indicadores *midpoint* de ecotoxicidad (A) y eutrofización (B) del agua dulce para el ciclo productivo de arroz en Ross Béthio correspondiente a la estación seca de 2016..

**Tabla 1.** Tratamientos herbicidas aplicados en el cultivo.

**Tabla 2.** Tratamientos fertilizantes aplicados en el cultivo.

**Tabla 3.** Factor de caracterización  $IEH_{mes}$  y consumo de *agua azul* y *agua verde* por tonelada de arroz.

**Tabla 4.** Consumo de *agua verde* del cultivo de arroz ( $AV_C$ ), consumo de *agua verde* del cultivo de referencia ( $AV_0$ ), diferencial del consumo de *agua verde* ( $dAV$ ) y factor de caracterización del Impacto derivado del consumo de Agua Verde (IAV), desde un enfoque productivo.

**Tabla 5.** Índice de Escasez de Agua Verde para el cultivo de arroz ( $IEAV_C$ ) y para el cultivo de referencia ( $IEAV_0$ ).

**Tabla 6.** Indicadores *midpoint* de ecotoxicidad y eutrofización del agua dulce.

**Tabla A1.** Resultados del análisis del suelo de estudio.

## 1.INTRODUCCIÓN

### 1.1. Marco de trabajo y objetivo

La República de Senegal es un país costero de África occidental cuya dieta se basa en el consumo de cereales, principalmente de arroz. Sin embargo, el 80% del arroz que se consume en el país es importado ([Ministère de l'Agriculture République du Sénégal, 2009](#)). Por otro lado, la superficie cultivable de Senegal supera las 3.800.000 ha (19% del territorio nacional), de las cuales sólo 2.500.000 ha están en explotación, esto es, un 66% de la superficie cultivable y un 13% de la superficie total del país ([FAO AQUASTAT, 2005](#)). Así pues, el impulso de la producción local de arroz para lograr un mayor índice de autoabastecimiento supone una opción estratégica para el país, con el objetivo primordial de alcanzar la seguridad alimentaria. Este reto ha de abordarse, sin embargo, desde una perspectiva global que permita conseguir tanto una mayor rentabilidad económica como el establecimiento de una agricultura sostenible donde la salud medioambiental y la equidad social estén garantizadas.

El presente trabajo se enmarca dentro de un proyecto financiado por el Centro de Cooperación al Desarrollo (CCD) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), desarrollado por investigadores de esta universidad, el cual lleva por título “Contribución a la sostenibilidad del cultivo de arroz en la región de Saint Louis (Senegal)”, concretamente en la localidad de Ross-Béthio (Figura 1). Este proyecto se desarrolla a lo largo de las dos campañas de los años 2016 y 2017 a partir de 140 ha cultivadas por la Unión de Mujeres Productoras de Ross-Béthio, contando con el apoyo de Cáritas Española y Cáritas Senegal. Se trata de proponer prácticas agrarias más sostenibles orientadas a mejorar los rendimientos y aumentar el beneficio económico del cultivo, a la vez que se disminuye el impacto ambiental asociado. Así pues, la sostenibilidad de la producción se aborda desde el punto de vista económico y ambiental simultáneamente.



**Figura 1.** Situación de Ross-Béthio al noroeste de Senegal ([Lexilogos, 2016](#)).

Ha de tenerse en cuenta que el cultivo de arroz consume gran cantidad de recursos (agua, tierra, energía y productos químicos), a la vez que implica ciertas emisiones en los distintos compartimentos ambientales (fundamentalmente, ecosistemas acuáticos y terrestres); esto genera impactos

ambientales de diversa índole. El cultivo del arroz en la región de Ross-Béthio se cultiva necesariamente bajo irrigación, lo cual genera un estrés adicional en una región ya de por sí árida con un clima subsahariano desértico, a pesar de la proximidad del río Senegal (UNESCO, 2003). Es por esto que la cuantificación de los impactos asociados al consumo del agua requieren especial atención en la mejora de la sostenibilidad de los sistemas productivos. Cabe señalar que Senegal es también objeto de los efectos del cambio climático, que se traducen en un aumento de la temperatura media y cambios en los patrones de lluvias (Tilman et al., 2001; Wenjun et al., 2006). La medida de estos impactos debidos al consumo del agua debe abordar esta estacionalidad en la disponibilidad del recurso. El objetivo del sector agrícola no debe pues centrarse únicamente en maximizar la productividad para alcanzar la seguridad alimentaria, sino que debe incorporar también aspectos ambientales como la adaptación y mitigación del cambio climático, como factores críticos en el desarrollo del país.

Ante esta problemática, el presente trabajo pretende evaluar los impactos asociados al uso del agua en el cultivo de arroz en la localidad de Ross-Béthio, en la región de Saint Louis (Senegal). Para ello, se han calculado diferentes indicadores de impacto para el consumo de *agua azul*, *agua verde* y *agua gris*. Las estimaciones se centran en la primera de las campañas realizadas en el 2016, durante la estación seca (marzo a julio), que, en análisis posteriores, se compararán con los de la estación húmeda (julio a diciembre). El objetivo último es proponer acciones estratégicas que sería conveniente llevar a cabo para minimizar los impactos ambientales relacionados con el uso del agua como elemento clave hacia la consecución de la sostenibilidad del cultivo del arroz en la región.

## 1.2. Evaluación del impacto del uso del agua: huella hídrica

Según la norma internacional ISO 14046: 2014, el uso del agua ha de considerarse en su sentido más amplio, incluyendo no solo el consumo total de agua de un sistema, sino también la degradación de la misma (por contaminación). Es por ello que el término “huella hídrica” sólo debe emplearse para hacer referencia a los resultados obtenidos tras emplear modelos de evaluación de todos los impactos relevantes relacionados con el uso del agua; es decir, un inventario volumétrico es insuficiente para evaluar la huella hídrica de un proceso porque los resultados de dicho inventario y los impactos relacionados con el uso del agua no se ven generalmente correlacionados (Kounina et al., 2012).

Existen muchos tipos de impactos ambientales relacionados con el uso del agua, por lo que su evaluación y medición puede llegar a ser muy compleja (Boulay et al., 2015). Por ejemplo, el consumo de agua puede generar escasez en el recurso, a la vez que las emisiones al agua debidas al uso de fertilizantes pueden contribuir a la eutrofización de los cuerpos de agua superficial o a la acidificación de los suelos; asimismo el uso de pesticidas y herbicidas causa impactos de toxicidad de los ecosistemas. Es por esto que, en muchas ocasiones, la expresión de huella hídrica va acompañada de algún tipo de especificación: por ejemplo, “la huella de la escasez de agua” ya que, en ese caso, sólo se evalúa un aspecto específico del uso del agua.

Una de las definiciones de las 50 que contempla la norma, es la que define la huella hídrica como “*métricas que cuantifican los impactos ambientales potenciales relacionados con el agua*” (ISO, 2014). Al definirlo como métrica, la huella hídrica puede corresponderse con los métodos de cuantificación propuestos por diversos autores (Hoekstra et al., 2011, Kounina et al., 2012, Pfister y Bayer, 2014, Milà i Canals et al., 2009). Así, la definición se ha dejado abierta para permitir la elección del método de cuantificación que más se adapte en cada caso.

Si bien los métodos para la cuantificación de los impactos relacionados con la calidad del agua, como la eutrofización o la acidificación, están ampliamente desarrollados y consensuados, actualmente existe una gran variedad de índices de estrés hídrico regionalizados que se emplean en la literatura para el cálculo de la huella de escasez de agua (Ridoutt y Pfister, 2010; Pfister y Bayer, 2014). Como esfuerzo paralelo, cabe mencionar que el proyecto denominado WULCA, perteneciente a la Iniciativa de Ciclo de Vida UNEP/SETAC, está llevando a cabo un proceso de consenso en las metodologías a aplicar. Con él se espera obtener un nuevo conjunto de datos de los factores de caracterización para el cálculo de las huellas de escasez de agua, para así lograr la comparabilidad entre las huellas (WULCA, 2007). En definitiva, lo que se intenta es ser capaces de obtener la huella hídrica de un proceso en cuestión en relación con la disponibilidad de agua de la zona donde este tiene lugar.

