

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL



Las Malvinas son  
Argentinas  
40 años

**UTN**  
Concordia  
Facultad Regional Concordia



*Universidad Tecnológica Nacional*  
*Facultad Regional Concordia*

**Trabajo Final integrador**  
**Monografía de Postgrado Especialización en Ingeniería**  
**Ambiental**

**"Análisis de la cuenca del arroyo El Palmar  
y sostenibilidad del cultivo de arroz (*Oryza  
sativa*) en Entre Ríos, Argentina."**

**Director**

Dr. Adrian Silva Busso.

**Autor**

Ing. Agr. Gabriel Eduardo Guiano.

**Entre Ríos, Argentina 2022**

# ÍNDICE

<b>RESUMEN.....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>2</b>
<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>9</b>
<b>DESARROLLO.....</b>	<b>10</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>20</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>21</b>

## RESUMEN

El arroz (*Oryza sativa*) es una de las especies vegetales más cultivadas a nivel mundial, destacándose como una base para la alimentación humana. Características particulares de la especie, hacen que su cultivo pueda conducirse bajo riego por inundación, principal sistema utilizado en Argentina. Entre Ríos es la segunda provincia productora de arroz en el país, y el agua para abastecer la superficie cultivada es fundamentalmente de origen subterráneo, accediendo a ella a través de pozos profundos y estaciones de bombeo.

El volumen de agua empleado por campaña en el cultivo de arroz ronda los 15.000 metros cúbicos por hectárea. Esta cuestión justifica poner de manifiesto en el presente trabajo las investigaciones realizadas en relación a los mecanismos de recarga de los acuíferos, que actúan como fuente de agua en sistemas productivos como los de la provincia de Entre Ríos. La recarga vertical de los mismos es cuantitativamente baja, lo que implica replantearse el modelo de funcionamiento de los mismos sumado a los altos volúmenes de agua demandados por el cultivo.

A su vez, se plantean alternativas al sistema tradicional de riego por inundación, que reduzcan el volumen de agua necesario para lograr los mismos rendimientos por hectárea conservando la calidad del grano, mediante recopilación de investigaciones que aborden el tema en el cultivo de arroz.

## INTRODUCCIÓN

El arroz es una especie monocotiledónea perteneciente a la familia *Poaceae*, subfamilia *Oryzoideae*, tribu *Oryzeae* (Lu, 1999). El género *Oryza* presenta 21 especies silvestres y dos especies cultivadas: *Oryza sativa* L. (arroz asiático o común) y *Oryza glaberrima* Steudel (arroz africano) (Khush, 2000).

Paredes et al. (2021) realizan una descripción morfológica detallada de la planta de arroz. Los autores indican que desarrolla tres tipos de raíces: radícula, raíces del mesocótilo y raíces adventicias o nodales. La radícula emerge del embrión y puede alcanzar 15 cm de longitud, siendo su función principal la absorción de nutrientes y agua desde el estado de plántula hasta el estado de la séptima hoja visible. Las raíces del mesocótilo son delgadas, no ramificadas, de crecimiento horizontal y se desarrollan desde la parte inferior a superior del mesocótilo, en condiciones especiales de manejo (siembra profunda, tratamiento químico de la semilla). Las raíces adventicias constituyen el sistema radical del arroz, en los nudos del tallo se forman las primarias, las cuales dan origen a las secundarias, éstas a las terciarias y así sucesivamente, disminuyendo su diámetro. El arroz presenta aerénquima, un parénquima aerífero característico de angiospermas acuáticas, que favorece la aireación de los órganos. Este tejido forma un conducto desde la atmósfera hasta la raíz, permitiendo la provisión de oxígeno para la respiración.

El tallo es erecto, cilíndrico, con entrenudos huecos y número variable de nudos. En los nudos, la parte compacta del tallo, se adhiere a la base de la vaina de la hoja. El tallo principal es el primer tallo de la planta y se desarrolla temprano en la fase vegetativa. A partir de yemas axilares en el tallo principal, se desarrollan tallos secundarios o macollos, cada uno de los cuales constituye a posteriori una unidad completa, constituida por tallo, raíces, hojas, macollos y panículas, contribuyendo al rendimiento del cultivo (Paredes et al., 2021).

Las hojas se insertan de manera alterna y están constituidas por una vaina, un cuello, donde se encuentra la lígula y las aurículas, y una lámina larga y lanceolada.

La estructura floral del arroz es la espiguilla, formada por glumas (lemma y pálea) y la flor. Las espiguillas se agrupan en una inflorescencia compuesta denominada panoja o panícula, que se ubica sobre el nudo apical del tallo y generalmente carece de yemas y hojas. La panícula está compuesta por el cuello nodal, raquis, ramas primarias y secundarias, pedicelos, glumas rudimentarias y espiguillas. Las panículas pueden ser compactas, intermedias o abiertas, según el ángulo que forman las ramificaciones al

salir del eje de la panícula. Las espiguillas que primero florecen son las ubicadas en la parte superior y luego la floración progresa hacia la base (Paredes et al., 2021).

Cada espiguilla se une a una rama lateral de la panícula mediante el pedicelo. Estas espiguillas son unifloras, cuya única flor desarrollada posee un par de lodículos (pétalos), androceo conformado por seis estambres y gineceo con ovario y dos estilos y estigmas. La planta de arroz es autógama, con un bajo porcentaje de polinización cruzada (menor al 1%) (Paredes et al., 2021).

Finalmente, el grano de arroz está constituido por dos brácteas, lemma y pálea, y un cariósipide que corresponde al fruto. La cariósipide es un fruto indehiscente formado por tejidos genéticamente diferentes: pericarpio, cáscara y nucela diploides, el endospermo triploide y el embrión diploide (Paredes et al., 2021).

En cuanto a su fenología, el ciclo del cultivo puede ser dividido en tres fases. En primer lugar se encuentra la fase vegetativa, que es la que define la longitud del ciclo del cultivo. Inicia con la germinación, a través de la imbibición de la semilla, que absorbe el 25 % de su peso en agua, promoviendo la emergencia de la radícula, seguido de la elevación del coleoptile por el mesocótilo ubicando el punto de crecimiento cerca de la superficie y permaneciendo allí hasta la diferenciación del primordio foliar. La primera hoja aparece por dentro del coleoptile, estado denominado “plántula”, y continúa con el desarrollo de las hojas subsiguientes. Con la aparición de la cuarta hoja, surge el primer macollo en el nudo número dos, dando inicio al estado o período de macollaje, que se extiende entre 25 y 55 días. El número de macollos es muy variable y dependiente de distintos factores, tales como el material genético utilizado, la altura de la lámina de agua, la densidad de siembra, la temperatura del suelo, la disponibilidad de nitrógeno, entre otros. En esta etapa se define el primer componente de rendimiento del cultivo, el número de panojas potenciales por hectárea (Kurtz et al., 2016).

