

Capítulo 23. Manejo del agua de riego en el cultivo de arroz en Chile

Gabriel Donoso Ñ., Viviana Becerra V., Mario Paredes C., Hamil Uribe C., Gonzalo Carracelas G.

El arroz (*Oryza sativa* L.) es uno de los alimentos principales a nivel mundial, con una producción de 509,2 millones de toneladas (FAO, 2020) que provienen, mayoritariamente, de países asiáticos como China e India. Debido al incremento en la población mundial que alcanzaría los 10 billones de personas para el año 2050 (UN, 2015), se estima un incremento de la demanda por alimento entre un 60 % a 100 % (Van Der Mensbrugge et al., 2009). Estudios realizados en diversos países arroceros incluidos en el atlas mundial (Global Yield Gap Atlas), indican que es posible continuar aumentando los rendimientos en las mismas áreas productoras de arroz, para satisfacer esta creciente demanda (Carracelas et al., 2017a).

La producción actual, relativa al rendimiento potencial del cultivo de arroz, se encuentra en el 60 % (Carracelas et al., 2019b; GYGA, 2019). Además, los rendimientos promedios de los campos arroceros a menudo comienzan a estabilizarse cuando alcanzan el 75 % a 85 % del potencial (Cassman et al., 2003; Lobell et al., 2009). Sin embargo, la disponibilidad del recurso hídrico para el cultivo podría ser insuficiente en India, Tailandia y Australia, entre otros, lo cual limitaría los aumentos de producción estimados, donde la optimización del uso del agua de riego juega un rol clave (Tuong y Bouman, 2003; Gaydon et al., 2010; Dunn y Gaydon, 2011). La reducción potencial estimada de los rendimientos a nivel mundial, debido a la menor disponibilidad de agua para riego, podría en promedio alcanzar los 18 millones de toneladas anuales de arroz (O'Toole, 2004). Por ello, la disminución de la disponibilidad del recurso hídrico es un gran desafío para la producción de arroz, donde se necesita contar con alternativas de manejo que permitan lograr una mejora en la optimización y uso del agua, sin disminuir significativamente la producción de grano (Dunn y Gaydon, 2011).

En Chile, el uso de agua consuntiva para la agricultura es de 88 % (Valdés-Pineda et al., 2014; Fundación Chile, 2018). Específicamente, la estimación de la demanda en la región del Maule, el consumo agrícola de agua consuntiva corresponde a un 96,4 % del total del recurso hídrico disponible en la región. Por otro lado, en las Regiones de Ñuble y Biobío juntas, se estima que el consumo agrícola del agua corresponde a un 41,9 % (DGA, 2017).

En este contexto, aunque la superficie sembrada de arroz en el país es reducida, el agua desempeña un papel importante en la producción de grano. Actualmente, un 80 % de la superficie de arroz se cultiva bajo condiciones de inundación continua desde la siembra hasta madurez fisiológica, y el 20 % restante utilizando la metodología de siembra directa. En ambos casos se utilizan grandes volúmenes de agua que superan los 14.000 m³ ha⁻¹ (Hernaíz y Alvarado, 2007). En el cultivo del arroz se deben considerar las pérdidas de agua debido a la evapotranspiración de la planta, infiltración y percolación en el suelo, y a prácticas específicas de manejo del agua (por ejemplo, drenaje para aplicación de agroquímicos), como la preparación de suelo inicial y el drenaje del terreno antes del macollaje (Bouman et al., 2007). Así, el cultivo de arroz es altamente demandante del recurso hídrico.

La inundación del cultivo permite un control más efectivo de las malezas, aumento de la disponibilidad de nutrientes, menor incidencia de enfermedades y protección contra el frío. Así, el incremento progresivo de la lámina de agua, desde 15 hasta 25 cm, protege al cultivo de las bajas temperaturas durante las etapas fenológicas de inicio de panícula hasta la microsporogénesis. Esto se debe al efecto de amortiguador térmico que tiene el agua producto de su alto calor específico; práctica que es recomendada en Australia (Williams y Angus, 1994; Lacy et al., 2002; Humphreys et al., 2006).

Antecedentes históricos del manejo del agua en el cultivo del arroz

La introducción del cultivo de arroz se realizó en el año 1920 en Valparaíso y La Serena. Sin embargo, a pesar de las buenas temperaturas de la zona, la escasa disponibilidad de agua desestimó el cultivo en esas zonas. A pesar de la importancia de dicho recurso, no existe información sobre la utilización y manejo del agua de riego en las primeras siembras realizadas en el país. Los primeros antecedentes se remontan a principios del año 1930, en una siembra por almácigo-trasplante realizada en el Fundo Quilapán ubicado en los alrededores de San Fernando. En ella, la baja temperatura encontrada en el agua causó importantes reducciones en el rendimiento de grano que generaron pérdidas considerables de plantas en la entrada de todos los cuadros (Anríquez, 1934).

En 1937 existe evidencia de una mayor preocupación por el manejo del agua en el cultivo del arroz. En esa época, las principales prácticas de manejo estaban asociadas a la elección de suelos con escasa pendiente que favorecieran una altura de agua uniforme, construcción de pretiles en curvas de nivel, instalación de compuertas de madera que permitieran el paso del agua de un cuadro a otro y un rápido desagüe del campo en el momento de la siega, facilitando la entrada de los equipos de cosecha (Silva, 1937).

El manejo del agua recomendado durante el desarrollo del cultivo, consistía en realizar el primer riego cuando las plantas de arroz tuvieran unos 20 cm de altura, para favorecer el vigor de ellas y facilitar el desarrollo normal de sus raíces. Con posterioridad a este primer riego, se iniciaba el riego permanente que consistía en abrir las compuertas que alimentaban los cuadros superiores, para dejar que el agua saturara el suelo y alcanzara una altura de 5 cm. De esta manera, se permitía el paso del agua al cuadro siguiente, donde se repetía este procedimiento hasta inundar todos los cuadros. Cuando todos los cuadros estaban inundados se procedía a subir la altura del agua hasta los 15 a 20 cm, situación que se mantenía hasta la aparición de las primeras panículas. En esa etapa se retiraba el agua por espacio de 8 a 12 d, para volver a llenar los cuadros hasta que la panícula se empezaba a doblar por el peso de los granos. En este estado se suspendía la entrada del agua por 8 d, para proceder al drenaje de los cuadros. Ante la ocurrencia de lluvias, se recomendaba labrar con un arado sobre los pretiles, acelerando el drenaje y facilitar la cosecha. El caudal de agua utilizado en el arrozal era muy variable, pudiendo variar entre 1 y 2 L s⁻¹ ha⁻¹ a 5 L s⁻¹ ha⁻¹ o más (Silva, 1937).

La experiencia obtenida en la primera década del cultivo de arroz en el país y el auge de la producción arrocería, permitió determinar que el cultivo del arroz debía contar con un buen abastecimiento de agua. Dada esta situación, la zona productora de arroz del país se estableció al poniente de la zona entre las ciudades de Valparaíso y San Carlos. Esta distribución permitiría explotar suelos 'nuevos y con limitaciones' para ser usados por otros cultivos (Sims, 1969). Sin embargo, esta zona presentaría una mayor exposición de la planta a las bajas temperaturas y a las lluvias tempranas de otoño, lo que podía afectar el desarrollo normal de la planta y las actividades de cosecha, respectivamente (Villalobos, 1941; Elgueta, 1955; Torrealba, 1956). Este proceso de expansión del cultivo de arroz hacia el sur del país fue acompañado por la construcción de una nueva infraestructura de riego, como los embalses Digua y Bullileo, y el canal Melado, entre otros, que apoyaron el desarrollo de la producción de arroz en las zonas de Parral, Talca y Linares (Astorga, 1944; Olate, 1950; Torrealba, 1956).

En la década del 1940 se continuó con la recomendación de evitar el efecto negativo de las bajas temperaturas del agua, ya que causaba pérdida de plantas, retraso en el período de desarrollo del cultivo y una mayor producción de granos verdes. Para abordar este problema, se recomendaba mantener un bajo caudal y velocidad del agua de riego o utilizar calentadores de agua. El sistema de riego utilizado continuó siendo similar al de la década anterior, es decir, el uso del sistema inter-comunicante, donde el agua de la acequia principal ingresaba a los cuadros superiores directamente, dejando una lámina de agua de alrededor de 5 cm, para pasar por los cuadros siguientes. Cuando las plántulas tenían la segunda hoja, se aumentaba la altura del agua hasta alcanzar 18 a 20 cm, la que se mantenía hasta la macolla, momento en que se desaguaban los cuadros por 5 d para permitir el control de las malezas, fortalecer el desarrollo del sistema radicular de la planta y realizar la

segunda aplicación de nitrógeno en seco. Posteriormente, se subía el nivel del agua a una altura de 20 a 25 cm, y cuando el 80 % del arroz estaba maduro, el flujo de agua se detenía completamente. El gasto de agua en el cultivo fluctuaba entre 1 y 3 L s⁻¹ ha⁻¹ (Villalobos, 1941).