En relación al concepto de huella hídrica asociado con el crecimiento de un cultivo en particular, ésta se define como el *volumen total de agua dulce empleado, directa o indirectamente, a lo largo de todo el ciclo productivo del cultivo en cuestión*, expresado como volumen de agua empleado (metros cúbicos, m<sup>3</sup>) por cantidad de cultivo recolectada (kilogramos, kg). Este consumo de agua distingue a su vez tres componentes, las cuales hacen referencia a tres tipos de agua según su procedencia: *agua azul*, *agua verde*, y *agua gris*. El *agua azul* es el volumen de agua procedente de la superficie o de aguas subterráneas, incluyendo el agua de riego, que se evapora o se incorpora en el producto cultivado; el *agua verde* es el volumen de agua procedente de lluvia que se evapora o se incorpora en el producto cultivado; mientras que el *agua gris* se define como el volumen de agua necesario para asimilar la contaminación generada por dicho cultivo (Hoekstra et al., 2011).

Como se indicó anteriormente, las metodologías para la evaluación del impacto derivado del uso de agua, entendido como un efecto sobre el medio ambiente, no deben centrarse exclusivamente en la cuantificación de entradas y salidas de agua, sino que también han de tener en cuenta los efectos en cuanto a disponibilidad de recursos de agua dulce, calidad de los ecosistemas o salud humana. Algunos de estos métodos sugieren el uso de indicadores que miden los efectos intermedios de dichos impactos, lo que se conoce como indicadores *midpoint* (Milà i Canals et al., 2009; Pfister y Bayer, 2014). Éstos hacen referencia a problemas que afectan directamente al medio ambiente tales como la ecotoxicidad, eutrofización, acidificación, escasez, disponibilidad, etc., en este caso asociados al uso del agua. Por otro lado, se han desarrollado también indicadores para el análisis de los efectos últimos que estos impactos ambientales intermedios generan sobre los humanos y los ecosistemas, llamados indicadores *endpoint* (Pfister et al., 2009). Estos últimos miden categorías de impacto finales que afectan directamente a la sociedad y por



tanto también pueden considerarse como categorías de daño. Son concretamente la salud humana, la diversidad de los ecosistemas y el estado de los recursos disponibles.

Las metodologías que establecen indicadores *midpoint* o *endpoint* citadas en el párrafo anterior, son compatibles con el concepto de huella hídrica que implica un análisis del sistema bajo el enfoque de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), y se centran en las consecuencias medioambientales del consumo de *agua azul*. Asimismo, otras metodologías se basan en el cálculo de indicadores relacionados con la privación o escasez de *agua verde*, también desde una perspectiva de ACV (Núñez et al., 2012). Por su parte, los métodos asociados a la degradación de agua o consumo de *agua gris* se centran en las vías de impacto más comunes; acidificación y eutrofización del agua dulce, ecotoxicidad acuática o toxicidad en humanos vía exposición al agua contaminada (Kounina et al., 2013; Pfister et al., 2009; Boulay et al., 2015; Goedkoop et al., 2012; Hoekstra et al., 2012).

## 2. MÉTODOS

Para la evaluación de los impactos derivados del uso del agua desde una perspectiva de ACV y según la norma ISO 14040, el estudio se llevó a cabo en cuatro etapas: definición de objetivo y alcance, análisis de inventario, evaluación del impacto e interpretación de los resultados.

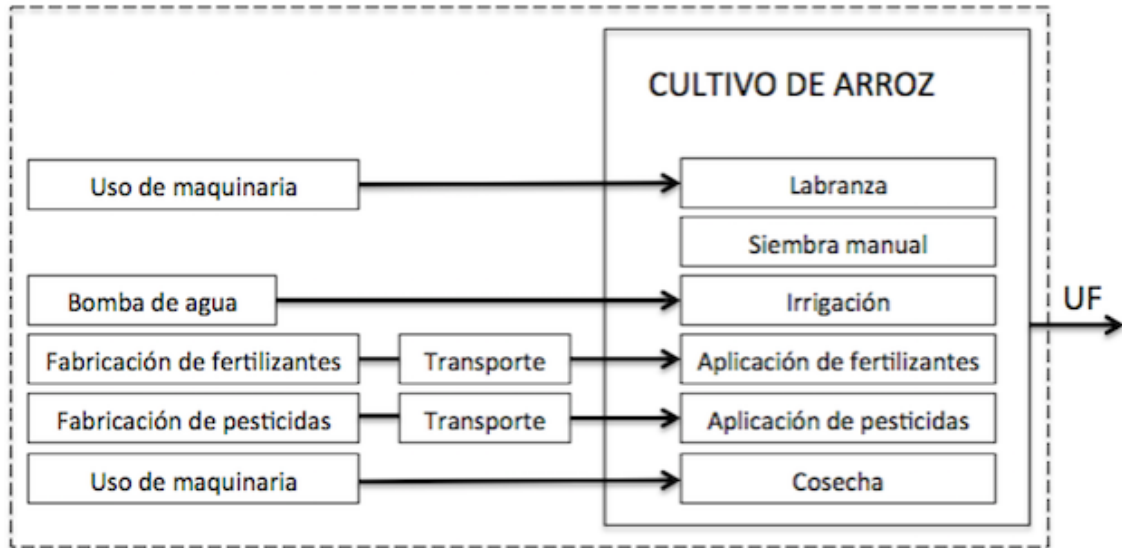
### 2.1. Definición del objetivo y alcance

Como se ha especificado en la sección 1.1, el objetivo final del trabajo consiste en la caracterización a nivel regional del impacto derivado del uso del agua que se lleva a cabo con las prácticas de cultivo que emplea actualmente la Unión de Mujeres Productoras de Arroz de Ross-Béthio. En la Unión, las mujeres se constituyen en los denominados Grupos de Interés Económico (GIE), es decir, grupos de mujeres que se organizan para cultivar dos cosechas de arroz anuales. Estas dos cosechas se llevan a cabo en la estación seca (que comienza entre febrero y marzo hasta junio o julio) y en la estación húmeda (que va de finales de julio o principios de agosto hasta diciembre) en el valle del río Senegal, región de Saint-Louis, Senegal. Concretamente, este trabajo se basa en los datos obtenidos a partir de las prácticas de cultivo efectuadas durante la estación seca de 2016 en 30 ha de cultivo, distribuidas en 7 GIES.

La unidad funcional (UF) es la magnitud de referencia a la que se asocian todos los flujos contemplados en los límites del sistema. En este caso la UF se definió teniendo en cuenta tanto el enfoque productivo, como el espacial (Núñez et al., 2012). La UF, desde el punto de vista de la productividad, se definió como 1 tonelada de arroz ya que el fin último del proceso productivo es proporcionar alimento para el autoabastecimiento de la población senegalesa. Sin embargo, con este estudio, también se pretende minimizar los impactos medioambientales por área cultivada; así, la UF para referirnos a este aspecto quedó definida como el volumen de agua consumida ( $m^3$ ) por área cultivada (ha).

Los límites del sistema definen los procesos que se incluyen en el sistema a analizar (Figura 2). En este estudio las etapas a considerar fueron: a) la producción de pesticidas, b) la producción de herbicidas, así como su

transporte hasta el campo, c) el uso de maquinaria y d) el uso de la bomba de riego, incluyendo la producción de diésel en ambos casos. En la Figura 2 se muestran las etapas incluidas en los límites del sistema que contribuyen a la huella hídrica correspondiente al cultivo de arroz.

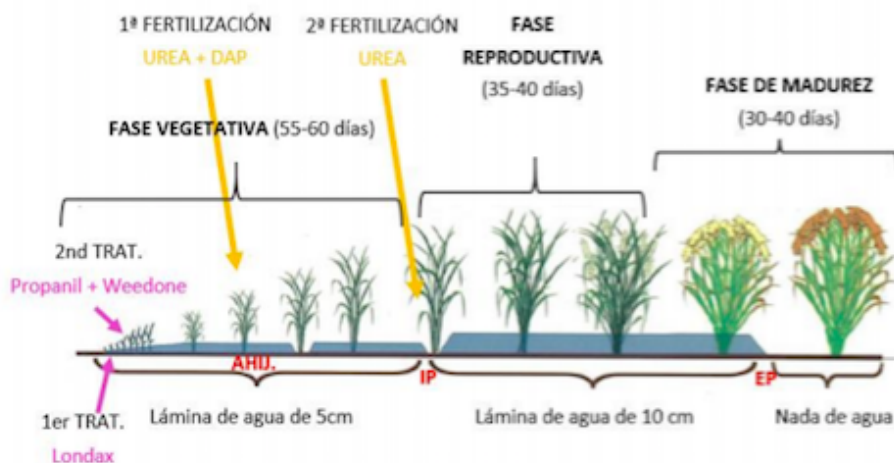


**Figura 2.** Etapas incluidas en el sistema de estudio para el ACV del cultivo de arroz en Ross-Béthio.

## 2.2. Descripción del sistema

Ross-Béthio es una población situada en la provincia de Saint Louis en el noroeste de Senegal (Figura 3.1), a 47 m sobre el nivel del mar. Se encuentra en el Valle del río Senegal, cuya agua es utilizada para el riego de los campos de arroz. En los últimos años, la realización de una apertura en el llamado *Langue de la Barbarie* ha modificado las condiciones del flujo del agua del río, de manera que es más sensible a las mareas; esto ha ocasionado un aumento de la salinización de los suelos en muchas zonas de la provincia (Oumar y Romagosa, 2013). En el anexo I se muestran los resultados de un análisis de caracterización del suelo llevado a cabo en la zona de estudio.