Posteriormente, el ciclo continúa con la fase reproductiva. Esta etapa inicia con la diferenciación del primordio floral (DPF) a nivel interno, también llamado anillo verde por la acumulación de clorofila en el tejido de la caña. Comienza el desarrollo de la panícula la cual se eleva por dentro de la vaina de la hoja bandera. Luego de 12 a 16 días de la DFP se produce el encañado o embuchado por aumento del grosor de la vaina de la hoja bandera y elongación de los entrenudos del tallo, en esta etapa se determina el segundo componente de rendimiento, los granos por panoja. La etapa reproductiva culmina con la floración, que dura 3 a 5 días luego de haber emergido de la panoja. Las flores se abren, se fecundan y se cierran (Kurtz et al., 2016).

Finalmente, la última fase es la de maduración, que abarca desde mediados de floración hasta la madurez fisiológica del grano, extendiéndose unos 30 a 40 días. En primera instancia ocurre el llenado de granos, debido a una movilización de fotoasimilados de las hojas y tallos hacia el grano, definiendo el tercer componente de rendimiento, el peso de 1000 granos. Los granos de arroz atraviesan las fases de grano lechoso, pastoso y duro, para finalmente alcanzar la madurez fisiológica (máxima acumulación de materia seca y aproximadamente un 30% de humedad). Al final de la fase de maduración, tiene lugar un subperíodo que abarca la pérdida de humedad del grano hasta llegar al 22% aproximadamente, abarcando desde la madurez fisiológica hasta la madurez comercial (Kurtz et al., 2016).

El arroz es el cuarto cultivo más producido en el mundo (514 millones de toneladas en 2020/21), detrás de la caña de azúcar (1.889 millones de toneladas en 2019/20), del maíz (1.108 millones de toneladas en 2019/20) y del trigo (780 millones de toneladas en 2020/21) (SISA, 2021). Junto al trigo son los cereales más importantes en la alimentación humana, teniendo en consideración los múltiples propósitos del maíz además del consumo humano (SISA, 2021). El arroz contribuye de forma muy efectiva al aporte calórico de la dieta humana actual, constituyéndose como fuente de una quinta parte de las calorías consumidas en el mundo (SISA, 2021). Para la campaña 2022/23, la FAO (2022) prevé que la utilización del arroz se mantenga estable, en un máximo histórico de 522,2 millones de toneladas, debido a que su persistente demanda para consumo humano compensa reducciones en otros usos, como pienso.

El estrés hídrico afecta numerosos aspectos en la fisiología de las plantas, fundamentalmente su capacidad fotosintética. En caso que el déficit sea prolongado, el crecimiento y la productividad pueden verse reducidos (Osakabe et al., 2014). En arroz, la respuesta al déficit hídrico está relacionada con el genotipo (Cabuslay et al., 2002).

Las plantas han desarrollado numerosas adaptaciones tanto fisiológicas como bioquímicas para afrontar diferentes situaciones de estrés debidas al ambiente que las rodea (Osakabe et al., 2014). Es pertinente, pues, conocer las características de la especie que se cultiva, de tal manera que las prácticas de manejo realizadas se ajusten para una mayor eficiencia en el uso de los recursos.

En cuanto a la provisión de agua, el cultivo de arroz puede realizarse en secano o bajo riego. El primer sistema es característico de zonas lluviosas, manejado al igual que la mayoría de los cultivos de secano, con rendimientos que no superan los 4.000 kg/ha (Kraemer et al., 2005). Por otra parte, se encuentra el cultivo de arroz bajo riego. En

Argentina, el riego por inundación es el más utilizado, obteniendo rendimientos que superan los 10.000 kg/ha. La presencia de tejidos con aerénquima, como se describió anteriormente, permiten la permanencia del cultivo bajo suelos inundados, sin comprometer el estado de la planta ni ir en detrimento de los rindes (Kraemer et al., 2005).

En Argentina, cultivar arroz bajo riego implica grandes volúmenes de agua por tonelada de grano producida. Por lo tanto, se busca aumentar la producción del cultivo de arroz irrigado, usando el agua dulce, o también llamada agua azul, con eficiencias de irrigación superiores a las que se dan comúnmente de acuerdo al sistema de riego utilizado (20-60 %) (Marano, 2014).

La demanda promedio de agua para su desarrollo, teniendo en cuenta el tipo de suelo, el ciclo de las variedades, y las condiciones climáticas, es de 15.000 m<sup>3</sup>/ha/ciclo, de los cuales de 10.000 m<sup>3</sup> a 13.000 m<sup>3</sup> se aportan mediante riego, y la diferencia es abastecida por las precipitaciones durante el ciclo del cultivo (De Bernardi, 2017).



A nivel país, las provincias de mayor producción son Corrientes, Entre Ríos y Santa Fe, representan el 91.23 % de la superficie total sembrada y el resto lo componen las provincias de Chaco y Formosa (SISA, 2021).

Figura 1: Imagen ilustrativa de las provincias productoras de arroz en la Argentina. Fuente: Luis A. De Bernardi (2017).

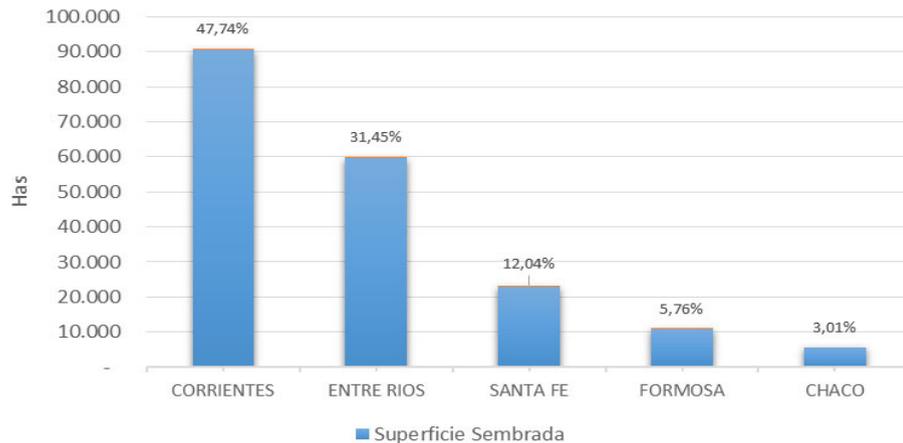


Figura 2: Representación gráfica de la superficie sembrada de arroz. Fuente: SISA, (2021).

