

A hand is shown holding a single rice panicle (ear of rice) in the foreground. The background is a vast field of rice plants under a sunset sky with soft, golden light and scattered clouds. The overall mood is serene and agricultural.

Ecofisiología del **Arroz**

Buscando altos rendimientos

Diagramación: Grégory Rossato - Editora GR

Diseño de tapa: Grégory Rossato - Editora GR

Revisión: Autor

Imágenes - Tablas - Gráficos: Autor

Impresión: Pallotti - SM

Foto de tapa: Guilherme Streck Cassol

Publicación de datos de catalogación internacional – CIP

E19

Ecofisiología del Arroz Buscando Altos Rendimientos
[recurso electrónico] / Lorenzo Dalcin Meus...
[et al.]. – Santa Maria: [s.n.], 2023.
294 p.

Disponible en PDF.

ISBN: 978-65-89469-88-9

1. Arroz 2. Cultura 3. Alimento I. Título

CDU 633.493

Ficha catalográfica elaborada por la editorial Trilce Morales – CRB 10/2209

Agradecimientos

Este libro es el resultado de más de 17 años de trabajo realizado con esfuerzo, dedicación, seriedad y, sobre todo, trabajo en equipo. Nuestro agradecimiento a los socios del equipo de FieldCrops, que hicieron todo lo posible para hacer factible el sueño del libro **Ecofisiología del Arroz Buscando Altos Rendimientos**.

Al Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (CNPq), la Coordinación para el Perfeccionamiento del Personal de la Educación Superior (CAPES) y la Fundación de Apoyo a la Investigación del Estado de Rio Grande do Sul (FAPERGS) para becas de nivel técnico, de cursos de pregrado y posgrado para miembros de los Equipos FieldCrops en todo Brasil;

A los Extensionistas e Investigadores del Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA), la Empresa de Asistencia Técnica y Extensión Rural (EMATER / RS-Ascar) y la Empresa Brasileña de Asistencia Agrícola (Embrapa) por su asistencia en la aplicación de cuestionarios en arrozales y realizar y evaluar experimentos;

A la Universidad Federal de Santa María (UFSM), la Universidad Federal de Pampa (UNIPAMPA) - Campus Itaqui y la Universidad Federal de Pelotas por la asistencia y apoyo a los integrantes del Equipo FieldCrops en la realización de experimentos;

A los productores rurales que abrieron las puertas de sus propiedades y les permitieron realizar investigaciones sobre sus cultivos;

A estudiantes técnicos, de pregrado y posgrado, integrantes del Equipo FieldCrops en todas las instituciones de Brasil, por recolectar datos y realizar experimentos con esfuerzo y dedicación.

Consejo Editorial



Lorenzo Dalcin Meus - Ing. Agr. - Alumno de Maestría del Programa de Post-Graduación en Ingeniería Agrícola de la UFSM e integrante del Equipo FieldCrops.



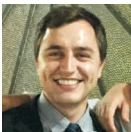
Michel Rocha da Silva, Ing. Agr. Dr. - Administrador de Crops Team Knowledge on Farm e integrante del equipo FieldCrops.



Giovana Ghisleni Ribas, Ing. Agr. Dr. - Especialista de Proyectos Agronómicos de GDM Seeds e integrante del Equipo FieldCrops.



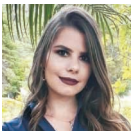
Alencar Junior Zanon, Ing. Agr. Dr. - Profesor del Departamento de Fitotecnia de la Universidad Federal de Santa María (UFSM) e integrante del Equipo FieldCrops.



Ioran Guedes Rossato, Ing. Agr. - Alumno de Maestría del Programa de Post-Graduación en Ingeniería Agrícola de la UFSM e integrante del Equipo FieldCrops.



Vladison Fogliato Pereira, Ing. Agr. - Alumno de Maestría del Programa de Post-Graduación en Ingeniería Agrícola de la UFSM e integrante del Equipo FieldCrops.



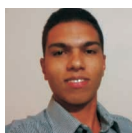
Isabela Bulegon Pilecco - Ing. Agr. - Alumna de Maestría del Programa de Post-Graduación en Ingeniería Agrícola de la UFSM e integrante del Equipo FieldCrops.



Bruna San Martin Rolim Ribeiro, Ing. Agr. - Alumna de Maestría del Programa de Post-Graduación en Ingeniería Agrícola de la UFSM e integrante del Equipo FieldCrops.



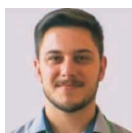
Pablo Mazzuco Souza, Ing. Agr. - Alumno de Maestría del Programa de Post-Graduación en Ingeniería Agrícola de la UFSM e integrante del Equipo FieldCrops.



Moises de Freitas do Nascimento, Ing. Agr. - Alumno de Maestría del Programa de Post-Graduación en Ingeniería Agrícola de la UFSM e integrante del Equipo FieldCrops.



Anderson Haas Poersch, Meteorólogo - Ing. Agr. - Alumno de Maestría del Programa de Post-Graduación en Ingeniería Agrícola de la UFSM e integrante del Equipo FieldCrops.



Ary José Duarte Junior, Ing. Agr. - Alumno de Maestría del Programa de Post-Graduación en Ingeniería Agrícola de la UFSM e integrante del Equipo FieldCrops.



Cesar Eugenio Quintero, Ing. Agr. Dr. - Profesor de la Universidad Nacional de Entre Ríos (UNER - Argentina).



Gonzalo Carracelas Garrido - Ing. Agr. Ms. - Investigador del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria - Programa de Arroz (INIA Uruguay).



Luciano de Campos Carmona, Ing. Agr. Ms. – Líder del Programa de Agronomía y transferencia de Tecnología del Fondo Latinoamericano para arroz de riego-FLAR, Colombia.



Nereu Augusto Streck, Eng. Agr. PhD. - Profesor del Departamento de Fitotecnia de la UFSM, integrante del Equipo FieldCrops e Investigador 1A do CNPq, el ranking más alto de investigadores en Brasil.

Resumen

Prefacio	10
Introducción	17
1. Crecimiento y desarrollo del arroz	24
1.1. Botánica y morfología	25
1.2. Escala fenológica	28
1.2.1. Escala de Counce et al. (2000)	28
1.2.1.1. Fase de desarrollo de la plántula (siembra-emergencia)	29
1.2.1.2. Fase vegetativa	30
1.2.1.3. Fase reproductiva	33
1.3. Ecofisiología y prácticas de manejo en cada fase de desarrollo	38
1.3.1. Fase siembra-emergencia	38
1.3.1.1. Prácticas de manejo en la fase siembra-emergencia	40
1.3.2. Fase vegetativa	45
1.3.2.1. Prácticas de manejo en la fase vegetativa	50
1.3.3. Fase reproductiva	61
1.3.3.1. Prácticas de manejo en la fase reproductiva	62
1.3.4. Subfase floración	65
1.3.5. Subfase llenado de granos	65
1.3.5.1. Prácticas de manejo en la subfase de floración y llenado de granos	67
1.3.6. Subfase de madurez fisiológica a madurez de cosecha	70
1.3.6.1. Prácticas de manejo en la subfase de de madurez fisiológica a madurez de cosecha	71

1.4. Acumulación, partición y retranslocación de biomassa	73
1.5. Índice de área foliar	76
1.6. Componentes de productividad	79
1.7. Escogiendo variedades.....	83
2. Factores y elementos climáticos	89
2.1. Temperatura.....	89
2.2. Radiación solar	92
2.3. Coeficiente fototérmico	95
2.4. El fenómeno El Niño Oscilación Sur	98
2.5. Cambio climático y el cultivo del arroz	104
3. Fertilización, nutrición y manejo de suelo en arroz irrigado	110
3.1. Absorción de nutrientes y ecofisiología del arroz	110
3.2. Inundación e impacto de la anaerobiosis en el suelo	122
3.2.1. Acidez de suelos cultivados con arroz irrigado	124
3.2.2. Ciclo del nitrógeno en suelos inundados y fertilización nitrogenada.....	125
3.2.3. Cationes básicos (potasio, calcio y magnesio)	127
3.3. Toxicidad por hierro	127
3.4. ¿Como planear un programa de fertilización para altas productividades en Argentina?	128
3.4.1. Recomendaciones de fertilización para expectativas de respuesta alta y muy alta en Argentina.....	129
3.5. Diagnóstico del estado nutricional del arroz a partir del tejido foliar	134
4. Uso del agua en el arroz irrigado	138
4.1. Riego por inundación	140
4.1.1. Manejos alternativos al riego por inundación continua	142
4.1.1.1. Riego por inundación intermitente	143
4.1.1.2. Riego por Mojado y Secado Alternado (MSA) o <i>Alternate Wetting</i> and <i>Drying (AWD)</i>	143

4.1.2. Finalización del riego y manejo poscosecha ...	146
4.2. Riego por aspersión	147
4.2.1. ¿Cómo se ve afectado el desarrollo y crecimiento del arroz por la disponibilidad de agua?	148
4.2.2. ¿Cómo cuantificar la necesidad de riego?	151
4.2.3. Productividad de granos en áreas de riego por aspersión	154
4.2.4. Calidad de granos	154
4.2.5. Índice de cosecha	156
4.2.6. Consideraciones y desafíos del riego por aspersión de arroz	157
5. Potencial y brecha de productividad de arroz irrigado	159
5.1. Potencial y brechas de productividad del arroz irrigado en el sur de Brasil: un estudio de caso para el estado de Rio Grande do Sul	162
5.2. Prácticas de manejo para altas productividades en cultivos de arroz irrigado en el sur del Brasil	164
5.2.1. Época de siembra	165
5.2.2. Momento de inicio del riego	168
5.2.3. Rotación de cultivos y barbecho	169
5.2.4. Manejo de enfermedades	170
6. Arroz de tierras altas en Brasil	173
6.1. Caracterización del área de producción	174
6.2. Productividad potencial	177
6.3. Condicionantes agrometeorológicas de productividad	178
6.3.1. Temperatura del aire	178
6.3.2. Radiación solar	179
6.3.3. Fotoperiodo	180
6.3.4. Precipitaciones	181
6.4. Zonificación de riesgo climático	182
6.5. Riego	184

7. Arroz Irrigado en clima Tropical en Brasil	190
7.1. Manejo de agua	193
7.2. Manejo de nitrógeno	196
8. Arsénico en la producción de arroz en América del Sur	200
8.1. El Arsénico en el sistema suelo-agua-arroz-atmósfera	201
8.2. Lo que sabemos sobre los países sudamericanos ...	206
8.3. Prácticas de manejo agronómico para reducir el As en arroz	207
9. Oferta y demanda de arroz en Brasil y en el mundo ..	212
10. Ecofisiología digital	217
10.1. Modelo SimulArroz	217
10.1.1. Emisión de hojas en el modelo SimulArroz.	220
10.1.2. Validación del modelo SimulArroz	221
10.2. Programa GD Arroz	227
10.2.1. Principios básicos del programa	228
10.2.2. Utilización de GD Arroz	230
10.2.3. Prácticas de manejo	241
10.2.4. Recomendación	241
10.3. Aplicativo PlanejArroz	242
10.3.1. Fundamentos del <i>software</i>	243
10.3.1.1. Manejo	243
10.3.1.2. Productividad	245
10.3.2. Utilización del PlanejArroz	245
10.4. Aplicación del modelo SimulArroz en el pronóstico de cosecha de arroz en Rio Grande do Sul	259
11. La excelencia, experiencia e importancia de la Transferencia de Tecnología para incrementar la productividad del arroz en América Latina y el Caribe	263
Consideraciones finales	271
Referencias	272

Prefacio

Clenio Nailto Pillon¹

Escribir el prefacio a un trabajo de referencia como este no es una tarea fácil. De hecho, esto no se hace con mucha frecuencia en la vida. Mi profundo agradecimiento a los editores y autores, a quienes aprovecho para felicitarlos por la calidad y excelencia del trabajo, que rescata contenidos y nuevos conocimientos de la ecofisiología del arroz, con el objetivo de desarrollar sistemas de producción sostenibles en agroecosistemas de llanuras de inundación y tierras bajas en Brasil, con énfasis en el arroz.

Una lectura cuidadosa de los 11 capítulos del trabajo deja en claro que el gran motor de la agricultura es la ciencia! La definición de mejor genética y buenas prácticas agrícolas que son esenciales para un cultivo exitoso implica un profundo conocimiento de las numerosas interacciones entre el suelo, el agua, las plantas, la atmósfera y los organismos (la base de la ecofisiología), cuya comprensión de los mecanismos y procesos químicos, fisiológicos, bioquímicos y ecológicos son esencial para la toma segura de decisiones, basada en datos, información, conocimiento, respetando las particularidades locales y regionales.

Vivimos en un mundo de transformaciones profundas y cada vez más rápidas. Las bases técnicas, científicas y tecnológicas que aporta este trabajo no están desconectadas de los signos y movimientos de la sociedad. En este contexto,

¹ Ingeniero Agrónomo, Investigador A, Embrapa Clima Templado.

invitamos al lector a una breve reflexión sobre el contexto de la sociedad y la agricultura, las debidas preguntas que esto trae a la ciencia y las consecuencias para las cadenas de valores y sus actores.

En los últimos cincuenta años, el agro brasileño quizás haya experimentado la mayor revolución de todos los tiempos, basada en avances constantes en la productividad y, en consecuencia, en la producción. De los grandes importadores de alimentos, la incorporación de conocimientos y tecnologías ha permitido lograr la seguridad alimentaria, con la producción anual de más de una tonelada de granos y semillas oleaginosas por habitante, además de generar excedentes de exportación significativos. Los avances en la producción de conocimiento y tecnologías para aumentar la producción de alimentos, fibras y biomasa fueron innegables, con ganancias reales en más de 70 programas de mejoramiento de plantas y animales, así como por el desarrollo y la adopción de buenas prácticas para los sistemas de producción de tierras altas y bajas, con una fuerte contribución de instituciones públicas y privadas de Ciencia, Tecnología e Innovación (CT&I).

En la región sur de Brasil, uno de los ejemplos más emblemáticos de estos avances tecnológicos fue el desarrollo de cultivares de arroz de regadío del tipo moderno a fines de la década de 1970, como BR IRGA 409, cuya baja altura, alta respuesta a la fertilización, alta productividad y la calidad diferenciada del grano provocó una verdadera revolución en el cultivo del arroz.

La fuerte demanda mundial de alimentos, que se encamina en su evolución hacia más de nueve mil millones de consumidores en 2050, provoca una reflexión sobre qué agricultura del futuro podrá garantizar la seguridad alimentaria y nutricional al mundo y, al mismo tiempo, generar bases para conservación, uso y gestión sostenible de los recursos naturales y la biodiversidad (sostenibilidad). Igualmente, especialmente en los últimos 20 años, las preocupaciones de la sociedad sobre el cambio

climático, la sostenibilidad, la concentración de los ingresos y el hambre y la pobreza extrema se han convertido en agendas globales, apoyadas por organizaciones internacionales, como la ONU y la FAO, que coordina la articulación institucional y las agendas de desarrollo basadas en 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

En este contexto, la sociedad llevará cada vez más la expectativa de que la agricultura podrá producir alimentos, fibras, energía y servicios ecosistémicos (multifuncionalidad) a partir del uso eficiente del agua, nutrientes y energía, contribuyendo a la reducción del consumo de combustibles fósiles (descarbonización de la agricultura) y también para mitigar los posibles efectos negativos del proceso de cambio climático global.

Ciertamente no será un desafío cualquiera, ya que el proceso de urbanización eliminará otro 5% de la población presente en el campo hasta 2030, cuando el 90% de la población brasileña se concentrará en los centros urbanos, reduciendo en gran medida la disponibilidad de mano de obra. Este “driver” forzarán cada vez más la incorporación de tecnologías en el campo de la mecanización y automatización de procesos, incluido el uso de servicios y sistemas inteligentes en la agricultura digital, basados en “Big Data”, sensores e “internet de las cosas”, entre otros.

Además de producir alimentos en cantidad y con mayor eficiencia, la sociedad esperará cada vez más aumentar su longevidad y calidad de vida a partir del consumo de alimentos saludables, nutricionales y funcionales (salubridad), con trazabilidad “de extremo a extremo”.

Estas “señales” de la sociedad generan direcciones institucionales para fortalecer la adopción de los principios de agronomía y buenas prácticas en el manejo de los recursos naturales y la biodiversidad en los sistemas de producción, así como reducir la dependencia de nuestra agricultura de los insumos químicos sintéticos basados en valorización, desarrollo e incorporación de conocimiento y tecnologías fundamentadas cada vez más en la ecofisiología, la química, la bioquímica y en la

ecología, cuyas bases teóricas, principios y estrategias se tratan exhaustivamente en este trabajo, con el objetivo de hacer agroecosistemas de producción de arroz, más eficiente en relación con el uso del suelo, agua, energía y nutrientes, con beneficios para la calidad ambiental y para la rentabilidad de la agricultura.

Con el tiempo, los conceptos y las visiones cambian debido a los avances científicos y tecnológicos desde la perspectiva de la ciencia y la humanidad misma. Desde la agricultura más primitiva, que usó fuego especialmente para la rápida disponibilidad de nutrientes presentes en residuos culturales (baja complejidad), plantas cultivadas, hasta el uso actual de organismos capaces de eliminar el nitrógeno atmosférico e incorporar fitomasa (alta complejidad), hubo una incorporación considerable del conocimiento de las interrelaciones entre los procesos físicos, químicos y biológicos.

Aunque difícil de percibir, estamos experimentando un cambio de paradigma, pasando de la agricultura basada en insumos (semillas, fertilizantes, pesticidas ...), hasta entonces muy preocupados por la producción de alimentos, a la agricultura multifuncional basada en procesos, donde una comprensión de las complejas interacciones entre el sistema suelo-agua-planta-atmósfera-organismos será fundamental para la sostenibilidad de las actividades.

En un marco de tiempo de la agricultura en los últimos 60 años, podemos considerar la Revolución Verde como la “primera ola”. Considerado uno de los períodos de mayor expansión de la frontera agrícola en Brasil (1960-1990), especialmente debido a la ocupación del Cerrado brasileño, el modelo agrícola se caracterizó por la intensificación de la mecanización agrícola, el monocultivo, la preparación intensa del suelo y la adopción de paquetes tecnológicos basados en insumos sintéticos. En este período, el desafío más importante para el país fue la seguridad alimentaria y la reducción de las importaciones.

Desde el punto de vista científico y tecnológico, las principales preguntas a responder por los proyectos en ese

momento se centraron en el desarrollo y la adaptación de los cultivares a las condiciones edafoclimáticas en diferentes partes del territorio nacional; ajustes en las dosis de fertilización NPK para diferentes cultivos y; ajustes en el manejo de plagas basados especialmente en pesticidas, con investigación monodisciplinaria y adaptativa que, cuando fue validada, fue difundida por técnicos de las empresas de asistencia técnica y de extensión rural (ATER).

Además de las importantes ganancias de productividad para la mayoría de los sistemas productivos, se debe hacer especial mención a la consolidación del sistema de labranza cero o siembra directa y la fijación biológica de N en este período, dos tecnologías que ayudaron al país a convertirse en una referencia importante en la producción mundial de alimentos.

El monocultivo, una especie de “especialización de producción”, acuñado como una estrategia durante toda la “revolución verde”, trajo externalidades, como la disminución de la productividad, especialmente debido a problemas con el manejo del suelo y las plagas, aumento de los costos de producción, riesgos e impactos ambientales. En este contexto, desde la década de 1990 hasta el presente, ha habido un aumento en la adopción de sistemas de producción integrados y rotados (“segunda ola”). Dichos sistemas tienen una mayor complejidad, menos riesgo de cambios en el tiempo y el clima, permiten una mejor convivencia con las plagas, son más eficientes en el uso del agua y la energía e incluso permiten un mejor ciclo de nutrientes y carbono, entre otros.

Al integrar la producción, es posible producir alimentos, fibra, proteína animal y biomasa, entre otros, en la misma área, asegurando el bienestar animal en los sistemas de cultivo-ganado (ILP) o cultivo-ganado-bosque (ILPF). En general, su gestión requiere una visión multidisciplinaria en la generación de nuevos conocimientos y soluciones tecnológicas. Por ejemplo, mientras que en un monocultivo simplemente podemos ajustar la fertilización NPK, en los sistemas integrados es necesario desarrollar estrategias para el manejo de la fertilidad del sistema,

lo que hace que los desafíos científicos y tecnológicos sean más grandes y complejos, requiriendo métodos de investigación sistémicos y trabajo en redes multidisciplinarias e inter-institucionales centradas en la eficiencia de los sistemas. Entre los ejemplos sólidos del avance de estos sistemas en Brasil, destacamos el cultivo especialmente de soja integrada con la producción animal basada en pasturas y en rotación con el cultivo tradicional de arroz de regadío en la mitad sur de Rio Grande do Sul.

Durante los próximos años, además de la preocupación por los impactos del cambio climático en la producción de alimentos, en la dinámica de los ecosistemas y los biomas y en las poblaciones especialmente más pobres, habrá una atención creciente al uso ineficiente de los recursos naturales (suelo, agua, atmósfera, biodiversidad y fuentes de energía), lo que requerirá innovaciones orientadas a la mejora de los mecanismos y procesos biológicos en detrimento del uso de insumos externos. Por otro lado, las soluciones tecnológicas a desarrollar, además de ser respetuosas con el medio ambiente, deberán tener una gran capacidad para generar valor tangible e intangible para la sociedad.

En este contexto, el mayor interés de la población en el formato tecnológico con el que se producen los alimentos, su origen territorial y vinculación sociocultural, así como una mayor atención a los mecanismos y estrategias de trazabilidad y certificación, incluida la adopción de buenas prácticas agrícolas y el uso de insumos, será un poderoso “*driver*” que reforzará los cimientos de una “tercera ola” en la agricultura, una agricultura de base biológica. Aunque todavía puede percibirse casi como una “utopía” para los más escépticos, la “ecologización” de la agricultura será cada vez más imprescindible, debido a varios problemas: I) la presión de la sociedad por alimentos más saludables; II) aumento en el costo de obtener nuevas moléculas sintéticas para su uso en la agricultura, especialmente para vivir con plagas; III) mayor resistencia de las plagas a estas moléculas y;

IV) expansión de inversiones en investigación, desarrollo e innovación en activos biológicos, privados y públicos.

En comparación con los formatos tecnológicos que apuntalaron la revolución verde y aún apoyan la adopción de sistemas integrados, las bases científicas de la agricultura basada en biotecnología son más complejas y requieren un conocimiento altamente especializado en química, bioquímica, fisiología y ecofisiología, altamente integrado con la agricultura digital.

La “tercera ola” de la agricultura ya está en marcha. El diseño de sistemas de producción sostenibles requiere del dominio de relaciones complejas y redes transdisciplinarias sólidas (“redes de redes”). Además, requiere un cambio en el modelo mental de cartesiano a holístico, dominio de métodos e indicadores altamente complejos, así como humildad para “observar” lo que la naturaleza ya “sabe”.

Aunque en nuestro “modelo mental”, los activos tangibles (semillas, fertilizantes, inoculantes y pesticidas) tienden a ser más “perceptibles” en términos de su impacto en el proceso de producción, estudios recientes muestran que más del 70% de los avances obtenidos por el agronegocio brasileño son resultante de la incorporación de conocimientos y buenas prácticas en el sistema de producción, considerados activos intangibles.

De diferentes maneras, este trabajo sintetiza lo mejor en el avance del conocimiento para los sistemas de producción de arroz en Brasil, haciendo que la ecofisiología esté disponible para el sector productivo, especialmente el cultivo de arroz, de una manera simple, objetiva y directa. Tal conocimiento sistematizado aquí guía los ajustes en los sistemas de gestión que apuntan a una alta productividad en el arroz, así como los programas de transferencia de tecnología, fundamentales para aumentar los saltos de productividad en sentido amplio.

Ahora estoy seguro de que estamos mucho mejor preparados para la tercera ola. ¡Buena lectura!

Introducción

*“Rice was everything to us. It was our breakfast in the morning, lunch at noon, snacks in the evening, and dinner”*¹ (El arroz fue todo para nosotros. Fue nuestro desayuno, nuestro almuerzo al mediodía, nuestra merienda y nuestra cena) - 1930 en el continente asiático.

*“Of course, rice is important. We have rice in every meal. We have rice on breakfast, lunch time, with friends, and as special dishes on festive dates”*² (Por supuesto, el arroz es importante. Usamos arroz en cada comida. Tenemos arroz para el desayuno, el almuerzo, con amigos y como plato especial en fechas festivas) - 2015 en China.

El arroz (*Oryza sativa*) se origina en el valle medio y bajo del río Yangtze en China y en el valle del río Mekong en el sudeste asiático. Los primeros indicios de consumo de arroz por parte del hombre se encontraron a orillas del río Yangtze, junto con utensilios primitivos hechos de huesos, piedras y cerámica, que datan del 7.000 a.C. Alrededor del 5.000 a.C., el arroz se esparcía por los territorios donde hoy se ubica Corea del Norte, Corea del Sur, Japón, Taiwán y Filipinas. Durante el siglo IV a. C., los griegos

¹ Sharma S.D. (2010). Extracto del autor informa sobre la importancia del arroz durante su infancia en 1930.