El sistema objeto de estudio consiste en un cultivo de regadío donde el arroz, en campos inundados, crece en condiciones anaerobias. Estos campos han sido cultivados con la variedad SAHEL 108, una de las denominadas variedades NERICA (NEw Rice for AfriCA – nuevo arroz para África) desarrolladas por la Asociación del África Occidental para el Fomento del Arroz (ADRAO). En concreto, la variedad SAHEL 108 posee un ciclo de vida breve que permite dos cosechas anuales; sin embargo, se trata de una variedad sensible a la salinidad (Wopereis et al., 2008). Así pues, el uso de esta variedad implica una duración total del ciclo productivo en torno a 125 días, donde la fase vegetativa abarca los primeros 55 días, la fase reproductiva los siguiente 40 días y por último, el periodo de maduración supone los últimos 30 días. En la Figura 3 se muestran las diferentes etapas del cultivo.



**Figura 3.** Fases de desarrollo del cultivo de arroz para la variedad SAHEL 108.

Para el cultivo de arroz irrigado, en primer lugar es necesario llevar a cabo la preparación de la parcela con la limpieza y la reparación de diques y canales; a continuación, se realiza un laboreo superficial con una grada de discos. Paralelamente, se lleva a cabo la preparación de las semillas; consiste en dejarlas a remojo durante 24 horas y seguidamente incubarlas durante 24 horas más a temperatura ambiente. Es entonces cuando se procede a la siembra manual a voleo sobre el suelo ya aplanado y enfangado, con una dosis de 120 kg de semillas/ha (SAED, 2009). Una vez distribuida la semilla en el suelo, esta se tapa para que quede a una profundidad de unos 5 cm y reducir así el daño por aves y otros animales.

Una vez sembrado el arroz, se procede a la primera irrigación del campo con una lámina de agua de una altura de alrededor de 5 cm, que habrá de mantenerse durante la fase vegetativa hasta la iniciación panicular, esto es, durante los primeros 55 días de cultivo. Posteriormente, con el inicio de la fase reproductiva, es necesario duplicar la altura de la lámina de agua del arrozal hasta alcanzar cerca de 10 cm de altura. Esta habrá de mantenerse hasta pasadas dos semanas de la floración, lo que supone 55 días más. Es en ese momento, cuando el cultivo alcanza el denominado estado pastoso, cuando se procede al drenaje definitivo de las parcelas. Entonces, harán falta 2 semanas más para que el arroz acabe de madurar para poder ser recolectado a máquina. El rendimiento medio obtenido por la Unión siguiendo estas prácticas de cultivo es de 5 t/ha.

Por su parte, el control selectivo de malezas se lleva a cabo con la aplicación de 3 herbicidas de forma manual, que se emplean habitualmente en el cultivo de arrozales (Tabla 1). Previamente a su aplicación se realiza un drenaje completo de la parcela y se vuelve a regar 48 horas después del tratamiento.

**Tabla 1.** Tratamientos herbicidas aplicados en el cultivo.

Herbicida (materia activa)	kg/ha de producto (kg/ha de materia activa)	Aplicación
Londax® (bensulfurón-metil)	0.1 (0.06)	5 días post-siembra
Weedone® 650 (Ácido 2,4-diclorofenoxiacético)	2.312 (1.387)	20 días post-siembra
Propanil 480 Proficol (Propanil)	4.216 (1.92)	20 días post-siembra

En cuanto al uso de fertilizantes, se emplean fosfato diamónico (DAP) y urea. Estos se aplican de forma manual en dos abonados de cobertera. Las condiciones de aplicación se detallan en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Tratamientos fertilizantes aplicados en el cultivo.

Fertilizante	kg/ha de producto (kg/ha de Nitrógeno)	Aplicación
Fosfato diamónico (DAP)	100 (18)	30 días post-siembra
Urea	350 (161)	30 días post-siembra (1ª aplic.) 55 días post-siembra (2ª aplic.)

Para optimizar la utilización de los fertilizantes, es necesario aplicarlos sobre una parcela sin malas hierbas y sobre un suelo fangoso o sobre una fina lámina de agua, la cual se tiene que elevar pasado un mínimo de 24 horas.

### 2.3. Análisis de Inventario

Para llevar a cabo la estimación de la huella hídrica del cultivo en cuestión, se planteó inicialmente un análisis de inventario centrado en el consumo de agua, expresado en metros cúbicos (m<sup>3</sup>), derivado de las diferentes etapas implicadas en el ciclo productivo, explicadas en la sección anterior. Esta fase del ACV consiste en recopilar fundamentalmente datos de entradas de agua en el sistema, no solo como agua consumida en el riego sino también la asociada a los distintos inputs agrícolas.

Los datos correspondientes a la fabricación de los fertilizantes y herbicidas se tomaron de la base de datos de Ecoinvent 3.1 (Weidema et al., 2013). En cuanto al transporte de los fertilizantes, se asumió que las distancias entre las fábricas y el campo de cultivo fueron 292 km y 3.230 para el DAP y la urea respectivamente, correspondientes al transporte desde Dakar y Lagos, como puntos de origen más probables. Por su parte, las estimaciones para el consumo de crudo en el transporte de los herbicidas se calcularon según los procesos en la base de datos Ecoinvent 3.1 (Weidema et al., 2013), suponiendo que éstos son fabricados en Francia y China y transportados en barco hasta Dakar (Senegal), también en base a las marcas comerciales utilizadas.

Las estimaciones para el consumo de diésel de la bomba de riego se realizaron tomando como referencia un modelo de irrigación con bomba de la base de datos de GaBi 6.0 (PE International, 2014) y se contrastaron con los datos proporcionados por los cuestionarios realizados a las productoras. Por último, las estimaciones del consumo de diésel para el uso de maquinaria se hicieron suponiendo un consumo de 6 l/ha para el tractor con grada de discos (Boto et al., 2005) y un consumo de 20 l/ha para la cosechadora (Miranda, 2004).

### 2.4. Evaluación del impacto ambiental

La evaluación integral de los impactos del consumo de agua supone la determinación de factores de caracterización para el *agua azul*, *agua verde* y *agua gris*, respectivamente, que relacionan el consumo en cada caso con el impacto asociado, así como el cálculo de los indicadores de impacto correspondientes.

### 2.4.1. Evaluación del consumo de agua azul

La evaluación del consumo de *agua azul* se realizó según la metodología *midpoint* descrita por Pfister y Bayer (2014). Esta metodología se basa en el cálculo de los denominados Índices de Estrés Hídrico regionalizados ( $IEH_{mes}$ ), calculados mes a mes para reflejar en mayor medida la variabilidad de disponibilidad de agua que existe en una cuenca según aspectos temporales y climatológicos. El IEH cuantifica la fracción de agua consumida en detrimento de su uso potencial para otros fines; puede tomar valores entre 0,01 (mínima escasez de agua) y 1 (máxima escasez de agua). Así pues, cuanto mayor sea el valor numérico del  $IEH_{mes}$ , mayor será el impacto causado por el consumo de *agua azul*.

Por su parte, fue necesario estimar el consumo de agua de riego mes a mes, ya que no se disponía de datos de consumo mensual de agua en las parcelas. Esto se hizo teniendo en cuenta el caudal de la bomba empleada, la altura de la lámina de agua requerida en cada etapa del cultivo y los cuestionarios realizados a las productoras. Teniendo en cuenta todos estos factores, el volumen de agua de riego empleado durante todo el ciclo productivo, fue de 31.500 m<sup>3</sup>/ha o, lo que es lo mismo, de 6.300 m<sup>3</sup>/t de arroz.