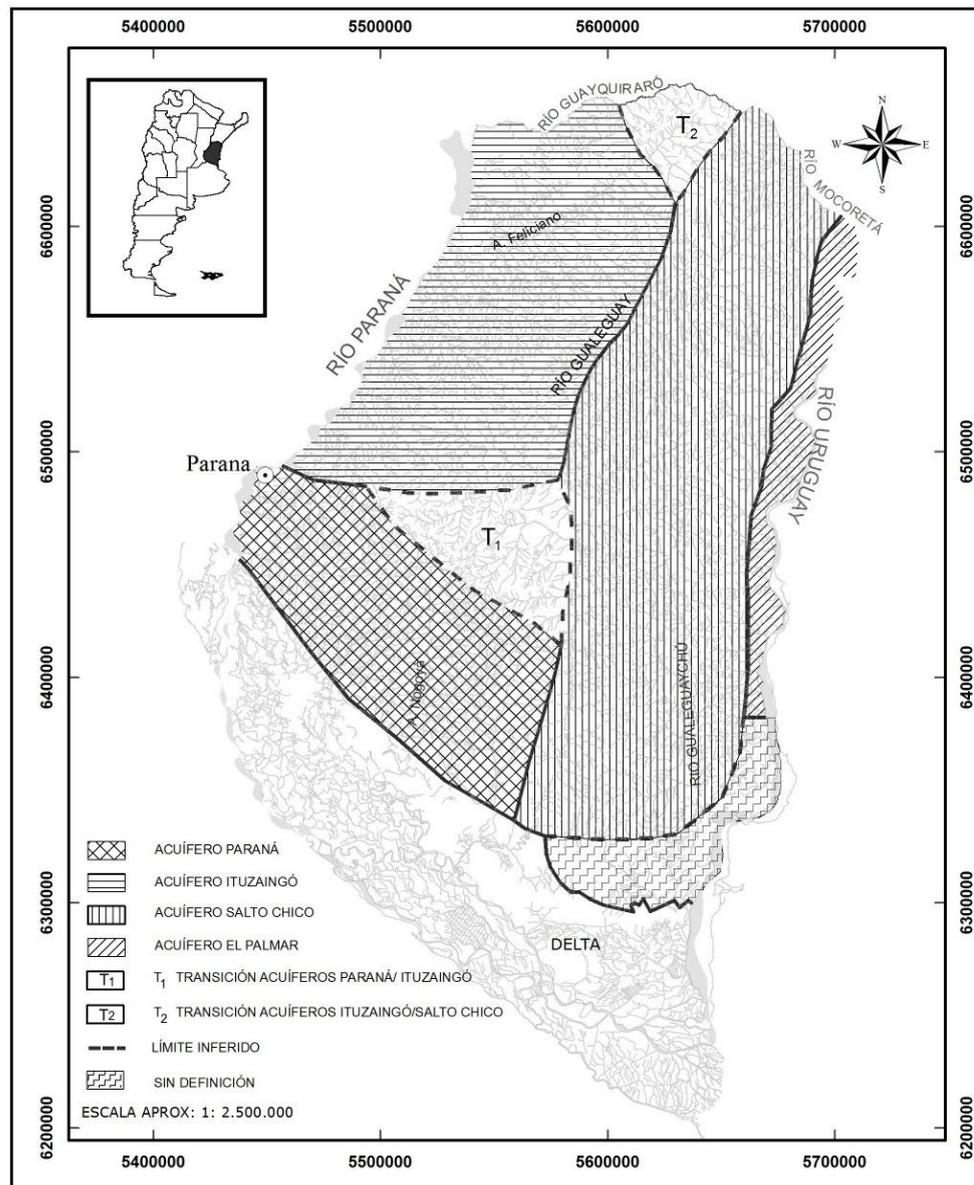
La provincia de Corrientes se posiciona como la mayor productora del arroz, donde el principal sistema de irrigación desarrollado es por represas, y en menor medida por extracción de aguas de ríos o arroyos. En segundo lugar, se ubica la provincia de Entre Ríos, que utiliza sistema de riego por medio de pozos profundos con unidades de bombeo y por represas, ríos y arroyos. Las provincias de Santa Fe, Formosa y Chaco consumen agua que se extrae de ríos y arroyos, constituyendo la mayor fuente de irrigación de estas provincias (De Bernardi, 2017).

La provincia de Entre Ríos forma parte de la región de la Mesopotamia Argentina, junto con Corrientes y Misiones. Tomando como base el trabajo de Santi et al. (2013), se caracteriza edafológicamente a la provincia de acuerdo con sus principales órdenes de suelo: Vertisoles, Molisoles, Alfisoles y Entisoles. Respecto a su geomorfología, los autores dividen a la provincia en 7 regiones:

- 1) Depósitos antiguos del río Paraná o Bañados o bajos del yacaré,
- 2) Superficie Feliciano - Federal,
- 3) Faja arenosa asociada al río Uruguay,
- 4) Lomadas loésicas de Crespo,
- 5) Área de Tala,
- 6) Colinas de Gualeguaychú,
- 7) Complejo deltaico.

Finalmente, en cuanto a geología e hidrología, consta de cuatro Formaciones acuíferas terciarias y cuaternarias: las Formaciones Paraná, Ituzaingó y Salto Chico, que alojan acuíferos semiconfinados, y la Formación El Palmar, un acuífero libre.

En la Figura 3, se observa la distribución en planta de los cuatro acuíferos, los que, con sus particularidades y diferencias litoestratigráficas, en el terreno de la hidrogeología constituyen un sistema interconectado. Los sectores T1 y T2 son áreas de transición (Paraná-Ituzaingó, Ituzaingó-Salto Chico), donde se desconoce el pasaje de una Formación acuífera a otra (Santi et al., 2013).



**Figura 3:** Acuíferos terciarios y cuaternarios. Fuente: Santi et al., 2013.

En Entre Ríos, Silva Busso & Amato (2013) determinaron la demanda de agua en el acuífero Ubajay en explotaciones forestales, siendo esta actividad la de mayor importancia en la provincia, seguida de la ganadera. La demanda de agua para uso

ganadero resultó la más significativa dentro de la comarca en estudio, implicando un 53.44% de la misma, seguida de la demanda para consumo humano en valores de 46.55% y la de uso forestal representa solo el 15.07% del total.

El área del Parque Nacional está conformada por cuatro cuencas ubicadas en el centro-este de la Provincia, en los Departamentos de Colón y San Salvador. Estas cuencas tienen su desembocadura en el Río Uruguay (Cuenca del Plata), atravesando el Parque Nacional El Palmar. A este conjunto de cuencas se las identifica como "Cuencas de El Palmar". El área involucra esas otras tres microcuencas, por una cuestión de que todas vierten sus aguas sobre el Parque Nacional además de la cuenca del Arroyo El Palmar propiamente dicha. Las cuencas están compuestas por cuatro cuencas distintas, cuyos cursos de agua no se relacionan entre sí: de norte a sur son la cuenca del Arroyo Ubajay, la del Arroyo Los Loros, la cuenca del Arroyo El Palmar y la del Sumaca-Espino. De ellas, la mayor en términos de longitud y caudal es la del Arroyo El Palmar; éste es de tipo permanente y recibe las aguas de cursos permanentes y estacionales. Las otras tres cuencas son menores y tienen menor cantidad de afluentes y caudal. El Arroyo Los Loros y el Sumaca-Espino tienen la totalidad de sus aguas dentro del Parque Nacional, y el Ubajay, al igual que el Arroyo El Palmar, tiene sus nacientes en campos privados. Todas las cuencas tienen una pendiente general de oeste a este muy suave (Micou, 2003).