² Yuan, Shen (2019). Respuesta del investigador de la Universidad Agrícola de Huazhong cuando se le preguntó sobre la importancia del arroz para el pueblo chino, en la ciudad de Lincoln, NE (EE. UU.).

introdujeron el arroz en Asia occidental y Grecia. Con la invasión de España por los árabes durante el siglo VIII, el arroz se introdujo en Europa, en los territorios de España, Italia y Francia. Recién en el siglo XV, a partir de las grandes navegaciones, los españoles, portugueses e ingleses introdujeron el grano en las Américas (Sharma, 2010) (Figura 1).

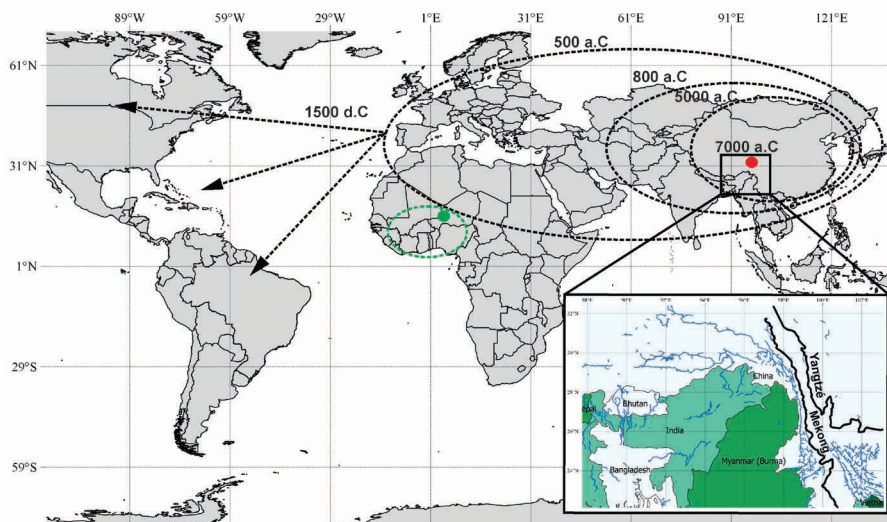


Figura 1. Centros de origen de arroz: *Oryza sativa*, en rojo, y *Oryza glaberrima*³, en verde. Las líneas punteadas representan la dispersión temporal de arroz alrededor del mundo desde el centro de origen en los continentes asiático y africano. Fuente: Equipe FieldCrops.

Las primeras semillas de arroz fueron introducidas al continente americano en las regiones donde hoy se encuentran República Dominicana, Brasil, Ecuador y Colombia, con una producción orientada al consumo de subsistencia. A partir del siglo XVII, se introdujeron en el continente americano muchas variedades de arroz producidos principalmente en Italia, como la

³ Originario del delta del río Níger hace 3.000 años, se extendió por el valle del río Sokoto, el lago Chad y los valles del río Senegal y del río Gambia. Durante el siglo XV, los europeos introdujeron *O. sativa* al oeste del continente africano (LINARES, 2002). Desde entonces, la superficie cultivada con *O. sativa* ha aumentado mientras que la superficie cultivada con *O. glaberrima* se ha reducido, representando hoy menos del 5% de la superficie cultivada con arroz en el continente africano.

variedad Novara (de la región de Novara en Italia) y posteriormente denominado Carolina por su primera introducción en el estado de Carolina del Sur (Estados Unidos) en 1694. A partir de la introducción de nuevas variedades se logró incrementar la producción y calidad del arroz producido en las Américas, tanto que en 1767 se produjo la primera exportación de arroz de América Latina al continente europeo, proveniente de la producción de granos de la variedad Carolina exportados de Brasil a Portugal (Pereira & Guimarães, 2010).

Entrando en el siglo XX, a partir de 1930 se introdujeron nuevas variedades en regiones tropicales de América Latina, como Japón y Bomba (introducido en Colombia) y la variedad Guacari (también conocido como Honduras), mientras que en las regiones subtropicales de América del Sur. Todavía predominaba el sur para variedad Carolina. Con el aumento de la superficie cultivada y la importancia del arroz para la alimentación y la economía de los países latinoamericanos durante el inicio del siglo XX, surgieron programas de investigación y selección de genotipos adaptados a las regiones productoras de arroz.

En 1930, se creó el Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias de Colombia, enfocado en la selección y multiplicación de variedades de arroz. Durante los primeros años de la fundación, el foco principal fue la multiplicación de cultivares de arroz de Estados Unidos, como Fortune⁴, Bluebonnet y Zenith. En Brasil, el programa de mejoramiento de arroz del Instituto Agronómico de Campinas (IAC), en São Paulo, fue creado en 1937, y poco después, en 1939, en Rio Grande do Sul, se fundó la Estación Experimental de Arroz (EEA) y el Instituto Rio Grandense do Arroz (en 1940), con el objetivo de introducir variedades de EUA y, posteriormente, seleccionar cultivares adaptadas al Estado. La primera cepa pura seleccionada por la EEA fue la selección 388 (Carmona, 2015).

⁴ Cultivar desarrollado en 1911 en la Estación Experimental Agrícola de Louisiana em Crowley (EE. UU.) a través de selección varietal de la variedad Pa Chiam (de Taiwán).

En 1960, con la fundación del Instituto Internacional de Investigación del Arroz (IRRI), ubicado en Filipinas, se inició uno de los programas de mejoramiento más exitosos de la historia. En 1962, el Dr. Peter Jennings cruzó 38 variedades de arroz para la selección de nuevas cepas promisoras. El cruzamiento N° 8, entre la variedad Peta (alta estatura, alto vigor, resistencia a varias plagas y enfermedades), originaria de Indonesia y la variedad Dee-geo-woo-gen (alta productividad, alto macollamiento, baja estatura) originaria de Taiwán, fue seleccionada para nuevos cruces, con la producción de 130 semillas. La generación F1 presentó un 100% de plantas de alta estatura (característica indeseable debido al vuelco). La segunda generación (F2), presentó 66% de plantas con ciclo largo (todas descartadas) y 34% de plantas con ciclo corto. Estos se mantuvieron en el programa de cría y se seleccionaron de acuerdo con el nivel de susceptibilidad a las enfermedades. De la generación F3, se seleccionaron 298 individuos y se sembraron en 298 hileras, descartando sólo individuos susceptibles a pircularia. En la línea 288, la planta N° 3 fue seleccionada para la multiplicación de la línea IR8-288-3⁵, reproducida y multiplicada para lograr una densidad de planta uniforme y producción de semillas para probar en algunos campos experimentales (Hong Kong, Filipinas, Malasia, Tailandia y Taiwán). El resultado de este cruce fue anunciado en 1966 por el IRRI, con la variedad denominado IR8, la primer variedad enana, con alto potencial de macollos y alto potencial de rendimiento, que posteriormente se utilizó en programas de mejoramiento de arroz en todo el mundo, incluso en América (Chandler, 1992).

Desde 1967, el Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias de Colombia ha cedido espacio al Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), donde la investigación para el desarrollo de cepas y variedades promisorias ha avanzado con el apoyo del IRRI. A partir de 1970, las variedades de grano fino y largo se volvieron predominantes en América del Sur,

⁵ IR8-288-3: De acuerdo con el sistema de numeración IRRI: se selecciona el tercero individuo (planta) de la línea 288 generada en F4, originada del cruzamiento 8.

principalmente debido a la introducción de material genético de Estados Unidos (Bluebelle, Startbonnet, Labelle). Estas variedades pasaron a ser utilizadas en programas de mejoramiento local para mejorar la calidad del grano, originando variedades que dominaban grandes áreas de producción, como CICA 4 en Centroamérica y EEA 404 y 406 en Sudamérica. En 1979 una alianza entre IRGA, CIAT y EMBRAPA permitió el lanzamiento de la variedad semi-enana BR-IRGA 409, de alta calidad y rendimiento de grano. A fines de la década de 1980, el INIA de Uruguay lanzó la variedad EL PASO 144, también del programa CIAT, que, junto con la variedad BR-IRGA 409, fueron durante dos años los dos cultivares predominantes en los cultivos de América del Sur (Hill y Hardy, 1999).

En la primera década del 2000, los programas de mejoramiento en muchos países latinoamericanos, como Colombia, Brasil, Argentina y Uruguay, lanzaron variedades con alta calidad de grano y alto potencial productivo. Con variedades más productivas, el ajuste en el manejo del arroz se ha convertido en un factor clave para proporcionar a estas variedades las condiciones adecuadas para la expresión del potencial genético. Se pueden destacar dos programas desarrollados en alianza con el Fondo Latinoamericano para Arroz de Riego (FLAR) e IRGA en Rio Grande do Sul. El primero fue el programa CFC, desarrollado a partir de la década de 2000, que consistió en la transferencia de tecnología entre investigadores y productores, financiado por el Fondo Común para los Productos Básicos (CFC). El segundo fue el Proyecto 10, cuyo objetivo fue ajustar las prácticas de manejo implementadas en el cultivo del arroz, con el fin de incrementar la productividad de los cultivos a $10,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ($1 \text{ Mg} = 1 \text{ tonelada}$). Estos dos proyectos marcaron un nuevo período en el que la gran cantidad de variedades con potencial productivo y calidad de granos presentaron diferentes respuestas al manejo, requiriendo más de la investigación, extensión y productores rurales para incrementar la eficiencia del uso de los recursos y explorar en un potencial productivo más sostenible.

Durante este período, muchas regiones aumentaron la productividad promedio, como el estado de Rio Grande do Sul, que mostró un salto en la productividad promedio del arroz de 5,0 Mg ha⁻¹ a 7,5 Mg ha⁻¹ en un período de 10 años (2003 a 2013). También en la primera década de los 2000 surgieron tecnologías importantes, como la tecnología Clearfield®, que incorporó genes de resistencia a herbicidas del grupo de las imidazolinonas, una herramienta fundamental para el manejo de maleza del arroz. Inicialmente los genes se introdujeron en la variedad IRGA 422 CL, el resultado de una alianza público-privada entre IRGA y la multinacional alemana BASF, y posteriormente también introducidos en las variedades Puitá INTA-CL y Guri INTA-CL desarrollados por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria de Argentina.

En el escenario actual (inicio de la tercera década del siglo XXI) del sistema de producción de arroz, donde existen variedades adaptadas para las principales regiones productoras de América Latina, la búsqueda de programas de mejoramiento, investigación y extensión es por variedades que tienen el mayor potencial de productividad y/o resistencia a factores que impactan negativamente en la productividad y manejo ajustado a cada material genético, considerando la reducción de costos de producción. Por lo tanto, en esta nueva etapa, en la que el manejo debe llevarse a cabo en base al conocimiento, existe una mayor necesidad de estudios que exploren de manera más eficientemente la ecofisiología del arroz. Por lo tanto, se pueden proponer prácticas de manejo específicas del sitio (ajustadas para cada región/cultivo) y para cada material genético con miras a reducir la brecha de productividad existente en los cultivos. Este libro tiene como objetivo detallar los eventos fenológicos, morfológicos y fisiológicos más importantes asociados con el crecimiento y desarrollo del cultivo del arroz, relacionándolos con las decisiones de manejo, apuntando a maximizar la eficiencia en el uso de recursos y “construir” cultivos con alta productividad de forma sostenible con el objetivo de aumentar las ganancias del productor de arroz y con el mínimo de impacto ambiental.

Foto: Patrício Orozco-Contreras



1. Crecimiento y desarrollo del arroz

Michel Rocha da Silva¹; Alencar Junior Zanon¹; Vladison Fogliato Pereira¹; Anderson Haas Poersch¹; Ary José Duarte Junior¹; Bruna San Martin Rolim Ribeiro¹; Giovana Ghisleni Ribas¹; Ioran Guedes Rossato¹; Isabela Bulegon Pilecco¹; Lorenzo Dalcin Meus¹; Moises de Freitas do Nascimento¹; Pablo Mazzuco de Souza¹; André da Rosa Ulguim²; Claudio Ogoshi⁴; Clérison Régis Perini²; Fernando Fumagalli Miranda³; Jerson Vanderlei Carús Guedes²; Nereu Augusto Streck¹.

El desarrollo y crecimiento de la planta son procesos distintos, que están relacionados entre sí, y pueden ocurrir al mismo tiempo o no. El desarrollo se refiere al proceso que ocurre en la planta, atraviesa un largo ciclo de vida, desde la diferenciación celular hasta la senescencia de los órganos, y se puede cuantificar por el número de órganos que aparecen en la planta, así como por el número de hojas durante el desarrollo vegetativo o de panículas y flores durante el desarrollo reproductivo. El crecimiento se define como un aumento irreversible en la dimensión física de un órgano o de la planta entera, como el aumento en el largo y/o ancho de una hoja, altura de la planta, materia seca o fresca de los granos y volumen o diámetro del órgano. Los procesos de crecimiento y desarrollo están influenciados por factores genéticos, meteorológicos (radiación solar y temperatura del aire) y de manejo (tiempo de maduración y características físico-químicas de los suelos), donde las interacciones entre estos factores definen el potencial productivo de cada cultivo de arroz.

¹ Universidad Federal de Santa Maria (UFSM), Departamento de Fitotecnia, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.

² UFSM, Departamento de Defesa Fitosanitária, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.

³ Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA), sector de Post-Cosecha, Cachoeirinha, Rio Grande do Sul, Brasil.

⁴ Empresa de Investigación Agropecuaria y Extensión Rural de Santa Catarina (EPAGRI), Estación Experimental de Caçador, Santa Catarina, Brasil.

1.1. Botánica y morfología

El arroz es una especie diploide ($2n$), con 24 cromosomas, autógama, herbácea y anual. En cuanto a la clasificación taxonómica, pertenece a la familia Poaceae (gramíneas), género *Oryza* y especie *Oryza sativa* L., siendo subdividida a su vez en dos subespecies: indica y japónica. Hay variedades que crecen en un entorno con una profundidad de agua de más de 1,5 metros de altura y gran estatura (más de 2,5 metros de altura) y variedades enanas que alcanzan un máximo de 1,2 metros de altura y se pueden cultivar en ambiente de tierras altas (ausencia de profundidad del agua). Variedades que presentan hojas verdes o violáceas, cáscara de grano amarillento, dorado o violáceo, granos largos, delgados o cortos y redondeados, pericarpio blanco, rojo o negro. Morfológicamente, las estructuras de una planta de arroz se pueden clasificar en: órganos vegetativos (raíces, tallos y hojas) y órganos reproductores (panículas o panojas) (Figura 2).

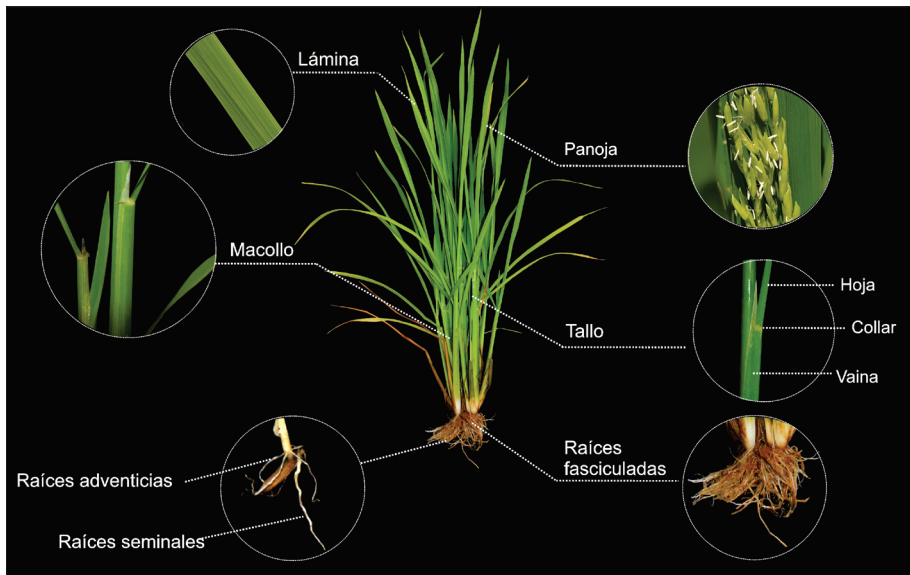


Figura 2. Planta de arroz y las principales estructuras morfológicas. Fuente: Equipo FieldCrops.

Estructuras vegetativas

Los órganos vegetativos son las raíces, hojas, tallos y macollos. El sistema de raíces se divide botánicamente en dos tipos principales: raíces fasciculadas y adventicias. Las raíces fasciculadas están formadas por raíces seminales, que se emiten en la primera semana de emergencia, se establecen a partir de las reservas del endospermo de la semilla. Por otro lado, las raíces adventicias (emitidas durante el crecimiento de las plantas) persisten hasta el final del ciclo de cultivo y tienen origen en el tallo principal y los macollos. Los tallos son responsables de mantener la planta erguida, ya que están compuestos de nudos y entrenudos, clasificados en tallos primarios (tallo principal) y tallos secundarios (macollos). Desde el tallo principal, los macollos se desarrollan a partir de los yemas axilares de los nudos no alargados.

Las hojas de arroz están formadas por lámina, ligula, aurícula, collar y vaina. A diferencia del resto de hojas, el profilo (primera estructura visible en la emergencia de las plantas de arroz) tiene forma cilíndrica y sin láminas, siendo descartado como una hoja real. A partir de la segunda hoja, la emisión se produce alternativamente a través de las yemas presentes en los principales nudos del tallo.

En las variedades modernas, que no responden al fotoperíodo, el número total de hojas varía de 9 a 18 (Streck et al., 2008), en los que la última hoja expandida se denomina “hoja bandera”. Una hoja se considera completa cuando el collar (estructura que separa la lámina de la vaina), la ligula y la aurícula son visibles. La lámina presenta nervaduras paralelinervias, con haces vasculares y espacios vacíos denominados aerénquimas, que conectan hojas y raíces, supliendo la necesidad de oxígeno en la condición de anaerobiosis del suelo y permitiendo el cultivo en ambientes inundados (Yoshida, 1981). Las hojas son responsables de la actividad de fotosíntesis de la planta. Cualquier daño a estas estructuras compromete la acumulación de biomasa y el rendimiento de grano.

Estructuras reproductivas

El arroz se caracteriza por ser una planta autógama, es decir, está formada por flores hermafroditas que se autofecundan (el polen de la parte masculina fertiliza el gameto femenino en la misma inflorescencia). Una flor de arroz está compuesta de pistilo (órgano reproductor femenino), estambres (órgano reproductor masculino compuesto de seis anteras) y lóbulos (revestimiento interno de la flor).

El sistema reproductivo está protegido por espiguillas, compuestas por dos brácteas (pálea y lemna) que minimizan el efecto de los eventos adversos durante la polinización. En algunas variedades, es común el crecimiento de aristas en el extremo final de la lema. Cada espiguilla está conectada al raquis a través de los pedicelos, formando la panícula o panojas. Después de la fertilización de una inflorescencia, se forma una cariopsis (o semilla) (Figura 3).

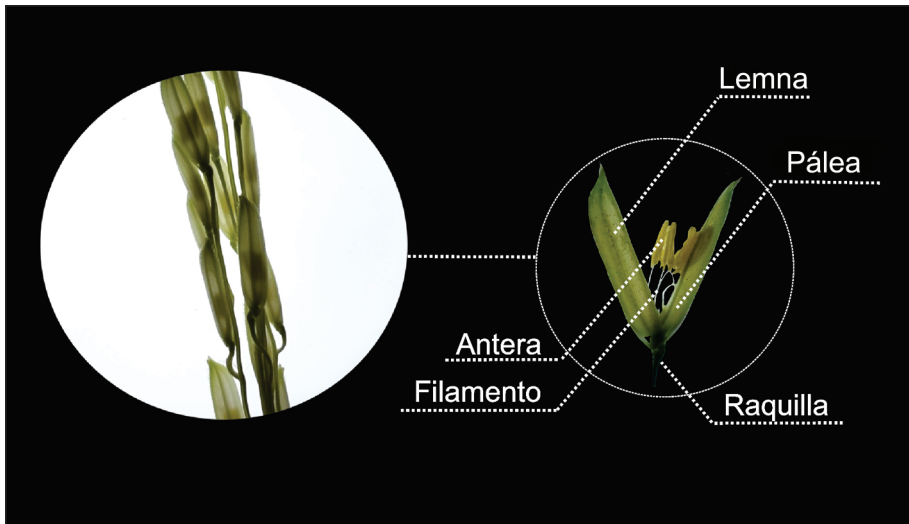


Figura 3. Estructuras reproductivas de una planta de arroz: espiguilla y sus estructuras morfológicas. Fuente: Equipo FieldCrops.

1.2. Escala fenológica

Las escalas fenológicas son herramientas objetivas y precisas en la identificación de las etapas de desarrollo, ya que describen los procesos de las plantas mediante características morfológicas, desde la siembra (en especies con reproducción de semillas) o plantación (en especies con reproducción asexual a través de órganos vegetativos) hasta la madurez fisiológica. Su objetivo es estandarizar la terminología y facilitar la comunicación entre investigadores, extensionistas y productores.

En este capítulo y en la mayor parte del libro, los términos “etapa de desarrollo” o estadio (término en inglés *developmental stage*) se utilizan para expresar un momento morfológico en el que se encuentra la planta o un órgano, mientras que la “fase de desarrollo” (término en inglés *developmental phase*) es definido como el intervalo entre dos etapas sucesivas de desarrollo en la ontología de la planta. Cada fase también se puede dividir en subfases para una mejor comprensión y detalle. La escala fenológica principal y más utilizada del cultivo de arroz en todo el mundo es la propuesta por Counce et al. (2000), que se describe a continuación.

1.2.1 Escala de Counce et al. (2000)

La escala fenológica propuesta por Counce et al. (2000) es la más utilizada para el cultivo de arroz, dividiendo el ciclo de desarrollo en tres fases: fase de plántulas, fase vegetativa y fase reproductiva.

La fase de plántulas tiene cuatro etapas de desarrollo durante el proceso de germinación (S0, S1, S2, S3), identificadas por la letra S. La fase vegetativa comienza en la aparición de la planta en la superficie y termina con la iniciación de la panícula (R0). Durante la fase vegetativa, la diferenciación de las hojas ocurre en el ápice meristemático y la aparición de hojas en el falso tallo formado por las vainas de la planta. El número de hojas

expandidas en el tallo principal de la planta se identifica con la letra V seguida del número de la hoja expandida (por ejemplo, en V1 la planta tiene una hoja expandida en el tallo principal, en V2 la planta tiene dos hojas expandidas en el tallo principal y así sucesivamente hasta VF, que es cuando se expande la hoja bandera del tallo principal). Una hoja se considera expandida cuando presenta el collar completamente desarrollado, es decir cuando la lámina de la hoja se separa de la vaina. Finalmente, la fase reproductiva comienza con la iniciación de la panícula hasta la madurez fisiológica de los granos, cada etapa está identificada por la letra R, comenzando en R0 y terminando en R9. Hay una pequeña superposición entre el final de la aparición de las hojas y el comienzo de la fase reproductiva: desde R0 hasta la aparición de la hoja de bandera, se emiten de tres a cinco hojas, dependiendo de la variedad y el tiempo de siembra (Streck et al., 2008). Esta división se detallará e ilustrará a continuación.

1.2.1.1. Fase de desarrollo de la plántula (siembra - emergencia)

S0: Semilla de arroz no embebida, o sea, cuando la semilla aún no ha absorbido agua para comenzar el proceso de germinación (Figura 4).

S1: Emergencia del coleóptilo o radícula. En el proceso de germinación, tanto el coleóptilo como la raíz pueden desarrollarse primero. Normalmente, en contacto con el suelo en humedad ideal, la radícula se emite primero, sin embargo, en condiciones de inmersión, como en el caso del sistema pregerminado, el coleóptilo puede emerger antes.

S2: Emergencia del coleóptilo y la radícula. Cuando ambas estructuras ya han emergido.

S3: Emergencia del perfilo. El perfilo es la primera hoja en aparecer, sin embargo, no se considera una hoja verdadera, ya que está compuesto solo por la vaina de la hoja, no presenta lámina ni collar. Se lo conoce popularmente como estadio de “punto de aguja”.

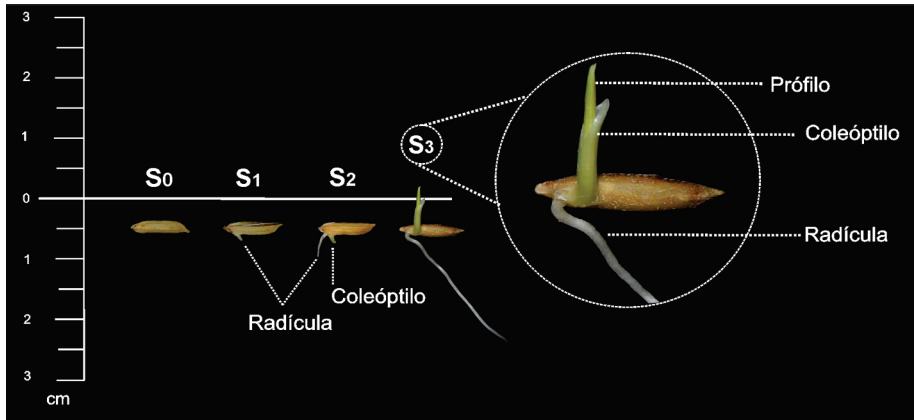


Figura 4. Fase de siembra a emergencia de la plántula. Fuente: Equipo FieldCrops.