A principios de 1970, el manejo del agua se centraba en algunos factores que posibilitaran un uso más racional y eficiente. Los estudios realizados permitieron establecer que: a) la época de entrega del agua por los ríos y embalses a los agricultores ocurriría los primeros días de octubre, situación que impedía sembrar temprano; b) la presencia de desnivel en los suelos, el exceso de pretilas y la falta de drenaje de los suelos, hacían muy complejo el manejo uniforme del agua; c) el sistema de inundación era superior a las frecuencias de inundación de cada 7 y 15 d; d) la cantidad de agua utilizada durante el cultivo era de alrededor de 18.000 m³ ha⁻¹, de los cuales 1.000 a 1.200 m³ ha⁻¹ se utilizaban a comienzos del llenado de los cuadros; e) la temperatura del agua en el arroz no era uniforme dentro de los cuadros y durante los meses de desarrollo del cultivo. Así, la mayor temperatura del agua se obtenía en diciembre, alrededor de las 18:00 h y en la salida del agua del predio. Mientras que las temperaturas más bajas se observaban en las mañanas, en la zona de la entrada del agua y en los meses de octubre y noviembre. Los cambios de temperatura del agua estuvieron más relacionados con la radiación solar que con la temperatura del aire; f) la disponibilidad de agua no era uniforme durante todo el desarrollo del cultivo. La mayor disponibilidad del agua se observaba en primavera, la que iba disminuyendo a inicios del verano, haciéndose crítica en enero y febrero (Sims y Alvarado, 1972).

En las décadas de 1980 y 1990, el manejo del agua continuó siendo un tema de preocupación y análisis. Estudios realizados por el INIA, indicaron que la eficiencia y manejo del agua de riego de los agricultores no era la más adecuada y que los caudales utilizados fluctuaban desde 2,1 a 11,2 L s⁻¹ ha⁻¹, lo que significaba un uso de agua de 181 a 968 m³ ha⁻¹ d⁻¹. Por otro lado, las estimaciones de la evapotranspiración señalaban valores de entre 6 a 11 mm día⁻¹, dependiendo de la época del año y de las variaciones climáticas, lo que implicaba que un porcentaje importante de agua se perdía por percolación y filtraciones (Alvarado y Hernaíz, 1995). En relación con la altura del agua, entre siembra y floración se recomendaba utilizar 10 cm y desde floración y llenado de grano 20 cm (Maldonado y Alvarado, 1982; Alvarado y Hernaíz, 1995). Por otro lado, el corte del suministro del agua al arrozal se recomendaba que fuera en la etapa de floración, grano lechoso y grano harinoso, manteniendo el agua estancada hasta el consumo total, sin afectar negativamente el rendimiento en grano paddy (o con cáscara) ni la calidad industrial (Alvarado y Gallardo, 1994).

En la década del 2000 se señalaba que el mal manejo del agua afectaba directamente los componentes de rendimiento, a través del número de plantas y panículas ha⁻¹, número de granos por panícula, además de reducir el control de malezas (principalmente del hualcacho y del arroz rojo). Para mejorar esta situación, se recomendaba una buena adecuación del suelo, un buen diseño de los cuadros y canales que permitieran conducir y drenar el agua del cultivo. Además, un estudio del manejo del agua en arroz señalaba que una altura del agua de 10 cm a inicio de la siembra tenía un mejor control de malezas que una altura de 5 cm. Sin embargo, una altura de agua de 5 cm entre siembra y macolla estimulaba la formación de un mayor número de macollas y un buen desarrollo de las plantas. La temperatura del agua se debía mantener sobre los 15 °C, lo que se lograba manejando el volumen y la velocidad del caudal del agua en forma adecuada. La altura de agua al final del estado fenológico de macolla debía alcanzar 10 cm, mientras que iniciada la elongación de los nudos se debía elevar a una altura máxima de 30 cm. La detención del flujo de agua en el período de cosecha dependía de la textura del suelo. Así, en suelos arcillosos se podía detener el flujo del agua al final de la floración, mientras que, si el suelo era más friable, la detención del flujo de agua se podía realizar en la etapa de grano lechoso (Hernaíz y Alvarado, 2007).

Huella hídrica en el cultivo de arroz

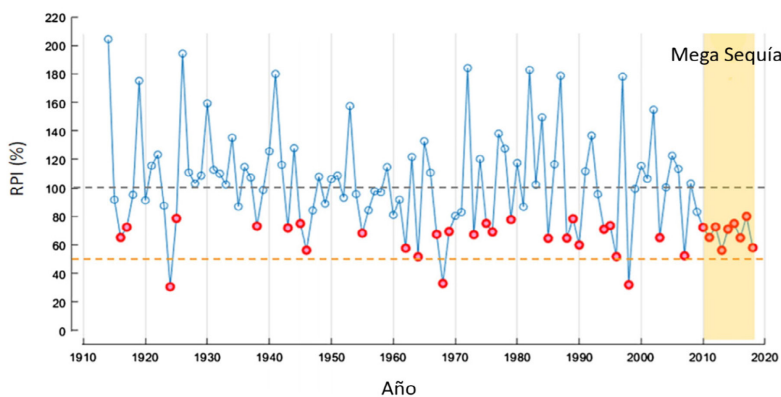
La huella hídrica corresponde al volumen de agua dulce utilizada directa o indirectamente para producir un bien (Hoekstra et al., 2009). En este sentido, se distinguen tres clasificaciones: a) la huella azul que corresponde al consumo de aguas superficiales y subterráneas lo que básicamen-

te corresponde al riego; b) la huella verde que corresponde al consumo del recurso que provienen de la lluvia almacenada en el suelo y; c) la huella gris que se refiere al volumen de agua dulce necesaria para asimilar la carga de contaminantes basados en las normas vigentes de calidad de agua (Chapagain y Hoekstra, 2010). En Chile, estudios realizados por INIA (Uribe y Riquelme, 2013) determinaron que la huella hídrica en las principales zonas arroceras del país (Retiro y Parral) alcanzó a los 1.200 L de agua usada o evapotranspirada por kg de grano producido. De ellos, los valores que correspondieron a huella azul, verde y gris fueron de 1.120, 20 y 60 L kg⁻¹, respectivamente. Estos valores fueron calculados en base a los coeficientes teóricos del cultivo, adaptados a la realidad chilena y a la producción de arroz paddy. Mientras que la huella gris fue calculada considerando una fertilización de 100 kg ha⁻¹ de Nitrógeno y 5 % de pérdidas por lixiviación.

Situación actual y perspectivas futuras del agua en las zonas arroceras

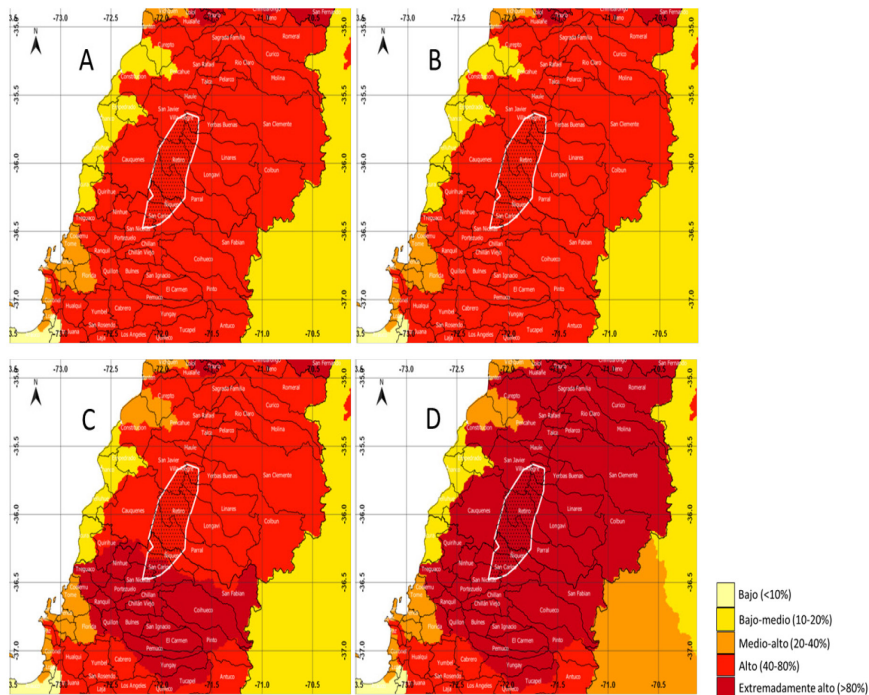
Un estudio en la zona central de Chile fue realizado con el fin de conocer los potenciales impactos en la agricultura chilena frente a los complejos escenarios del cambio climático (Santibáñez et al., 2008). Esta zona se encuentra afectada por una larga sequía que ha significado un importante déficit de las precipitaciones variando entre 20 % y 40 % (Garreaud et al., 2019). Esta situación, conocida como 'mega sequía', ha sido uno de los eventos más largos registrados desde el siglo pasado.

El índice regional de precipitaciones (RPI) fue determinado considerando las precipitaciones anuales de seis estaciones meteorológicas automáticas (EMAs) ubicadas entre las latitudes 32 y 37° S. Así, un evento de sequía es identificado cuando el valor del índice RPI es menor o igual al 80 %, indicando un déficit de precipitaciones igual o superior a 20 % (círculos rojos) (Figura 1). En ese estudio se detectaron nueve años consecutivos de sequía con un RPI entre 55 % a 80 % desde el año 2010 al 2018. Las proyecciones realizadas por el Instituto de Recursos Hídricos Mundiales (WRI), señalan que nuestro país se encuentra en una gran vulnerabilidad con respecto a la disponibilidad de agua para el año 2040. Además, el WRI prevé un incremento importante de la competencia por el recurso hídrico, el cual se incrementaría desde 2,67 a 4,41 puntos para el período entre 2010 y 2040 (Hofste et al., 2019), con una demanda del recurso hídrico igual o superior a un 80 %.