En relación a la importancia de los estudios anteriormente mencionados, resulta pertinente destacar que la producción sostenible de alimentos debe ser promovida en todos los países del mundo, tanto desde gobiernos, organizaciones internacionales y sector privado (ONU, 2002). En este marco, es prioritario el cuidado del agua como recurso económico y social (Manzán et al., 2012), justificando la necesidad de la comprensión de su dinámica en la naturaleza para la optimización de su aprovechamiento en la producción de alimentos.

Por la extensión del cultivo de arroz a nivel mundial y su importancia en la dieta humana, y por las características particulares de la conducción bajo riego por inundación, predominante en nuestro país, resulta crucial la revisión bibliográfica respecto a la demanda agua del cultivo comparada con la velocidad de recarga de los acuíferos, por constituirse como la principal fuente de agua en la provincia de Entre Ríos para la producción arrocería. Finalmente, es pertinente la discusión sobre sistemas de riego alternativos que permitan un uso más eficiente del recurso hídrico.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

El objetivo del trabajo es la recopilación de estudios de sostenibilidad de la recarga de la cuenca El Palmar en Entre Ríos, para abastecer la demanda de las explotaciones arroceras (*O. sativa*). Se pretende discutir la información acerca los requerimientos hídricos y de la eficiencia del uso del mismo por tratarse de un cultivo demandante de grandes cantidades del recurso agua.

### **Objetivos Específicos**

1. Analizar los valores propuestos por la bibliografía para cuantificar las tasas de recarga de los acuíferos de la cuenca El Palmar.
2. Evaluar alternativas de sistemas de riego para mejorar la eficiencia en el uso de agua en el cultivo de arroz.

## DESARROLLO

En el presente trabajo de investigación, se eligió como base de estudio la cuenca del Arroyo Palmar ubicada en el área protegida Parque Nacional El Palmar, situada en la provincia de Entre Ríos a orillas del río Uruguay.

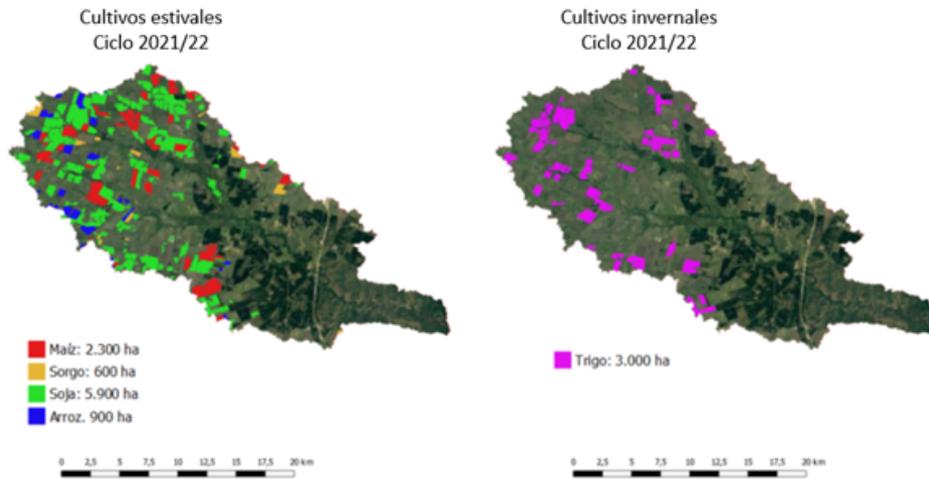


**Figura 4:** Cuenca del arroyo "El Palmar". Ubicación en la provincia de Entre Ríos, superficie y longitud de arroyos. Fuente: Elaboración propia.

Micou (2003) realizó la descripción de los usos de suelo para la provincia de Entre Ríos. Destaca en primera instancia el uso forestal, estableciendo dos regiones en la provincia: el Delta, con plantaciones de álamos y sauces; y por otro lado, el nordeste de la provincia, donde se encuentran explotaciones de pinos (*Pinus spp.*) y eucaliptos (*Eucalyptus spp.*). Esta última es la que se encuentra en las cuencas de la región. El autor hace mención a su vez del uso citrícola, concentrado fundamentalmente en la franja lindante con el río Uruguay, abarcando los departamentos de Concordia, Federación y el norte de Colón, siendo la provincia de Entre Ríos, en aquel momento, la segunda provincia en producción de cítricos (24% de las toneladas producidas en el país) y la primera en superficie citrícola a nivel nacional (28,5% del total nacional). Finalmente, destaca la presencia del monte semi natural o naturalizado, de importancia para el mantenimiento de la biodiversidad y la producción ganadera, y la vegetación marginal a los cursos de agua, es decir, en los márgenes del río Uruguay y sus afluentes.

Más recientemente, Silva Busso et al. (2021) definieron los usos de suelos de la cuenca, siendo los más importantes el agro-ganadero y el forestal. El cambio de los usos se debe a cambios geológicos que conducen a diferentes tipos de suelos, marcando dos

zonas bien diferenciadas: la cuenca baja situada hacia el oriente netamente silvícola y la cuenca media- alta agrícola, siendo el cultivo de arroz el más relevante.



**Figura 5:** Superficie de la cuenca del arroyo “El Palmar” destinada a cultivos estivales e invernales. Fuente: Elaboración propia 2021/2022.

Como anteriormente se menciona la cuenca se conforma por varios acuíferos, los cuales poseen una geología propia de cada formación (F. Salto chico, Ubajay, Hernandarias) que determina los distintos usos de suelos en la región y cubren más del 95% de la superficie de la cuenca.

La Formación Salto Chico, cuenta con una extensión regional de 7.870,88 Km<sup>2</sup> de carácter semi libre, la cual constituye la base de la explotación de aguas para riego de arroz en Entre Ríos. Presenta caudales que oscilan entre 200-500 m<sup>3</sup>/h hasta 800 m<sup>3</sup>/h, valores de transmisividad de 1500 a 2100 m<sup>2</sup>/d, una permeabilidad de 30 a 72 m/d y un Coeficiente de almacenamiento entre 1.10<sup>-1</sup> a 5.10<sup>-2</sup>. Es el resultado de sucesión de gravas silíceas y arenas cuarzosas estratificadas con niveles suprayacentes que afloran y cubren toda la cuenca del Arroyo el Palmar conocidas como las F. Ubajay y F. Hernandarias. Por su parte, la formación Ubajay unidad sedimentaria de origen fluvial que se comporta como un acuitardo, está conformada por suelos Entisoles nuevos de poca evolución, compuesta por materiales regolíticos, arenas finas a medias de colores rojizos amarillentos y ocres, comprende un espesor variable entre 3 a 12 mts, de edad Holocena. Finalmente, la F. Hernandarias unidad más extensa de edad pleistoceno, compuesta por suelos Vertisoles, ricos en arcillas o arcilla limosa de casi una decena en metros de espesor, con finas láminas de arena distribuidas en todo el perfil con

intercalaciones de niveles yesíferos, la misma se comporta como un acuicludo o acuitardo de muy baja permeabilidad y presentan formación de grietas profundas en las épocas de seca (Gentili y Rimoldi, 1979). Esta formación es la representante de la zona agro-ganadera por lo que sus suelos permiten el cultivo de cereales y oleaginosas en seco, así como también el cultivo de arroz, principal demandante del recurso agua (Silva Busso et al., 2021).