1.2.1.2. Fase vegetativa

V1: Primera hoja del tallo principal completamente expandida. La primera hoja con el collar formado (Figura 5). Es en esta etapa que se forman las primeras raíces nodales o adventicias.

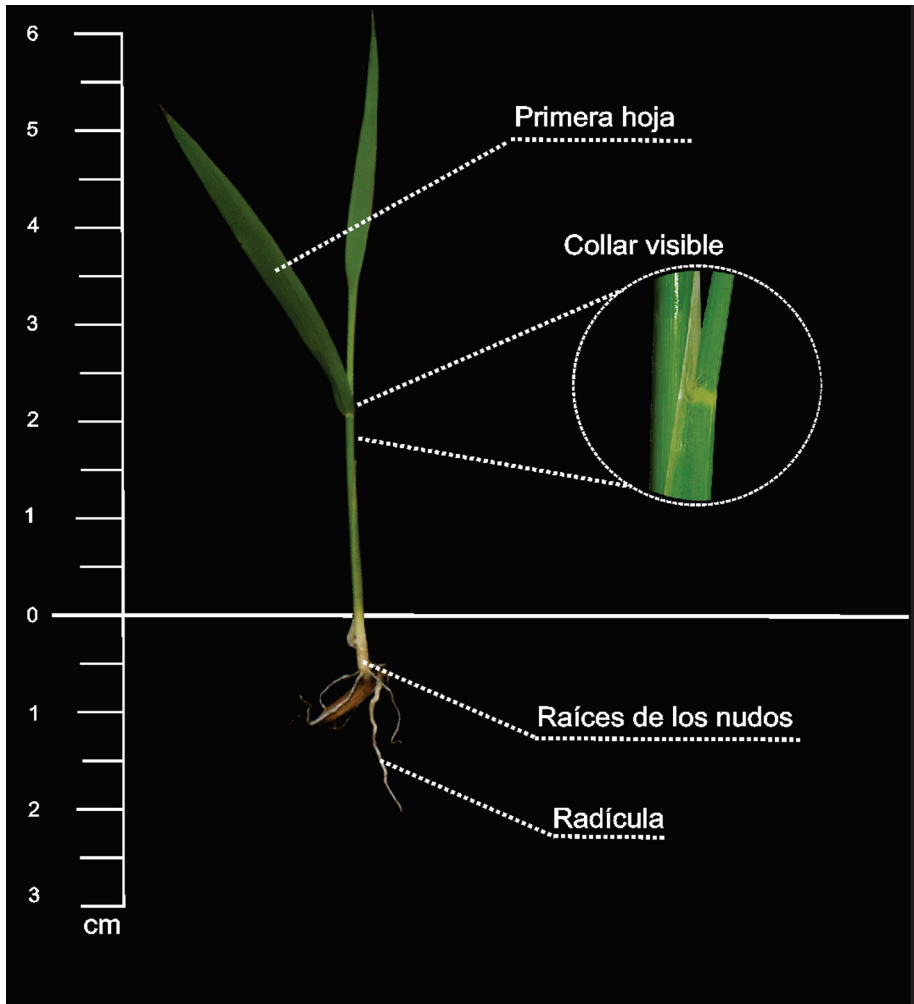


Figura 5. Estadio V1 en arroz de la escala de Counce et al. (2000). Fuente: Equipo FieldCrops.

V2: Segunda hoja del tallo principal completamente expandida. La segunda hoja con el collar visible.

V3: Tercera hoja del tallo principal completamente expandida (Figura 6). La tercera hoja con el collar visible. Etapa en la que comienza el macollamiento, que dura hasta aproximadamente V7.

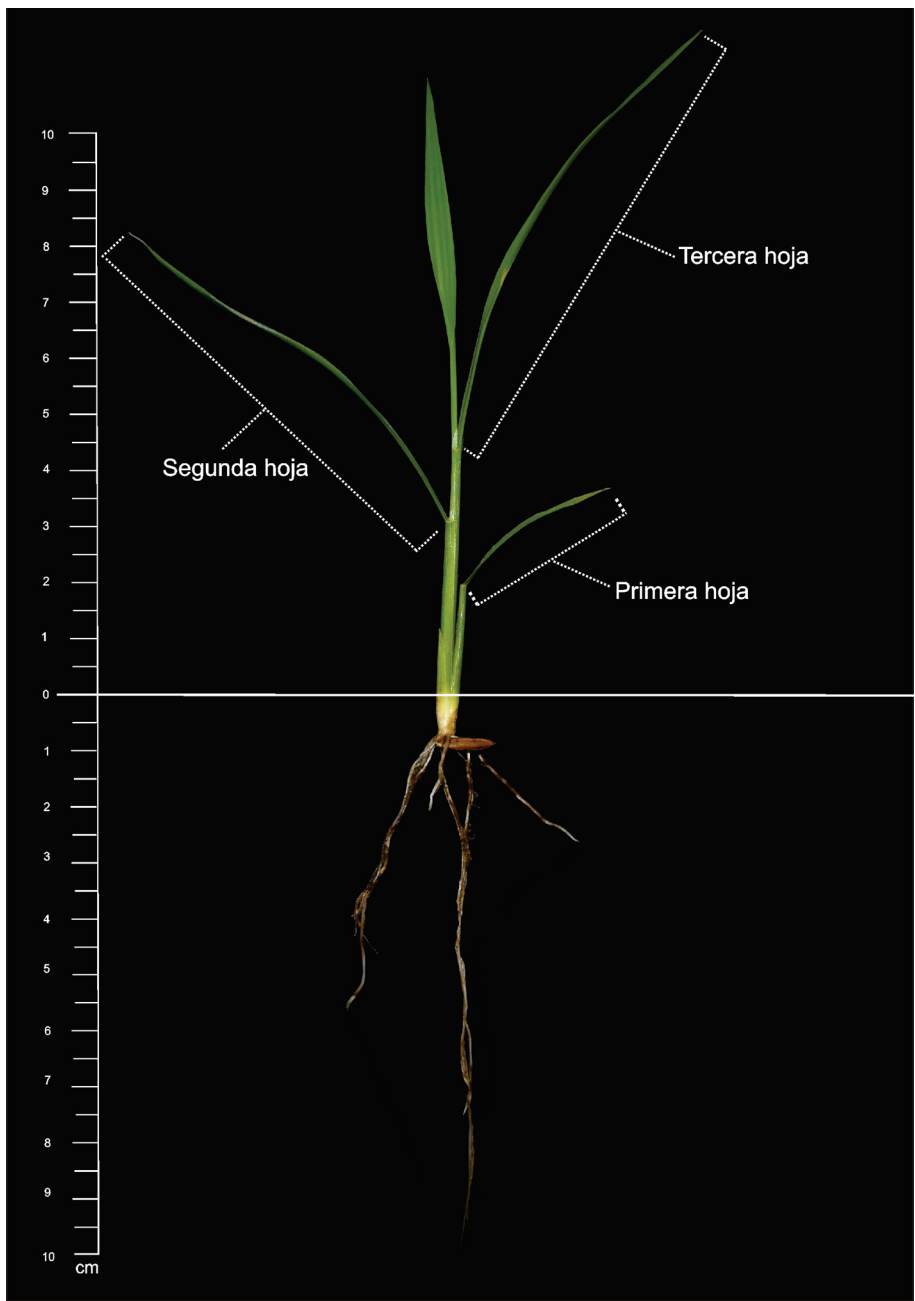


Figura 6. Estadio V3 en arroz de la Escala de Counce et al. (2000). Fuente: Equipo FieldCrops.

Vn: Enésima hoja del tallo principal completamente expandida.
VF: Collar de la hoja bandera del tallo principal formado (Figura 7).



Figura 7. Estadio VF en arroz de la escala de Counce et al. (2000), mostrando la hoja bandera del tallo principal completamente expandida. Fuente: Equipo FieldCrops.

1.2.1.3. Fase reproductiva

R0: Iniciación de la panícula (Figura 8). Se caracteriza por la diferenciación del meristema apical en la panícula primordial. En esta etapa, comienza la definición del número de granos por panícula.

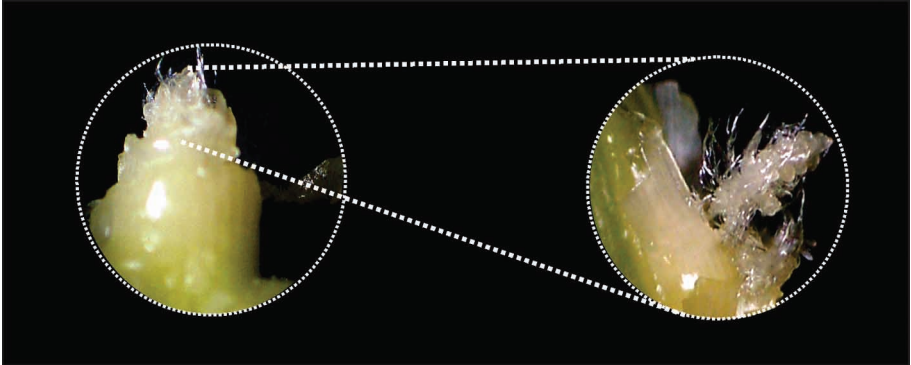


Figura 8. Estadio R0 en arroz de la escala de Counce et al. (2000), mostrando el ápice meristemático en iniciación de la panícula, tomado con lupa de aumento de 45 veces. Fuente: Equipo FieldCrops.

R1: Diferenciación de la panícula, o punto de algodón. Período en el que se produce la diferenciación de las ramificaciones de la panícula y el alargamiento del tallo, o sea, la planta abandona la fase de “roseta”. Esta etapa se identifica cortando el tallo principal. En la Figura 9A es posible observar el comienzo del desarrollo de la panícula y en la Figura 9B unos días después del comienzo, con la panícula más prominente.

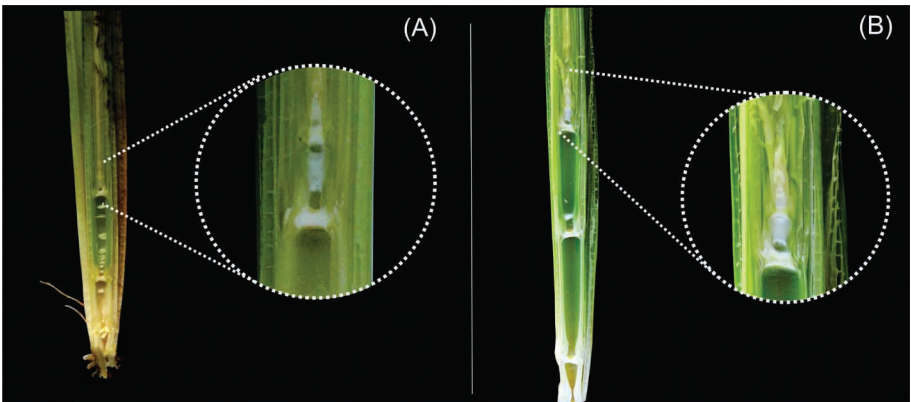


Figura 9. Estadio R1 en arroz en la escala de Counce et al. (2000). El panel A muestra el comienzo del desarrollo de la panícula. El panel B muestra un desarrollo avanzado de estructuras diferenciadas. Fuente: Equipo FieldCrops.

R2: Formación del collar en la hoja bandera. Conocido popularmente como embuchado o embarrigado, ocurre cuando hay una formación completa de la última hoja en la parte superior del tallo principal. En ese momento, con la emisión de la última hoja (VF), la planta alcanza el área foliar máxima.

R3: Exerción de la panícula. Se considera cuando la parte superior de la panícula está por encima del collar de la hoja bandera (Figura 10).

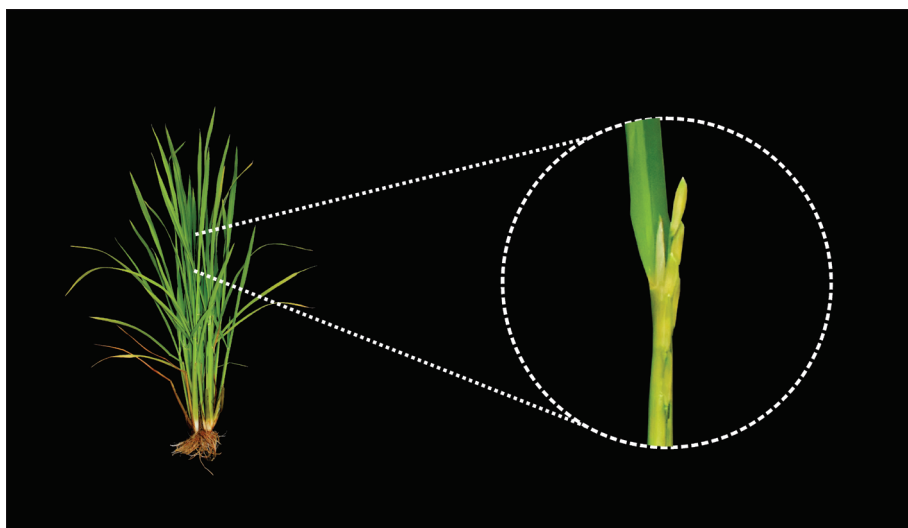


Figura 10. Estadio R3 en arroz de la escala de Counce et al. (2000). Fuente: Equipo FieldCrops.

R4: Antesis. En esta etapa, el 50% de las plantas están en plena floración, cuando el proceso de polinización alcanza su punto máximo (Figura 11). Además, es durante este período que las plantas alcanzan la altura máxima.

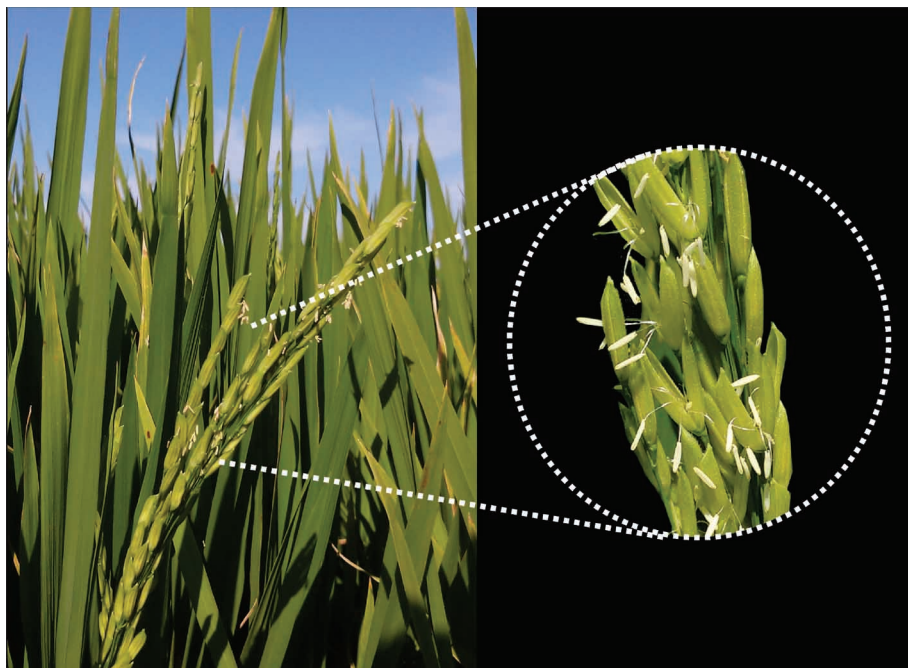


Figura 11. Estadio R4 en arroz de la escala de Counce et al. (2000). Fuente: Equipo FieldCrops.

R5: Comienzo de llenado de granos.

R6: Expansión de granos en profundidad (maximo tamaño de grano en al menos un cariopside). Comienzo de la etapa del grano lechoso (Figura 12).

R7: Al menos un grano de la panícula tiene la cáscara con un color típico de la variedad. Etapa de grano pastoso, se mantiene la huella al marcar con la uña del pulgar.

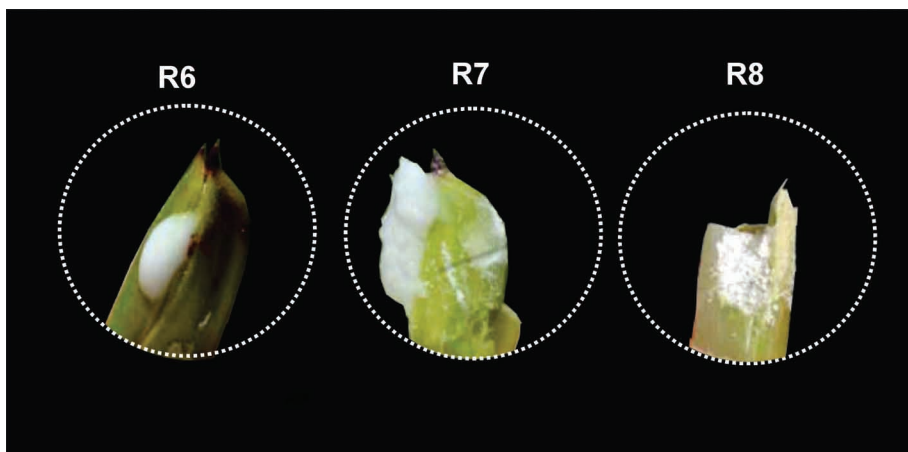


Figura 12 - Estadios R6, R7 e R8 de la escala de Counce et al. (2000). Fuente: Equipo FieldCrops.

R8: Inicio de madurez fisiológica: también llamado grano harinoso duro (Figura 13) coloración marrón en algunos granos. La madurez puede comenzar tanto desde la punta de la panícula hasta la base, como también puede comenzar en el centro de la panícula.

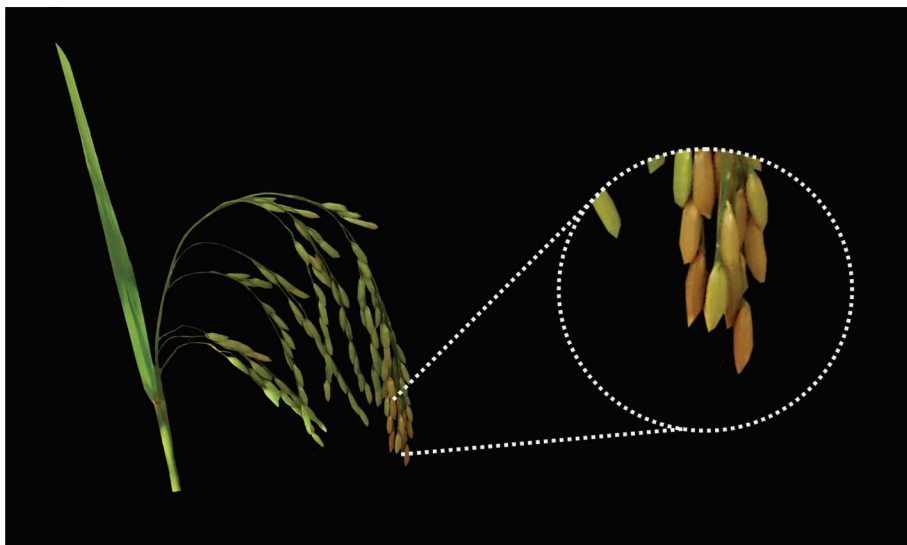


Figura 13. Estadio R8 en arroz de la escala de Counce et al. (2000). Fuente: Equipo FieldCrops.

R9: Madurez completa de los granos de panícula. Todos los granos tienen un color característico de la variedad, en este momento no hay más translocación de fotoasimilados a los granos y ya están en su peso seco máximo (Figura 14).

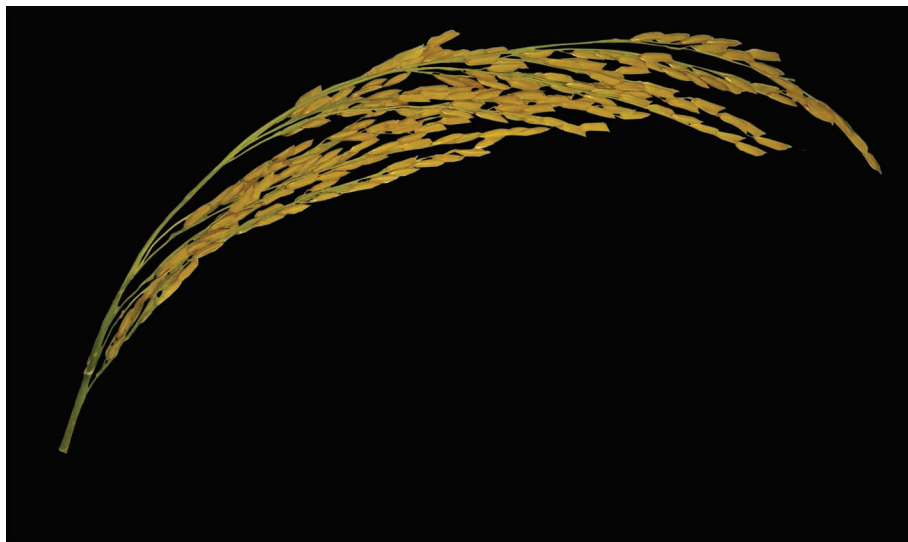


Figura 14. Estadio R9 en arroz de la escala de Counce et al. (2000). Fuente: Equipo FieldCrops.

1.3. Ecofisiología y prácticas de manejo en cada fase de desarrollo.

En este ítem se detallarán las prácticas de crecimiento, desarrollo, ecofisiología y manejo por etapa de desarrollo de las plantas de arroz.

1.3.1. Fase de siembra – emergencia

Esta fase comienza cuando hay el primer contacto de la semilla con el suelo y termina cuando el perfilo (hoja incompleta) del coleóptilo está por encima de la superficie del suelo. La duración de esta fase depende de factores ambientales como la temperatura del aire, la temperatura y la humedad del suelo.

Después de la siembra, el proceso de germinación comienza con la absorción de agua por parte de la semilla, donde las condiciones favorables de humedad del suelo serán clave para que la emergencia sea uniforme. El agua actúa como un activador de enzimas responsables de la degradación del almidón contenido en la semilla y, a partir de ese momento, se desencadenan los procesos metabólicos responsables de la expansión del embrión y la exposición de la radícula.

Después de la emergencia de la radícula, se desarrollan las raíces seminales, formando el primer contacto de la raíz con el suelo. Al mismo tiempo, el mesocótilo (estructura ubicada entre la semilla y el primer nodo de plántulas) inicia el proceso de alargamiento, caracterizando la aparición de plántulas de arroz. Si el agua no es un factor limitante, la capacidad de desarrollo del mesocotilo depende sólo de la temperatura del suelo. Las temperaturas más bajas reducen la velocidad de alargamiento y las temperaturas más altas aumentan. Durante las primeras dos semanas de crecimiento y desarrollo, las plántulas de arroz dependen en gran medida de las reservas de semillas. Después del alargamiento del mesocotilo, la fuente de energía para el crecimiento y desarrollo de las plantas de arroz proviene de las raíces adventicias y la radiación solar interceptada por las hojas y las reservas de semillas contribuyen al crecimiento de las dos primeras hojas (V1 y V2). Las raíces adventicias emergen justo debajo de la superficie del suelo después de la generación del primer conjunto de raíces seminales. Las raíces adventicias son responsables de la mayor parte de la absorción de agua y nutrientes hasta el final del ciclo de desarrollo de la planta.

Durante esta primera fase y desarrollo del cultivo, debemos centrarnos en construir los componentes de la productividad. Sabiendo que el número de plantas por unidad de área es un factor importante para determinar la productividad, el establecimiento correcto del cultivo se convierte en un pilar importante en la construcción de altos rendimientos. Esta construcción puede realizarse a través de las prácticas de manejo que se abordarán en el siguiente punto.

1.3.1.1. Prácticas de manejo en la fase siembra - emergencia

La duración de la fase de siembra-emergencia está influenciada por la temperatura y la humedad del suelo, por lo tanto, realizar la siembra cuando las condiciones son óptimas (subcapítulo 2.1) acelera el proceso de emergencia, reduciendo el tiempo de exposición de las semillas a patógenos y plagas. Entre las prácticas de manejo, la fecha de siembra es la práctica principal que afecta la duración de esta subfase. En la siembra llevada a cabo cuando la temperatura del suelo es baja (menos de 20 °C durante el comienzo de la primavera en regiones extra-tropicales), el proceso de germinación y emergencia ocurre más lentamente, mientras que si la siembra se lleva a cabo en momentos en que la temperatura es más alta (por encima de 25 °C desde octubre/noviembre), la germinación y la emergencia ocurren más rápidamente (Figura 15).