Así pues, empleando el  $IEH_{mes}$  de Pfister y Bayer (2014) y teniendo en cuenta el consumo de Agua de Riego mensual ( $AR_{mes}$ ), es posible calcular el Impacto derivado del consumo de Agua Azul ( $IAA_{mes}$ ), también mensual, durante la estación seca de acuerdo con la ecuación 1. Este hace referencia al volumen de agua que pueda tener alguna repercusión sobre los ecosistemas de agua dulce desde un punto de vista ecológico (m<sup>3</sup> de agua equivalentes de un ecosistema).

$$IAA_{mes} = AR_{mes} \cdot IEH_{mes} \quad (1)$$

### 2.4.2. Evaluación del consumo de agua verde

El *agua verde* es el agua procedente de lluvia contenida en el suelo y disponible para las plantas. Los indicadores *midpoint* referidos al Impacto derivado del consumo de Agua Verde (IAV), se calcularon según la metodología propuesta por Núñez et al. (2012) según los dos enfoques mencionados en el apartado 2.1: productivo y espacial. En cuanto al enfoque productivo, los autores definen el diferencial del consumo de agua verde (dAV) (m<sup>3</sup>/mes) como el consumo de *agua verde* llevado a cabo por el sistema de estudio ( $AV_c$ ) menos el consumo de *agua verde* llevado a cabo por un sistema de referencia ( $AV_0$ ). En este caso, el sistema de referencia fue el cultivo de cebolla, ya que se trata del cultivo mayoritario en la zona según la *Association des Producteurs d'Oignon de la Vallée* (APOV, 2016). Este diferencial modifica el caudal del río y en consecuencia, la disponibilidad de agua de la cuenca; influyendo así en el aumento o disminución de la escasez de agua.

De acuerdo con este procedimiento, la evaluación del flujo de *agua verde* es compatible con la evaluación del flujo de agua azul, ya que el IAV depende del mismo factor de caracterización, el denominado  $IEH_{mes}$ , y por tanto, posee las mismas unidades (m<sup>3</sup> de agua equivalentes de un ecosistema). Así, el cálculo del IAV se muestra en las ecuaciones 2 y 3.



$$IAV = dAV \cdot IEH_{mes} \quad (2)$$

$$dAV = AV_c - AV_0 \quad (3)$$

El consumo de *agua verde* es equiparable a la totalidad de las pérdidas de agua que el cultivo sufre debido a la evapotranspiración ( $ET_c$ ). La  $ET_c$  del cultivo se calculó según la metodología empleada por la FAO (ecuación 4, [Allen et al., 1998](#)), donde el coeficiente específico para cada cultivo ( $K_c$ ) se emplea para relacionar la  $ET_c$  con la evapotranspiración potencial ( $ET_0$ ):

$$ET_c = K_c \cdot ET_0 \quad (4)$$

donde  $ET_0$  hace referencia a la evapotranspiración de la superficie de referencia. Para el cálculo de esta última se empleó la metodología descrita por [Hargreaves y Samani \(1985\)](#) según la ecuación 5:

$$ET_0 = 0,0023 (t_{med} + 17,78) R_0 \cdot KT \cdot (t_{max} - t_{min})^{0,5} \quad (5)$$

donde  $ET_0$  es la evapotranspiración potencial diaria (mm/día),  $t_{med}$  es la temperatura diaria media,  $R_0$  es la radiación solar extraterrestre (tabulada en [Hargreaves y Samani \(1985\)](#)),  $KT$  es un coeficiente empírico calculado a partir de datos de presión atmosférica,  $t_{max}$  es la temperatura diaria máxima y  $t_{min}$  la temperatura diaria mínima.

El consumo de *agua verde* mensual se calculó de acuerdo con la ecuación 6. Se puede apreciar que la cantidad de *agua verde* que puede consumir la planta está limitada por la precipitación efectiva ( $P_e$ ), definida como la proporción de la precipitación total ( $P$ ) disponible para las plantas.

$$\begin{aligned} \text{Si } P_e \geq ET_c, \text{ consumo de agua verde} &= ET_c \\ \text{Si } P_e < ET_c, \text{ consumo de agua verde} &= P_e \end{aligned} \quad (6)$$

La  $P_e$  depende a su vez de las características específicas de cada suelo. Para su estimación se empleó el método USDA descrito en la ecuación 7 ([USDA, 1986](#)).

$$\begin{aligned} \text{Si } P > 250 \text{ mm, } P_e &= 0,1P + 125 \\ \text{Si } P < 250 \text{ mm, } P_e &= P \cdot [(125 - 0,2P) / 125] \end{aligned} \quad (7)$$

Paralelamente, para la evaluación desde una perspectiva espacial, se empleó el Índice de Escasez de Agua Verde (IEAV) definido por [Water Footprint Network \(2008\)](#) y descrito a continuación (ecuación 8):

$$IEAV = \frac{AV}{P_e}, \quad 0 \leq IEAV \leq 1 \quad (8)$$

donde IEAV es un parámetro adimensional,  $P_e$  es la precipitación efectiva por área durante los cinco meses de cultivo que abarca una estación ( $m^3/ha \cdot \text{estación}$ ) y AV es la cantidad de  $P_e$  consumida por la planta para esa misma área y periodo de tiempo ( $m^3/ha \cdot \text{estación}$ ). El IEAV indica el nivel de estrés que el cultivo ejerce sobre el suelo en el que crece. En principio, valores bajos se asocian a un menor estrés medioambiental, ya que indicarían un menor estrés sobre el agua disponible en el suelo.

Para el cálculo de los indicadores *midpoint*, fue necesario recopilar los datos climatológicos de la localidad, concretamente, régimen de precipitaciones y temperatura para los meses que abarcó el periodo de cultivo de la estación seca (marzo a julio). Éstos se obtuvieron del Sistema mundial de información y alerta sobre la alimentación y la agricultura (SMIA, 2016), perteneciente a la FAO, así como de la estación meteorológica Ica (OACI): GOSS (2016) situada en la región de Saint Louis, respectivamente.

### 2.4.3. Evaluación del consumo de agua gris

El *agua gris* se define como el volumen de agua dulce necesaria para asimilar las emisiones contaminantes (Chapagain et al., 2006; Milà i Canals et al., 2009). Sin embargo, el enfoque empleado para la medición de los impactos asociados a su consumo, es diferente al empleado en el caso del *agua azul* y *agua verde*. Esto se debe a que no es lo mismo un litro de agua extraído directamente de una fuente, que un litro de agua requerido para asimilar una emisión contaminante. De este modo, las emisiones contaminantes liberadas al agua se engloban dentro de otras categorías de impacto como la eutrofización o la ecotoxicidad acuática (Ridoutt y Pfister, 2010).

La eutrofización acuática hace referencia al enriquecimiento en nutrientes de un ecosistema acuático. Una de las causas principales de la eutrofización de las aguas dulces es la actividad humana, en concreto, el uso de fertilizantes. Las emisiones de nitrógeno (N) y fósforo (P), tanto por aire como por agua, implican contaminación tanto del agua dulce como de los ecosistemas marinos, teniendo efectos diversos (composición, estructura y dinámica) sobre los mismos. La ecotoxicidad designa la persistencia y capacidad acumulativa de un químico para instalarse en la cadena alimentaria humana y provocar efectos tóxicos sobre los mismos. Así, las emisiones tóxicas (microorganismos, compuestos sintéticos, contaminantes metálicos) contaminan el agua, y ésta a su vez, contamina las plantas, animales y seres humanos (Goedkoop et al., 2009).