Iriondo (2010) considera incorrectas las nomenclaturas informales de “Formación Salto Chico” y “Formación Ubajay”, a las que engloba bajo la denominación “Formación El Palmar”. Describe a esta formación como la típica cuenca media, que forma grandes lóbulos meándricos a ambos lados del cauce actual y su superficie está ubicada alrededor de 10 metros por encima del nivel de los valles afluentes. Está compuesta de facies de cauce (arenas que incluyen lentes de grava y cantos rodados), facies de inundación y facies de albardón (arena limosa). El espesor varía entre 3 y 12 metros. La composición es silícea, con más de 90 % de cuarzo en la fracción arena y sílice hidratada (calcedonia) y cuarzo en los cantos rodados. La formación está poco consolidada, con claras diferencias entre los estados húmedo y seco debido a particulares características de los sesquióxidos de hierro. Contiene caolinita neoformada en varios afloramientos. Esta formación fue datada por TL en 80.670+/-13.420 a. A.P. en Federación y 88.370+-35.680 a.A.P. en Salto, lo que corresponde al Estadio Isotópico 5a, característico de una época húmeda y cálida. Coincidentemente, Tonni (1987) publicó el hallazgo de un *Stegomastodon platensis* en la misma, lo que indica también edad pleistocena superior.

### **Objetivo específico 1:** Análisis de la recarga de los acuíferos.

Pese a la importancia que revisten para la explotación racional del recurso agua, los estudios respecto a la recarga de los acuíferos de la cuenca El Palmar son escasos. Los estudios disponibles hasta el momento consideraban que la recarga del acuífero Salto Chico ocurría principalmente de manera vertical, con valores de infiltración mínima del 7% (Auge & Santi, 2002; Auge et al., 2005) e infiltraciones máximas del 15% de las precipitaciones (Santi, 2002; Santi et al., 2009). Para determinar el balance hídrico a nivel edáfico se emplearon datos provistos por el INTA EEA Concepción del Uruguay desde 1968 al 2000, obtenidos por el método de Thornthwaite & Mather (1957). También se utilizaron datos aportados por mediciones

escasas de algunos arroyos de la región en períodos breves de tiempo y datos meteorológicos. La presencia dominante de bicarbonatos en las aguas fue establecida como indicador del proceso de infiltración vertical.

Sin embargo, Silva Busso et al. (2021) llegaron a la conclusión que estos datos están sobreestimados, y que la recarga vertical del acuífero Salto Chico no es la principal ni reviste importancia cuantitativa. Estos últimos determinaron, para las formaciones de Ubajay y Hernandarias, una recarga vertical del 1.41% y 0.04% de las precipitaciones totales, respectivamente.

Calcularon la recarga del acuífero mediante la utilización de sensores de registro continuo ubicados en dos estaciones (Hernandarias y Ubajay) de control dentro de la cuenca del Arroyo Palmar, para la determinación del exceso de agua en el suelo en cada estación. Cada estación contaba con un instrumental de medición constituido por tres sensores 5TM marca Decagon Devices, que determinaron humedad y temperatura del suelo, registraron la temperatura ambiente sobre el nivel del mismo, midieron los niveles estáticos del agua subterránea y recolectaron datos meteorológicos.

Para calcular el volumen de recarga, los autores consideran al excedente de agua de las precipitaciones que no se almacena, se evapotranspira o se transfiere a horizontes de suelo inferiores, por lo que la recarga neta del acuífero es aquella porción de las precipitaciones que supera los valores de capacidad de campo del suelo y atraviesa los niveles inferiores de los mismos.

La metodología que emplearon fue la de Lerner (1990), método de balance directo denominado por el autor como recarga neta, medida por un piezómetro:

$$\Delta_{Ne} = \sum_{n=1} (Ne_n - Ne_{n-1})$$

$$Rn = (\Delta_{Ne}) \times s$$

Donde

$\Delta_{Ne}$  = Variación del nivel estático en mm entre dos periodos de tiempo (n: final y n - 1: inicial).

s = Porosidad específica o coeficiente de almacenamiento (adimensional).

Rn = Recarga neta en mm.

El mismo presenta limitaciones en su uso que deben tenerse en cuenta, ya que no pueden utilizarse si no hay oscilaciones de los niveles piezométricos, las estaciones

deben ser representativas de la zona de recarga y arroja mejores resultados para niveles piezométricos someros.

Las mediciones se realizaron durante el período comprendido entre el 9 de noviembre de 2014 y el 29 de noviembre de 2015, en dos estaciones: Ubajay, donde el 6.61% (9,38 mm) de las precipitaciones efectuadas en el año de estudio sobrepasaron los niveles inferiores de suelo (1,2 m), y para la estación Hernandaria el 0,89% (13,6 mm) pasa la zona edáfica de 1,5 m, debido a la composición de esta formación.

### **Objetivo específico 2:** Evaluación de métodos de riego alternativos.

Kraemer et al. (2005) destacan la importancia del riego por inundación en el cultivo de arroz en Argentina. Esta forma de cultivar crea un ambiente en condiciones ideales que conducen a obtener rendimientos superiores a las obtenidas por secano, por el recurso agua que actúa como el mejor fertilizante, herbicida, fungicida e insecticida para el arroz. De esto surge que el manejo del agua debe ser lo más eficiente posible, ya que permite obtener el máximo aprovechamiento de los insumos aplicados como así también el control de agentes bióticos y abióticos. Entre los efectos positivos del agua sobre el cultivo, se destacan los siguientes puntos:

1) Fertilidad: con un manejo correcto del agua, hay mejoras en un 70% de eficiencia en el uso de los fertilizantes utilizados, disminuyendo pérdidas principalmente del nitrógeno aplicado como fuente en forma de urea. Al mismo tiempo, debido a los procesos que se generan en los suelos inundados aumenta la disponibilidad de los nutrientes del suelo para las plantas.