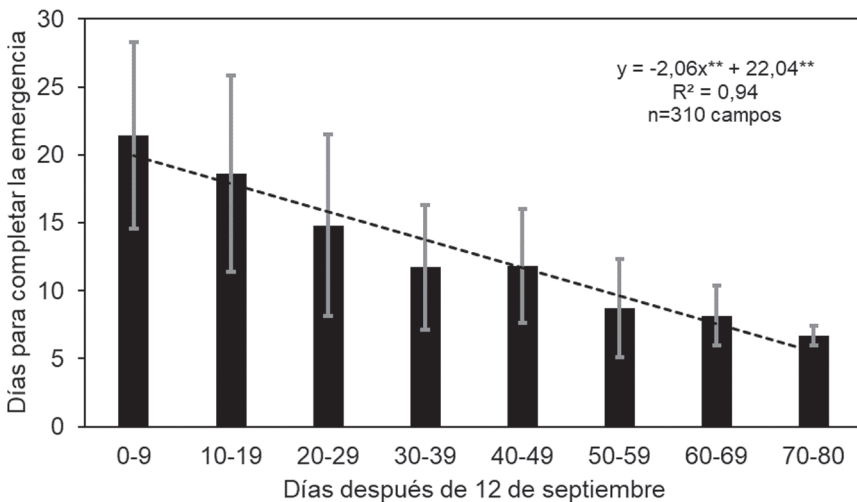


Figura 15. Número de días de la siembra a emergencia en función de la fecha de siembra. Datos de las parcelas demostrativas del Proyecto 10+ de las 6 regiones de arroceras de Rio Grande do Sul en las cosechas 2016, 2017 e 2018. ** P<0,0001. Fuente: IRGA y Equipo FieldCrops.

La velocidad de germinación también depende de la calidad fisiológica y fitosanitaria de las semillas. La calidad de la semilla es aún más importante cuando la siembra se realiza en épocas más frías, ya que las semillas están expuestas a hongos fitopatógenos e insectos plaga durante un período de tiempo más prolongado (Figura 16), lo que puede comprometer el crecimiento de la planta. En este caso, se recomienda realizar un tratamiento de semillas (TS) para proteger la semilla de agentes externos y garantizar su viabilidad hasta que se den condiciones favorables para la germinación y emergencia.

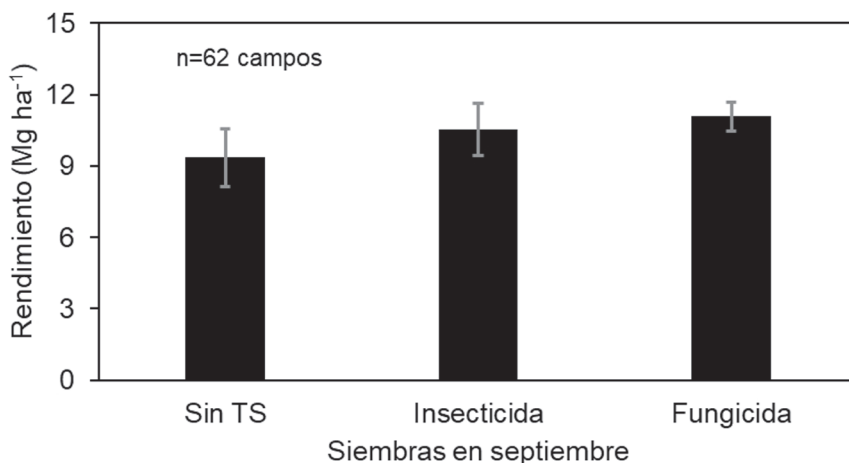


Figura 16. Productividad de cultivos sembrados en septiembre, sin tratamiento de semillas (TS), semillas tratadas sólo con insecticida y semillas tratadas sólo con fungicida. Datos de las parcelas demostrativas del Proyecto 10+ realizadas en seis regiones arroceras en Rio Grande do Sul en las cosechas de 2016, 2017 y 2018. Fuente: IRGA y Equipo FieldCrops.

Pensando en definir el mejor tiempo de siembra, se pueden consultar herramientas como la Zonificación del Riesgo Climático Agrícola (ZARC) o software como “PlanejArroz” (Capítulo 11), que simula el crecimiento y desarrollo de las plantas, para la mejor planificación del tiempo de siembra. La zonificación agrícola indica los períodos de siembra recomendados por región, buscando conciliar el período de mayor demanda del cultivo con el período

de condiciones ambientales más favorables, o con menos riesgo de malos resultados.

La temporada de siembra también influye directamente en la aparición de enfermedades y plagas en el arroz de regadío, lo que influye en el manejo fitosanitario del cultivo. Por ejemplo, para las regiones subtropicales de América del Sur (Brasil, Argentina, Uruguay, Chile y el sur de Paraguay), cuanto más tarde se siembra, mayor es el riesgo de aparición de enfermedades, debido al ambiente más favorable para el desarrollo de patógenos (Grohs et al., 2010). La aparición de enfermedades como la piricularia, la mancha marrón y la pudrición del tallo es menor cuando el arroz de regadío se siembra en la primera quincena de octubre, especialmente en comparación con la siembra en la primera quincena de diciembre, lo que demuestra la importancia de la fecha de siembra en el manejo de enfermedades del arroz regado (Figura 17).

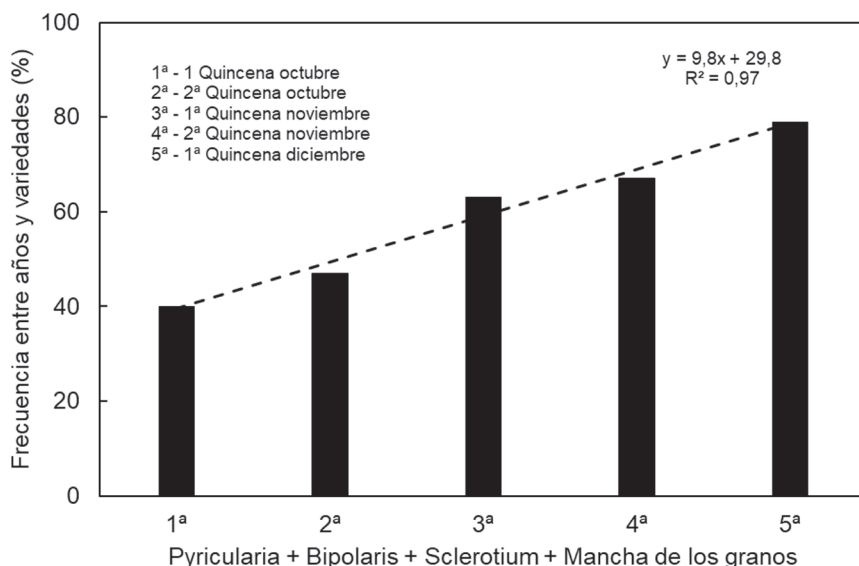


Figura 17. Influencia de la fecha de siembra en la ocurrencia de enfermedades en arroz irrigado en Rio Grande do Sul. Los datos se refieren a medias de los ensayos conducidos entre 2003 a 2008 con cinco variedades. Adaptado de Grohs et al. (2010).

Para un establecimiento libre de competencia con malezas, el control debe comenzar en la siembra previa. Después de la siembra, el “punto de aguja” (etapa S3 de la esacla de Counce et al., 2000), es el momento principal para el control de malezas que busca dejar el cultivo libre de plantas invasoras, donde el uso de herbicidas preemergentes asociados con un herbicida de acción total. El uso de esta técnica tiene como objetivo controlar las malezas ya establecidas, constituyendo una práctica importante para el manejo del arroz-malezas o arroz rojo (*Oryza sativa*) y otras malezas resistentes a los herbicidas post-emergentes, como el capín (*Echinochloa sp.*) o del género de las Ciperáceas.

Debido a su importancia, la aplicación del herbicida en el punto de aguja es ampliamente utilizada. Tomando como ejemplo el estado de Rio Grande do Sul, el 80% de los extensionistas informaron que los productores llevan a cabo esta operación, con el cultivo sucesivo de arroz debido a la resistencia a las malezas como una de las únicas opciones para controlar el arroz-maleza resistente (Fruet et al., 2019). Sin embargo, es importante tener en cuenta que esta técnica es sólo una parte de un manejo integrado y, de forma aislada, no brindará un control eficiente para todo el ciclo del cultivo. El punto de aguja también es importante para el control de las plantas de arroz espontáneo o “guacho”, resultado del desgrane y de las pérdidas en la cosecha anterior. La aplicación de herbicida de acción completa en la etapa de punto de aguja en mezcla con otros herbicidas proporciona la mayor productividad en comparación con aquellas áreas sin aplicación, debido a la eliminación de malezas y arroz espontáneo (Figura 18).

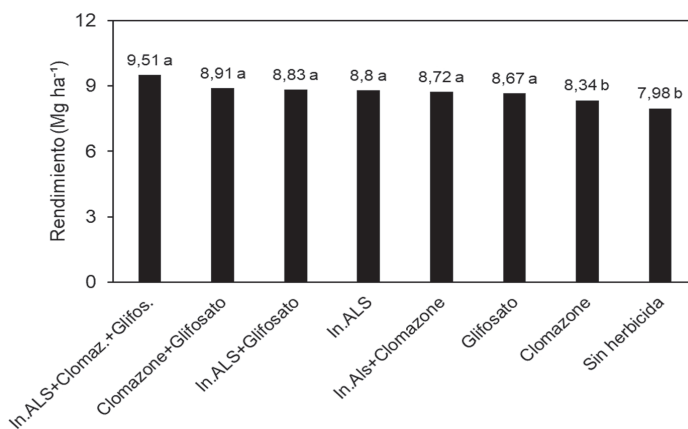


Figura 18 – Productividad de granos de arroz (kg ha⁻¹) en las cosechas 2015/16, 2016/17 y 2017/18 como resultado del manejo químico adoptado por los productores en preemergencia y/o punta de aguja en cultivos de arroz de regadío en Río Grande do Sul. ¹Los promedios seguidos de la misma letra no difieren entre sí por el test de Scott-Knott ($p=0,05$). $n = 242$. Fuente: Silva (2020) - Equipo FieldCrops.

Para el uso de preemergentes y dosis respectivas, debe ser considerado el tipo de suelo (tendencia de aparición de fitotoxicidad en suelos arenosos asociados con altas dosis preemergentes), tiempo y condición climática, antecedentes de infestación y especies de malezas predominantes en el área. Además, el productor debe estar atento al herbicida y la tecnología elegida, ya que existen protectores (“antídotos”) en el mercado que permiten aumentar las dosis que normalmente se utilizan, de manera segura para el cultivo. Al usar protectores, se debe tener cuidado con la interacción de este protector con el tratamiento de semillas a base de fungicidas e insecticidas, ya que el resultado predominante es el antagonismo, que puede causar una reducción en la germinación y el vigor de las semillas (Cereza et al., 2019).

La decisión de cuándo aplicar el herbicida en el punto de aguja, depende del monitoreo diario del cultivo, a fin de garantizar la seguridad de la aplicación sin ningún riesgo para el establecimiento de las plantas de arroz. En general, cada vez que surgen partes “verdes” (primeras hojas de arroz), existe el riesgo de absorción del herbicida aplicado, lo que puede terminar reduciendo el número de plantas.

Las estrategias de control de malezas traerán resultados satisfactorios cuando se agreguen a otras prácticas, como el uso de semillas certificadas libres de contaminantes. Además, se observa que los sistemas de cultivo sin preparación o con un mínimo movimiento del suelo tienen menos problemas con el arroz-maleza, como se caracteriza en estudios a largo plazo (cinco y treinta años) (Ulguim et al., 2019).

1.3.2. Fase vegetativa

El desarrollo vegetativo comienza cuando el perfilo (hoja incompleta) del coleóptilo está por encima del nivel del suelo y termina con la formación del collar de la hoja bandera (R2). A partir de V1 (Figura 19), las hojas emergen del pseudotallo y se emiten alternativamente en relación con el tallo. En esta fase se define uno de los componentes de productividad más importantes para el cultivo, el número de plantas por unidad de área, que definirá el número de panículas por unidad de área.



Figura 19. Planta de arroz al comienzo del desarrollo vegetativo (V1). Este cultivo se sembró el 12/04/2018 y la foto se tomó 18 días después de la siembra, en el municipio de Restinga Sêca, Rio Grande do Sul. Autor: Eduardo Pauletto - Equipo FieldCrops.

Uno de los momentos más importantes de la fase vegetativa es el inicio del macollaje, que se produce a partir de V3. Los macollos se originan en nudos diferentes del tallo principal de la planta. Aunque es una característica relacionada con la genética, el macollamiento puede variar con la densidad de siembra, la radiación solar, el aporte de nutrientes (principalmente nitrógeno) y otras condiciones ambientales. La figura 20A indica una mayor producción de tallos m^{-2} con un aumento en la dosis de nitrógeno aplicada. En cierto punto, no es factible aumentar la dosis (por encima de $150 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$), ya que la producción de macollos ya no se ve influenciada por la aplicación de nitrógeno, lo que aumenta el costo de producción. La Figura 20B muestra la relación entre la producción de tallos m^{-2} y el nivel de radiación solar incidente para el cultivo, utilizando dosis de nitrógeno de 150 y $180 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$. Existe una mayor eficiencia en el uso de nitrógeno (EUN) cuando el arroz no sufre estrés de sombra (100% de la radiación solar incidente), con más tallos m^{-2} cuando la dosis de nitrógeno es mayor.

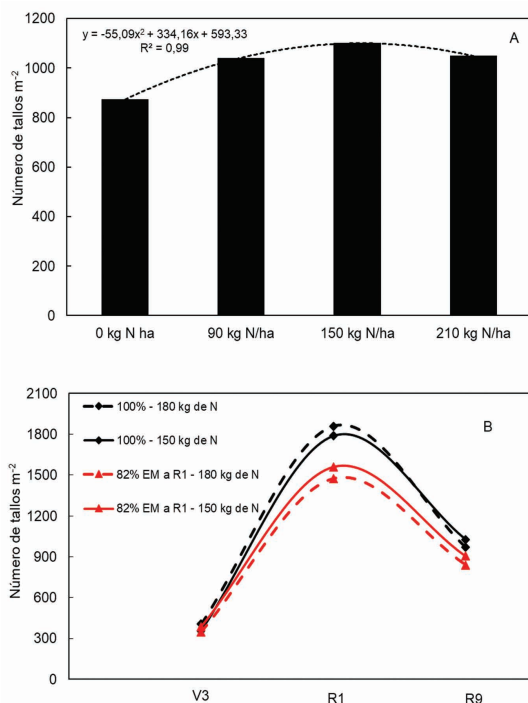


Figura 20. Panel superior (A): número de tallos por unidad de área en función de la fertilización nitrogenada. Panel inferior (B): número de tallos por unidad de área durante el ciclo de desarrollo en función de la fertilización nitrogenada y la radiación solar incidente (líneas negras: sin restricción de radiación solar; líneas rojas: restricción de radiación solar del 18%). Fuente: Rossato et al. (2020) - Equipo FieldCrops e IRGA.

En la fase vegetativa, el número de hojas acumuladas en el tallo principal sirve como indicador morfológico de la ocurrencia de momentos estratégicos para la toma de decisiones en las prácticas de manejo como el inicio del macollaje, diferenciación de panículas, embuchado, floración, entre otros. Uno de los parámetros más aceptados e internacionalmente utilizados para cuantificar la emisión de hojas en el arroz es el filocrón, considerado la unidad básica del desarrollo vegetativo y expresado como el tiempo requerido para la emisión de dos hojas consecutivas en el tallo principal (Rickman & Klepper, 1995; Streck et al., 2008).

Para calcular el filocrón en arroz, es necesario contar el número acumulado de hojas (NC) en el tallo principal una vez por semana y determinar la suma térmica acumulada (STa) a partir de la fecha de emergencia del cultivo. El NF se puede obtener por la etapa de Haun (HS; Haun, 1973), midiendo la longitud de la última (Uhoja) y la penúltima hoja (Phoja) y contando el número total de hojas en el tallo principal. El HS en el tallo principal, entonces, se calcula usando el NF más la relación entre las longitudes de la última y la penúltima hoja [$HS = NF + (Uhoja / Phoja)$]. La STa se cuantifica acumulando la suma térmica diaria (STd), que tiene en cuenta la temperatura media diaria del aire (T_m) y la temperatura base (T_b) del arroz ($STd = T_m - T_b$), donde $T_b = 11\text{ °C}$ (Ellis y col., 1993; Infeld y col., 1998). El siguiente paso es calcular la regresión lineal entre el NF y el STa (Figura 21). La pendiente de la regresión lineal es la tasa diaria de aparición de hojas (TAF), y el filocrón se calcula como la inversa de TAF ($1 / TAF$) (Xue et al., 2004; Streck et al., 2009, 2012).

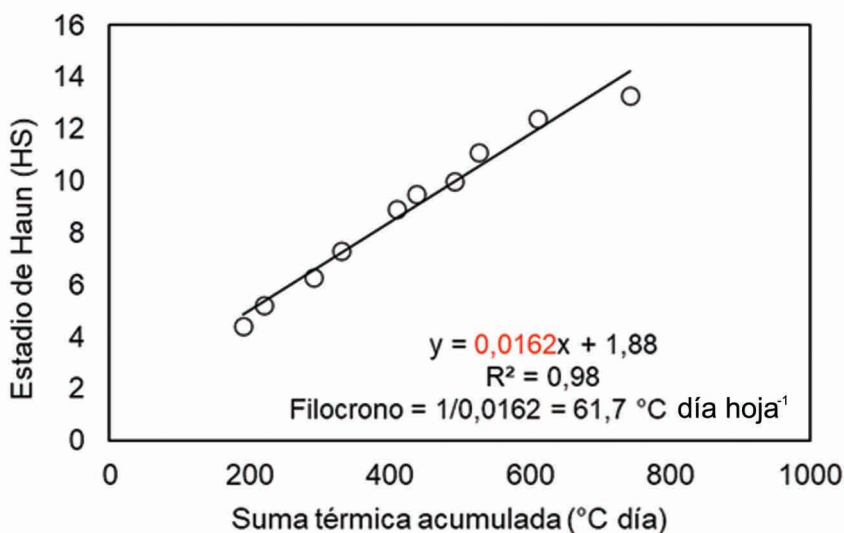


Figura 21. Metodología para estimar el filocrón. En la regresión lineal entre la etapa de Haun (HS, hojas acumuladas en el tallo principal) y la suma térmica acumulada (STa) de la emergencia, la pendiente (en rojo) es la tasa diaria de aparición de hojas y el filocrón es la inversa de la tasa de aparición de hojas ($61,7 \text{ } ^\circ\text{C día hoja}^{-1}$). Los círculos huecos se dan en arroz. Fuente: Equipo FieldCrops.

Considerando la temperatura base para la emisión foliar de $11 \text{ } ^\circ\text{C}$ (Infeld et al., 1998), los valores de filocrón en variedades de arroz utilizados en Sudamérica varían entre 50 y $70 \text{ } ^\circ\text{C día hoja}^{-1}$ (Streck et al., 2006a). En la práctica, significa que, durante los meses más calurosos del año, cada tres a cinco días aparece una nueva hoja en el tallo principal y los macollos de una planta de arroz.

Desde principios de la década de 2000, el Equipo FieldCrops ha estado estudiando el desarrollo de las hojas en el arroz. A través de estos estudios, fue posible identificar la relación entre la fase vegetativa, el desarrollo foliar, el número final de hojas y la duración del ciclo de desarrollo. La duración del ciclo de desarrollo total (desde la emergencia hasta la madurez fisiológica) está determinada por la duración de la fase vegetativa (desde la emergencia hasta embuchado o embarrigado) (Figura 22a, e), mientras que la duración de la fase reproductiva (embuchado desde el hasta la madurez fisiológica) no tiene correlación con el ciclo total, es decir, las variedades tempranas, medias y

tardías tienen una duración similar de la fase reproductiva (Figura 22b, f). En la fase vegetativa, las variedades tempranas tienen un número final menor de hojas en comparación con variedades media y tardía (Figura 22c, g), mientras que el filocrón es similar entre las variedades tempranas, intermedias y tardías (Figura 22d, h), lo que indica que la velocidad de emisión de las hojas es similar entre los grupos del ciclo de desarrollo. Se concluye, por tanto, que el acortamiento del ciclo total de las variedades de arroz se produce al reducir el número final de hojas en el tallo principal y no por la velocidad de emisión de las hojas (Streck et al., 2006a).

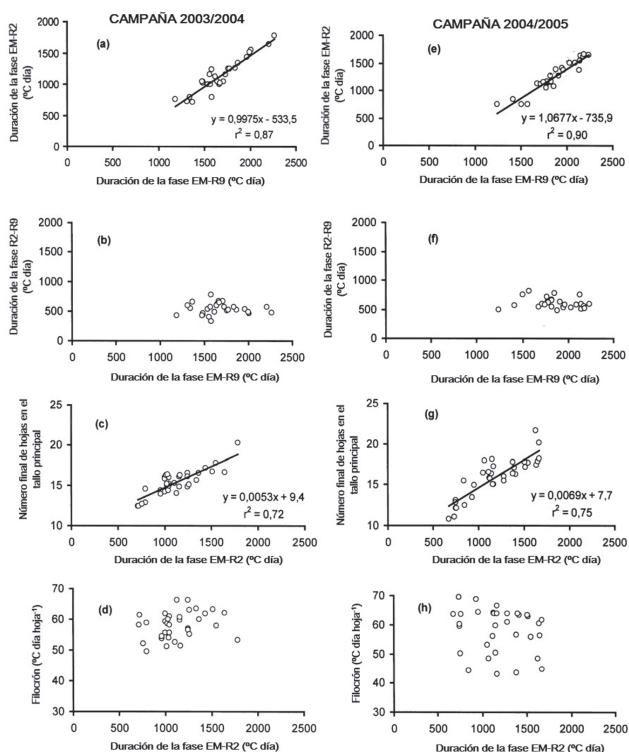


Figura 22. Relación entre la duración de la fase EM-R2 (a) y el ciclo EM-R9 total (e); relación entre la duración de la fase R2-R9 (b) y el ciclo total EM-R9 (f); relación entre el número final de hojas en el tallo (c) y la duración de la fase EM-R2 (g); y relación entre filocrón (d) y duración de la fase EM-R2 (h) del arroz de regadío, en Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil. EM = emergencia; R2 = aparición del collar en la hoja de la bandera; R9 = maduración fisiológica. Fuente: Streck et al. (2006a) - Equipo FieldCrops.

A pesar de estar asociado con la fase vegetativa, el final de la emisión foliar en el arroz se superpone con el inicio de la fase reproductiva en el ápice meristemático. Por ejemplo, la diferenciación de la panícula (R1) ocurre cuando todavía quedan, en promedio, 3 hojas por aparecer en el tallo principal hasta la hoja bandera (Streck et al., 2008). R1 es un momento importante en el manejo del nitrógeno para altos rendimientos de arroz (Ítem 1.3.2). Una recomendación es dividir las dosis de nitrógeno en 2/3 en macollaje (V3) y 1/3 al inicio de la diferenciación de la panícula (R0). Sin embargo, identificar el macollamiento no es una tarea difícil, pero la identificación de R0 en campo requiere de mucha experiencia, lo que lleva a los productores a realizar la segunda entrega de fertilización en R1, popular “mancha algodонера”, que se da a los 3 a 5 días después de R0 (Stansel, 1975; Carli et al., 2016).

En un estudio del Equipo FieldCrops, fue posible asociar el número de hojas con la ocurrencia de R1. El momento de la diferenciación de la panícula se relacionó con el número final de hojas, pero dependió de la variedad, ya que los valores variaron entre 9 y 15 hojas (Streck et al., 2009). Por lo tanto, es importante prestar atención al ciclo del cultivo y al tiempo de siembra para definir el momento de la segunda aplicación de nitrógeno en función del número de hojas del tallo principal.

1.3.2.1. Prácticas de manejo en la fase vegetativa

En la fase vegetativa, se define el tamaño de la fuente (tallos y hojas), que será responsable de llenar los granos y determinar el potencial productivo de la planta. La duración de esta fase varía según la variedad, el lugar y el momento de la siembra. Por esta razón, las prácticas de manejo deben llevarse a cabo en el momento adecuado y en una dosis adecuada para proporcionar el mejor ambiente para las plantas en desarrollo.

Al comienzo de esta fase, el cultivo tiene una mayor plasticidad debido al macollamiento. El número de macollos varía según la variedad, el tiempo de entrada del agua, la altura de la

profundidad del agua, la fertilización nitrogenada y la incidencia de la luz solar (densidad de siembra y disposición de las plantas), siendo este último el factor que más influye en el número de macollos por planta. La entrada temprana de agua es esencial para el macollamiento y para aumentar la eficiencia de la aplicación de nitrógeno y herbicida, y debe llevarse a cabo en la etapa V3 (Figura 23). Cuanto más rápido se establezca la lámina de agua y las prácticas de manejo, mayor será la uniformidad del cultivo y mayor será la efectividad del control de malezas.



Figura 23. Riego iniciado en la etapa de desarrollo antes de V3 en campos de arroz (10 días después de la emergencia). São Borja, Rio Grande do Sul, 2016. Fuente: Emanuel Barchet.

El manejo de malezas ha sido considerado como uno de los principales factores bióticos que interfieren en la obtención de una alta productividad, dado que la aparición de especies de malezas resistentes a los principales herbicidas es cada vez más común. Tomando Rio Grande do Sul como ejemplo, hay informes de que aproximadamente el 60% del área de producción de arroz muestra una infestación de malezas por encima de lo tolerable (Fruet et al., 2019).