Fuente: Garreaud et al., 2019.

Figura 1. Índice de precipitación regional (RPI) de la zona central de Chile. Los círculos azules corresponden a años sin sequía, mientras que círculos rojos corresponden a años con sequía.



Fuente: Hofste et al., 2019.

Figura 2. Proyección de vulnerabilidad en disponibilidad de agua de riego para el sector arrocero de Chile. A; escenario optimista a 2030, B; escenario pesimista a 2030, C; escenario optimista a 2040, y D; escenario pesimista a 2040. El polígono de contorno blanco representa el sector arrocero de Chile. Los colores representan el porcentaje de necesidad del recurso hídrico en las diferentes zonas geográficas mostradas en la barra lateral.

Dada esta situación, el gran desafío para el sector arrocero nacional es la optimización y uso eficiente del agua de riego a través de estrategias de gestión hídrica inteligente que compatibilicen el ahorro de agua con mejoras en la producción, bajo condiciones limitadas de agua. Considerando que en los últimos 100 años no se han implementado de manera sistemática métodos eficientes para el riego del arroz en Chile, la Agenda de Innovación Agraria para la Cadena del Arroz planteó la necesidad de la evaluación y validación de tecnologías de manejo productivo que permitan lograr este objetivo (FIA, 2017). En este sentido, investigadores de INIA Quilmapu, han desarrollado estudios que incluyen la evaluación de diferentes sistemas de riego como el riego intermitente, riego por mangas con compuertas, riego por pulsos a través de válvulas automáticas, riego por aspersión, entre otros. Estas tecnologías están validadas en otros países, mejorando la eficiencia del uso del agua y la sustentabilidad del cultivo.

Situación de la infraestructura de riego en la zona arrocera

Según la información disponible gracias a la Asociación Digua Perquillauquén, se indica que parte importante del cultivo del arroz en Chile es regado por el sistema de riego Digua, el cual coordina la utilización de los excedentes de los ríos Longaví y Perquillauquén, y tiene una capacidad útil de 225 millones de m³ (Asociación Digua Perquillauquén, 2020). El sistema Digua permite una seguridad de riego del 85 %, entregando agua a las comunas de Parral, Retiro (Maule) y Ñiquén (Ñuble). El sistema Digua cuenta con el embalse Digua (localizado en el río Cato), el canal alimentador Longaví, el canal alimentador Perquillauquén Cato y el nudo Hidráulico

lico de Remulcao. Para la distribución del agua, este sistema cuenta con tres canales matrices: Digua, Perquillauquén y Ñiquén. El canal alimentador Longaví posee una longitud de 6 km y una capacidad de $20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, permitiendo derivar recursos hídricos desde el río Longaví, para el llenado del embalse entre mayo y septiembre, y así abastecer las demandas de la temporada de riego. El canal alimentador Perquillauquén Cato posee una longitud de 12 km y una capacidad de $20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, derivando los recursos hídricos excedentes del río Perquillauquén hacia el nudo hidráulico de Remulcao. Por su parte, el nudo hidráulico de Remulcao está ubicado en el sector de Remulcao y está construido sobre el río Cato. En éste convergen las aguas del canal alimentador Perquillauquén y las provenientes del Embalse Digua y alimentador Longaví. Desde este lugar se distribuyen hacia los tres canales matrices de distribución que sirven al sistema. El canal matriz Digua, cuya bocatoma se encuentra en el nudo hidráulico Remulcao, tiene 47 km de longitud, una capacidad de $27 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y sirve un área de 47.300 ha físicas. Por otro lado, el canal matriz Perquillauquén es un cauce construido por el Estado hace más de 90 años e incorporado al sistema Digua en el año 1974. Su captación está en la ribera norte del río Perquillauquén y tiene una longitud de 31,8 km con una capacidad de $4,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, cubriendo, aproximadamente, 10.600 ha. El canal matriz Ñiquén fue construido con posterioridad a las obras del proyecto original del Sistema Digua. Su bocatoma se ubica en la ribera sur del río Perquillauquén, en la confluencia de los ríos Cato y Perquillauquén. Tiene una longitud de 11,7 km y cerca de 12.000 ha bajo riego. Este cauce es administrado por la Organización de Usuarios Ñiquén y corresponde a la Región de Ñuble. A partir de estos canales matrices se desarrolla una red de distribución secundaria que tiene una longitud aproximada de 600 km. Actualmente, existen agricultores que riegan utilizando aguas subterráneas extraídas desde acuíferos a través de pozos profundos, drenes o zanjas (Henríquez et al., 2018).

Al norte del área regada por el sistema Digua, dentro de la Región del Maule, otras fuentes hídricas abastecen de agua al área arrocera, ubicada en general al poniente de la ruta 5 sur. Las aguas de riego son obtenidas desde varios ríos como el Putagán, Ancoa, Achibueno, Liguay y Longaví. Cada uno de estos ríos cuenta con organizaciones de usuarios del agua (OUA) que se encargan de su distribución desde el río y en canales, hasta llegar a los predios. Se debe destacar que esta zona también es abastecida por el Sistema Melado, que capta aguas del río del mismo nombre en la alta cordillera, las que son conducidas a través del túnel Melado. Esta zona cuenta con dos embalses, Ancoa y Bullileo, cuyas capacidades son de 80 y 60 millones de metros cúbicos, respectivamente.

Por otra parte, al sur del área regada por el sistema Digua, en la Región de Ñuble, el cultivo del arroz es regado con aguas superficiales provenientes, principalmente del río Ñuble. Cabe destacar que, en los últimos años debido a la creciente escasez hídrica, el riego con aguas subterráneas ha ido en aumento, constituyendo un apoyo importante para el riego del arroz.

Manejo actual del agua de riego en el cultivo de arroz

a) Siembra pregerminada

El sistema de siembra utilizado en Chile es mayoritariamente con semilla pregerminada. La semilla se mantiene durante 24 a 36 h sumergida en agua y luego se pone en contacto con el aire para que se inicie la germinación con la aparición del coleóptilo (36 a 48 h) (Donoso et al., 2019). La semilla pregerminada es distribuida en el campo al voleo, sobre una lámina de agua de 5 cm (Figura 3A). Esta labor se puede realizar de forma manual, por avión o a través de un trompo aplicador de fertilizantes. En este último caso, debe ser utilizada una semilla pregerminada previo a la aparición del coleóptilo, para evitar pérdidas por daño mecánico de la estruc-

tura antes mencionada. La dosis de semilla utilizada fluctúa entre 140 y 200 kg ha⁻¹ en siembra manual y 120 kg ha⁻¹ en caso de siembra por avión. Posterior a la siembra, el cultivo requiere un incremento de la lámina de agua de al menos 10 cm a partir del estado de plántula con 3 a 4 hojas (V3 a V4), manteniendo el nivel de agua hasta la etapa de madurez fisiológica. La lámina de agua se debe mantener, especialmente, en la etapa de inicio de primordio (R0), disminuyendo la entrada de agua fría en este periodo. Datos preliminares muestran que este sistema de siembra requiere por sobre los 18.000 m³ ha⁻¹ durante la temporada que se extiende por, aproximadamente, 160 d (Quezada et al., 2011; Henríquez et al., 2018; Donoso et al., 2019).

b) Siembra directa

Este tipo de siembra permite ahorrar agua durante la etapa vegetativa del cultivo, mejorar la eficiencia de las actividades de la siembra, fertilización y aplicación de herbicidas (Henríquez et al., 2018). Actualmente, cerca de un 20 % del cultivo de arroz en Chile se realiza mediante este tipo de siembra (Paredes et al., 2015). Este sistema requiere de una preparación de suelo a cota cero o micro nivelación láser (Henríquez et al., 2018). Para este tipo de siembra se requiere de una buena preparación de suelo. La siembra se puede realizar con una máquina sembradora de cereales, la cual debe calibrarse para dejar la semilla entre dos a tres centímetros de profundidad. La dosis de semilla para este tipo de siembra fluctúa entre 100 y 120 kg ha⁻¹. Además, sólo se requiere mantener la humedad del suelo para iniciar la germinación de la semilla, hasta que la planta tenga tres a cuatro hojas (V3 a V4). Posteriormente, una lámina de agua de alrededor de 5 a 10 cm se debe aplicar, la que se mantiene hasta la etapa de madurez fisiológica de la planta (Henríquez et al., 2018) (Figura 3B). Esta alternativa productiva requiere contar con canales de avance que permitan llenar rápidamente todos los pretilos de manera independiente y un canal de desagüe. Según estudios realizados en Chile, la siembra directa permite ahorrar más de un 20 % en agua de riego respecto de la siembra inundada, debido a que no se requiere inundación en los primeros 25 a 30 d del cultivo (Henríquez et al., 2018).