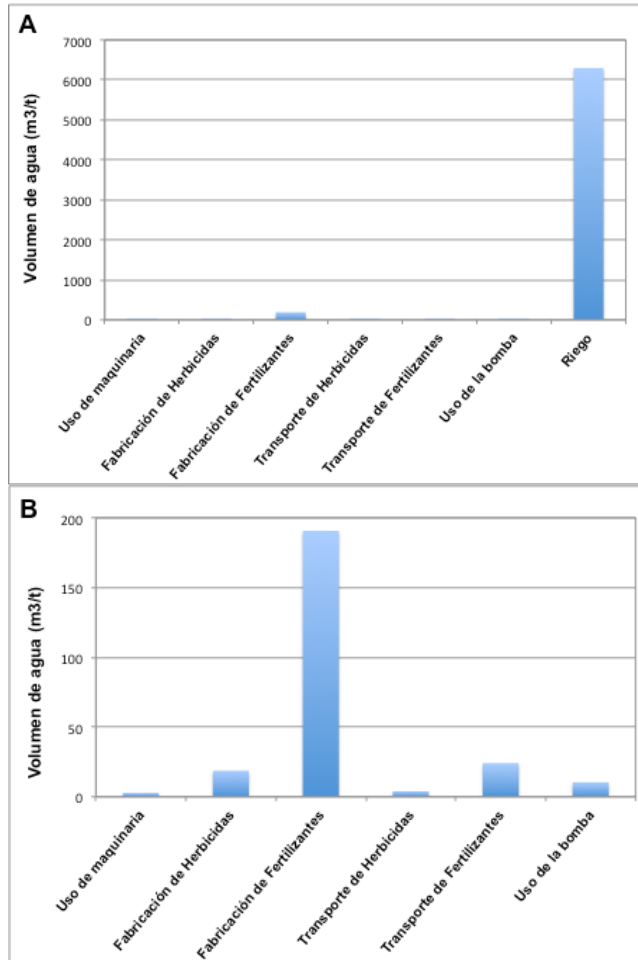
Para la evaluación de la categoría de impacto referida a la eutrofización, se empleó el método ReCiPe 2008 descrito por Goedkoop et al. (2009). En cuanto al cálculo de la categoría de impacto ecotoxicidad acuática, se ha utilizado el método USEtox (Rosenbaum et al., 2008). En ambos métodos se describen los correspondientes factores de caracterización asociados a la categorías de impacto propuestas a nivel *midpoint*.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Inventario de agua

La Figura 4 muestra los resultados para el consumo de agua requerido en cada etapa del ciclo de vida del sistema, expresado por 1 t de arroz. La etapa que supone el consumo mayoritario de agua es la etapa de riego (96,1% del total), ya que se trata de un sistema de cultivo de arroz irrigado con un elevado consumo directo de agua. La etapa de fabricación de fertilizantes, con mucha diferencia respecto a la anterior, es la segunda etapa que más contribuye al uso del agua (2,9% del total), esto es debido a que la cantidad de fertilizantes empleados en el cultivo es elevada en comparación con las cantidades requeridas de herbicidas o la cantidad de diésel requerido para alimentar la

bomba y la maquinaria. Por su parte, el transporte de los fertilizantes es la tercera etapa que más contribuye al uso de agua (0,4% del total). En cuarta posición se encuentra la fabricación de herbicidas (0,3% del total), seguida de la etapa correspondiente al uso de la bomba de riego (0,2% del total). El transporte de los herbicidas así como el uso de maquinaria, representan el menor consumo de agua (0,06 y 0,04% del total respectivamente).



**Figura 4.** Resultados del inventario de flujo de agua: volumen de agua consumido en cada etapa para producir una tonelada de arroz (A), volumen de agua consumido en las etapas minoritarias para producir una tonelada de arroz (B).

Respecto al consumo de agua para riego, en el presente estudio se ha estimado un valor de 31.500 m<sup>3</sup>/ha para todo el ciclo de cultivo, es decir unos 6.300 m<sup>3</sup>/t de arroz. Este valor es bastante elevado si lo comparamos con los 3.000 m<sup>3</sup>/t de arroz de [Thanawong et al. \(2014\)](#) para Tailandia, con rendimientos de 2,5 t/ha, o los 4.900 m<sup>3</sup>/t de arroz de [Blengini y Busto \(2009\)](#) en Italia, donde se alcanzan rendimientos en torno a 7 t/ha. No obstante, la estimación realizada en este estudio es acorde con las realizadas por [Frenken y Faurès \(1997\)](#) para la FAO, según las cuales se requieren más de 20.000 m<sup>3</sup>/ha para la irrigación del arroz durante la estación seca en esta misma zona.

Son varios los motivos que contribuyen a la necesidad de una elevada dosis de riego; en primer lugar, la falta de precipitaciones obliga a que el cultivo de arroz durante la estación seca deba mantenerse con irrigación en la totalidad del periodo productivo. Por otra parte, el suelo característico de la zona estudiada ha ido experimentando durante los últimos años un incremento progresivo de salinidad ([Oumar y Romagosa, 2013](#)), como indican los análisis presentados en el anexo I; esto aumenta la demanda de agua por parte del



cultivo con el fin de arrastrar las sales y, a su vez, asegurar la disponibilidad de agua para la planta.

Así pues, el elevado consumo de agua en la etapa de riego respecto al resto de etapas del ciclo de vida del arroz, es la causa de que el análisis de impactos, tanto para agua azul como agua verde se centren en esta etapa.

### 3.2. Impacto ambiental

Para determinar el impacto ambiental total del cultivo de arroz irrigado es necesario diferenciar entre el impacto producido por el consumo de *agua azul*, *agua verde* y *agua gris*, ya que cada uno de estos afecta a un compartimento ambiental distinto del total de los recursos hídricos empelados.

#### 3.2.1. Impacto derivado del consumo de Agua Azul y Agua Verde

En la Tabla 3 se muestra el denominado factor de caracterización mensual propuesto por Pfister y Bayer (2014), así como el consumo de *agua azul* y *agua verde* para cada mes calculados según lo expuesto en las secciones 2.4.1. y 2.4.2., respectivamente. El  $IEH_{mes}$  correspondiente a la cuenca de Senegal indica que mayo es el mes más crítico en cuanto a estrés hídrico debido a la escasez de agua. Esto es debido, entre otras causas, a la casi inexistencia de precipitaciones en la zona durante los meses de marzo, abril y mayo (Ica OACI: GOSS, 2016) que implican una disminución progresiva en el caudal del río durante dicho periodo alcanzándose así valores mínimos en el mes de mayo. Al mes de abril se le atribuye el segundo valor más elevado, esto está en consonancia con el argumento expuesto anteriormente.

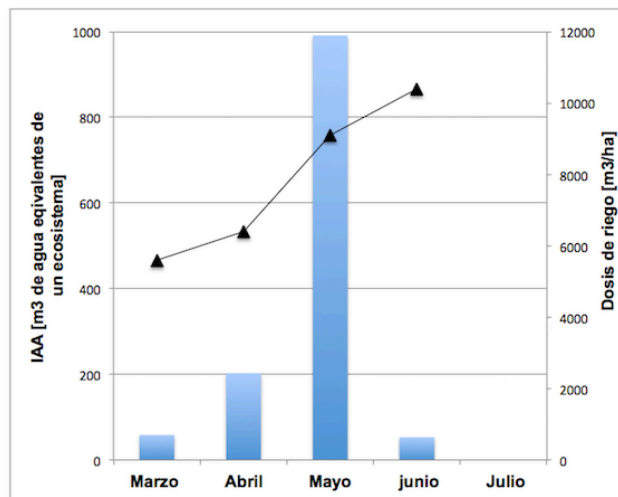
**Tabla 3.** Factor de caracterización  $IEH_{mes}$  y consumo de *agua azul* y *agua verde* por tonelada de arroz.

Mes	$IEH_{mes}$	Agua azul (m <sup>3</sup> / t)	Agua verde (m <sup>3</sup> / t)
Marzo	0,05	1.120	2
Abril	0,16	1.280	0
Mayo	0,54	1.820	0
Junio	0,03	2.080	6,24
Julio	0,01	0	2

Analizando los consumos de *agua azul* y *agua verde* (Tabla 3), es posible anticipar que los impactos derivados del consumo de *agua azul* van a ser los más relevantes a lo largo del proceso productivo. Esto es debido a que la zona de estudio posee un clima semidesértico, con un régimen de precipitaciones estacional. Así pues, el consumo de *agua verde* por parte del cultivo durante la estación seca, es prácticamente nulo en comparación con el consumo de agua procedente de riego. En estudios posteriores, se compararán estos resultados con datos extraídos durante la estación húmeda, donde cabe esperar un mayor consumo de *agua verde* y por tanto, un menor consumo de *agua azul*.