Para una mayor eficiencia del control químico en post-emergencia, es decir, en la etapa V3 del cultivo, es fundamental que la maleza sea pequeña (hasta cuatro hojas para ciperáceas y gramíneas y entre dos y tres hojas para dicotiledóneas) y que la inundación del cultivo se complete inmediatamente después de la aplicación del herbicida. De esta manera, se reduce la interferencia de malezas mediante una mayor eficiencia de control. Es importante que el productor sea consciente de que la eficiencia del manejo de malezas también se debe a las otras prácticas adoptadas, es decir, es necesario realizar un manejo integrado de malezas.

Además del manejo temprano de malezas posteriores a la emergencia, el manejo de la fertilización con nitrógeno es muy importante (Capítulo 3). El mejor uso de este nutriente depende de que el suelo esté seco y libre de especies que puedan competir con la planta de arroz (Figura 24). Además, el ajuste de dosis debe planificarse de acuerdo con el tiempo de siembra, cultivar y productividad esperada: dosis muy altas asociadas a la siembra en diciembre, promueven un desequilibrio nutricional en las plantas y un aumento en la aparición de enfermedades, especialmente Brusone.



Figura 24. Plantas de arroz en la etapa V3 que reciben la primera aplicación de urea seguida de entrada de agua. Fuente: Pablo Mazzuco de Souza - Extensionista de IRGA y miembro del Equipo FieldCrops.

Brusone o Piricularia o Añublo o Tizón del arroz (forma sexual: *Magnaporthe oryzae*/ forma asexual: *Pyricularia Oryzae* B. Couch) es la principal enfermedad que se presenta en el arroz, especialmente cuando se utilizan variedades susceptibles, pudiendo comprometer hasta el 100% de la productividad de un cultivo, cuando las condiciones ambientales son favorables para la ocurrencia de esta enfermedad (Figura 25). En general, las variedades susceptibles tienen un mayor riesgo de reducción de la productividad debido a enfermedades y, por lo tanto, requieren un manejo más intensivo de fungicidas y mayores costos de producción. Durante el seguimiento del añublo en la fase vegetativa, si se identifican los primeros síntomas de la enfermedad (Figura 26A, B), se recomienda la aplicación de fungicidas (Ogoshi et al., 2018).



Figura 25. Ocurrencia de brusone en las hojas de las variedades Guri INTA CL en el municipio de Capivari do Sul/RS durante la campaña 2015/2016. Fuente: Claudio Ogoshi.

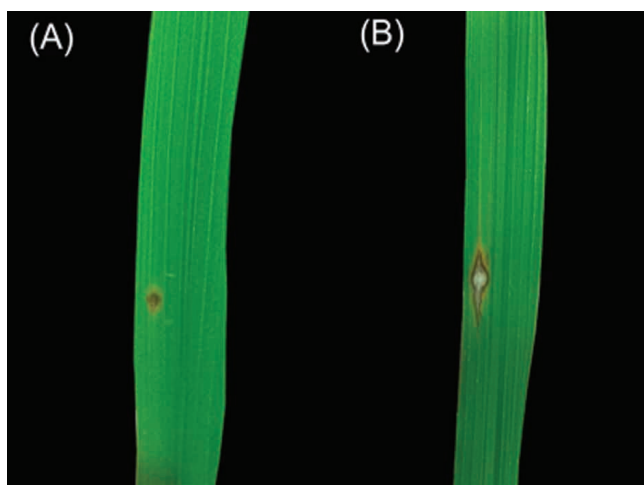


Figura 26. Evolución de brusone en la hoja. Sintoma inicial (A) y sintoma después de una semana (B). Fuente: Pablo Mazzuco de Souza - Extensionista de IRGA e integrante del Equipo FieldCrops.

Recientemente, se adaptó para la región subtropical de América del Sur una metodología que utiliza la suma hidrotérmica y utilizada en Italia para monitorear el riesgo de brusone en el arroz. A través de la suma hidrotérmica es posible cuantificar el número de horas favorables para el desarrollo de Brusone en arroz. Por tanto, cuanto mayor sea el número de horas, mayor será la probabilidad de que ocurra la enfermedad y más intenso debe ser el manejo del cultivo. En el sur de Brasil, durante el período de 2009 a 2019 la suma hidrotérmica varió de menos de 50 horas a más de 550 horas. Se encontró que en años con invierno intenso durante la temporada baja y con menor precipitación durante el período de septiembre a diciembre, la suma hidrotérmica fue menor y el riesgo de incidencia de Brusone ocurrió más tarde (Figura 27). En años con invierno suave, con baja incidencia de heladas y con mayor precipitación durante el período de septiembre a diciembre, la suma hidrotérmica fue mayor y el riesgo de incidencia de brusone se presentó temprano (Figura 27). Estos resultados indican la importancia de la siembra temprana para reducir el riesgo de incidencia de brusones, sin

embargo es importante resaltar que existe una gran variabilidad interanual y especialmente entre las microrregiones de Rio Grande do Sul y Santa Catarina.

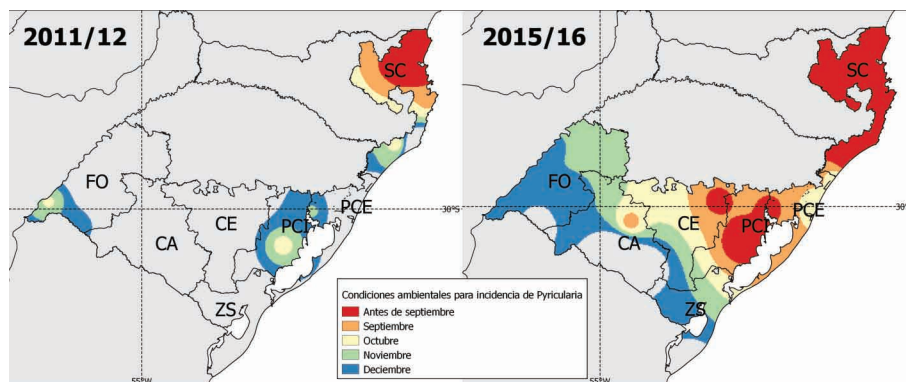


Figura 27. Condiciones ambientales adecuadas para la incidencia de brusone del arroz en el sur de Brasil. Los colores indican en qué mes se alcanzó la suma hidrotérmica mínima para los primeros síntomas de brusone en arroz (suma realizada a partir de junio) en un año con condiciones más frías y secas (La Niña 2011/12) y en un año más cálido y húmedo (El Niño 2015/16). Fuente: Silva (2020) - Equipo FieldCrops.

Entre las plagas, la principal que se presenta durante la fase vegetativa es la bichera de la raíz del arroz (Figura 28) o el gorgojo acuático (fase larval y adulta de *O. oryzae*, respectivamente). Las pérdidas de productividad por esta plaga oscilaron entre el 10 y el 30% (Guedes et al., 2015). Por tanto, conocer el nivel de daño económico y el momento de control es fundamental para minimizar las pérdidas (Tabla 1). Actualmente, la mayoría de los productores de arroz utilizan el tratamiento de semillas “en la finca” o compran la semilla con el tratamiento específico para el control del gusano o bichera de la raíz.

Tabla 1. Estimaciones del número máximo tolerable de larvas de gusano o bichera de raíz de arroz, variando el valor de toneladas de arroz y el costo de control (insecticida + servicio).

Costo del tratamiento (U\$ ha ⁻¹)	Valor de la tonelada de arroz (U\$/t)					
	160	180	200	220	240	260
Número de larvas de <i>O. oryzae</i> tolerables por muestra						
U\$ 10	1,1 ²	1,0	0,9	0,8	0,7	0,7
U\$ 12	1,3	1,1	1,0	0,9	0,9	0,8
U\$ 14	1,5	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9
U\$ 16	1,7	1,5	1,4	1,3	1,1	1,1
U\$ 18	1,9	1,7	1,5	1,4	1,3	1,2
U\$ 20	2,2	1,9	1,7	1,6	1,4	1,3
U\$ 22	2,4	2,1	1,9	1,7	1,6	1,5
U\$ 24	2,6	2,3	2,1	1,9	1,7	1,6
R\$ 26	2,8	2,5	2,2	2,0	1,9	1,7
U\$ 28	3,0	2,7	2,4	2,2	2,0	1,9
U\$ 30	3,2	2,9	2,6	2,3	2,2	2,0

¹ Muestra de suelo indicada para monitoreo por recomendaciones de investigación técnica para el sur de Brasil (SOSBAI, 2018);

² Fórmula de NDE = [(C / VD)], "C" es el costo del control - suma del valor de la aplicación insecticida +, "V" es el valor del kg de arroz, "D" es el daño (en kg) causado por la plaga (58 kg ha⁻¹).

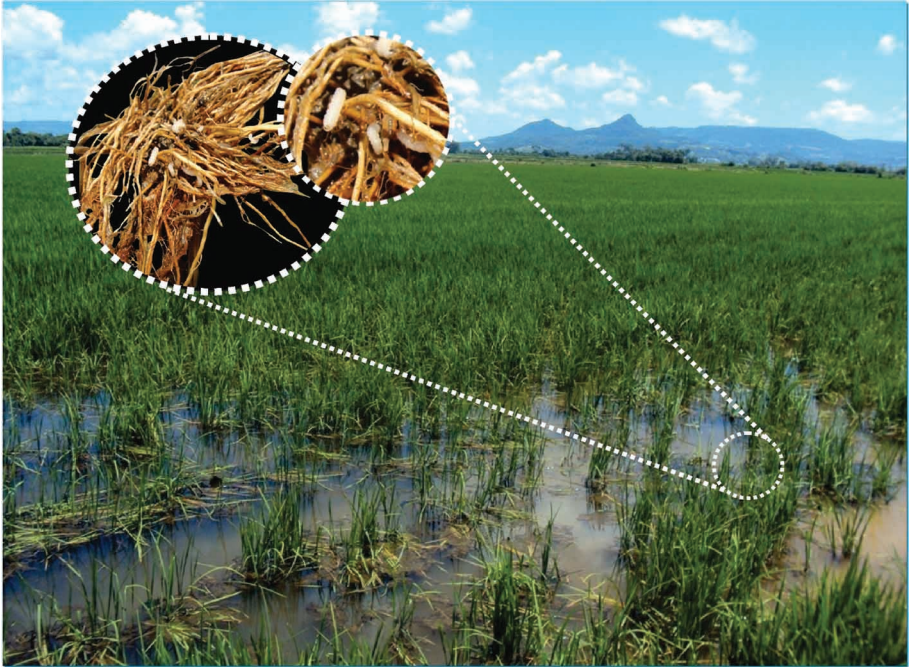


Figura 28. Foco de Bichera de raíz en un campo de arroz irrigado. En detalle: larvas y daños en las raíces. Fuente: Jaime Vargas.

El historial de presencia de la plaga es muy importante en la decisión de utilizar o no el tratamiento de semillas. En temporada baja, el gorgojo acuático (adulto de *O. oryzae*), puede permanecer hibernando en restos culturales, a base de pastos, desagües de agua, bordes y/o entorno de los cultivos. Durante la zafra, generalmente se espera que el daño visual verifique la presencia de larvas, lo que ocurre en reboleiras o zonas con mayor densidad de plantas y en lugares donde la lámina del agua es mayor. Sin embargo, cuando se observan los síntomas de amarillamiento o marchitez de las plantas, ya existe un daño en las raíces y cualquier intervención que se haga, por muy efectiva que sea, resultará en el gasto energético de la planta para su recuperación.

Otro insecto que puede causar daño es la lagarta de la hoja (*Spodoptera frugiperda*). El ataque de la lagarta de la hoja puede ocurrir desde inmediatamente después de la emergencia,

hasta el llenado de granos, cortando las plantas, consumiendo las hojas y reduciendo el área foliar. La pérdida de productividad causada por una lagarta *S. frugiperda* m⁻² puede variar de 50 a 143 kg ha⁻¹ (Grützmacher et al., 1999). La información sobre el nivel de infestación y el costo del control de la lagarta de la hoja es importante para la toma de decisiones sobre el manejo químico (Tabla 2). Además del uso de insecticidas, los métodos de control cultural como la limpieza de la vegetación en los caminos y los canales, la rotación de cultivos y la profundidad del agua son importantes para reducir la hibernación de los adultos en invierno, así como la infestación de estos insectos en la siguiente cosecha.

Tabla 2. Estimaciones del número máximo tolerable de lagartas *Spodoptera frugiperda*, variando el valor del arroz y el costo de control (insecticida + servicio). Fuente: Laboratorio de Manejo Integrado de Plagas (LabMIP).

Costo del tratamiento (U\$ ha ⁻¹)	Valor de la tonelada de arroz (U\$/ t)					
	160	180	200	220	240	260
	Número orugas de <i>Spodoptera frugiperda</i> tolerables m ⁻²					
U\$ 10	0,8 ¹	0,7	0,7	0,6	0,6	0,5
U\$ 12	1,0	0,9	0,8	0,7	0,7	0,6
U\$ 14	1,2	1,0	0,9	0,9	0,8	0,7
U\$ 16	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8
U\$ 18	1,5	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9
U\$ 20	1,7	1,5	1,3	1,2	1,1	1,0

¹ Fórmula NDE = [(C / VD)], “C” es el costo de control - suma del valor de la insecticida + aplicación, “V” es el valor de kg de arroz, “D” es daño (en kg) causada por la plaga (promedio de 74,8 kg ha⁻¹).

La chinche del tallo (*Tibraca limbativentris*) es también una plaga importante que se produce de manera generalizada en las regiones productoras de arroz de América del Sur, tanto en el arroz de regadío como en el de secano. La chinche se coloca en la base de los tallos, donde inserta el estilete, succiona la savia e inyecta saliva tóxica, lo que lleva a estrangulación del tallo, la muerte de las hojas centrales en la etapa vegetativa y/o la muerte de la panícula en el período pre-floración y formación de panículas, con daños conocidos como “corazón muerto” y “panícula blanca”. El manejo de esta plaga debe realizarse en función del monitoreo del cultivo y los bordes del cultivo, durante todo el ciclo del cultivo (principalmente desde el macollaje) y también fuera de temporada (Tabla 3). El uso de insecticidas químicos es el método más utilizado para el control, combinado con el corte y el control de malezas, principalmente con mezclas de ingredientes activos o productos aislados del grupo de piretroides y neonicotinoides (Botta et al., 2014).

Tabla 3. Estimaciones del número máximo tolerable de chinches m⁻², variando el valor del arroz y el costo de control (insecticida + servicio). Fuente: Laboratorio de Manejo Integrado de Plagas (LabMIP).

Costo del tratamiento (U\$ ha ⁻¹)	Valor de la tonelada de arroz (U\$ / t)					
	160	180	200	220	240	260
Número de chinches del tallo tolerables m ⁻²						
U\$ 6	0,3 ¹	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
U\$ 8	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
U\$ 10	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3
U\$ 12	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,3
U\$ 14	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4
U\$ 16	0,7	0,6	0,6	0,5	0,5	0,4

¹ Fórmula NDE = [(C / VD)], “C” es el costo de control - suma del valor del insecticida + aplicación, “V” es el valor del kg de arroz, “D” es el daño (en kg) causada por la plaga (promedio de 142 kg ha⁻¹).

Finalmente, en la fase vegetativa, el enrollamiento del arroz, también conocido como virosis estriada del arroz, merece atención. El agente causal es el *Rice Stripe Necrosis Virus (RSNV)*, transmitido por el protozoo *Polymyxa graminis*, que infecta las raíces del arroz y puede sobrevivir largos períodos de ausencia de huéspedes (Morales et al., 1999). Este problema se ha observado en los últimos años, con más frecuencia e intensidad de daños, principalmente asociados con estreses relacionados con la elevación abrupta de la profundidad del agua (inundaciones), fitotoxicidad de herbicidas o desequilibrios nutricionales.

Los primeros síntomas se pueden ver en los primeros 20 a 30 días después de la emergencia. Las plantas afectadas muestran menos crecimiento, con la presencia de líneas cloróticas y amarillentas en las hojas (Figura 26). Las panículas y las raíces se tuercen comúnmente y pueden necrosarse (Calvert & Sedano, 2004) y llevar a las plantas a la muerte en casos extremos.



Figura 29. Planta de arroz en la etapa V4: cuatro hojas verdaderas desarrolladas, con síntomas de enrollamiento foliar causada por el virus RSNV. Santa Maria, RS, Brasil, 2017. Fuente: Francisco Tonetto - Equipo FieldCrops.

El Equipo FieldCrops realizó un estudio de caso en Santa Maria, RS, en el campo de un productor con la presencia del virus en el área, buscando remediar los síntomas del virus aplicando dosis adicionales de nitrógeno en R1. Se encontraron resultados positivos con la aplicación de 60 kg de N ha⁻¹ comparado con un testigo sin segunda fertilización. A partir de este estudio, se creó una escala de puntajes para el daño del virus, basada en criterios visuales, evaluando las plantas (Tabla 4).

Tabla 4. Escala para evaluar la gravedad del virus del enrollamiento de las hojas de arroz (RSNV), según el sistema de calificación y los síntomas de la enfermedad. Fuente: Tonetto et al. (2019) - Equipo FieldCrops.

Nota asignada	Síntomas en las hojas	Porcentaje de hojas afectadas
0	Ausencia de síntomas	0
1	Líneas cloróticas en las hojas laterales	1 a 25%
2	Líneas cloróticas en las hojas laterales y tallo principales	25 a 50%
3	Retorcimiento parcial de las hojas	50 a 75%
4	Retorcimiento total de las hojas	75 a 99%
5	Retorcimiento total y necrosamiento foliar	100%

1.3.3. Fase reproductiva

La fase reproductiva del arroz comienza con el inicio de la panícula (R0), un evento que ocurre cuando la planta está en promedio con ocho hojas expandidas, por lo tanto, hay una superposición parcial al final de la fase vegetativa y al comienzo de la fase reproductiva, porque mientras comienza la diferencia de las estructuras reproductivas, la planta sigue emitiendo hojas. El inicio de la panícula ocurre, en promedio, cuatro a cinco días antes de la diferenciación de panícula (R1) y en este punto se definirá el número potencial de granos por panícula y la planta demanda un aplicación de nitrógeno en cobertura (De Carli et al., 2016).

La emisión de hojas se detiene en R2 cuando se forma el collar de la hoja bandera. Morfológicamente, la planta alcanza el área máxima de la hoja y aumenta el grosor del tallo (embuchado o embrarrigado) al aumentar las dimensiones de la panícula dentro del tallo. Próximo al embuchado se produce la microsporogénesis, un evento microscópico de diferenciación de las células de los granos de polen. Las temperaturas extremas durante el embrarrigado interfieren negativamente en la microsporogénesis, aumentando la esterilidad de las espiguillas y, por lo tanto, reduciendo el potencial productivo (Ítem 2.1).

Después del embrarrigado, la panícula inicia el proceso de extrusión (R3) y aparece por primera vez fuera del cartucho, hasta que alcanza la floración (R4). A partir de R4, se define el número de granos por panícula y el peso de 1000 granos. En el siguiente ítem se abordará la gestión necesaria para atender las necesidades de las plantas en esta fase y maximizar la eficiencia en el uso de los recursos.

1.3.3.1. Prácticas de manejo en la fase reproductiva

Las prácticas de manejo en la fase reproductiva deben estar enfocadas a mantener la salud nutricional y fitosanitaria de la planta, a fin de evitar una reducción del potencial productivo. Pensando en brindar un aporte nutricional para la microsporogénesis y la formación del número potencial de granos (espiguillas) por panícula, es común que la otra porción de la fertilización nitrogenada en cobertura se realice en R0. Sin embargo, identificar el R0 requiere mucha experiencia o el uso de una lupa en el laboratorio, lo que lo hace más común que esta aplicación realizada en puntada de algodón.

En este sentido, para planificar esta aplicación deben utilizarse herramientas digitales como GD Arroz o PlanejArroz, que estiman las fechas de ocurrencia de las etapas fenológicas (Capítulo 10). Incluso con este apoyo, se indica que también se realiza el monitoreo de cultivos para tomar decisiones sobre

prácticas de manejo. Para definir el momento de aplicación, se recomienda recolectar diez tallos principales (más avanzados que los macollos) y realizar un corte longitudinal a la base del tallo. Cuando se visualiza la puntada de algodón (Figura 9) en el 50% de estas plantas, es el momento de realizar la aplicación de nitrógeno en cobertura.

En orden de importancia, la primera aplicación de nitrógeno (realizada en suelo seco antes de que entre agua) es la más importante, ya que es en este momento que se define el número de plantas y macollos por unidad de área. Cuando hay un buen nivel de control y manejo del agua, puede llevarse a cabo en una sola aplicación sin disminución de la productividad (Figura 30). Sin embargo, la segunda aplicación de nitrógeno también puede usarse como una herramienta para corregir deficiencias observadas en las variedades de ciclo largo, fallas o irregularidades en la primera aplicación, o en áreas que sufrieron algo de estrés durante el ciclo.

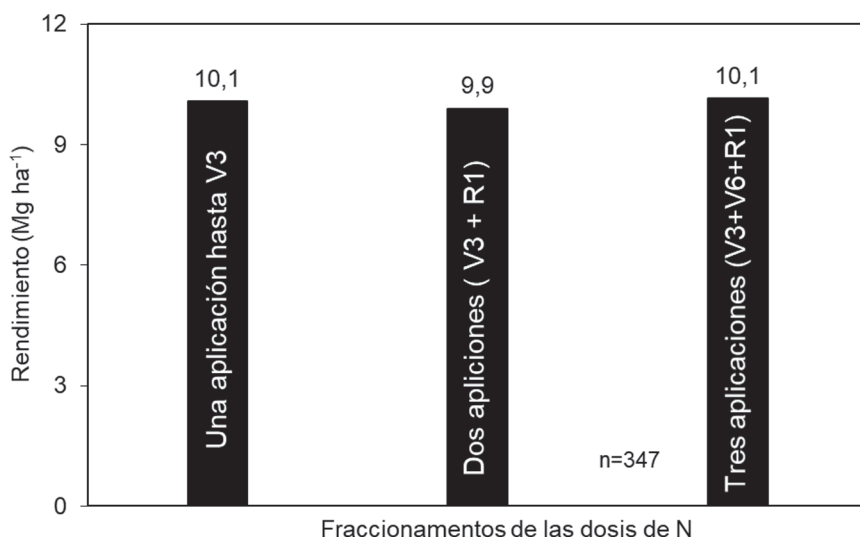


Figura 30. Productividad del arroz en respuesta al fraccionamiento de nitrógeno en cobertura. Datos de las parcelas demostrativas del Proyecto 10+ en seis regiones arroceras de Rio Grande do Sul en las cosechas de 2016, 2017 y 2018. Fuente: Equipo FieldCrops, UFSM e IRGA.

Durante la fase reproductiva, mantener la salud de las plantas es esencial para asegurar que la panícula crezca libre de hongos y patógenos. En variedades susceptibles y moderadamente susceptibles, es común aplicar fungicida en R2 con el fin de proteger principalmente la panícula de piricularia o añublo del cuello la panícula (*Magnaporthe oryzae* B. Couch), enfermedad que puede ocasionar hasta el 100% de las pérdidas económicas. Con el fin de evaluar la respuesta de variedades con diferentes niveles de resistencia a Brusone o Piricularia en la siembra tardía, el equipo FieldCrops realizó una prueba con una variedad susceptible (Guri INTA CL), una variedad de resistencia media (IRGA 428) y una variedad resistente (IRGA 424 RI) en la Región Central de Rio Grande do Sul (Figura 31).

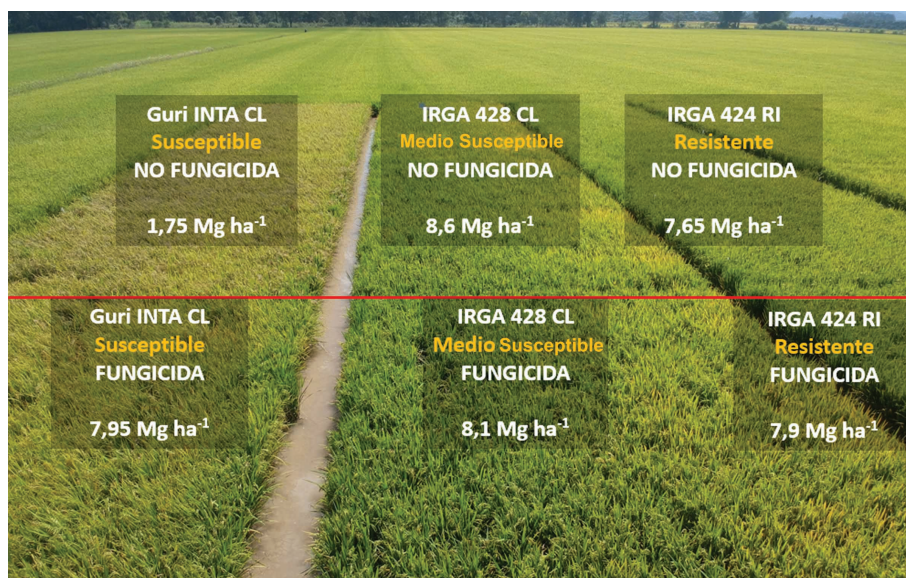


Figura 31. Variedad susceptible, moderadamente susceptible y resistente a Brusone en una prueba con y sin aplicación de fungicida realizada por el equipo FieldCrops en Agudo / RS durante la cosecha 2018/2019. Fuente: Silva (2020) - Equipo FieldCrops.