El diseño predial en el caso del cultivo del arroz bajo siembra directa debe considerar entradas y salidas de agua, con canales de avance para el ingreso rápido y homogéneo del agua a los cuadros, y drenajes que permitan el desagüe adecuado, para extraer el agua posterior a los riegos iniciales y evitar la pudrición de la semilla. Además, los drenajes deben permitir un manejo adecuado del predio, evitando inundaciones previas a la siembra. Estos canales de drenaje prestan una gran utilidad cuando se debe realizar la aplicación de herbicidas que requieren el retiro de la lámina de agua. Por otro lado, los canales de avance permiten el ingreso rápido a los cuadros para realizar los riegos, adecuándose a la necesidad fisiológica de la planta y a las recomendaciones de reposición de la lámina de agua que realizan los distintos proveedores de herbicidas. El primer riego se realiza aplicando una lámina de agua que permita humedecer hasta el doble de la profundidad de siembra. La lámina de agua debe permanecer alrededor de 2 d, para asegurar la humedad del suelo que permita la imbibición de la semilla. Posteriormente, los excesos de agua se drenan para evitar la pudrición de la semilla. Un segundo riego se puede realizar en caso de: a) falta de humedad en el suelo durante la aparición del coleóptilo; y b) aplicación de un herbicida pre emergente que requiere la aplicación de lámina de agua. En caso de no contar con precipitaciones (< 20 mm) se puede realizar un tercer riego para asegurar el establecimiento de las plantas (Henríquez et al., 2018). Una vez alcanzada la altura de la lámina de agua se sugiere que se detenga la salida del flujo, para que ésta se caliente durante el día, mejorando el uso del agua de riego y el crecimiento y desarrollo del cultivo. Posterior a la floración, se recomienda mantener el cultivo con una lámina de agua hasta que los granos del tercio superior de la panoja estén duros (Fundación Chile, 2011). Sin embargo, esta decisión es dependiente de la textura del suelo. En caso de que el cultivo esté sembrado en suelos con alta capacidad de retención de agua, como sucede en varias zonas de Parral, se puede dejar de regar y detener la salida del flujo de agua.

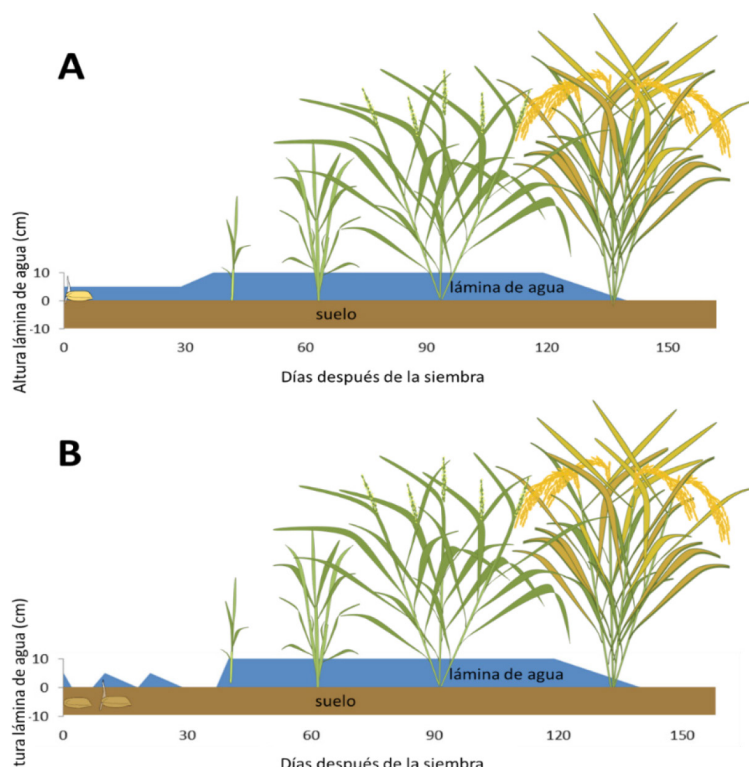


Figura 3. Uso del agua de riego en las diferentes alternativas productivas para el cultivo del arroz. Las figuras representan las diferentes etapas del cultivo del arroz considerando la siembra, estado de plántula, macolla, floración y madurez fisiológica. A, sistema de siembra con arroz pregerminado y B, sistema de siembra directa.

Nuevas alternativas de manejo del riego para el cultivo del arroz

Debido a los pronósticos negativos respecto a la disponibilidad de agua en Chile, se requiere la implementación de tecnologías que permitan disminuir el uso de agua de riego sin disminuir los rendimientos en grano. Para ello existen alternativas como el uso de una menor cantidad de agua en ciertos períodos del cultivo. Estas técnicas de manejo presentan ciertos desafíos que se deben abordar como un menor rendimiento en grano, mayor incidencia de malezas y falta de regulación de la temperatura del ambiente cercano al cultivo (Hernaíz y Alvarado, 2007). Numerosos estudios informan de reducciones de rendimiento que pueden llegar hasta un 70 % en los tratamientos de riego intermitente, en comparación con la técnica de riego continuo (Bouman y Tuong, 2001). Sin embargo, la reducción importante en el gasto de agua determina un aumento en la productividad del recurso hídrico (Tabbal et al., 2002). Se ha determinado también que esta técnica de riego intermitente podría alargar el período de duración del ciclo del cultivo, aumentando el riesgo de daño por frío durante la fase reproductiva (Dunn y Gaydon, 2011). A pesar de esta situación, una gran variabilidad existe en los resultados obtenidos con esta tecnología, dependiendo del estado fenológico de la planta en que se realizan los tratamientos, las variedades, severidad del estrés y tipo de suelo. Es así que, en algunos experimentos realizados en suelos arcillosos, la implementación del riego intermitente determinó una reducción en el uso del agua utilizada que fluctúa entre 15 % y 30 %, sin reducir significativamente el rendimiento del grano, en comparación con el riego continuo (Lampayan et al., 2005). El agua disponible en estos tratamientos nunca está por

debajo de la zona efectiva de raíces (Lampayan et al., 2009) o con un potencial hídrico del suelo superior a -20 kPa (Carrijo et al., 2017).

Medición de caudal

La primera dificultad que se encuentra al momento de querer manejar el agua en el cultivo es contar con el equipamiento que permita la medición del caudal. Para ello, existen diversas técnicas de medición como: a) el método del flotador, el cual tiene una baja precisión (error > 25 %) (Rantz, 1982); b) la metodología de vertedero con mayor precisión (error de 3 % a 5 %) (Bello y Pino, 2000); y c) otras metodologías de mayor costo y precisión como son el uso de aforadores (error < 5 %) (Reddy et al., 2013) y caudalímetros (error < 2 %) (MacCrometer, 2020).

Con el fin de evaluar la utilización de una tecnología de mayor precisión en la medición de caudal en el cultivo de arroz, un proyecto titulado 'Desarrollo de un sistema de riego eficiente y sustentable para el cultivo del arroz en Chile, una estrategia para disminuir la vulnerabilidad de este cultivo frente al cambio climático global' fue desarrollado entre los años 2017 y 2020. El proyecto fue cofinanciado por INIA, FIA, Empresa Tucapel, Carozzi y apoyado por varias organizaciones gremiales (Donoso et al., 2018). Dentro de las actividades del proyecto se utilizaron tecnologías para la cuantificación del agua que se utiliza en el cultivo del arroz. Una de las tecnologías utilizadas fue la de los aforadores Parshall (Parshall, 1936; Foto 1) que permiten la medición de flujo de agua en un canal abierto. Para un funcionamiento dinámico, la canoa cuenta con un sensor de presión atmosférica (Foto 2), con registro digital de datos que permite determinar el nivel de agua y su distribución en el tiempo. Estas tecnologías dadas a conocer a los agricultores, permitieron cuantificar con mayor exactitud el volumen de agua utilizada para el cultivo del arroz en ensayos de campo y en predios de agricultores arroceros.



Foto 1. Aforador Parshall en campo de agricultor arrocero de la zona de San Carlos, 2020.



Foto 2. Sensor de presión atmosférica.

Riego intermitente

El riego intermitente consiste en intercalar períodos con y sin inundación. Numerosos estudios reportaron reducciones en el uso de agua, sin mermar el rendimiento en grano, aumentando significativamente la productividad o eficiencia de uso del agua de riego a nivel mundial (Bouman y Tuong, 2001; Bouman et al., 2007; Massey et al., 2014; Carracelas et al. 2019b). El éxito en la implementación de estos manejos alternativos de riego a escala comercial depende de una adecuada sistematización del predio; del diseño de un sistema de riego que posea una alta capacidad de entrada de caudales de agua que permitan una inundación rápida y uniforme de los cuadros; y de un programa integrado de manejo agronómico, control de malezas y fertilización de acuerdo con los nuevos requerimientos de manejo (Massey et al., 2014; Carracelas et al., 2019b). Este tipo de manejo del agua entrega tiempo extra al agricultor antes de que el suelo se seque, lo que permite solucionar eventuales problemas, como la rotura de bombas de riego, entre otros. La intensidad del secado del suelo no debe llegar a que las raíces no tengan acceso al agua, ya que el rendimiento y la calidad del arroz se pueden ver afectados negativamente.

La ausencia de una lámina de agua limitaría la implementación de este tipo de manejo en lugares con riesgo de ocurrencia de bajas temperaturas durante el periodo de floración. Una posible solución para evitar los riesgos de daños por frío es atrasar el periodo de inundación continua hasta el inicio de formación del primordio floral (Dunn y Gaydon, 2011), mediante la alternancia de la inundación del cultivo (Khepar et al., 2000) y reponiendo la lámina de agua cada vez que el suelo llega a saturación (Figura 4). Sin embargo, este proceso es dependiente del nivel de transpiración del cultivo, la evaporación, la percolación y la filtración lateral en el suelo.