### 3.2.1.1. Impacto derivado del consumo de Agua Azul

La Figura 5 muestra los resultados del IAA. Paralelamente se muestran los datos correspondiente a las dosis de riego estimadas para cada mes. En los meses de marzo y abril se requiere un espesor de 5 cm para la lámina de agua, mientras que para los meses de mayo y junio se requiere un espesor de 10 cm; es por eso que las dosis de riego en mayo y junio adquieren progresivamente valores más elevados. El mes de mayo, a pesar de no ser el mes en el que se empleó la máxima dosis de riego, acumula el mayor impacto derivado del consumo de *agua azul*. Esto es debido a que el IEH para este mes es muy superior al del resto de meses (0,54), y siendo que el IAA se define como el producto entre el denominador  $IEH_{mes}$  y el consumo de *agua azul*, estos dos factores contribuyen a partes iguales. El mismo fenómeno tiene lugar en el mes de abril, en el que, a pesar de que la dosis de riego es muy inferior a la dosis proporcionada en el mes de junio, el IAA (0,16) es muy superior al obtenido en el mes de junio, donde el  $IEH_{mes}$  alcanza un valor de 0,03, muy cercano al mínimo para este factor de caracterización, como se observa en la Tabla 3. Marzo presenta la menor dosis de riego y su factor de caracterización mensual, con un valor de 0,05, también está cercano al mínimo; sin embargo, esas dos centésimas de diferencia respecto al  $IEH_{mes}$  correspondiente a junio, colocan al IAA del mes de marzo 5 puntos por encima del IAA atribuible al mes de junio. De este modo, siendo el mes de junio el que presenta la máxima dosis de riego, resulta ser el que presenta a su vez el mínimo IAA. Por su parte, durante el mes de julio no se aplicó ninguna dosis de riego, y es por esto que el IAA para este mes es 0.



**Figura 5.** Impacto derivado del consumo de Agua Azul (IAA). Las líneas corresponden a la dosis de riego ( $m^3/ha$ ), en el eje secundario.

En referencia a la comparativa que se pretende realizar con los datos obtenidos durante la próxima estación húmeda, cabe mencionar dos aspectos; en primer lugar, se estima que las dosis de riego deberían ser inferiores a las dosis proporcionadas durante la estación seca ya que, tanto el régimen de precipitaciones como los valores de temperatura durante los meses de julio a diciembre son más favorables y por tanto, los requerimientos de agua de riego habrán de ser menores durante el ciclo productivo. Por otra parte, el  $IEH_{mes}$  para todos los meses correspondientes a la estación húmeda toma el valor

mínimo de 0,01 en la cuenca del río Senegal, esto minimizará en gran medida los IAA en dicha estación.

### 3.2.1.2. Impacto derivado del consumo de Agua Verde

Desde el punto de vista de la productividad, los valores obtenidos del diferencial del consumo de agua verde (dAV) así como los del IAV, se muestran en la Tabla 4. El dAV refleja que el cultivo de arroz afecta a los recursos de agua verde algo más que el cultivo de referencia, siendo esta una diferencia mínima si comparamos con otros estudios (Núñez et al., 2012). Esto se debe principalmente a que el consumo de agua verde en ambos cultivos es prácticamente nulo, ya que la disponibilidad de ésta debido al clima tan seco, es también muy baja. La única diferencia sustancial entre ambos cultivos reside en su rendimiento productivo; mientras el rendimiento del arroz es de 5 t/ha, el rendimiento medio del cultivo de cebolla es de 20 t/ha (APOV, 2016).

Los resultados obtenidos para el IAV van en el mismo sentido, los valores obtenidos para cada mes se muestran en todos los casos cercanos a 0. Esto indica que el cultivo de arroz no afecta a los recursos de agua verde del ecosistema típico de la zona, siendo el motivo principal la falta de precipitaciones durante los meses correspondientes a la estación de cultivo seca.

**Tabla 4.** Consumo de *agua verde* del cultivo de arroz ( $AV_C$ ), consumo de *agua verde* del cultivo de referencia ( $AV_0$ ), diferencial del consumo de *agua verde* (dAV) y factor de caracterización del Impacto derivado del consumo de Agua Verde (IAV), desde un enfoque productivo.

Mes	$AV_C$ ( $m^3/t \cdot mes$ )	$AV_0$ ( $m^3/t \cdot mes$ )	dAV ( $m^3/t \cdot mes$ )	IAV ( $m^3$ de agua equivalentes de un ecosistema)
Marzo	2	0,5	1,5	0,08
Abril	0	0	0	0
Mayo	0	0	0	0
junio	6,24	1,85	4,4	0,11
Julio	2	0,5	1,5	0,02

Para el posterior análisis durante la estación húmeda, cabe esperar que los valores de dAV sean similares ya que este parámetro depende de la diferencia entre las  $k_c$  de los respectivos cultivos y los valores numéricos de éstas no están muy alejados. Por su parte, el IAV, al depender de dicho diferencial y del  $IEH_{mes}$ , también se espera que sea del mismo orden que los resultados obtenidos en la presente estación, ya que como se ha mencionado en la sección anterior,  $IEH_{mes}$  tomo el valor mínimo de 0,01 para los meses de julio a diciembre.

En la Tabla 5 se muestra el Índice de Escasez de Agua Verde para el análisis del impacto derivado del consumo de agua verde desde un enfoque espacial, tanto para el cultivo de arroz como para el cultivo de referencia. El valor obtenido de 0,43 en el caso del arroz, denota que el cultivo ejerce un estrés moderado sobre el agua disponible en el suelo durante la estación seca. Aunque el indicador para el cultivo de la cebolla es superior, la diferencia entre ambos es muy pequeña.

**Tabla 5.** Índice de Escasez de Agua Verde para el cultivo de arroz (IEAV<sub>c</sub>) y para el cultivo de referencia (IEAV<sub>0</sub>).

<b>IEAV<sub>c</sub></b>	0,43
<b>IEAV<sub>0</sub></b>	0,48

El interés de este IEAV radica en la comparativa entre diferentes localizaciones para un mismo cultivo o, para poder comparar entre cultivos alimentados con agua de lluvia o cultivos irrigados. Así, el valor de IEAV obtenido en este estudio sólo tomará sentido cuando, en estudios posteriores, se evalúen otras posibles localizaciones para el cultivo o la sustitución parcial del cultivo de arroz en la zona por otros irrigados, al menos en parte, con agua de lluvia.

### 3.2.2. Impacto derivado del consumo de Agua Gris

Los indicadores empleados para la evaluación del impacto derivado del consumo de *agua gris* se muestran en la Tabla 6. El valor obtenido para el indicador de eutrofización ( $8,6 \cdot 10^{-2}$  kg de P eq./t) es considerablemente menor que otros valores encontrados en la literatura, que oscilan entre 6,8 kg de P eq./t para [Blengini y Busto \(2009\)](#) y 90 kg de P eq./t para [Thanawong et al. \(2014\)](#). Las diferencias observadas pueden atribuirse a diferencias en el plan de fertilización realizado en cada caso, o bien, a que el estudio de [Blengini y Busto \(2009\)](#) incluyen también el transporte y distribución del arroz y, por último también puede deberse a los diferentes métodos de caracterización utilizados, pues [Thanawong et al \(2014\)](#) utilizan el CML 2001, mientras que en el presente estudio se utiliza ReCiPe.

En cuanto a la ecotoxicidad de agua dulce, el valor obtenido es sensiblemente mayor que el obtenido por [Thanawong et al. \(2014\)](#) para el cultivo del arroz en Tailandia (370 kg de 1,4-DB eq./t). Estas diferencias son atribuibles además de al método utilizado para evaluar este impacto, a las diferencias en las materias activas aplicadas, que pueden presentar características de toxicidad muy diferentes ([Juraske y Sanjuán, 2011](#)).