Tan importante como la aplicación en R2, es la elección de productos para obtener la máxima eficiencia en el control de piricularia en cuello. De los 49 fungicidas registrados en el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Abastecimiento (MAPA-Brasil), sólo 2 fueron efectivos y garantizaron una productividad de grano satisfactoria (Tabla 5 - Ogoshi et al., 2018).

1.3.4. Subfase de floración

La subfase de floración o antesis (R4) comienza con la exposición de los estigmas y las anteras en la parte superior de la panícula y termina con la exposición en el extremo inferior de la panícula. En esta subfase, se definirá el número de granos por panoja.

La reproducción de la planta de arroz se produce por autofertilización. El polen se produce y almacena en las anteras, que son pequeñas bolsas en la punta de cada estambre (Figura 3). La polinización ocurre cuando las anteras se secan, se abren y derraman polen en los estigmas de abajo. La aparición de altas temperaturas, vientos cálidos y secos durante la floración puede secar las anteras y reducir el número de espiguillas fertilizadas y, en consecuencia, de granos. La humedad y el viento excesivos también pueden perjudicar la fertilización, ya que dificultan la llegada del polen al estigma.

1.3.5. Subfase de llenado de granos

La subfase de formación y llenado de grano comienza justo después de la floración y termina cuando los granos alcanzan la madurez fisiológica. Se caracteriza por el crecimiento gradual de los granos, con un aumento del tamaño y peso, así como por cambios en su color. En esta subfase se define el peso de los granos.

Después de la fertilización, los granos pasan a través de las subfases de granos lechosos, granos pastosos y finalmente granos con masa dura, hasta que alcanzan la maduración

fisiológica. El llenado de granos depende principalmente de la fotosíntesis realizada después de la floración, por lo tanto, la radiación solar es el insumo más importante durante el llenado de granos.

En la etapa R5, uno o más granos se alargan dentro de la cáscara y, en R6, uno o más granos se expanden en profundidad (Figura 32). El carbohidrato que se acumula en los granos se almacena en forma de almidón. Esta acumulación es blanca y lechosa y se puede identificar en el estadio R6. A medida que el grano pierde humedad, pasa a la etapa R7 con una consistencia de grano pastoso y la panícula tiene al menos un grano con cáscara con el color típico de la variedad. En R8 se observa la madurez de un grano aislado, con la coloración típica de la cáscara de la variedad y la característica de los granos cambia de pastosa a harinosa. Durante este proceso, la panícula se curva debido al aumento del peso de los granos, que comienza en el extremo superior de la panícula (Figura 33).

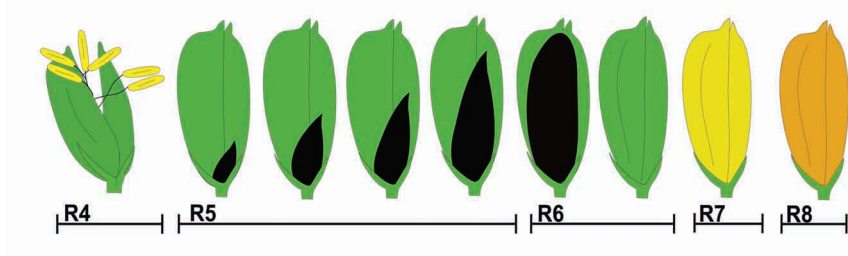


Figura 32. Desarrollo de granos de arroz desde la antesis hasta el punto de cosecha. Adaptado de Hardke, J. T. (2003) - Equipo FieldCrops.



Figura 33. Proceso de maduración de granos de arroz y curvatura de la panícula.
Autora: Vanessa Fontana.

1.3.5.1. Prácticas de manejo en la subfase de floración y llenado de granos

Después de la floración, con el comienzo del llenado de los granos, la atención debe centrarse en garantizar la salud de la planta para que pueda aprovechar al máximo la oferta ambiental sin pérdidas debido a factores bióticos. Asimismo, el control de plagas que atacan directamente a los granos es fundamental, ya que cualquier estrés o daño sufrido en la floración y llenado de los granos provocará pérdida de productividad. Entre los daños directos, podemos destacar la presencia de insectos plaga que afectan directamente la productividad y calidad de los granos.

La chinche apestosa (*Oebalus spp.*) Es la principal plaga que se presenta durante el llenado de los granos. El control de la chinche apestosa del grano se puede iniciar mediante un monitoreo temprano en panículas de arroz-maleza y capín del arroz, dos malezas hospedadoras que, si se manejan mal, favorecen la infestación de esta plaga.

En el sur de Brasil, Weber et al. (2020) encontraron que una chinche hedionda por panícula ya causa importantes daños en la productividad y calidad de los granos, por lo que se recomienda monitorear y controlar la plaga principalmente durante el final de la fase reproductiva y el inicio de la fase de llenado del grano. El control cultural también se puede lograr eliminando las malas hierbas hospedantes. Cuando se verifica la presencia del insecto en el cultivo en poblaciones por encima del nivel de daño económico, se recomienda la aplicación de insecticidas químicos. Sin embargo, cabe mencionar que, antes de realizar el control químico, se debe prestar atención a la población de insectos enemigos naturales (por ejemplo, arañas), que pueden controlar la plaga en infestaciones bajas.

Además de la chinche, otra plaga importante en la etapa reproductiva es la Sogata o cigarrita del arroz (*Tagosodes orizicolus* - Muir, 1926). El daño de *T. orizicolus* en las plantas de arroz puede ser directo o indirecto. El daño directo es causado por la oviposición endofítica (dentro de las plantas), y por la succión de la savia de hojas, tallos y panículas, además de la inyección de toxinas que provocan el amarilleamiento y secado de la planta. El impacto más importante se produce por la transmisión del virus de la hoja del arroz (RHBV) (sin registro de ocurrencia en Brasil). La transmisión de virosis temprano en el desarrollo del arroz puede causar enanismo o incluso la muerte de las plantas o, cuando la infección ocurre en plantas más desarrolladas, puede resultar en la formación de una panícula estéril (Carbonell et al., 2001). El síntoma del virus es característico de las hojas que emergen tras la inoculación del virus por la cigarrita del arroz, mostrando manchas amarillas y vetas blancas paralelas a las nervaduras de las hojas que se fusionan y dejan la hoja totalmente blanca (Ferreira, 1998).

El control de la sogata se puede realizar principalmente mediante el uso de genética resistente, obtenidas mediante programas de mejoramiento que desarrollan variedades resistentes al RHBV (Ej: FLAR). Cuando ocurre una infestación,

el control de la sogata debe comenzar con prácticas culturales, como mantener el cultivo libre de malezas, que sirven como hospedero de la cigarrita.

También el daño causado en la fase de llenado de grano, por las orugas de panícula, *Mythimna* spp., ocurren al final del ciclo de cultivo del arroz. La aparición de la oruga de la panícula ocurre de manera esporádica, con mayores brotes reportados en arroz de secano, áreas bien drenadas y en cultivos donde se aplican insecticidas específicos para chinches (neonicotinoides) y de bajo efecto residual (piretroides). El comportamiento y daño de este insecto son bastante característicos, ya que las orugas se esconden durante el día dentro del cultivo y en la base de las plantas de arroz y salen por la noche a alimentarse en la parte superior del dosel de las plantas, donde cortan las panículas por el raquis. Así, una de las técnicas de seguimiento consiste en vigilar el interior del cultivo, entre las líneas de siembra, para comprobar panículas y/o granos caídos al suelo, además de muestrear orugas, preferiblemente al final de la jornada. Una oruga m^{-2} o 10.000 orugas/hectárea pueden reducir alrededor de 276 $kg\ ha^{-1}$ en solo 7 días de infestación (Severo et al., 2009). Por lo tanto, la tolerancia para el número de insectos m^{-2} es extremadamente baja y varía según el valor del rendimiento de arroz y el costo del control (Tabla 5).

El control de la oruga de la panícula es generalmente químico, con pulverizaciones al final del día (Freitas et al., 2011) y con insecticidas que proporcionan un efecto de “*knockdown*” (parálisis alimentaria rápida y mortalidad de las orugas) para evitar la continuidad del daño. Los insecticidas más utilizados son las diamidas, benzoilureas, carbamatos y piretroides. Aquí destaca el intervalo de seguridad de estos productos, el período desde la última aplicación hasta la cosecha del arroz, que varía de 15 a 70 días y que el productor debe respetar. Además, el manejo cultural con el mantenimiento de la lámina de agua alta puede reducir la infestación de la oruga de la panícula.

Tabla 5. Estimaciones del número máximo tolerable de oruga de la panícula por m², variando el valor del arroz y el costo de control (insecticida + servicio). Fuente: Laboratorio de Manejo Integrado de Pragas (LabMIP).

Costo del tratamiento (U\$ ha ⁻¹)	Valor de la tonelada de arroz (U\$/t)					
	160	180	200	220	240	260
	Número de orugas de panícula tolerables m ⁻²					
U\$ 10	0,2 ¹	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1
U\$ 12	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
U\$ 14	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2
U\$ 16	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
U\$ 18	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3
U\$ 20	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3

¹ Fórmula NDE = [(C / VD)], “C” es el costo de control - suma del valor del insecticida + aplicación, “V” es el valor del kg de arroz, “D” es el daño (en kg) causada por la plaga (promedio de 276 kg ha⁻¹).

1.3.6. Subfase de madurez fisiológica a madurez de cosecha

Esta subfase comienza en R9, cuando no hay más translocación de carbohidratos a la panícula y los granos tienen un contenido de humedad cercano al 30% y termina cuando los granos alcanzan aproximadamente el 22% de humedad, siendo esta la humedad ideal para la cosecha, llamada madurez de cosecha. En esta subfase, el peso potencial del grano ya está definido. A medida que se produce la pérdida de humedad, el tono verde de la cáscara desaparece y el endospermo de todos los granos se vuelve uniformemente duro y translúcido (Figura 34).



Figura 34. Grano de arroz en el punto de cosecha y su estructura. Fuente: Equipo FieldCrops.

1.3.6.1. Prácticas de manejo en la subfase de madurez fisiológica a madurez de cosecha

La identificación de la madurez fisiológica de los granos de arroz es difícil de lograr visualmente. Un grano se considera fisiológicamente maduro cuando tiene una acumulación máxima de materia seca (contenido de humedad cercano al 30%). Durante este período, el peso potencial del grano (que comenzó su formación en R4) ya está definido y, desde entonces, solo pierden peso y humedad. La pérdida de peso puede ocurrir debido a dos factores: por la respiración (con la quema de las reservas acumuladas por la respiración del embrión) y por la disminución del contenido de agua en el grano (sin comprometer sus características físico-químicas).

A partir de la fecundación del óvulo, el objetivo de la planta madre es generar semillas que sean capaces de germinar y crear una nueva planta. Las semillas de arroz son estructuras vivas que respiran (quemando carbohidratos para generar energía) para

mantenerse metabólicamente vivos y asegurar la germinación del embrión. En este contexto, el factor principal que determina la tasa de respiración de las semillas es la temperatura del aire. La respiración es más baja a bajas temperaturas y más alta a altas temperaturas. Por lo tanto, especialmente cuando los cultivos se utilizan para la producción de semillas, es esencial comprender y controlar estos factores para garantizar la máxima acumulación de reservas y, en consecuencia, peso, calidad y vigor.

La reducción natural en el contenido de humedad es una pérdida de peso positiva, ya que el contenido de humedad en granos por encima del 25% aumentará los granos defectuosos cosechados (granos verdes, yesosos y quebrados) y los costos de secado. En esta etapa, mientras ocurre la reducción en el contenido de humedad de los granos, la preparación para la cosecha debe ser el foco del productor. El punto de cosecha ideal depende del genotipo y el medio ambiente, pero el contenido promedio utilizado por los productores es del 22% de humedad (aproximadamente 30 días después de la floración completa, que varía con la temperatura, la radiación solar y la humedad del aire).

Tan importante como el punto de cosecha es el número de días para cosechar (o período de cosecha ideal), que está influenciado por la variedad y el medio ambiente. En general, el período ideal dura aproximadamente 15 días y, después de eso, hay una marcada reducción en la humedad del grano y el rendimiento del molino, que varía de acuerdo con la tolerancia de la variedad al retraso en la cosecha (Tabla 6). El rendimiento del molino influirá en la cantidad pagada por el grano.

Tabla 6. Tolerancia de los cultivares de arroz al retraso en la cosecha. Fuente: Lopes et al. - IRGA (2019).

Variedad	Grupo de tolerancia en el atraso de la cosecha	Tolerancia en el atraso de cosecha (en semanas)
BR-IRGA 410	Muy susceptible	2
IRGA 429 e IRGA 430	Susceptible	3
IRGA 424 e IRGA 424 RI	Intermedios	4 a 5
IRGA 417	Tolerante	6

Por lo tanto, en campos pequeños o donde hay una gran disponibilidad de maquinaria, la cosecha puede comenzar aproximadamente 30-35 días después de la floración, cuando hay un mayor rendimiento de granos enteros y una mayor reducción de la humedad, lo que conduce al menor costo de secado. Sin embargo, para áreas de cultivo más grandes, o donde hay poca maquinaria o mano de obra disponible para la cosecha, es recomendable comenzar a cosechar una semana antes del punto máximo de rendimiento para granos enteros, entre 28 y 30 días después de la floración.

Comprender el punto de cosecha ideal es importante para la planificación de la operación, ya que tiene que evaluar su capacidad diaria de cosecha y secado, los costos de estos procesos, así como las condiciones climáticas del período, ya que la pérdida del momento ideal provoca una reducción en el rendimiento de grano entero en el molino y mayores pérdidas de cultivos (por ejemplo, vuelco de plantas).

1.4. Acumulación, partición y retranslocación de biomasa

Comprender cómo ocurre el crecimiento de las plantas y la acumulación de materia seca (MS) en los diferentes órganos de la planta es una estrategia importante para generar una alta productividad. Esta comprensión es aún más importante cuando

se desea representar un cultivo o grupo de maduración en modelos ecofisiológicos, como es el caso de los modelos SimulArroz y ORYZA.

Para determinar la acumulación de MS se utiliza una metodología en la que el material cosechado se separa en los diferentes órganos funcionales de la planta: láminas foliares, tallos, panículas y material senescente (Figura 35).

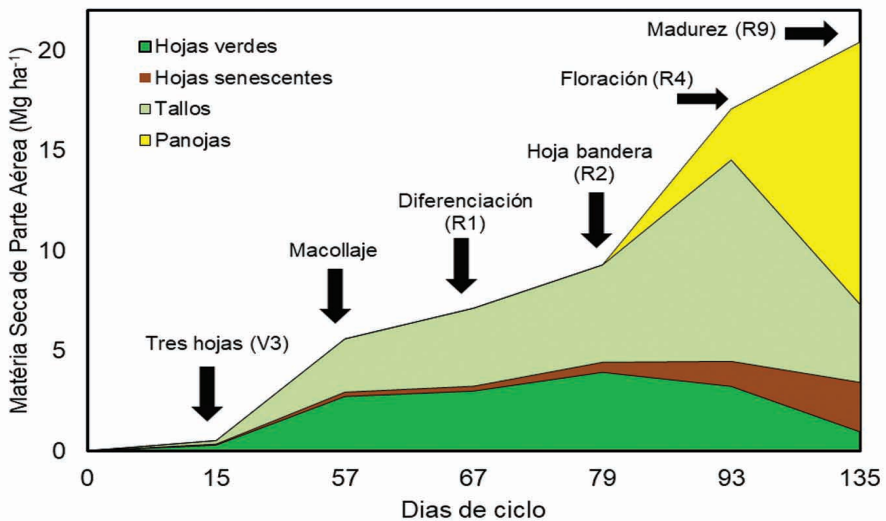


Figura 35. Producción de biomasa, partición por órganos vegetales y rendimiento de grano de arroz en una prueba realizada en el año agrícola 2019/20 en la provincia de Corrientes, Argentina. Fuente: Equipo FieldCrops y UNER.

La máxima tasa de crecimiento se observó entre las etapas R2 y R4 (aparición de la hoja bandera y floración). A partir de estas etapas, comienza una gran reasignación de biomasa del tallo a la panícula, de manera que los fotoasimilados acumulados en el tallo en R4 son responsables de hasta el 60% del peso final de la panícula. La reasignación de fotoasimilados de hojas a granos es pequeña, ya que la función de las hojas es mantener la fotosíntesis para generar energía y carbohidratos para llenar los granos.

La Figura 36 muestra la distribución de MS a lo largo del ciclo para un híbrido (QM 1010 CL) y para una variedad de arroz no híbrido (IRGA 424) (Ribas et al., 2017). Durante las etapas iniciales, la relación hoja/tallo fue cercana al 80% para los dos materiales analizados. Entre V3 y R1, esta relación fue de 60% y 50% para el cultivar convencional y el híbrido, respectivamente. De R1 a R4, los tallos representan hasta el 70% de la planta, porque la panícula es el principal destino de fotoasimilados y aún se encuentra dentro del tallo. A partir del llenado de grano (R4-R9), la MS fue similar entre híbridos y variedades, alcanzando 50% en R9.

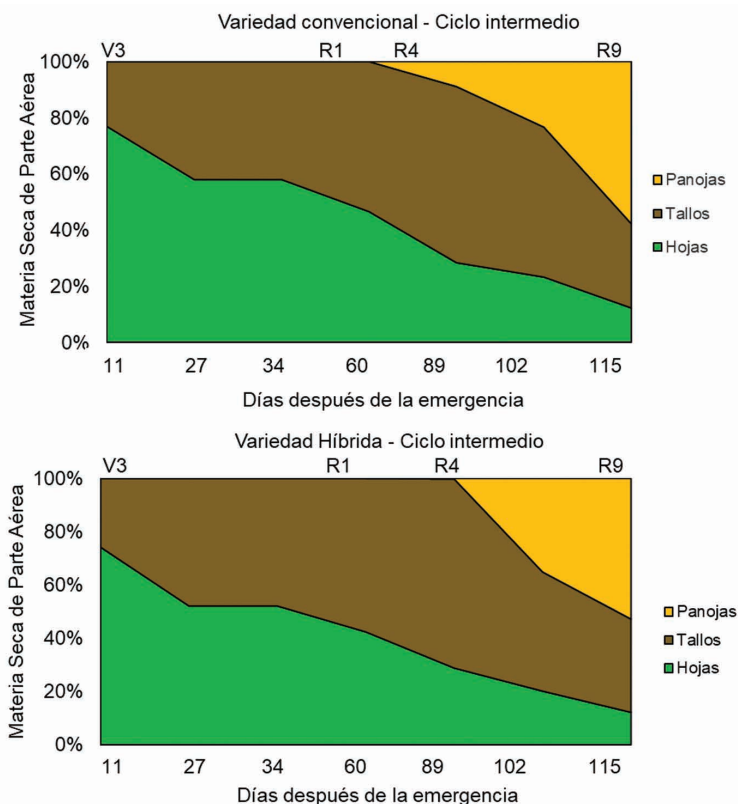


Figura 36 - Distribución relativa de materia seca (MS) en los diferentes órganos de la planta de arroz en una variedad convencional (IRGA 424) y un híbrido (QM 1010), ambos del grupo de maduración media. Fuente: Ribas et al. (2017) - Equipo FieldCrops, UFSM e IRGA.

Un experimento utilizando tres de las principales variedades sembradas en América del Sur (IRGA 424 RI, Guri INTA CL y Puitá INTA CL), indicó que las variedades convencionales traslocan más del 50% de los fotoasimilados a las hojas hasta R1, mientras que los híbridos traslocan el 40% (Ribas et al., 2017) (Tabla 7). La partición y translocación de fotoasimilados de plantas de arroz se describen en porcentaje (0 a 1) para cada etapa de desarrollo en la tabla 7.

Tabla 7. Partición de materia seca para cada etapa de desarrollo (DVS), materia seca (MS), dividida en hojas (F), tallos (C) y panículas (P) para tres variedades convencionales (IRGA 424 RI, Guri INTA CL, Puitá INTA CL) y para los híbridos de arroz. Fuente: Ribas et al. (2017) - Equipo FieldCrops, UFSM e IRGA.

DVS	MS da parte aérea	IRGA 424 RI			GURI INTA CL			PUITÁ INTA CL			Híbridos		
		F	C	P	F	C	P	F	C	P	F	C	P
EM	0,5	0,73	0,27	0,0	0,7	0,3	0,0	0,75	0,25	0,0	0,4	0,6	0,0
R1	0,65	0,3	0,7	0,0	0,2	0,8	0,0	0,19	0,81	0,0	0,3	0,7	0,0
FL	1,0	0,0	0,9	0,1	0,0	0,8	0,2	0,0	0,9	0,1	0,1	0,3	0,6
R9	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	1,0

EM = emergencia, R1 = diferenciación de panículas, FL = antesis o floración, R9 = cosecha.

1.5. Índice de área foliar

El índice de área foliar (IAF) es la relación entre el área de la hoja verde y el área de la superficie del suelo (Heiffig et al., 2006). A partir del IAF, es posible evaluar la eficiencia fotosintética de la planta y la capacidad de interceptación de la radiación solar, convirtiendo la radiación solar en fotoasimilados y determinando el potencial productivo del cultivo (Zanon et al., 2015; Tagliapietra et al., 2018).

La evolución del IAF está determinada por la tasa de aparición de las hojas (o su inverso, el filocrón), la duración del área verde y el tamaño de las hojas.

Durante el ciclo de desarrollo del arroz, el IAF aumenta hasta alcanzar el valor máximo cercano a la floración, luego de lo cual comienza a disminuir como consecuencia de la senescencia de las hojas (Figura 37). Cuando el dosel vegetativo intercepta el 95% de la radiación solar disponible, el cultivo alcanza el IAF crítico. Después de este momento, la tasa de aumento de la fotosíntesis neta por unidad de área foliar (AF) disminuye. En el momento en que el aumento de la interceptación solar no contribuye al aumento de la fotosíntesis neta, se produce el IAF óptimo (Hay & Porter, 2006). En experimentos realizados a un nivel potencial, el IAF máximo para el arroz varió de 6 a 10, durante tres fechas de siembra, independientemente del ciclo del cultivar (Figura 37) (Ribeiro et al., 2019).

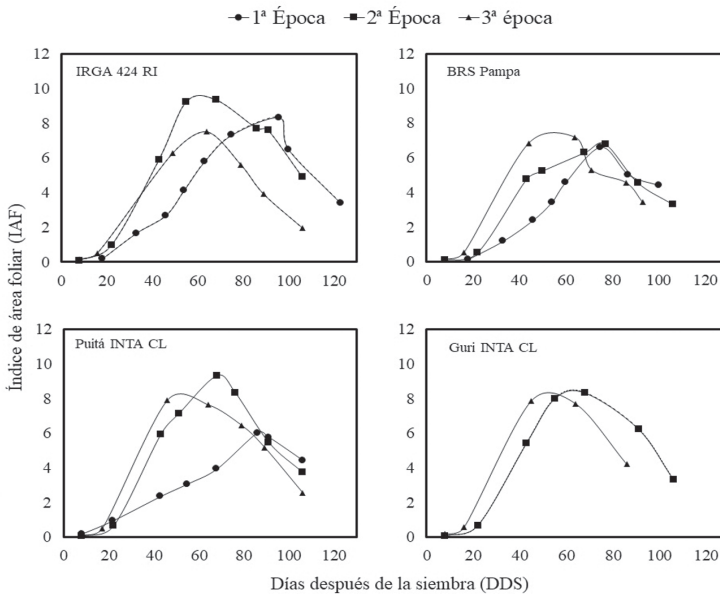


Figura 37. Evolución del índice de área foliar en función de los días posteriores a la siembra en cuatro variedades de arroz en tres fechas de siembra en Cachoeirinha/RS: temporada 1 (1/10/2015), temporada 2 (9/11/2015) y temporada 3 (12/12/2015). Fuente: Ribeiro et al. (2019) - Equipo FieldCrops, UFSM e IRGA.

Con base en experimentos realizados en condiciones potenciales, se definió el IAF necesario cerca de la floración (momento crítico) para obtener altos rendimientos. Este valor de IAF se denomina IAF óptimo, definido mediante la metodología de función límite⁶ (Figura 38).

El IAF óptimo para el arroz es 7,1, con rendimientos cercanos a 14 Mg ha⁻¹(Figura 38). Para rendimientos de 12 Mg ha⁻¹, es necesario un IAF mayor que 6, similar al IAF óptimo encontrado por Yoshida (1978) con la variedad IR8. Los cultivos con IAF entre 7,1 y 9,0 mantuvieron el potencial productivo y los cultivos con IAF por encima de 9,0 mostraron una productividad reducida debido al auto sombreado por exceso de hojas, lo que reduce la incidencia de radiación solar en el tercio inferior de la canopia, provocando una reducción en la tasa fotosintética promedio (Yoshida, 1981), además de crear un microclima favorable al desarrollo de enfermedades, como Brusone.