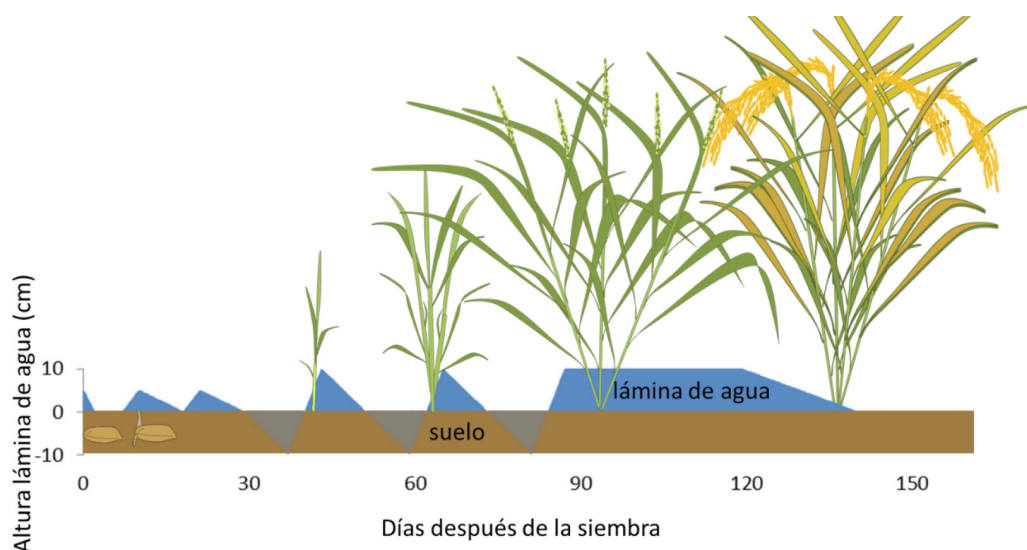
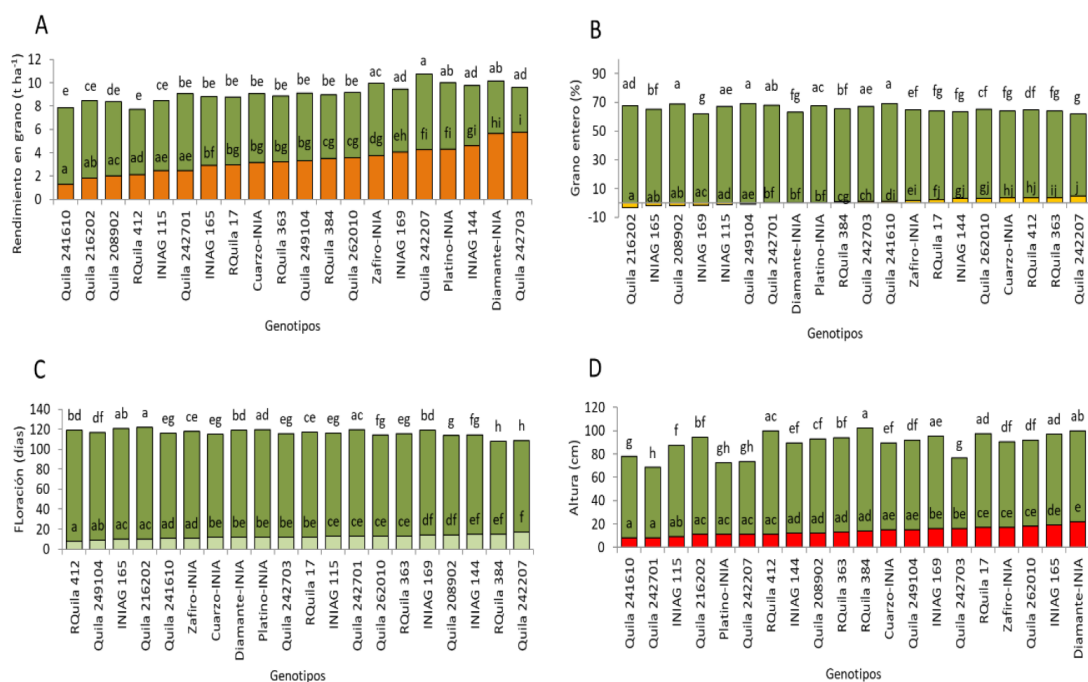


Figura 4. Riego intermitente en el cultivo del arroz. Las figuras representan las diferentes etapas del cultivo del arroz considerando la siembra, estado de plántula, macolla, floración y madurez fisiológica.

Estudios realizados en Chile revelan que la utilización de esta metodología hasta la etapa de macolla, permite un ahorro de agua de un 41 %, una disminución en un 30,6 % en los rendimientos en grano y un incremento en 14,2 % de la calidad del grano medido como porcentaje de grano entero (Quezada et al., 2011). En el riego convencional, la productividad fue de $0,5 \text{ kg m}^{-3}$ y en el caso del riego intermitente alcanzó los $0,7 \text{ kg m}^{-3}$.

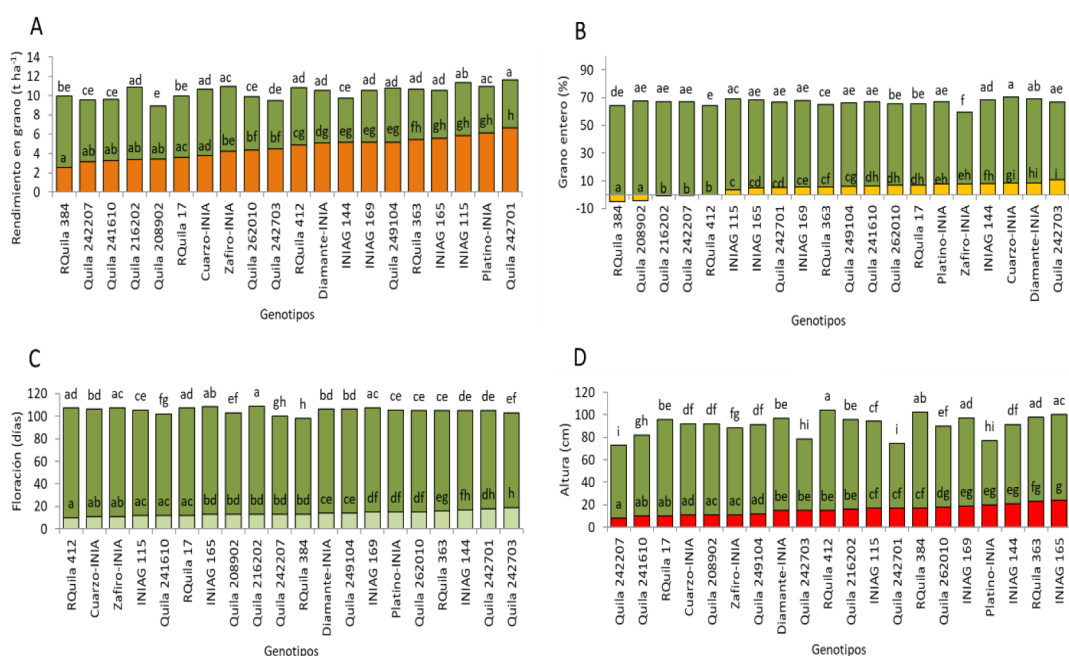
En las zonas de San Carlos y Parral, algunos estudios muestran que el uso de riego intermitente durante todo el periodo del cultivo tiene un efecto importante en el rendimiento en grano, grano entero, floración y altura (Figura 5) (Paredes et al., 2015). Específicamente en San Carlos, una disminución del rendimiento 1,3 y 5,8 t ha⁻¹ fue observado en los genotipos Quila 241610 y Quila 242803, respectivamente (Figura 5A). Se observó también que el rendimiento industrial (% de grano entero) tuvo un comportamiento variable, disminuyendo o aumentando, dependiendo de los genotipos. Así, una mayor disminución del grano entero fue observada en el genotipo Quila 216202, con un -3,3 %, y el mayor incremento en Quila 242207 con un 4,9 % (Figura 5B). El periodo de siembra a floración se incrementó en todos los genotipos, entre 8 y 17 d en los genotipos RQuila 412 y Quila 242207, respectivamente (Figura 5C). Finalmente, la altura de la planta se afectó debido al riego intermitente, disminuyendo entre 8 y 22 cm en los genotipos Quila 241610 y 'Diamante-INIA', respectivamente (Figura 5D).



Fuente: Paredes et al., 2015.

Figura 5. Riego intermitente en San Carlos temporada 2014-2015. A, rendimiento en grano en condición control (■) y disminución del rendimiento bajo riego intermitente (■); B, grano entero (%) en condición control (■) e incremento o disminución de grano entero (%) bajo riego intermitente (■); C, días a floración en condición control (■) e incremento de los días a floración bajo riego intermitente (■); D, altura de la planta en condición control (■) y disminución de la altura bajo riego intermitente (■).