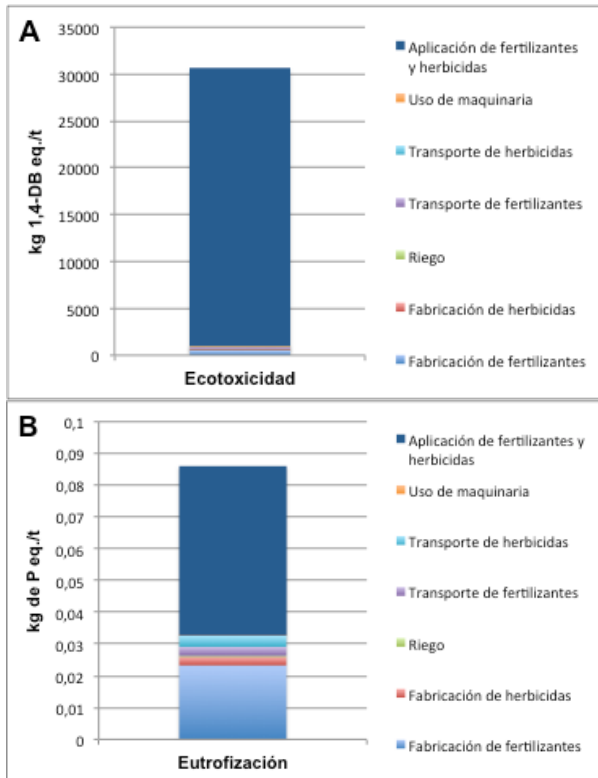
**Tabla 6.** Indicadores *midpoint* de ecotoxicidad y eutrofización del agua dulce.

<b>Indicador</b>	<b>Nivel</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Ecotoxicidad agua dulce	<i>Midpoint</i>	30.602	kg de 1,4-DB eq./t
Eutrofización agua dulce	<i>Midpoint</i>	$8,6 \cdot 10^{-2}$	kg de P eq./t

En la Figura 6 se detalla la contribución de las diferentes etapas del ciclo de vida a los resultados obtenidos para los indicadores de ecotoxicidad y eutrofización.

En la Figura 6A se evidencia que la etapa de *Aplicación de fertilizantes y herbicidas* es la principal responsable de la ecotoxicidad (97% del total), concretamente por la aplicación de los herbicidas, especialmente el propanil. Esto es debido a dos motivos fundamentales; en primer lugar, la dosis aplicada de materia activa para este herbicida es mayor que la de los otros dos (apartado 2.2.), en segundo lugar, el factor de caracterización de toxicidad correspondiente a dicha materia activa es muy superior al resto.

En cuanto a la categoría de impacto eutrofización (Figura 6B), también es la etapa de *Aplicación de fertilizantes y herbicidas* la que más contribuye con un 62% del total, debido principalmente al uso de fertilizantes ya que estos generan lixiviación de nitratos y fosfatos. Este fenómeno a su vez, se ve acentuado por la textura arenosa del suelo y las altas dosis de agua de riego empleadas. Por su parte, la etapa de *Fabricación de fertilizantes* también contribuye en gran medida al fenómeno de eutrofización (27% del total), debido principalmente a los vertidos tóxicos que se liberan al agua durante esta etapa.



#### 4. PROPUESTAS DE MEJORA

A la vista de los resultados obtenidos y de acuerdo con los objetivos planteados en este estudio, se plantean a continuación una serie de propuestas para disminuir los impactos producidos por el cultivo de arroz.

Una posible solución al problema de la salinidad es el empleo de una variedad de arroz diferente a la empleada hasta el momento, la SAHEL 108, ya que se trata de una variedad especialmente sensible a la salinidad. Recientes estudios realizados por el Instituto Internacional de Investigación en Arroz (IRRI, 2015), proponen el empleo de una nueva variedad mejorada tolerante a la sal desarrollada a través del cruce de dos especies: el arroz silvestre *Oryza Coartaca* y la variedad cultivada de arroz IR56. Estas variedades permiten a la planta crecer en tierras con alto contenido en sal, permitiendo a la planta expulsar el excedente de la misma.

Por su parte, la evaluación del impacto derivado del consumo de agua azul, indica que los meses de abril y mayo son los menos indicados para mantener un cultivo de regadío. Existen diferentes estrategias que pueden llevarse a cabo para disminuir el consumo de agua. Una opción para seguir con el cultivo de arroz, sería explorar la implantación del denominado Sistema de

Intensificación del Arroz o *System of Rice Intensification* (SRI). Los principios de este sistema son cuatro: implantación temprana, rápida y sana de la planta, reducción de la densidad de plantas, enriquecimiento del suelo con materia orgánica y disminución y control en la aplicación de agua (SRI-RICE, 2010). Estudios realizados en India demuestran los efectos positivos de esta metodología, con un aumento notable del rendimiento y un descenso del uso de agua de riego (Gathorne et al., 2013). Sin embargo, para el caso de estudio los problemas de salinidad limitarían en cierta medida su implantación en lo referente a la gestión del agua de riego.

Otra alternativa sería plantear un cambio de cultivo para la estación seca estableciendo así un cultivo rotacional, que además ayudaría a prevenir problemas de plagas. Una buena candidata podría ser la quinua ya que, tiene mayor contenido en proteína y grasa vegetal, fibra y minerales, por lo que se trata de un alimento más completo que el arroz desde un punto de vista nutricional (Romo et al., 2006). En cuanto a los requerimientos para su cultivo, esta se adapta bien a climas calurosos con pocas precipitaciones, como es el caso de la localización de estudio. Es más, la quinua presenta tolerancia a la sequía y es susceptible al exceso de humedad, sobre todo en los primeros estados. En cuanto al tipo de suelo, existen variedades capaces de soportar una elevada salinidad (Gómez y Aguilar, 2016), por lo que ello no debería suponer un problema.

Otra opción para el establecimiento de un cultivo rotacional sería la introducción de una leguminosa, como la bambara (*Vigna subterranea* (L.) Verdc.) o el versim (*trifolius alexandrinum* L.) ya que se trata de plantas fijadoras de nitrógeno capaces de mejorar la calidad y fertilidad del suelo de forma natural. De esta manera, se podría disminuir la cantidad de nitrógeno a aportar y por tanto también disminuiría el impacto producido por la producción, transporte y aplicación de fertilizantes. No obstante, esto implicaría un cambio en manejo del cultivo así como en los hábitos de consumo de las productoras y la búsqueda de nuevos mercados para estos productos.

El apartado dedicado a los impactos del agua por contaminación, indica que en este sentido las mejoras han de centrarse en un mejor manejo de los fertilizantes y herbicidas. La implantación del ya mencionado SRI también tendría impactos beneficiosos en este sentido ya que, una de las medidas que incluye este sistema es la siembra indirecta en semilleros que, aunque es más laboriosa, permite reducir el uso de herbicidas ya que esta técnica limita en gran medida el crecimiento de malas hierbas en la fase de crecimiento más temprana. Así mismo, el enriquecimiento del suelo con materia orgánica es uno de sus principios, con lo que se podría sustituir al menos uno de los abonados de cobertera que se realizan actualmente, por un abonado de fondo. Además podría considerarse la aplicación de compost elaborado con los residuos orgánicos de la zona de estudio.

## 5. CONCLUSIONES

Para la evaluación del impacto derivado del uso del agua en el cultivo de arroz en la región de Ross-Béthio (Senegal), en primer lugar se ha llevado a cabo un ACV centrado en la categoría de impacto consumo de agua para conocer los flujos de entrada que más contribuyen al consumo de agua a lo largo del ciclo productivo. De los resultados se concluye que los esfuerzos por



disminuir los impactos medioambientales que genera dicho cultivo han de centrarse en reducir el volumen de agua empleado para riego, teniendo en cuenta los dos problemas principales: la escasez de precipitaciones y la elevada salinidad del terreno.

El impacto derivado del consumo de agua verde es, para el caso de estudio, despreciable frente al impacto derivado del consumo de agua azul. Esto ocurre con frecuencia en zonas con un clima estacional semidesértico como es el caso, donde el grueso del impacto medioambiental recae sobre el manejo del agua de riego (Boulay et al., 2015). El apartado dedicado a los impactos del agua por contaminación, indica que el campo de mejora se encuentra en la selección y manejo de los fertilizantes y herbicidas.