Según Marano (2014), los suelos inundados sufren cambios entre las 6 u 8 horas de haberse inundado, la tasa de oxígeno empieza a disminuir por acción de la actividad microbiana que lo consumen, la difusión del oxígeno se vuelve 10.000 veces más lenta y se establecen 4 zonas de espesor variable: una zona por encima del suelo donde la concentración del oxígeno es mayor por la menor actividad microbiana; una interfase entre el agua y el suelo de 6 a 12 mm espesor; una capa reducida debajo de la zona oxidada de 0.02 a 0.2 m y un estrato oxidado en la zona radical. Los procesos de reducción comienzan y se estabilizan hasta alcanzar un equilibrio según contenido de materia orgánica y concentración de iones. Al descender el potencial redox, se reducen los nitratos, los óxidos de manganeso se transforman en iones de manganeso y su concentración se eleva. La concentración del fósforo soluble aumenta debido a la

hidrólisis de los fosfatos de hierro y aluminio, liberación de fósforo adsorbido por intercambio aniónico de las arcillas e hidróxidos de hierro y aluminio, y a la reducción de hierro férrico a ferroso con liberación de fósforo adsorbido y fijado por el hierro.

2) Control de malezas: el agua es el mejor herbicida que tiene el cultivo una vez que el lote se inunda. Esto va de la mano con un correcto uso de los herbicidas cuando las plantas de malezas aún son pequeñas (2-3 hojas) y de una demora en el riego de no más de dos días desde la aplicación del herbicida ya que de esta manera actúa mejor el producto y al mismo se evita los nuevos nacimientos de las semillas de malezas. Reduce el número de aplicaciones con herbicidas selectivos si se realizara controles tardíos con malezas más grandes.

3) Macollaje: el agua favorece la formación de macollos con altura de láminas de agua que no superen los 5 cm cuando se inicia el riego (4-5 hojas), de lo contrario afectaría la producción de los mismos y comprometería el rendimiento por la baja cantidad de panojas/m<sup>2</sup>.

4) Plagas, enfermedades y rendimiento: atenúa el ataque de los mismos cuando se mantienen alturas de láminas entre 5-7 cm. Lograr un correcto y eficiente uso del agua conduce a numerosos beneficios para que el cultivo alcance los máximos rendimientos posibles.

El riego tradicional por inundación permanente comienza cuando la planta tiene entre 4-5 hojas, alrededor de los 14 - 17 días de nacida y se mantiene la lámina de agua hasta 15-20 días después de la floración, luego se realiza drenaje previo a la cosecha para la cosecha en suelo seco. Dicho esto los volúmenes de agua utilizados por este método son cuantiosos.

Para alcanzar una utilización más eficiente del agua dulce, en vista de las dificultades de recarga del acuífero y la potencial mejora de la eficiencia de uso del agua (EUA) en kilogramos de grano, este objetivo específico tiene como propósito evaluar alternativas al sistema de riego gravitacional tradicional del arroz:

- Inundación intermitente CPFA.
- Uso de mangas plásticas en reemplazo del sistema tradicional de conducción de agua.

Profesionales de la Estación Experimental del INTA Concepción del Uruguay, Entre Ríos (Pirchi et al., 2019), condujeron la investigación de un sistema de riego

intermitente denominado CPFA (Control Parcial de Flujo de Agua), consistente en acotar el período de inundación y el mantenimiento de un nivel mínimo de humedad en el suelo. Se retrasó el momento de inicio de riego hasta los 60 días post emergencia y finalizó 15 días post - floración, es decir, hubo entre 50 - 60 días de riego en contraste con los 100 días que conlleva el sistema de riego tradicional. En los períodos en que el cultivo no se encontraba inundado, realizaron riegos por pulsos a fines de mantener como mínimo un nivel de humedad del 80% del agua útil en el suelo. Obtuvieron rendimientos por hectárea entre 7434 - 9462 kg, con dotaciones de riego 6461 - 8611 m<sup>3</sup>/ha y factor de calidad por encima de 100. El volumen de agua empleado, mucho menor a los 10 - 13.000 m<sup>3</sup>/ha utilizados en el sistema convencional, no fue en detrimento del rendimiento ni la calidad.

Por su parte, Quezada et al. (2011) coinciden en que el uso de riego por inundación intermitente, en relación al riego permanente, reduce el uso del agua en un 41%, al mismo tiempo la eficiencia en el uso del agua para producir mayores kg de arroz por unidad de agua tomaron valores de 0.726 kg/m<sup>3</sup> para riego intermitente y 0.523 kg/m<sup>3</sup> para riego permanente.

Carracelas et al. (2019) realizaron estudios en el manejo de agua por medio de diferentes sistemas de riego en el periodo comprendido del 2009 y 2015 en suelos arroceros del norte y centro del Uruguay. Los tratamientos analizados fueron el tradicional con láminas de agua de 10 cm durante todo el ciclo; inundación por riego intermitente hasta primordio e inundación intermitente hasta finalizar el ciclo, en ambos la lámina de agua se dejaba consumir y restablece cuando se encontraba saturado (barro líquido); por último alternancias de suelo saturado y seco hasta primordio. Los distintos métodos alternativos de riego permitieron un ahorro importante de agua con respecto al tradicional en valores del 28 al 42 % para riego intermitente permanente e intermitente y de un 29% para el riego con alternancia de suelo seco.

En Uruguay, Balian et al. (2018) realizaron un estudio de costos - beneficios del riego intermitente en el cultivo de arroz, debido a que el recurso agua es un factor limitante para la expansión en la producción de arroz más hacia la zona norte y por tales motivos se busca alternativas para el uso eficiente del agua y reducción de costos de producción debido al costo del agua de riego que les implica a los arroceros pasar de 18 bolsas de arroz/ha de costo por riego tradicional a 14 bolsas/ ha en riego intermitente.

El éxito del riego intermitente radica en el correcto manejo del agua, es decir, de la rapidez con la que se vuelva a restablecer la lámina de agua sin llegar a causar estrés por déficit hídrico en la planta.

En cuanto a la implementación de mangas plásticas para el riego en arroz también llamados politubos son tubos aplanados para la conducción de agua a baja presión de alta eficiencia y reducción de energía, sus dimensiones varían entre 8" a 22" de diámetro, con un espesor variable de 200 a 350 micrones para mangas de irrigación y de 350 a 760 micras para mangas de conducción. Esta amplia gama de tamaños y espesores permite la flexibilidad necesaria para ajustar el diseño por lote y ajustar el flujo de agua según necesidades. En el mercado se puede encontrar de dos clases, las mangas blancas que son hechas de polímeros y mangas negras de material reciclado con valores y calidades distintas.

En los últimos tiempos se presentó un aumento en el uso del mismo, debido a las ventajas que representa. Entre ellas podemos mencionar el bajo nivel de inversión inicial por lo que reduce costos de riego, disminuye pérdidas de agua por evaporación, sustituye las conducciones internas en los lotes, reducción de ancho de los canales de conducción tradicionales de 3-4 mts a 0.50 mts, optimiza la mano de obra por su fácil instalación y manejo, uniformidad, velocidad y productividad, conducción de grandes volúmenes de agua ya sea por medio de bombeo o por gravedad.