En el caso de Parral, una disminución del rendimiento en grano se observó entre 2,6 y 6,7 t ha⁻¹ para los genotipos RQuila 384 y Quila 242701, respectivamente (Figura 6A). Se observó que el comportamiento del grano entero fue genotipo dependiente, ya que en algunos casos disminuyó y en otros casos se observó un aumento (Figura 6B). Es así como la mayor disminución del grano entero fue observada en el genotipo RQuila 384, con un -4,7 % y el mayor incremento se observó en el genotipo Quila 242703 con un 10,6 %. El tiempo entre siembra y floración se incrementó en todos los genotipos (Figura 6C), por ejemplo, entre 10 y 19 d en los genotipos RQuila 412 y Quila 242703, respectivamente. Por último, la altura de la planta disminuyó entre 8 y 24 cm en los genotipos Quila 242207 y INIAG 165, respectivamente (Figura 6D).



Fuente: Paredes et al., 2015.

Figura 6. Riego intermitente en Parral durante la temporada 2014-2015. A, rendimiento en grano en condición control (■) y disminución del rendimiento bajo riego intermitente (■); B, grano entero (%) en condición control (■) e incremento o disminución de grano entero (%) bajo riego intermitente (■); C, días a floración en condición control (■) e incremento de los días a floración bajo riego intermitente (■); D, altura de la planta en condición control (■) y disminución de la altura bajo riego intermitente (■).

En la localidad de Parral, otros estudios utilizando riego intermitente con diferentes intensidades (entre siembra hasta inicio de panícula; temporada 2018-2019), han permitido conocer de mejor manera el manejo más adecuado de este tipo de riego. La comparación entre los rendimientos en grano del testigo con inundación permanente y el tratamiento de riego intermitente con reposición de la lámina de agua cuando el nivel de la lámina se encontraba a 5 cm bajo el nivel del suelo, no mostró diferencias significativas. Sin embargo, en el tratamiento donde la reposición de la lámina de agua se realizó cuando ésta estaba 10 cm bajo el nivel del suelo, se observó una disminución significativa en los rendimientos en grano de 27 %. Respecto al uso de agua, la mayor productividad se observó en el tratamiento con una disminución de lámina de agua bajo los 5 cm ($0,89 \text{ kg m}^{-3}$) en comparación con el testigo ($0,73 \text{ kg m}^{-3}$) y el tratamiento con lámina de agua bajo los 10 cm ($0,53 \text{ kg m}^{-3}$) (Gutiérrez, 2019).

En general, el menor uso de agua puede afectar los rendimientos en grano. Este fenómeno ha sido observado en varios estudios internacionales (Tabbal et al., 2002; Dunn y Gaydon, 2011), como también el aumento del período de siembra a floración y la reducción de la altura de la planta. Sin embargo, un adecuado manejo de la lámina de agua, no inferior a los 5 cm bajo el nivel del suelo, y su aplicación entre siembra hasta inicio de panícula, puede minimizar los efectos negativos del riego intermitente. Otro aspecto importante a considerar al momento de utilizar esta práctica, es sembrar temprano con el fin de evitar que la etapa de formación del polen se traslade a fechas en las cuales se puedan presentar bajas temperaturas nocturnas (Dunn y Gaydon, 2011).

Finalmente, un problema complejo para la implementación de estas tecnologías representa la determinación precisa del nivel de agua en el campo. Para ello, se fabricó un instrumento que permite revisar a gran distancia la altura de la lámina de agua, con el fin de controlar los ciclos de

inundación y saturación propuestos en los sistemas de riego intermitente. En la Figura 7, se presenta un esquema del uso del sistema de flotación (flotador de PVC) y en la Foto 3 se representa un prototipo instalado en condiciones de campo.

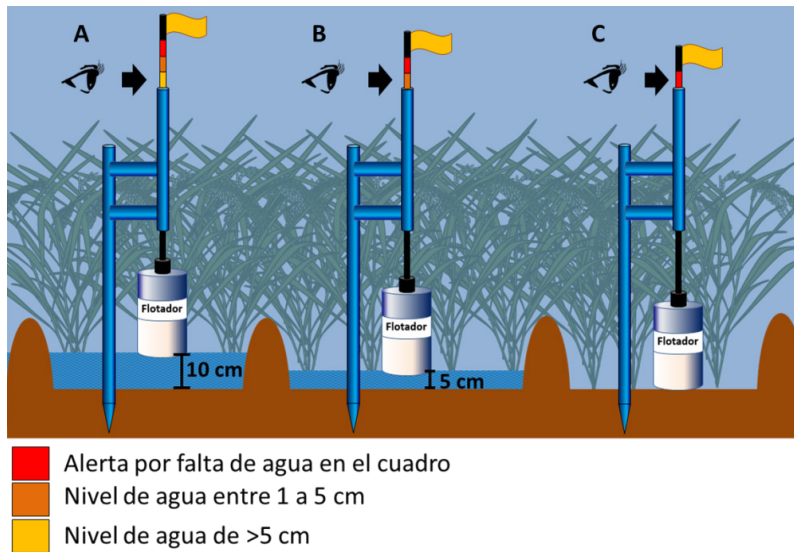


Figura 7. Representación de medidor de nivel de agua. A, nivel de agua de 10 cm (■), B, nivel de agua de 5 cm (■), y C, sin lámina de agua (■).



Foto 3. Medidor de nivel de agua en condiciones de campo.

Riego por mangas

Otra de las tecnologías utilizadas por primera vez en el país en el cultivo de arroz, fue el riego por mangas, técnica ampliamente utilizada en U.S.A., Argentina, Brasil y Uruguay. Las ventajas de esta tecnología son: bajo costo; mejor eficiencia de uso del agua de riego, ya que reduce las pérdidas de agua por distribución y mejora la uniformidad del riego gravitacional convencional; incrementa el número de hectáreas regadas por persona (hasta 120 ha); y facilita la velocidad del establecimiento de la lámina de agua en el predio. Esta tecnología permite la implementación de manejos de riego alternativos, como el riego intermitente en campos comerciales (Massey et al., 2014; Carracelas et al., 2017b). El proyecto apoyado por la Fundación para la Innovación Agraria (FIA), permitió instalar mangas de riego en los campos experimentales de arroz y en campos de agricultores para evaluar su viabilidad y efectividad, y difundir su uso en Chile (Foto 4).



Foto 4. Utilización de mangas de riego por agricultor de la zona de Parral.

Junto al sistema de riego por mangas, se implementó por primera vez en el país, el uso del sistema de riego por pulsos en el predio de un agricultor arrocero (Foto 5).



Foto 5. Validación de uso de válvula de riego por pulsos en campo de agricultor. Parral 2019-2020. Gentileza Marcelo Ibáñez.

Esta tecnología fue evaluada en la comuna de Parral durante las temporadas 2017-2018, 2018-2019 y 2019-2020 (Figura 8). Se comparó el sistema de riego por mangas, utilizando el sistema de siembra directa y siembra pregerminado. En las temporadas 2017-2018 y 2019-2020, el sistema de riego mediante mangas de riego se relacionó con un incremento en los rendimientos en grano de 2 t ha^{-1} en el sistema de siembra pregerminado (Figura 8A y 8C). Durante la temporada 2018-2019 no se observaron diferencias en los rendimientos entre los tratamientos (Figura 8B). Además, se observó una importante disminución en los rendimientos respecto a la temporada anterior, cercana a un 20 %. Adicionalmente, no se observaron diferencias entre las variedades evaluadas, 'Zafiro-INIA', 'Platino-INIA' y 'Cuarzo-INIA'.

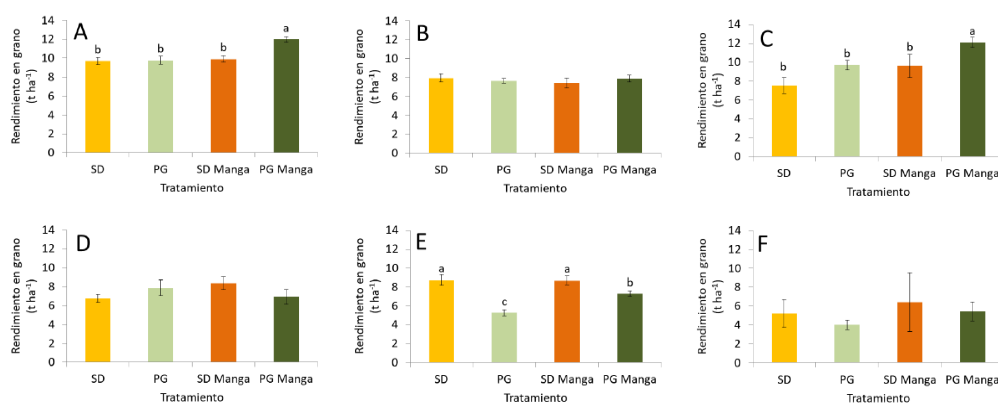


Figura 8. Efecto del riego y sistema de siembra en el rendimiento en grano de arroz en diferentes condiciones de riego y sistemas de siembra. A, B y C, temporada 2017-2018, 2018-2019 y 2019-2020, respectivamente. Los ensayos fueron sembrados el 30 de octubre con una dosis de semilla de 140 kg ha⁻¹. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$; test LSD Fisher).