En futuras campañas de cultivo, diferentes alternativas de mejora se podrán llevar a cabo para su estudio y posterior comparación; estas alternativas son la introducción de nuevas variedades de arroz así como nuevos cultivos para establecer una dinámica de cultivo rotacional, o una mayor optimización del uso de fertilizantes y herbicidas mediante abonados de fondo o siembra indirecta en semilleros.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Allen R., Pereira L. S., Raes D., Smith M., 1998. Crop evapotranspiration—Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Report 56. Rome: United Nations Food and Agriculture Organization.
- APOV, Association des Producteurs d'Oignon de la Vallée, 2016. Disponible en : <http://www.agroalimentaire.sn/>. Fecha de consulta Agosto 2016.
- Boto J.A., Pastrana P., Suárez de Cepeda M., 2005. Consumos energéticos en las operaciones agrícolas en España. IDEA, M-13776-2005.
- Blengini G.A., 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., Motoshita M., Pfister S., Bayart J.B., Franceschini H., Muñoz I., Bulle C., Margni M., 2015. Water use impact assessment methods (Part A): Methodological and quantitative comparison of scarcity and human health impacts models. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(1): 139-160.
- Chapagain A.K., Hoekstra A.Y., Savenije H.H.G., Gautam R., 2006. The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries. *Ecological economics*, 60 (186-203).
- FAO AQUASTAT, 2005. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Senegal, Base de datos de la FAO disponible en: <http://www.fao.org>. Fecha de consulta junio 2016.
- Frenken K., Faurès J.M., 1997. Irrigation potential in Africa: A basin approach. *FAO land and water bulletin*, 1024-6703.
- Gathorne-Hardy A., Reddy N., Venkatanarayana M., Harriss-White B., 2013. A Life Cycle Assessment (LCA) of Greenhouse Gas Emissions from SRI and Flooded Rice Production in SE India. *Taiwan Water Conservancy*, 61(4): 110-125.

- Goedkoop M., Heijungs R., Huijbregts M., De Schryver A., Struijs J., van Zelm R., 2009. ReCiPe 2008—a life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. RIVM report.
- Gómez L., Aguilar E., 2016. Guía de cultivo de la quinua. FAO y Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Hargreaves G.H., Samani Z.A., 1985. Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. *Engineering in Agriculture*, 1(2): 96-99.
- Hoekstra A.Y., Chapagain A.K., Aldaya M.M., Mekonnen M.M., 2011. *The Water Footprint assessment manual: Setting the Global Standard*. Earthscan Ltd, London. ISBN 978-1-84971-279-8.
- Hoekstra A.Y., Mekonnen M.M., Chapagain A.K., Mathews R.E., Richter B.D., 2012. Global monthly water scarcity: blue water footprints versus blue water availability. *PLoS ONE*, 7(2): e32688.
- Icao (OACI): GOSS. Estación meteorológica Saint-Louis. Disponible en: <http://www.tutiempo.net/registros/goss>. Fecha de consulta junio 2016.
- IRRI, Instituto Internacional de Investigación en Arroz, 2015. Disponible en: <http://inger.irri.org/>. Fecha de consulta agosto 2016.
- ISO (2006). ISO 14040:2006. Environmental management —Life cycle assessment —Principles and framework.
- ISO (2014). ISO 14046:2014, Environmental management — Water footprint —Principles, requirements and guidelines.
- Juraske R., Sanjuán N., 2011. Life cycle toxicity assessment of pesticides used in integrated and organic production of oranges in the Comunidad Valenciana, Spain. *Chemosphere*, 82:956–962.
- Kounina A., Margni M., Bayart J.B., Boulay A.M., Berger M., Bulle C., Frischknecht R., Koehler A., Mila i canals LL., Motoshita M., 2012. Review of methods addressing freshwater use in life cycle inventory and impact assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(3): 707-721.
- Lxilogos, mots et merveilles d'ici et d'ailleurs. 2016. Disponible en: [http://www.lexilogos.com/senegal\\_carte.htm](http://www.lexilogos.com/senegal_carte.htm). Fecha de consulta junio 2016.
- Milà i Canals LI., Chenoweth J., Chapagain A., Orr S., Antón A., Cliff R., 2009. Assessing freshwater use in LCA: Part I – inventory modelling and characterisation factors for the main impact pathways. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 14: 28-42.
- Ministère de l'Agriculture République du Sénégal. 2009. Programme national d'autosuffisance en riz. Stratégie Nationale de Développement de la Riziculture. In: "http://www.jica.go.jp/english/our\_work/thematic\_issues/agricultural/pdf/senegal\_fr.pdf" Fecha de descarga mayo 2016.
- Miranda A., Iglesias C.E., Anillo J., Figueroa R.R., 2004. Estudio comparativo de la productividad y el consumo de combustible de las máquinas cosechadoras de arroz Ideal 9075 y New Holland L5117 en función de los rendimientos agrícolas. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 13(1): 31-35.



- 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., Romagosa F., 2013. El impacto del turismo en la Lengua de Barbarie (delta del río Senegal). *Cuadernos de Turismo*, nº31; pp. 289-309.
- PE International. Gabi software and database: contents for Life Cycle Engineering. Stuttgart (Germany) 2014.
- Pfister S., Bayer P., 2014. Monthly water stress: spatially and temporally explicit consumptive water footprint of global crop production. *Journal of Cleaner Production*, 73: 52-62.
- Pfister S., Koehler A., Hellweg S., 2009. Assessing the environmental impact of freshwater consumption in LCA. *Environmental Science and Technology*, 43(11): 4098–4104.
- Ridoutt B.G., Pfister S., 2010. A revised approach to water footprinting to make transparent the impacts of consumption and production on global freshwater scarcity. *Global Environmental Change*, 20: 113-120.
- Ridoutt B.G., Pfister S., 2010. Reducing humanity's water footprint. *Environmental Science and Technology*, 44: 6019-6021.
- Romo S., Rosero A., Forero C.L., Cerón E., 2006. Nutritional potencial of quinoa flour (*chenopodium quinoa w*) piartall variety in Colombian andes: part one. *Facultad de Ciencias Agropecuarias*, 4(1): 113-125.
- Rosenbaum R.K., Bachmann T.M., Gold L.S., Huijbregts M.A., Jolliet O., Juraske R., 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 Assessment* 13(7): 532-546.
- SAED, Riz Irrigué: le potentiel technico-économique pour l'atteinte de l'autosuffisance en riz vers l'horizon 2012, 2009.
- SMIA, Sistema mundial de información y alerta sobre la alimentación y la agricultura. FAO. Disponible en: <http://www.fao.org/giews/earthobservation/index.jsp?lang=es>. Fecha de consulta junio 2016.
- SRI-RICE, International Network and Resources Center. Founded in 2010. Disponible en: <http://sri.cals.cornell.edu/index.html> . Fecha de consulta agosto 2016.
- 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).
- Tillman D., Fargione J., Wolff B., D'Antonio C., Dobson A., Howarth R., Schindler D., Schlesinger W.H., Simberloff D., Swackhamer D., 2001. Forecasting agriculturally driven global environmental change. *Science*, 292: 281–284.
- UNESCO, 2003. Programme Mondial pour l'Évaluation des Ressources en Eau. Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau, première édition: L'eau pour les hommes, l'eau pour la vie. Paris, UNESCO and New York, Berghahn Books: Bassin du fleuve Sénégal, Guinée, Mali, Mauritanie et Sénégal, 20: 447-461.
- USDA, 1986. United States Department of Agriculture. Urban hydrology for small watersheds. Technical Release 55. Second edition. Natural Resource Conservation Service, Conservation Engineering Division. Washington DC (United States).

Water Footprint Network. Founded in 2008. Disponible en: <http://waterfootprint.org/en/>. Fecha de consulta agosto 2016.

Weidema B.P., Bauer Ch., Hischier R., Mutel Ch., Nemecek T., Reinhard J., Vadenbo C.O., Wernet G., 2013. The ecoinvent database: Overview and methodology, Data quality guideline for the ecoinvent database version 3. Disponible en: [www.ecoinvent.org](http://www.ecoinvent.org). Fecha de consulta junio 2016.

Wenjun Z., Yanhong Q., Zhiguo Z., 2006. A long-term forecast analysis on worldwide land uses. Environmental Monitoring and Assessment 119, (1–3): 609–620.

Wopereis M.C.S., Diagne A., Rodenburg J., Sié M., Somado E.A., 2008. Why NERICA is a successful innovation for African farmers. Agriculture, 37 (3): 169-176.

WULCA, A Life Cycle Initiative Project. Founded in 2007. Disponible en: <http://www.wulca-waterlca.org/>. Fecha de consulta junio 2016.

## 7. ANEXOS

### Anexo 1. Análisis del suelo

**Tabla A1.** Resultados del análisis del suelo de estudio.

<b>PROPIEDAD</b>	<b>MUESTRA</b>
pH 1:2,5 H <sub>2</sub> O	7,95
pH 1:2,5 CaCl <sub>2</sub>	7,14
CE 1:2,5 dS/m	6,6
% Arcilla	10,3
% Limo	15,3
% Arena	74,4
C orgánico (g/kg)	0,75