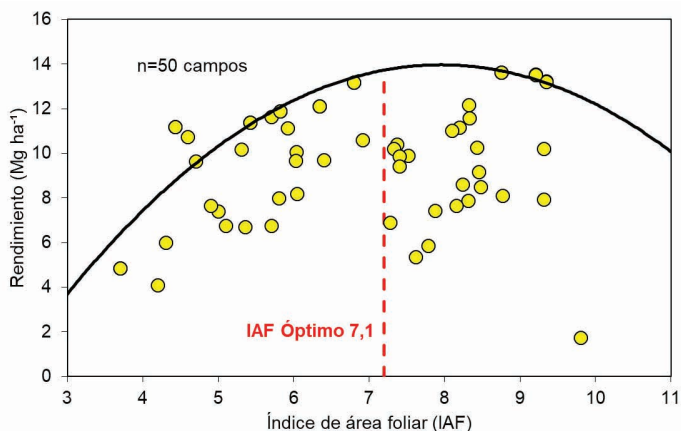


Figura 38. Relación entre el rendimiento de granos de arroz de regadío (Mg ha⁻¹) y el índice de área foliar (IAF). La línea negra completa representa la función de límite. La línea punteada vertical en rojo representa el valor IAF que maximiza el rendimiento de grano (IAF Óptimo). Fuente: Equipo FieldCrops, UFSM e INIA - Uruguay.

⁶ Función límite o de contorno: metodología que utiliza la estadística no paramétrica propuesta por French y Schultz (1984), utilizada para cuantificar la influencia de un factor sobre otro. Para determinar la función límite, se selecciona el 10% de los valores más altos de la variable independiente (eje x), que están relacionados con la variable dependiente (eje y).

1.6. Componentes de productividad

La planta de arroz tiene una gran capacidad de adaptación morfológica y fisiológica según los cambios del medio. La capacidad de adaptarse a diferentes entornos se llama plasticidad. En este ítem, la productividad del grano se construirá a través de los principales componentes de productividad (o componentes de rendimiento) de un cultivo de arroz, enfatizando la importancia de cada uno de ellos para determinar el potencial productivo, además de indicar valores óptimos para cada componente de productividad. Para definir valores óptimos, se evaluaron los componentes de productividad en experimentos y cultivos en Argentina, Brasil y Uruguay, obtenidos durante más de 10 años de investigación. Los componentes de productividad abordados son: número de panículas por área, número de espiguillas por panícula, número de granos por panícula y la peso de granos (expresada en peso de mil granos).

El número de panículas por área (panículas m^{-2}) es el primer y más importante componente de la productividad del arroz. Su construcción comienza inmediatamente en la elección de la semilla y su definición se da a lo largo de las fases vegetativa y reproductiva, desde la S0 hasta la R4. Así, el uso de semillas certificadas, con adecuada germinación y vigor, libres de semillas de maleza (como el arroz-maleza o arroz rojo), y el tratamiento de semillas contra insectos y enfermedades son prácticas que maximizan la expresión de este componente.

Usando la metodología de la función límite y usando datos de más de 850 campos comerciales de arroz en Rio Grande do Sul, la densidad óptima de siembra es 93 kg de semillas ha^{-1} (Figura 39A) y la densidad óptima de plantas en emergencia (planta) es de 197 plantas m^{-2} (Figura 39B). Durante el ciclo de desarrollo, se espera que cada planta de arroz genere 2 o 3 macollos productivos para lograr la densidad óptima de 550 panículas m^{-2} (Figura 40).

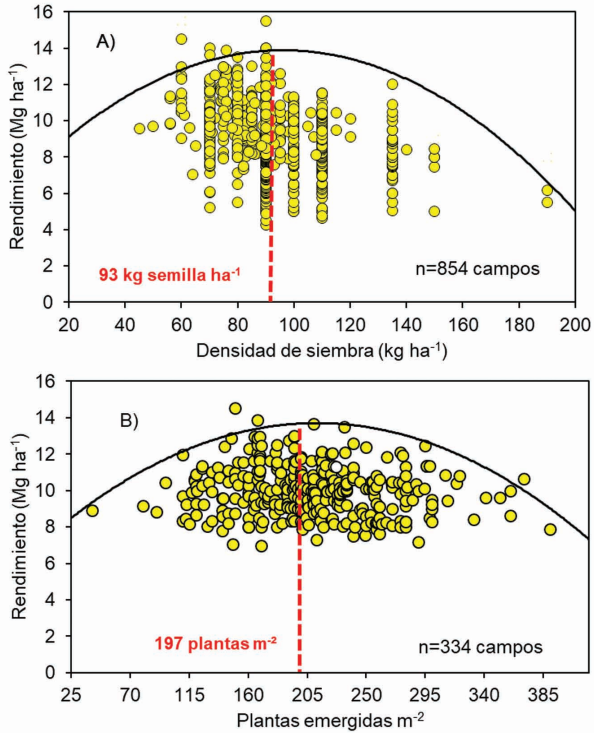


Figura 39. Relación entre rendimiento de grano (Mg ha^{-1}) de arroz de regadío y A) densidad de siembra y B) densidad de plantas emergidas. La línea negra completa representa la función de límite. La línea roja punteada vertical en cada panel representa el número de plantas emergidas m^{-2} que maximiza el rendimiento de grano. Fuente: Equipo FieldCrops, IRGA, Unipampa, UFPel y UFSM.

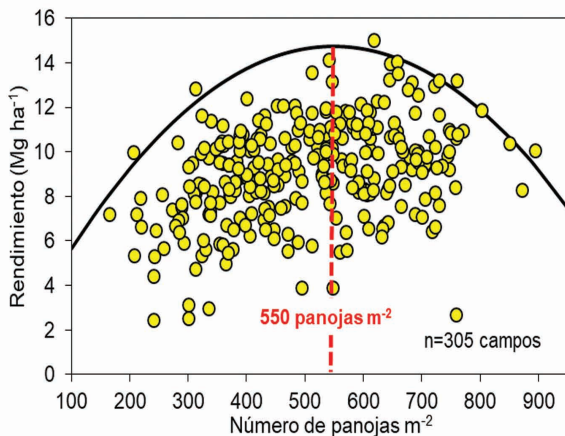


Figura 40. Relación entre rendimiento de grano (Mg ha^{-1}) de arroz de regadío y densidad de panícula m^{-2} . La línea negra completa representa la función de límite. La línea roja discontinua vertical representa el número de panículas m^{-2} que maximiza el rendimiento de grano. Fuente: Equipo FieldCrops, UFSM e INIA - Uruguay.

La definición del número de granos por panícula ocurre durante la fase reproductiva del arroz (R0 a R4). El número de granos por panícula depende, sobre todo, de las condiciones climáticas, principalmente la radiación solar y la temperatura, que si son extremas (ítem 2.1) durante la microsporogénesis, pueden aumentar la esterilidad de las espiguillas y reducir el potencial de producción. En un estudio con 238 campos de arroz en Rio Grande do Sul y Uruguay, se encontró la variación de 40 a 180 granos por panícula, el número óptimo para lograr altos rendimientos de 100 granos por panícula (Figura 41).

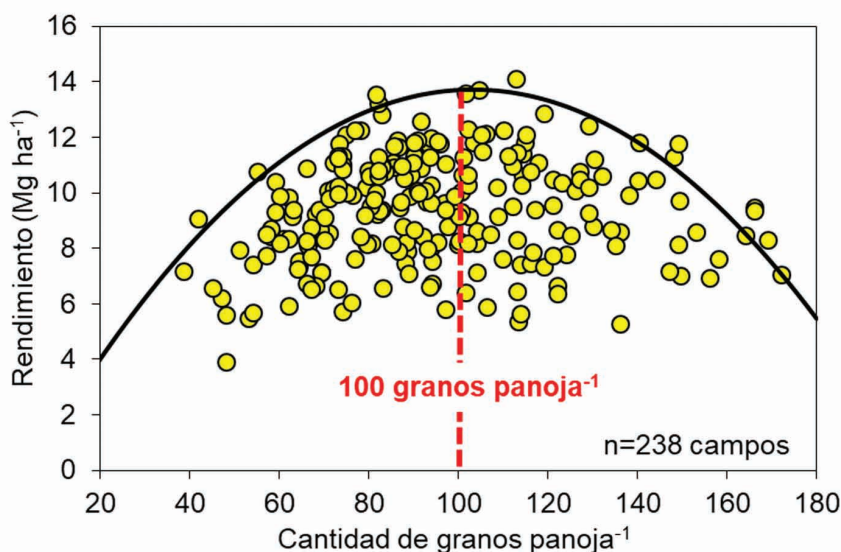


Figura 41. Relación entre el rendimiento de grano (Mg ha^{-1}) de arroz de regadío y el número de granos por panícula. La línea negra completa representa la función de límite. La línea roja punteada vertical representa el número de granos por panícula que maximiza el rendimiento de grano. Fuente: Equipo FieldCrops, UFSM e INIA - Uruguay.

Después de la floración, se define el número de granos por panícula (R4 a R6) y el peso de granos (de R4 a R8). Durante este período, los fotoasimilados del tallo y la fotosíntesis se redirigen para llenar las espiguillas. Así, la disponibilidad de radiación solar durante este período está directamente relacionada

con la mayor cantidad de espiguillas completas (granos) (Figura 42). La temperatura determina la tasa de llenado de grano, en el que las altas temperaturas aceleran el metabolismo de la planta, la tasa de translocación de fotoasimilados y el llenado de grano. El impacto de la tasa de llenado de grano sobre la productividad no es directo, sin embargo la calidad de los granos puede verse alterada por la mala estructura del almidón en el grano, aumentando el porcentaje de granos quebrados y yesoso (Ishimaru et al., 2009). Por otra parte, las temperaturas suaves durante el llenado del grano reducen la velocidad de translocación de los fotoasimilados y aumentan el número de días necesarios para la maduración del grano (Kobata & Uemuki, 2004; Yoshida, 1981). En un estudio con 185 arrozales en Rio Grande do Sul y Uruguay, se encontró que el peso óptimo de 1000 granos para lograr altos rendimientos es de 24 gramos por 1000 granos (Figura 43).

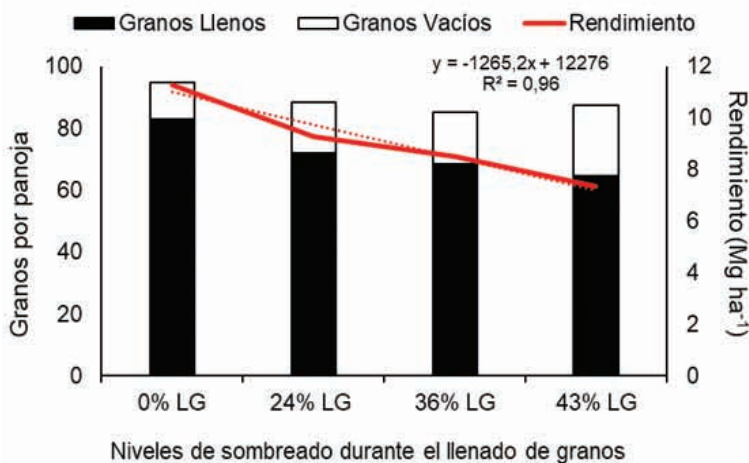


Figura 42. Número de granos por panícula durante el llenado de granos bajo niveles de radiación solar incidente de 100%, 76%, 64% y 57% y su relación con el rendimiento de grano en arroz de regadío. Las columnas indican el número de granos totales por panícula (llenas de negro para granos completos y sin llenar para granos vacíos) y están relacionadas con el eje Y izquierdo. La línea roja indica el rendimiento de grano y está relacionada con el eje Y derecho. La línea de puntos indica la regresión lineal entre el rendimiento de grano y los niveles de radiación solar, que disminuye con menos radiación solar incidente durante el llenado de grano. Fuente: Rossato (2020) - Equipo FieldCrops, IRGA, Unipampa y UFSM.

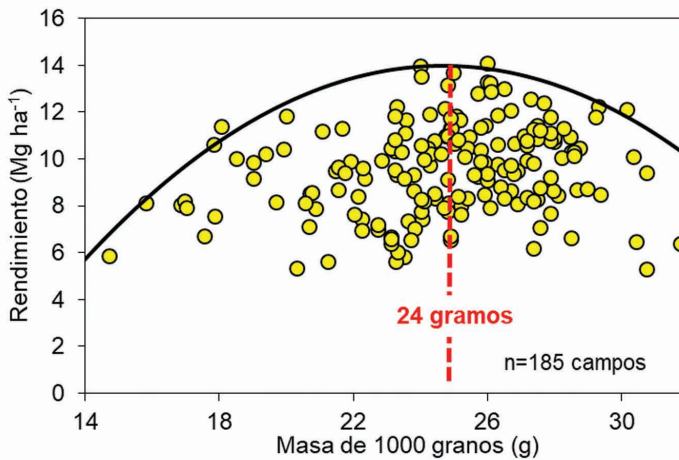


Figura 43. Relación entre el rendimiento de grano (Mg ha^{-1}) de arroz de regadío y el peso de 1000 granos. La línea negra completa representa la función de límite. La línea roja discontinua vertical representa el peso de 1000 granos que maximiza el rendimiento de granos. Fuente: Equipo FieldCrops, UFSM e INIA - Uruguay.

1.7. Escogiendo variedades

La elección de la variedad implica comprender los conceptos asociados con la interacción ambiental x genotipo, teniendo en cuenta factores como el sistema de riego, la región de producción y la fecha de siembra. A la hora de planificar la elección de la variedad, no podemos decir que existe una mejor variedad, sino cual mejor se adapta y satisface las demandas que busca el productor en su campo. Entre los factores importantes a la hora de elegir variedad de arroz se encuentran: el potencial productivo, la duración del ciclo de desarrollo, el tipo y la calidad del grano, las preferencias del mercado de los consumidores, la resistencia a los herbicidas y la tolerancia a las tensiones ambientales bióticas (por ejemplo, resistencia a enfermedades) y abióticos (ej.: resistencia al frío).

La duración del ciclo es uno de los puntos más importantes en la elección de la variedad. El ciclo puede ser muy temprano, temprano, medio y tardío, según el número de días desde la

siembra hasta la madurez. Sin embargo, la clasificación depende del lugar y período de siembra, ya que los genotipos presentan diferentes sensibilidades a la temperatura y en algunos casos fotoperiodo (Yoshida, 1981). Buscando comprender mejor la interacción genotipo x ambiente, el equipo de FieldCrops en asociación con IRGA evaluó 268 campos de arroz en el estado de Rio Grande do Sul - Brasil en los años agrícolas 2015/16, 2017/18 y 2018/19 (Tabla 8), en el cual fue posible cuantificar la influencia de la fecha de siembra sobre la duración del ciclo de maduración (en días).

Tabla 8. Duración del ciclo de desarrollo, en días, para variedades de arroz tempranos, medios y tardíos, según época de siembra en Rio Grande do Sul, Brasil (n = 268 cultivos). Fuente: Equipo FieldCrops, UFSM e IRGA.

Ciclo	Época de Siembra			
	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Precoz	146	132	133	123
Intermedio	159	143	141	127
Largo	165	158	154	145

Para las variedades tempranas, la duración del ciclo se reduce o aumenta en 7 días, cada 30 días de retraso o anticipación de la fecha de siembra, respectivamente. Para variedades de ciclo medio y tardío, este valor es de 9 y 6 días, respectivamente (Figura 44).

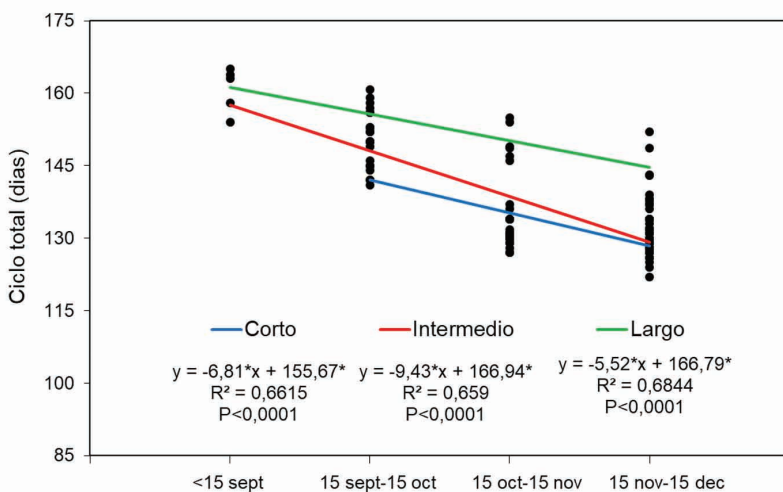


Figura 44. Relación entre la duración del ciclo de desarrollo del arroz y la época de siembra. La función lineal de las variedades de arroz de ciclo temprano, medio y largo está representada, respectivamente, por la línea azul, roja y verde. Fuente: Equipo FieldCrops y UFSM.

Debido a esta respuesta específica al medio ambiente, como se ve en el ítem 1.3.2, la mejor manera de expresar la duración del ciclo es en grados día⁻¹, en lugar de días calendario (Streck et al., 2006a). Este enfoque permite considerar el efecto de la temperatura en el desarrollo vegetativo y en la ocurrencia de las principales etapas del cultivo. Como ejemplo, podemos destacar el *software* DD50 (<https://dd50.uaex.edu/>) y su uso por productores de arroz en el estado norteamericano de Arkansas. En Brasil, se desarrolló un programa basado en grados día⁻¹, llamado GD Arroz (Capítulo 10), que se puede usar para estimar la duración del ciclo de desarrollo de una variedad dependiendo del lugar y el momento de la siembra.

Otro factor determinante en la elección de la variedad es el potencial productivo de la misma, el cual debe estar asociado a factores como la calidad del grano, la capacidad de inversión del productor y el uso eficiente de los recursos disponibles en el ambiente. Las instituciones de investigación de todo el mundo han estado trabajando en proyectos para romper el potencial

productivo actual de los campos de arroz. Entre los avances genéticos para incrementar el potencial de productividad se encuentran el desarrollo y mejoramiento de híbridos y el desarrollo de las variedades de arroz con el sistema fotosintético C4⁷. El uso de híbridos ya está consolidado en las regiones Centro-Sur de Estados Unidos y en algunas regiones de China. Mediante el uso de híbridos, la productividad es de un 10 a un 20% más alta que las variedades convencionales (Nalley et al., 2016). Otro proyecto que busca romper los potenciales de producción actuales se refiere a la evolución genética de las plantas de arroz, pasando del sistema fotosintético C3⁸ al C4. Esta conversión daría lugar a un aumento cercano al 50% de la productividad debido a una mayor eficiencia en el uso de los recursos ambientales, especialmente en el aumento de EUR (Normile, 2008). El proyecto de referencia en el mundo para el desarrollo y mejoramiento del arroz C4 es “*The C4 Rice Project*” del IRRI (<http://photosynthome.irri.org/C4rice/>).

La estabilidad productiva también se debe tener en cuenta al momento de definir la elección de la variedad, es importante considerar la estabilidad productiva principalmente en áreas donde existen estreses ambientales que pueden afectar el desarrollo de las plantas. En este punto, es fundamental conocer cuáles

⁷ **Sistema fotosintético C4** ocurre en plantas que tienen una mayor afinidad por el CO₂ y una vía fotosintética adaptativa. En estas plantas existe una separación física de la fijación inicial del carbono y el Ciclo de Calvin, que tiene gasto energético (ATP), sin embargo minimiza la fotorrespiración. La primera etapa ocurre en las células mesófilas (tejido ubicado en el medio de la hoja), donde actúa la enzima PEP carboxilasa, que no tiene afinidad con el O₂. Así, en el ciclo de Calvin, que ocurre en las células de la vaina del haz vascular (alrededor de las nervaduras - estructuras de Kranz), existe una mayor actividad carboxilasa de la enzima rubisco, debido a la mayor concentración de CO₂. Lo que hace que estas plantas sean más eficientes en el uso de CO₂, especialmente en regiones cálidas.

⁸ **Sistema fotosintético C3** ocurre en plantas que no tienen adaptaciones fotosintéticas para reducir la fotorrespiración. La fijación de CO₂ por la enzima rubisco ocurre en la primera etapa del Ciclo de Calvin, sin embargo, esta enzima también tiene afinidad con las moléculas de O₂, presentes en ese lugar. Por tanto, en lugares con altas temperaturas del aire, puede producirse fotorrespiración, lo que genera un gasto excesivo de energía. Este mecanismo está presente en la gran mayoría de especies vegetales conocidas.

son los principales factores que están limitando la productividad y elegir las herramientas adecuadas a la realidad de cada cultivo. Por ejemplo, en áreas con antecedentes de ocurrencia de enfermedades, el criterio para elegir la variedad debe ser la resistencia a las enfermedades, equilibrando la duración del ciclo y el potencial productivo. Otro ejemplo es el uso de variedades resistentes a herbicidas no selectivos en áreas con alta infestación de arroz rojo y capín del arroz.

La calidad y el tipo de grano de la variedad también es un punto clave en la elección, especialmente cuando se busca atender mercados exigentes. Por ejemplo, en el mercado brasileño existe preferencia por el grano largo, fino, translúcido, con alto contenido de amilosa y buena apariencia visual, sin embargo este tipo de grano no es ampliamente aceptado en el mercado internacional. También existe la oportunidad de explorar nichos de mercado, con el uso de variedades especiales, como arroz con colores especiales de pericarpio, arroz arbóreo y variedades destinadas a la cocina oriental.

Además del estrés biótico, la temperatura, la radiación solar y las precipitaciones son elementos meteorológicos que impactan los procesos fisiológicos y el rendimiento de grano (Yoshida, 1981). Debido a la sensibilidad del arroz a las bajas temperaturas, se debe priorizar el uso de genotipos tolerantes a bajas temperaturas en las regiones más frías. En general, las variedades de ciclo medio son más sensibles a las bajas temperaturas (por debajo de 15 a 17 °C), especialmente durante el embarrigado (R2) (Cruz & Milach, 2000). En general, las variedades tempranas tienen un potencial de rendimiento menor en comparación con las de ciclo medio y tardío, pero son cultivares clave para escalar la siembra y la cosecha, reducir el uso de agua, evitar períodos con bajas temperaturas y distribuir la demanda de mano de obra, maquinaria e infraestructura.



2. Factores y elementos climáticos

Nereu Augusto Streck¹; Anderson Haas Poersch¹; Ary José Duarte Junior¹; Bruna San Martin Rolim Ribeiro¹; Giovana Ghisleni Ribas¹; Ioran Guedes Rossato¹; Isabela Bulegon Pilecco¹; Lorenzo Dalcin Meus¹; Michel Rocha da Silva¹; Moisés de Freitas do Nascimento¹; Pablo Mazzuco de Souza¹; Silvio Steinmetz²; Vladison Fogliato Pereira¹; Alencar Junior Zanon¹

El clima tiene una gran influencia en la productividad y el potencial productivo de los cultivos y sistemas agrícolas. El arroz se cultiva en latitudes que oscilan entre los 50°N (Checoslovaquia) y los 35°S (Uruguay/Chile), a nivel del mar y en altitudes superiores a los 2000 m (Nepal), adaptadas a una amplia gama de condiciones edafoclimáticas. Entre los principales elementos meteorológicos que afectan el desarrollo, crecimiento y productividad del arroz se encuentran la temperatura del aire, la radiación solar, el fotoperíodo y las precipitaciones.

Debido a la influencia del clima y las variables meteorológicas en la producción de arroz, este capítulo destacará los requisitos climáticos del arroz, los principales elementos que determinan el crecimiento y desarrollo del cultivo, la influencia del fenómeno El Niño Oscilación Sur (ENOS) sobre estas variables y el impacto del calentamiento global en el potencial productivo de los cultivos de arroz.

2.1. Temperatura

La temperatura (del aire, del agua y del suelo) determina la velocidad de las reacciones y actividades biofísicas y bioquímicas de las plantas de arroz. El efecto de la temperatura puede

¹ Universidad Federal de Santa Maria (UFSM), Departamento de Fitotecnia, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.

² Embrapa Clima Temperado, Capão do Leão, RS, Brasil.

ser un catalizador (altas temperaturas) o un desacelerador (bajas temperaturas). Cada especie vegetal tiene sus temperaturas cardinales (mínima, óptima y máxima) para su desarrollo (Pascale & Damario, 2004). Para el arroz, las temperaturas cardinales varían según la fase de desarrollo (Figura 45). Las temperaturas mínimas y óptimas de desarrollo tienden a disminuir a lo largo del ciclo del cultivo, mientras que la temperatura mínima de desarrollo tiende a aumentar desde la germinación hasta la madurez fisiológica. En la práctica, significa que en la fase de germinación y durante la fase vegetativa la planta de arroz es más tolerante a altas y bajas temperaturas, y durante la fase reproductiva es más sensible a altas y bajas temperaturas ambientales.