Durante la ejecución del proyecto se pudo demostrar que el uso de mangas de riego incrementa hasta tres veces la velocidad de llenado de los cuadros, lo cual es una gran ventaja para los agricultores que, en algunos casos, se pueden demorar hasta 10 d con el sistema de llenado cuadro a cuadro utilizado normalmente (Donoso et al., 2018). Por otra parte, las mangas permitieron un menor uso de agua en siembra directa, alrededor de 11.000 m³ ha⁻¹, comparado con la siembra pregerminado, sin mangas de riego, que utilizó 16.000 m³ ha⁻¹.

Respecto a la productividad de agua, se observó que el sistema más eficiente para el cultivo del arroz fue la siembra directa con riego a través de mangas de riego, la que alcanzó una productividad de agua de 0,7 a 1,0 kg de arroz por m³ de agua utilizada en el riego durante toda la temporada (Cuadro 1). En tanto, el sistema menos eficiente fue la siembra con arroz pregerminado con riego convencional, que tuvo una productividad de agua de entre 0,4 y 0,6 kg de arroz por m³ de agua utilizada en el riego.

Cuadro 1. Productividad de agua en los ensayos de dos temporadas en la comuna de Parral.

Tratamiento	2017-2018	2018-2019	2019-2020
	kg m ⁻³		
Siembra directa sin manga	0,78	0,58	0,56
Pregerminada sin manga	0,59	0,44	0,58
Siembra directa con manga	1,02	0,67	0,78
Pregerminada con manga	0,79	0,53	0,77

Análisis económicos preliminares del uso de riego con mangas para el cultivo de arroz (2017-2018 y 2018-2019), muestran que el uso de esta metodología podría ser viable para los agricultores arroceros de Chile. Esta tecnología, requiere inversiones amortizadas por unidades requeridas por hectárea (mangas plásticas, compuertas, insertor de compuertas, tacho plástico de unión y descompresión, y adecuaciones de mini contenedores). Se debe considerar que el uso de mangas de riego en siembra con arroz pregerminado, generó en promedio mayores rendimientos en grano en comparación con el sistema de riego convencional, con una relación beneficio/costo superior en comparación con su competidor sin mangas (González et al., 2020).

Riego por aspersión

Otra tecnología evaluada por primera vez en el país fue el uso de riego por aspersión en arroz. En los Campos Experimentales de arroz en Parral y San Carlos, se instaló un sistema experimental para evaluar su uso potencial en el cultivo de arroz (Foto 6). Se trata de un sistema de riego que es utilizado en países como Brasil y U.S.A. Paralelo a este trabajo experimental, un agricultor de la zona de Parral utilizó un pivote central para regar arroz en forma comercial. El uso experimental de este sistema de riego no logró obtener rendimientos superiores a 7 t ha^{-1} .



Foto 6. Riego presurizado experimental para el cultivo del arroz en parcela experimental de la comuna de San Carlos.

En el caso del sistema de riego por aspersión, los rendimientos fueron inferiores a los sistemas que mantienen inundación permanente (Figura 9). En la temporada 2017-2018, se determinó que este sistema permite lograr rendimientos inferiores a 6 t ha^{-1} , independiente de la ubicación de la planta dentro de la línea de aspersión. En cambio, durante la temporada 2018-2019 se observó un incremento en las expectativas de rendimientos en la comuna de Parral, obteniéndose rendimientos en grano de hasta 8 t ha^{-1} , a diferencia de lo observado en San Carlos, donde los rendimientos fueron inferiores a 6 t ha^{-1} .

El uso de esta tecnología necesita adaptar una nueva forma de manejo agronómico para el cultivo del arroz como, por ejemplo, control de malezas (control de malezas no acuáticas, tipo de productos, dosis, épocas de aplicación, entre otros), fertilización (fertirrigación, dosis, épocas de aplicación de macro y micronutrientes), caudales y temperatura del agua de riego, especialmente durante la microsporogénesis y floración (etapas sensibles a las bajas temperatura), y costos de producción, entre otros.

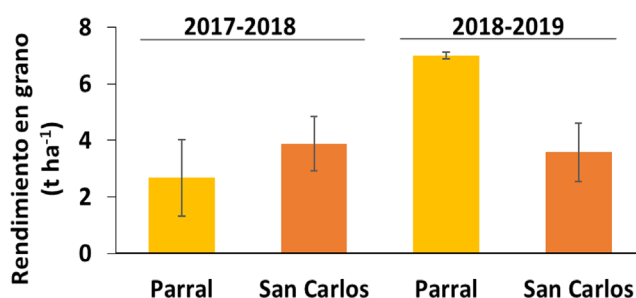


Figura 9. Rendimiento de arroz bajo riego por aspersión. Las barras de error corresponden al error estándar.

Si bien, los resultados muestran un desarrollo rentable para el cultivo del arroz utilizando la metodología de riego por mangas, especialmente cuando se utiliza sistema de siembra de arroz pregerminado, se debe considerar que el análisis no garantiza que el resultado se cumpla completamente. Esto debido a que el cultivo del arroz está sujeto a una serie de restricciones agroclimáticas y económicas como:

- 1) Altas o bajas temperaturas en periodos críticos del cultivo (etapa reproductiva) que puedan causar una disminución en los rendimientos en grano.
- 2) Falta de agua para riego en periodo crítico para el cultivo (etapa reproductiva), lo que puede provocar una fuerte disminución en los rendimientos en grano.

Consideraciones finales

Finalmente, tomando en cuenta que más del 80 % del sector arrocero continúa utilizando la metodología de siembra con arroz pregerminado, los resultados positivos en términos agronómicos y económicos, muestran que el uso del sistema de riego por mangas podría ser considerado como una alternativa para los agricultores arroceros de Chile. Por otro lado, el uso de este sistema para siembra directa, a pesar de no significar un beneficio económico para el agricultor, permitiría una mejor utilización recurso hídrico, el que es cada vez más escaso.

Referencias

- Alvarado, R., Gallardo, I. 1994. Influencia de la época de corte del agua al arroz (*Oryza sativa* L.) sobre el rendimiento, humedad del grano y calidad industrial. *Agríc. Téc. (Chile)* 54:238-242.
- Alvarado, R. Hernaíz, S. 1995. Riego. p. 22-24. En *Manual de producción de arroz. Programa de reconversión de suelos degradados*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.
- Anríquez, C. 1934. El cultivo del arroz y sus posibilidades en Chile. Tesis de pregrado. Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile, Escuela de Agronomía, Santiago, Chile.
- Asociación Digua Perquilauquén. 2020. Infraestructura. http://embalsedigua.cl/web/?page_id=7274. Revisado el 23 de marzo de 2020.
- Astorga, M. 1944. Elaboración industrial del arroz Nacional. Tesis de pregrado. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Bouman, B.A.M., Lampayan, R.M., Tuong, T.P. 2007. Water management in irrigated rice: coping with water scarcity. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines.

- Bouman, B., Tuong, T. 2001. Field water management to save water and increase its productivity in irrigated rice. *Agric. Water Manage.* 49:11-30.
- Carracelas, G., Cora, P., Ferres, S. 2017b. Monitoreo de prácticas de manejo de riego en chacras comerciales. p. 56-59. In Zorrilla, G., Martínez, S., Saravia, H. (eds.) *Arroz 2017*. INIA Serie Técnica 233. INIA, Montevideo, Uruguay. <http://doi.org/10.35676/INIA/ST.233>
- Carracelas, G., Guilpart, N., Grassini, P., et al. 2017a. Evolución del rendimiento del arroz producido en Uruguay y comparación con otros países arroceros. p. 51-55. In Zorrilla, G., Martínez, S., Saravia, H. (eds.) *Arroz 2017*. INIA Serie Técnica 233. INIA, Montevideo, Uruguay. <http://doi.org/10.35676/INIA/ST.233>
- Carracelas, G., Hornbuckle, J., Rosas, J., et al. 2019a. Irrigation management strategies to increase water productivity in *Oryza sativa* (rice) in Uruguay. *Agric. Water Manage.* 222:161-172.
- Carracelas, G., Hornbuckle, J., Rosas, J.E., et al. 2019b. Manejo del riego y productividad del agua en el cultivo de arroz en Uruguay. p. 49-52. In Terra, J., Martínez, S., Saravia, H. (eds.) *Arroz 2019*. INIA Serie Técnica 250. INIA, Montevideo, Uruguay.
- Carrijo, D.R., Lundy, M.E., Linqvist, B.A. 2017. Rice yields, and water use under alternate wetting and drying irrigation: A meta-analysis. *Field Crops Res.* 203:173-180.
- Cassman, K.G., Dobermann, A.R., Walters, D.T., et al. 2003. Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 28:315-358.
- Chapagain, A.K., Hoekstra, A.Y. 2010. The green, blue and grey water footprint of rice from both a production and consumption perspective value of water. *Ecol. Econ.* 70:749-758.
- DGA. 2017. Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas (DGA), División de Estudios y Planificación. Unión Temporal de Proveedores Hídrica Consultores SPA y Aquaterra Ingenieros Ltda., Santiago, Chile.
- Donoso, G., Becerra, V., Uribe, H., et al. 2019. Nuevas herramientas para mejorar la gestión del agua en el sector arrocero de Chile. *Tierra adentro. Especial Gestión Hídrica* 111:41-45.
- Donoso, G., Paredes, M., Becerra, V., et al. 2018. Desarrollo de un sistema de riego eficiente y sustentable para el cultivo del arroz (*Oryza sativa*) en Chile. XIII Conferencia Internacional de Arroz para América Latina y el Caribe, Piura, Perú. 14-19 mayo. Fondo Latinoamericano de Reservas (FLAR), Bogotá, Colombia.
- Dunn, B.W., Gaydon, D.S. 2011 Rice growth, yield and water productivity responses to irrigation scheduling prior to the delayed application of continuous flooding in south-east Australia. *Agric. Water Manage.* 98:1799-1807.
- Elgueta, L. 1955. Organización de la cooperativa de productores de arroz de San Carlos. *Simiente* 25:80-81.
- FAO. 2020. Perspectivas de cosechas y situación alimentaria - Informe trimestral mundial N° 2, julio 2020. FAO, Roma, Italia.
- FIA. 2017. Agenda de innovación agraria para la cadena del arroz en Chile. Fundación para la Innovación Agraria (FIA), Santiago, Chile.
- Fundación Chile. 2011. Manual de recomendaciones del cultivo de arroz inundado desde siembra. Programa Convenio Subsecretaría de Agricultura-Fundación Chile, Santiago, Chile.
- Fundación Chile. 2018. Escenarios hídricos 2030. Radiografía del agua: Brecha y riesgo hídrico en Chile. Fundación Chile, Santiago, Chile.