También presenta sus desventajas como su baja durabilidad según material ya sea mangas blancas o negras, hasta dos años de uso podrían utilizarse sin inconvenientes, espesor, baja resistencia a la presión interna de la cual no sería una desventaja porque conociendo el material que se trabaje se debe buscar el mejor sistema de carga hidráulica que se adapte y no sea superada, otro inconveniente sería el ataques por roedores. Lo dicho anteriormente indica que estas desventajas dependen mucho del manejo y uso que se le de a las mismas.

Para su correcta implementación, el uso de accesorios es fundamental para el diseño, instalación y uso del sistema. Se debe contar con los siguientes elementos:

- Cutter o contador diámetro de dimensiones variables con dientes de metal para facilitar la instalación de las compuertas plásticas.
- Compuertas plásticas ajustables, para controlar el volumen de agua o cortar el flujo en la filas que no se riegan.
- Precintos o abrazaderas de acero inoxidable con cierre de rosca, logran asegurar la manga a la fuente de agua.

- Empalmadores Y o T hechas de PVC para conexión entre los rollos de mangas.

En el trabajo de Bandeira & Böcking (2014), realizaron estudios de riego por mangas en 4 zafras del cultivo de arroz como medio de sustitución de los canales secundarios o internos de tierra. Obtuvieron un ahorro de 1420 m<sup>3</sup> de agua de riego respecto al sistema por canales, con una eficiencia de uso del agua del 72% en comparación al tradicional de 65%. Presentó menores rindes pero no debe atribuirse al uso de la tecnología misma y en cuanto al ahorro de agua plantean como un posible incremento en la superficie de siembra del 10% como compensación de la disminución en el rinde obtenido por este riego.

En Mississippi, Estados Unidos, Massey et al. (2014) mantuvieron o mejoraron los rendimientos de 5 variedades y un híbrido de arroz combinando las bondades del riego intermitente con el sistema de riego por entradas múltiples (MIRI, por sus siglas en inglés), respecto al cultivo bajo inundación continua.

En Chile, Donoso et al. (2020) determinaron que el uso de mangas permite un llenado de cuadros de riego tres veces más rápido y una mayor productividad del agua (kg de arroz / m<sup>3</sup> de agua), tanto en arroz de siembra directa como pregerminado, comparados con el sistema de riego sin mangas.

Con estos sistemas, se pone en evidencia la reducción de las pérdidas de agua en la distribución, mientras que se logra una mayor uniformidad en la aplicación de la lámina en el lote, respecto al riego por inundación convencional. Son herramientas simples de utilizar, cuyas propiedades los hacen altamente eficientes y reducen la necesidad de realizar operaciones costosas para confección de canales y colocación de tuberías. Las mangas reducen el consumo de agua gracias a su capacidad de ajustar con precisión según las necesidades del cultivo.

El desafío de aumentar la productividad y proteger el recurso agua para la producción agraria, pasa definitivamente por la incorporación de estas tecnologías a los procesos productivos tradicionales, las cuales permiten reducir costos de insumos y mano de obra, logrando un fuerte impacto en el desarrollo de los cultivos e impulsando el crecimiento económico por aumento de la producción y los rendimientos.

Esto resulta particularmente importante en la provincia de Entre Ríos, donde confluyen los efectos del tiempo transcurrido hasta que el agua utilizada para el riego retorna al acuífero con la posible sobreexplotación cuando existe una alta demanda (Marano & Filippi, 2015). La reducción en el consumo de agua, en caso de la

implementación de nuevas tecnologías de manera generalizada en los sistemas productivos arroceros de la cuenca, optimizarán la recarga del acuífero subyacente, cuya determinación es de vital importancia para su manejo de manera sostenible (Vélez & Vásquez, 2004).

Se trata de alternativas factibles para muchos productores arroceros, que manifiestan la necesidad de incorporar tecnología más eficientes, de bajo costo, con mejora de rendimientos, siendo el arroz el cultivo donde el ingreso y manejo del agua son clave para la mejora y cuidado del recurso hídrico evitando consumos excesivos.

## CONCLUSIONES

La recarga de los acuíferos, fuente de agua de riego para el cultivo de arroz en la provincia de Entre Ríos, es un punto crítico que no debe soslayarse al momento de encarar proyectos productivos. La limitada recarga vertical de los mismos, la falta de estudios que cuantifiquen el impacto de las zonas de transición entre formaciones, sumado a la demanda de altos volúmenes de agua por el cultivo de arroz en sistema de riego gravitacional convencional, plantean la necesidad de evaluar alternativas de manejo.

Numerosas investigaciones, nacionales e internacionales, ponen en conocimiento el incremento de kilogramos de grano producido por unidad de volumen de agua al aplicar tecnologías superadoras tales como el riego por mangas, la inundación intermitente o ambas combinadas. Las alternativas de riego ponen de manifiesto que con un correcto conocimiento y manejo de los sistemas, puede reducirse el volumen de agua empleada para el riego sin ir en detrimento de la calidad y rendimientos. El desafío en este punto será pasar de la etapa experimental y llevarlo a lotes productivos de manera generalizada, teniendo como prioridad el cuidado de un recurso natural tanpreciado como el agua.

Es por ello que la aplicación de nuevas tecnologías de riego en la cuenca del arroyo “El Palmar”, tales como las mangas plásticas y CPFA, permitirán aumentar la eficiencia de utilización del agua del cultivo de arroz, manteniendo el rendimiento pese a reducir a la mitad los requerimientos hídricos, según experiencias realizadas en la provincia de Entre Ríos. En consecuencia, de implementarse estas tecnologías superadoras a gran escala en la superficie de la cuenca, potencialmente reducirá el riesgo de sobreexplotación del acuífero subyacente.

Estudios posteriores deberían ahondar los conocimientos acerca de la recarga de acuíferos en el territorio nacional, pues la información al respecto sigue siendo escasa pese a su relevancia en la producción agropecuaria. Asimismo, las futuras investigaciones pueden orientarse no sólo a innovar sistemas de riego para el cultivo de arroz, sino a evaluar cultivos alternativos que sean viables de realizar en esa superficie y que estén mejor adaptados al sistema de secano.