- Garreaud, R., Boisier, J., Montecinos, A., et al. 2019. The central Chile mega drought (2010-2018): A climate dynamics perspective. *Int. J. Climat.* 40:421-439.
- Gaydon, D.S., Beecher, H.G., Reinke, R., et al. 2010. Rice. p. 67-83. In Stokes, C.J., Howden, S.M. (eds.) *Adapting Australian Agriculture to Climate Change* (Chapter 5). CSIRO Publishing, Clayton, Australia.
- González, J., Donoso, G., Becerra, V., et al. 2020. Factibilidad económica de la implementación de mangas de riego en el cultivo del arroz (*Oryza sativa* L.) en Chile. 70° Congreso Agronómico de Chile, Universidad Católica, Campus San Joaquín, Santiago, Chile.
- Gutiérrez, J. 2019. Efecto del riego intermitente sobre el cultivo del arroz. 45p. Tesis de pregrado. Universidad Adventista de Chile, Facultad de Ingeniería y Negocios, Chillán, Chile.
- GYGA. 2019 Global Yield Gap and Water Productivity Atlas. Available at <http://www.yieldgap.org/> (Acceso 2019).
- Henríquez, R., Henríquez, E., Sepúlveda, D., et al. 2018. Manual de manejos bajo el sistema de siembra directa con taipas en arroz en Chile. Serie Estudios para la Innovación FIA. Fundación para la Innovación Agraria (FIA), Ministerio de Agricultura, Santiago, Chile.
- Hernaiz, S., Alvarado, R. 2007. Manejo del agua en el arrozal. p. 49-57. En Alvarado R. (ed.) *Arroz. Manejo tecnológico*. Boletín N° 162. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.
- Hoekstra, A., Chapagain, A., Aldaya, M. 2009. *Water Footprint Manual, State of the Art 2009*. Water Footprint Network, Enschede, Netherlands 2 University of Twente, Enschede, Netherlands WWF-UK, Godalming, UK.
- Hofste, R., Kuzma, S., Walker, S., et al. 2019. *Aqueduct 3.0: Updated decision-relevant global water risk indicators*. Technical note. World Resources Institute, Washington, DC, USA. <https://www.wri.org/resources/data-sets/aqueduct-global-maps-30-data>
- Humphreys, E., Lewin, L.G., Khan, S., et al. 2006. Integration of approaches to increasing water use efficiency in rice-based systems in south-east Australia. *Field Crops Res.* 97:19-33.
- Khepar, S., Yadav, A., Sondhi, S., et al. 2000. Water balance model for paddy fields under intermittent irrigation practices. *Irrig. Sci.* 19:199-208.
- Lacy, J., Clappett, W., Lewin, L., et al. 2002. *Ricecheck recommendations*. NSW Agriculture, Yanco, NSW, Australia.
- Lampayan, R., Bouman, B., De Dios, J., et al. 2005. Transfer of water saving technologies in rice production in the Philippines. p. 111-129. In Thiyagarajan, T.M., Hengsdijk, H., Bindraban, P. (eds.) *Proceedings of the International Symposium on Transitions in Agriculture for Enhancing Water Productivity*, Killikulam. 23-25 Sept. 2003. Wageningen University, Wageningen, The Netherlands.
- Lampayan, R.M., Palis, F.G., Flor, R.B., et al. 2009. Adoption and dissemination of "safe alternate wetting and drying" in pump irrigated rice areas in the Philippines. 60th International Executive Council Meeting & 5th Asian Regional Conference, New Delhi, India. 6-11 Dec. International Commission on Irrigation and Drainage (ICID), New Delhi, India.
- Lobell, D.B., Cassman, K.G., Field, C.B. 2009. Crop yield gaps: Their importance, magnitudes, and causes. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 34 179-204.
- MacCrometer. 2020. Medidores McCrometer de hélice. 24545-00 Rev. 4.4. 27p. <https://www.mccrometer.com>

- Maldonado, I., Alvarado, R. 1982. Algunos aspectos del manejo del agua en el arroz. Inv. Progr. Agrop. INIA Quilamapu (Chile) 13:20-23.
- Massey, J.H., Walker, T.W., Anders, M.M., et al. 2014. Farmer adaptation of intermittent flooding using multiple-inlet rice irrigation in Mississippi. Agric. Water Manage. 146:297-304.
- O'Toole, J.C. 2004. Rice and water: The final frontier. Proceedings of the First International Conference on Rice for the Future, Bangkok. 31 Aug.-2 Sept. 26. Kasetsart University, Bangkok, Thailand.
- Olate, H. 1950. Industria del arroz en Chile y sus proyecciones económicas. Memoria Licenciado Facultad de Ciencias Jurídicas y Sociales, Universidad de Chile. Memorias 11:161-222.
- Paredes, M., Becerra, V., Donoso, G., et al. 2015. Evaluación preliminar de genotipos de arroz bajo dos sistemas de manejo de agua. 66° Congreso Agronómico SACH y 13° SOCHIFRUT. 17-20 de noviembre, Valdivia, Chile.
- Parshall, R. L. 1936. The Parshall measuring flume. Rep. Nr 423, Colorado Experiment Station, Colorado Agricultural College, Fort Collins, Colorado, USA.
- Quezada, C.; Hernaíz, S.; Stolpe, N., et al. 2011. Efecto del método de riego intermitente en componentes de rendimiento y manejo del agua en once genotipos de arroz (*Oryza sativa* L.) Chil. J. Agric. Anim. Sci. 27:105-115.
- Rantz, S. E. 1982. Measurement and computation of streamflow. USGS Water-Supply Paper 2175.
- Reddy, M., Jumaboev, K., Matyakubov, B., et al. 2013. Evaluation of furrow irrigation practices in Fergana Valley of Uzbekistan. Agric. Water Manage. 117:133-144.
- Santibáñez Q., Santibáñez, F., Solis, L. 2008. Análisis de vulnerabilidad del sector silvoagropecuario, recursos hídricos y edáficos de Chile frente a escenarios del cambio climático. Centro de Agricultura y Medio Ambiente y Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Silva, C. 1937. Cómo se cultiva el arroz. Información completa sobre siembra, cultivo y cosecha de arroz. Ediciones Ercilla, Santiago, Chile.
- Sims, G. 1969. El cultivo del arroz. El Campesino 100:44-71.
- Sims, G., Alvarado, R. 1972. Control de malezas. En Manual de producción de arroz. Boletín Técnico N°54. p. 69-78. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.
- Tabbal, D.F., Bouman, B.A.M., Bhuiyan, S.I., et al. 2002. On-farm strategies for reducing water input in irrigated rice; case studies in the Philippines. Agric. Water Manage. 56:93-112. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(02\)00007-0](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(02)00007-0).
- Torrealba, S. 1956. El problema del arroz en Chile. Tesis de pregrado para optar a título de Ingeniero Comercial. Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.
- Tuong, T.P., Bouman, B.A.M. 2003. Rice production in water scarce environments. p. 53-67. In Kijne, J.W., Barker, R., Molden, D. (eds.) Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement. CABI Publishing, Wallingford, UK.
- UN. 2015. World population prospects: The 2015 revision, key findings and advance tables. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. Working Paper No. ESA/P/WP.241. United Nations, New York, USA.
- Uribe, H., Riquelme, F. 2013. Huella hídrica en arroz. p. 143-146. En Osorio, A. (ed.) Determinación de la huella del agua y estrategias de manejo de recursos hídricos. Serie Actas N° 50. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), La Serena, Chile.
- Valdés-Pineda, R., Pizarro, R., García-Chevesich, P., et al. 2014. Water governance in Chile: Availability, management and climate change. J. Hydrol. 519:2538-2567.

- Van Der Mensbrugge, D., Rodarte, I.O., Burns, A., et al. 2009. How to feed the world in 2050: Macroeconomic environment, commodity markets—a longer term outlook. MPRA Paper Nr 19061.
- Villalobos, E. 1941. El cultivo del arroz y su importancia económica. 81 p. Memoria Ingeniero Agrónomo. Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.
- Williams, R.L., Angus, J.F. 1994. Deep floodwater protects high nitrogen rice crops from low temperature damage. *Aust. J. Exp. Agric.* 34:927-932.