## BIBLIOGRAFÍA

- Auge, M., Sánchez, C., & Santi, M. (2005). Hidrogeología de la región arrocerá de Entre Ríos. In *Actas IV Congreso Hidrogeológico Argentino*.
- Auge, M., & Santi, M. (2002). Disponibilidad de agua subterránea para la producción arrocerá de la provincia de Entre Ríos: Inventario a nivel de reconocimiento. *Consejo Federal de Inversiones, Buenos Aires*.
- Bandeira, S., & Böcking, B. (2014). Riego de arroz por mangas. *Grupo de Desarrollo de Riego, Donistar SC, Salto, Uruguay*.
- Balian, C., Silva, M. E., & Borges, M. (2018). Análisis Costo-Beneficio del riego intermitente en el cultivo de arroz en Uruguay.
- Carracelas, G., Hornbuckle, J., Rosas, J., & Roel, A. (2019). Irrigation management strategies to increase water productivity in *Oryza sativa* (rice) in Uruguay. *Agricultural water management*, 222, 161-172.
- Cabuslay, G. S., Ito, O., & Alejar, A. A. (2002). Physiological evaluation of responses of rice (*Oryza sativa* L.) to water deficit. *Plant Science*, 163(4), 815-827.
- Donoso, G., Becerra, V., Paredes, M., Uribe, H., & Carracelas, G. (2020). Capítulo 23. Manejo del agua de riego en el cultivo de arroz en Chile.
- De Bernardi, L. A. (2017). Perfil del mercado de arroz. Ministerio de Agroindustria. Disponible en:  
<https://www.magyp.gob.ar/new/0-0/programas/dma/granos/Perfil%20de%20Mercado%20de%20Arroz%202017.pdf>
- FAO (2022). Nota informativa de la FAO sobre la oferta y la demanda de cereales. Fecha de publicación: 02/09/2022. Fecha de acceso: 19/09/2022.  
<https://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/es/>
- Gentili, C., & Rimoldi, H. (1979). Mesopotamia en J. Turner (ed.): Geología Regional Argentina. In *II Simposio Geología Regional Argentina, Córdoba (1)* (pp. 185-223).
- Iriondo, M. H. (2010). *Geología del Cuaternario en Argentina*. Museo Provincial de Ciencias Naturales Florentino Ameghino.

- Kraemer, A., Moulin, J. F., Marín A. R., Kruger, D., & Herber, L., (2005). Manual del aguador arrocero. Principios básicos para el Manejo del Riego en el cultivo de Arroz. *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Proyecto Arroz. Corrientes.*
- Khush, G. S. (2000). Taxonomy and origin of rice. *Aromatic rices*, 5-13.
- Kurtz, D., Fedre, J., & Ligier, D. (2016). Guía de buenas prácticas agrícolas para el cultivo de arroz en corrientes. Disponible en: [https://inta.gov.ar/sites/default/files/arroz\\_guia\\_2016-final.pdf](https://inta.gov.ar/sites/default/files/arroz_guia_2016-final.pdf)
- Lerner, D. N. (1990). Técnicas. En: van Acken (ed.). *Recarga de aguas subterráneas. Una guía para comprender la recarga natural* (pp. 99 - 229). Hannover, Alemania.
- Lu, B. R. (1999). Taxonomy of the genus *Oryza* (Poaceae): historical perspective and current status. *International Rice Research Notes*, 24(3), 4-8.
- Manzán, A., Pagliettini, L., & Robles, D. (2012). Valoración del agua para la producción de arroz en Entre Ríos. *Aqua-LAC*, 4(1), 1-8.
- Marano, R. P. (2014). *Manejos da irrigação e da adubação na cultura de arroz (Oryza sativa L.) visando incrementar a eficiência do uso da água e do nitrogênio* (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).
- Marano, R. P., & Filippi, R. A. (2015). Water Footprint in paddy rice systems. Its determination in the provinces of Santa Fe and Entre Ríos, Argentina. *Ecological indicators*, 56, 229-236.
- Massey, J. H., Walker, T. W., Anders, M. M., Smith, M. C., & Avila, L. A. (2014). Farmer adaptation of intermittent flooding using multiple-inlet rice irrigation in Mississippi. *Agricultural Water Management*, 146, 297-304.
- Micou, A. P. (2003). Riesgo ambiental por invasiones biológicas en una zona con alto valor de conservación: las cuencas de El Palmar, Entre Ríos.
- Osakabe, Y., Osakabe, K., Shinozaki, K., & Tran, L. S. P. (2014). Response of plants to water stress. *Frontiers in plant science*, 5, 86.

- ONU (2002). Cumbre Mundial sobre desarrollo sostenible 26 de agosto – 4 de septiembre de 2002. Johannesburgo, Sudáfrica.
- Paredes, M., Becerra, V., & Donoso, G. (2021). 100 años del cultivo del arroz en Chile en un contexto internacional 1920-2020. *Colección Libros INIA-Instituto de Investigaciones Agropecuarias*.
- Pirchi, H. J., Arguissain, G. G., Gregori, L. A., & Crepy, M. A. (2019). Evaluación del sistema de riego CPFA (control parcial de flujo de agua) y riego con mangas. En: 6° Reunión Internacional de Riego. Uso eficiente del agua para riego, 22 y 23 de agosto de 2018. INTA EEA Manfredi. 1era ed. Manfredi, Córdoba.
- Quezada, C., Hernaíz, S., Stolpe, N., & Saludes, A. (2011). Efectos del método de riego intermitente en componentes de rendimiento y manejo del agua en once genotipos de arroz (*Oryza sativa* L.). *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences* 27.
- Santi, M. (2002). Estudio de Aguas Subterráneas en el Sudoeste de la Provincia de Entre Ríos. *Dirección de Hidráulica de Entre Ríos (DHER)-Consejo Federal de Inversiones (CFI)*.
- Santi, M., Bianchi, G., & Rezzónico, G. (2009). Agua subterránea en el noroeste de Entre Ríos. *VI Congreso Argentino de Hidrogeología, Planificación y Gestión de aguas subterráneas*. Santa Rosa, La Pampa, Argentina. Acta I, 63 - 73.
- Santi, M., Bianchi, G. J., & Rezzónico, G. (2013). Caracterización de los principales acuíferos de la provincia de Entre Ríos. In *VIII Congreso Argentino de Hidrogeología y VI Seminario Latinoamericano sobre Termas Actuales de la Hidrología Subterránea (La Plata, 17 al 20 de septiembre de 2013)*.
- Silva Busso, A., & Amato, S. (2013). Posibilidades de Explotación y Demanda Hídrica sobre el Acuífero Ubajay en el Sector Oriental de la Provincia de Entre Ríos. In *24 Congreso Nacional del Agua* (pp. 2-56).
- Silva Buso, A., Moreno Merino, L., & Chury, M. (2021). Evaluación de la recarga en los acuíferos de las formaciones Salto Chico, Hernandarias y Ubajay: Arroyo Palmar, Entre Ríos, Argentina. 132 (3): 253 - 271.
- SISA - Sistema de Información Simplificado Agrícola (2021). Arroz.2020.2021.

- Thornthwaite, C. W., & Mather, J. R. (1957). Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. *Centerton*.
- Tonni, E. P. (1987). *Stegomastodon platensis* (Mammalia, Proboscidea, Gomphotheriidae) y la antigüedad de la Formación El Palmar en el Departamento Colon, provincia de Entre Ríos, República Argentina. *Ameghiniana*, 24(3-4), 323-324.
- Vélez, M. V., & Vásquez, L. M. (2004). Métodos para determinar la recarga en acuíferos. *Avances en recursos hidráulicos*, (11), 51-62.