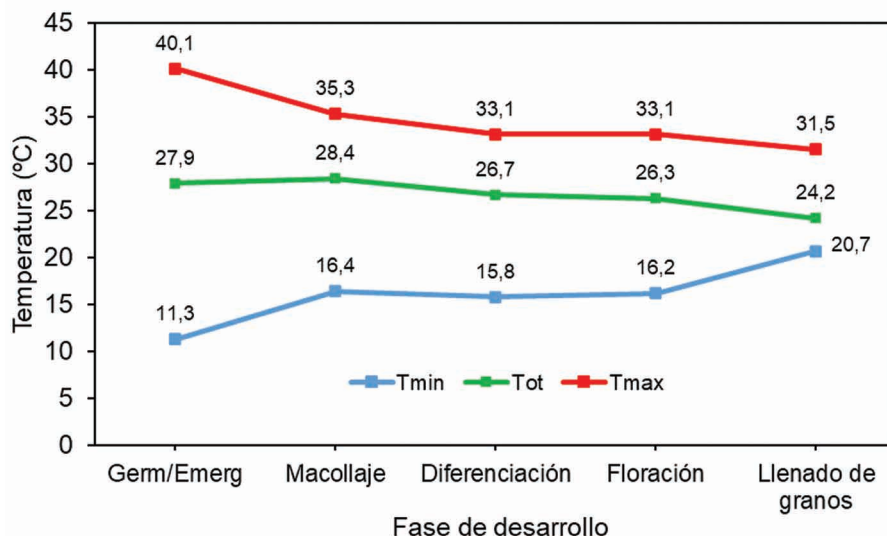


Figura 45 - Temperaturas cardinales mínima (Tmin), óptima (Tót) y máxima (Tmax) en diferentes etapas del desarrollo de la planta de arroz. Fuente: Adaptado de Sánchez et al. (2014).

Inmediatamente después de la siembra, la temperatura del suelo determina la velocidad de germinación y emergencia de las plántulas, y el rango óptimo para una buena germinación debe estar entre 20 y 35 °C. Las temperaturas del suelo por debajo

de los 12 °C y por encima de los 35 °C perjudican el proceso de germinación y aumentan el riesgo de obtener una planta baja y desigual. En regiones subtropicales, como el sur de Brasil, Argentina, Uruguay y Estados Unidos (Arkansas), la temperatura del suelo durante el período de siembra y desarrollo temprano es menor, lo que puede ser un factor limitante para el buen establecimiento de las plantas. En estas condiciones, la germinación y emergencia de las plántulas puede demorar hasta 25 días (Tabla 9). Además, la ocurrencia de una temperatura del aire por debajo de los 15 °C entre la emergencia y el establecimiento de la lámina de agua puede causar el amarillamiento de las hojas, la reducción de la tasa de crecimiento y la eficiencia fotosintética.

Tabla 9. Temperatura del suelo y tiempo medio para emergencia de plántulas de arroz. Fuente: Adaptado de Amaral e Santos (1983).

	Temperatura de suelo (°C)			
	16	23	30	37
Tiempo medio para emergencia (días)	25,4	12,8	6,2	5,2

Después del establecimiento de las plántulas, la temperatura del aire comienza a afectar la duración del ciclo del cultivo de acuerdo con las temperaturas críticas para cada etapa de desarrollo (Figura 45). Durante la floración se da el período de mayor sensibilidad del arroz a las altas temperaturas, cuando las temperaturas superan los 35 °C durante 3 o más días, y las bajas temperaturas, cuando las temperaturas están por debajo de los 17 °C, aumentando la esterilidad de las espiguillas. Algunas variedades tienen una mayor tolerancia al frío, mostrando daños solo cuando la temperatura es inferior a 15 °C. Las pérdidas de frío son más comunes en las regiones subtropicales, en regiones sujetas a la entrada de masas de aire frío, como el Sur de Rio

Grande do Sul, Brasil (Steinmetz & Amaral, 2002). En las regiones tropicales, la ocurrencia de pérdidas por temperaturas extremas no es común. Sin embargo, el potencial productivo en las regiones tropicales es menor debido a la ocurrencia de altas temperaturas nocturnas y la mayor tasa de respiración de las plantas. Además, las temperaturas más altas, combinadas con la alta humedad relativa del aire, aumentan el potencial de proliferación de enfermedades fúngicas, como la piricularia.

2.2. Radiación Solar

La radiación solar es la principal fuente de energía de las plantas, siendo la energía impulsora en el proceso de fotosíntesis, convirtiendo la energía lumínica en carbohidratos y, en consecuencia, siendo uno de los principales factores biofísicos que influyen en la productividad del cultivo de arroz.

La importancia de la radiación solar en el crecimiento del cultivo de arroz va aumentando según la evolución de las etapas de desarrollo de la planta. Por tanto, se deben llevar a cabo prácticas de manejo con el fin de incrementar el uso y la eficiencia en el uso de la radiación solar (Yoshida, 1981). Entre estas prácticas se encuentran la elección del cultivar y el ajuste al momento de la siembra, aprovechando el período de mayor disponibilidad de radiación solar en la fase reproductiva y de llenado de grano.

La eficiencia del uso de la radiación (EUR), que es producto de la cantidad de materia seca producida por unidad de radiación solar absorbida (Sinclair & Muchow, 1999), está condicionada a la nutrición de la planta, el tiempo de siembra y el buen manejo del cultivo. Con EUR es posible cuantificar cuánto el cultivo es capaz de asimilar la energía absorbida del sol en energía bioquímica y compuestos carbónicos a través de la fotosíntesis. Los valores de EUR en el arroz oscilan entre 1,32 y 2,95 g de MJ⁻¹ (radiación fotosintéticamente activa interceptada - PAR) (Weerakoon et al., 2000; Mall y Aggarawal, 2002).

En Brasil, los niveles más altos de radiación solar (número de horas de sol, que es directamente proporcional a la radiación solar) en enero ocurren en la Región Sur, mientras que en las regiones del Medio Oeste, Sudeste y partes de las Regiones Norte y Noreste las tasas más elevadas de radiación solar ocurren en julio (Figura 46). En la región sur de Brasil, se recomienda sembrar desde finales de septiembre hasta la primera quincena de noviembre, buscando coincidir la fase reproductiva y llenado de granos con la época de mayor disponibilidad de radiación solar (segunda quincena de diciembre y primera quincena de enero), con el fin de aprovechar mejor la oferta del entorno para lograr una alta productividad.

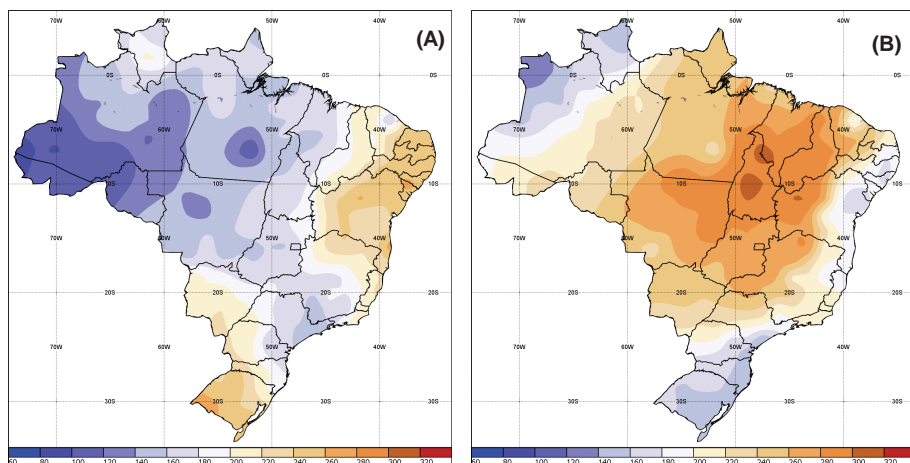


Figura 46. Climatología de radiación solar para los meses de enero (A) y julio (B) en Brasil, período de 1981 a 2010. Fuente: INMET

La reducción de la incidencia de la radiación solar en las diferentes etapas del desarrollo del cultivo interfiere de manera diferente con los componentes de productividad. Así, la fase de desarrollo que más sufre por la reducción de la radiación solar es la de llenado de granos, seguida de la reproductiva y vegetativa (Figura 47). Durante el llenado de granos, el componente de productividad más afectado por la restricción de la radiación solar es el número de granos vacíos o vanos por panícula, que aumenta cuanto mayor es el nivel de sombreado (Ítem 1.6).

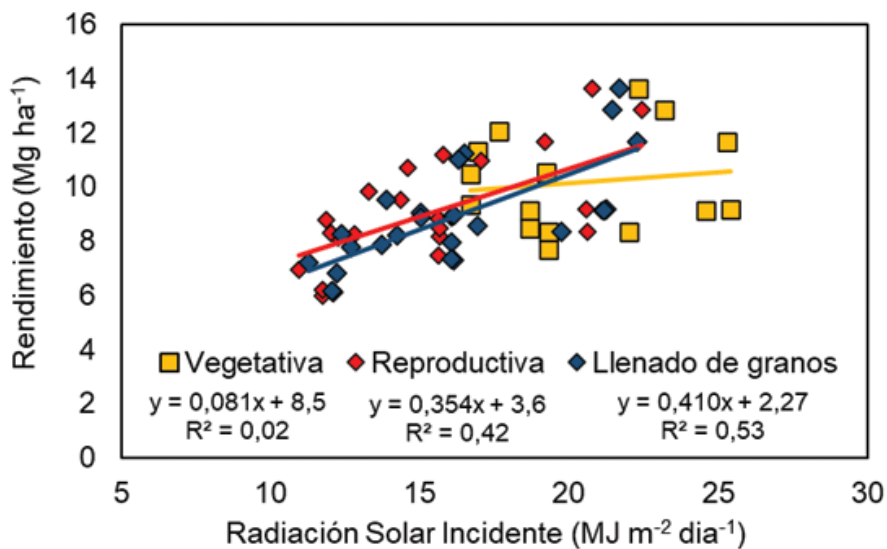


Figura 47. Relación entre productividad de granos de arroz y la radiación solar incidente por fase de desarrollo. Fuente: Rossato et al (2020) - Equipo FieldCrops.

De esta manera, conociendo el impacto del sombreado en las fases de desarrollo, fue posible cuantificar la pérdida por día nublado ($\text{kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$) en cada fase (Tabla 10). La identificación de un día nublado se realizó utilizando datos de amplitud térmica diaria, ocurrencia de lluvia e incidencia de radiación solar diaria. Se estima que el valor medio de la radiación solar en un día nublado es de $9,93 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$.

Tabla 10. Pérdida de rendimiento de arroz por día nublado y por etapa de desarrollo. Fuente: Rossato et al. (2020) - Equipo FieldCrops, UFSM, Unipampa e IRGA.

Fase	Productividad diaria (kg MJ·m ² día ⁻¹)	² Productividad en un día sin nubes (kg ha ⁻¹ día ⁻¹)	³ Productividad en un día nublado (kg ha ⁻¹ día ⁻¹)	Pérdida por día nublado (kg ha ⁻¹ día ⁻¹)
¹ EM-R1	1,72	40,9	17,1	23,8
R1-R4	11,4	237,1	113,2	123,9
R4-R9	12,1	257,8	120,1	137,6

¹ EM-R1: fase vegetativa; R1-R4: fase reproductiva; R4-R9: fase de llenado de grano;

² La productividad en un día despejado se calcula en base a la radiación solar incidente promedio (RSI) durante las fases de los años agrícolas 2017/18 y 2018/19 en Rio Grande do Sul, Brasil, siendo: 23,8 MJ m⁻² día⁻¹ en fase vegetativa; 20,8 MJ m⁻² día⁻¹ en la fase reproductiva; y 21,3 MJ m⁻² día⁻¹ en la fase de llenado de grano.

³ La productividad en un día nublado se calcula en base al RSI en un día nublado (9,93 MJ m⁻² día⁻¹).

2.3. Coeficiente fototérmico

El coeficiente fototérmico o fototermal (Q) se calcula mediante el cociente de la radiación solar incidente y la temperatura media del aire (Fischer, 1985). En la práctica, Q integra los efectos de la radiación solar y la temperatura sobre el crecimiento y el desarrollo (Fischer, 1985). Para calcular el Q del cultivo de arroz se asume una temperatura base (T_b) de 8°C. Se han informado relaciones entre el rendimiento de grano y Q durante las etapas clave para determinar los componentes del rendimiento para cultivos agrícolas de trigo (Fischer, 1985) y soja (Zanon et al., 2016). Para el arroz de regadío, el coeficiente fototérmico se ha utilizado desde la década de 1980 en Asia, donde los investigadores han evaluado la respuesta a Q en cultivares antiguos en diferentes estaciones de crecimiento (Islam y Morison, 1992).

Recientemente, se ha estudiado la influencia de la radiación solar y la temperatura en la productividad de los granos de arroz de regadío para un ambiente subtropical. Se compararon experi-

mentos realizados en condiciones potenciales, sin estrés biótico y sin restricción nutricional (círculos amarillos - Figura 48a) y experimentos que tenían algún tipo de limitación biótica o abiótica (círculos azules - Figura 48a).

Se encontró que la pérdida de productividad con retraso en la fecha de siembra está asociada con diferencias en los valores del coeficiente fototérmico en las etapas críticas de determinación de los componentes de productividad y con la duración del ciclo de desarrollo; ya que los valores de Q disminuyen linealmente con el retraso en fecha de siembra y son mayores en los grupos de maduración media y tardía (GM) en la siembra de septiembre y octubre.

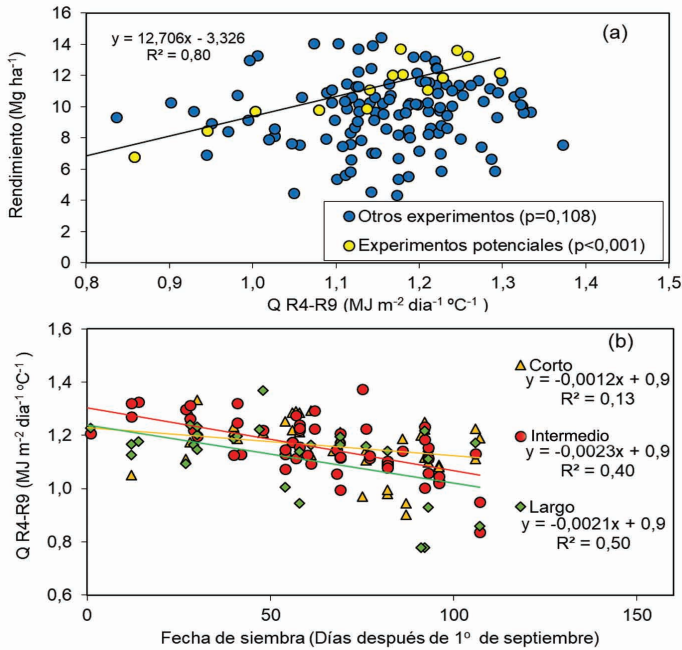


Figura 48. (a) Relación entre productividad de granos de arroz irrigado y del coeficiente fototérmico (Q) entre los estadios R4 y R9 en experimentos conducidos en condición potencial (círculo amarillo) y con alguna limitación biótica o abiótica (círculo azul). (b) Coeficiente fototérmico (Q) entre R4 y R9 en función de la fecha de siembra en grupos de madurez precoz (triángulos amarillos), medios (círculos en azul) y tardío (rombos en verde). Datos recolectados durante seis años agrícolas en RS (2013 a 2018). Líneas de regresión son mostradas solamente cuando son significativas.* y ** $P<0,1$ y $P<0,0001$, respectivamente. Fuente: Equipo FieldCrops.

En otro estudio, se utilizó Q para comprender el efecto de la restricción de la radiación solar en el cultivo de arroz y mostró una relación lineal con la productividad. En general, a medida que aumentaba el nivel de restricción de la radiación solar, Q y la productividad disminuyeron (Figura 49).

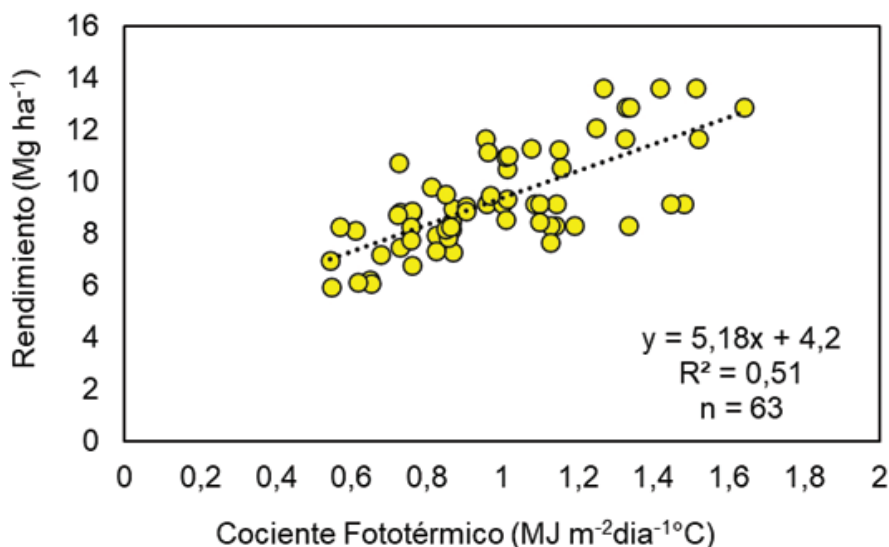


Figura 49. Relación entre a productividad de granos de arroz y el coeficiente fototérmico (Q) sobre niveles de restricción de radiación solar de 0%, 24%, 36% e 43% durante los años agrícolas 2017/18 y 2018/19 en Rio Grande do Sul. Fuente: Rossato et al. (2020) - Equipo FieldCrops.

En este estudio, fue posible cuantificar Q por fase de desarrollo para saber en qué período es más importante la relación entre la radiación solar y la temperatura. Con este análisis, se encontró que la fase de llenado de grano (R4-R9) es más sensible al efecto del sombreado y más dependiente de la disponibilidad de radiación solar que la reproductiva (R1-R4) y vegetativa (EM-R1), respectivamente (Figura 50).

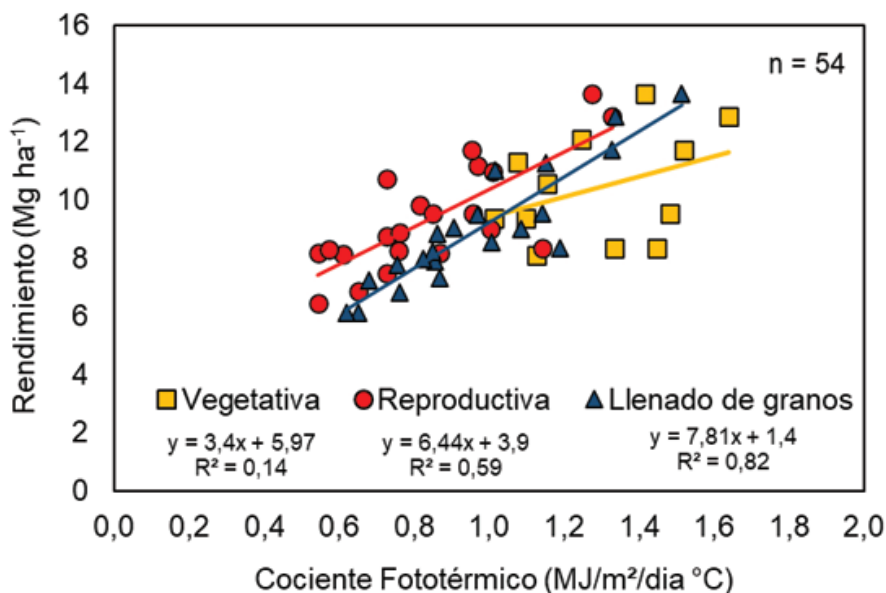


Figura 50. Relación entre el rendimiento de grano de arroz y el coeficiente fototérmico (Q) durante las fases vegetativa, reproductiva y llenado de granos bajo los niveles de restricción de radiación solar 0%, 24%, 36% e 43% durante los años agrícolas 2017/18 y 2018/19 en Rio Grande do Sul. Fuente: Rossato et al. (2020) - Equipo FieldCrops.

2.4. El fenómeno El Niño Oscilación Sur

El fenómeno El Niño Oscilación Sur (ENOS) es uno de los eventos más importantes que afectan el clima en diferentes regiones del mundo (Espe et al., 2016). En general, es posible considerarlo como la principal causa de variabilidad climática a nivel planetario, debido a su impacto en elementos meteorológicos como temperatura, precipitaciones, disponibilidad de radiación solar, entre otros (Grimm et al., 2000; 2003).

El ciclo ENOS está determinado por variaciones en la temperatura de la superficie del Océano Pacífico ecuatorial. El fenómeno se caracteriza por una fase Neutra y dos fases con anomalías de temperatura en la superficie del Océano Pacífico ecuatorial, llamado El Niño y La Niña. La fase Neutral ocurre en los años en que las aguas superficiales del Océano Pacífico

ecuatorial tienen temperaturas normales. En períodos de neutralidad, los vientos alisios soplan en dirección oeste del Pacífico occidental, forzando aguas cálidas hacia el Pacífico occidental. Durante los períodos de El Niño, hay una reducción en la velocidad de los vientos alisios y un calentamiento anormal de las aguas superficiales del Pacífico ecuatorial cerca de la costa de América del Sur. Los períodos de La Niña se caracterizan por un aumento en la velocidad de los vientos alisios, resultando en un enfriamiento anormal de las aguas superficiales del Océano Pacífico ecuatorial frente a las costas de América del Sur. Estos cambios afectan el clima a escala global con diferentes impactos según la fase del fenómeno y la región del planeta (Araújo et al., 2013).

La relación entre ENOS y la disponibilidad de radiación solar y lluvia es visible en varias regiones de Brasil. En la región sur, en general, ENOS actúa con más fuerza en las temporadas de primavera y verano. Así, cuando se manifiesta un año de El Niño, las precipitaciones ocurren en niveles superiores al promedio observado en los años de neutralidad, principalmente durante los meses de septiembre a diciembre, provocando un retraso en la siembra de los arrozales en el sur de Brasil.

El impacto del desempeño del fenómeno ENOS durante el período primaveral se puede analizar en la Figura 51, en la cual es posible comprender la dinámica de anticipación o retraso en la temporada de siembra de arroz de riego en Rio Grande do Sul. Analizando la evolución de la siembra, solo en los años de La Niña se logró sembrar el 50% del área en la primera quincena de octubre, época que presenta el mayor potencial de productividad, pues así las fases reproductivas y llenado de grano se dan en los meses de mayor disponibilidad de la radiación solar, factor fundamental para lograr una alta productividad en el cultivo del arroz (Nascimento, 2019).

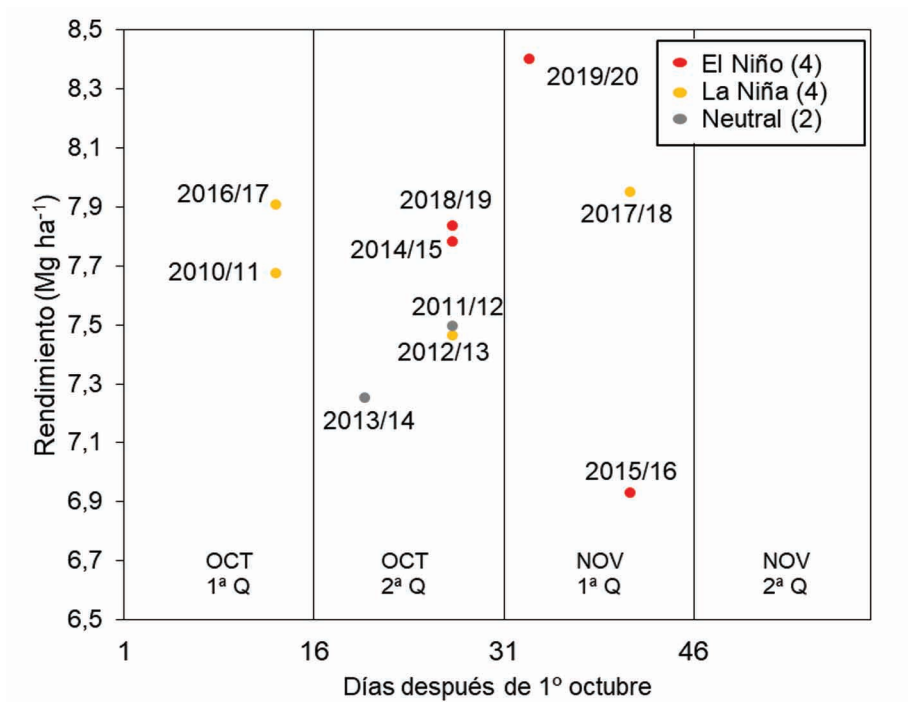


Figura 51. Rendimiento de los granos de arroz según la fecha en que se sembró el 50% de los cultivos de arroz de regadío durante el período de 2010 a 2018 en Rio Grande do Sul según la fase del fenómeno ENOS. Fuente: Nascimento (2019) - Equipo FieldCrops e IRGA.

Un hecho que debe tenerse en cuenta es la variabilidad que existió en los años de El Niño y La Niña. La Figura 51 ilustra que no todos los años de El Niño son perjudiciales para el cultivo de arroz en Rio Grande do Sul, como es el caso de los años agrícolas 2014/15, 2018/19 y 2019/20, cuando los rendimientos estaban en alrededor de 7,8 Mg ha⁻¹ en los años agrícolas 2014/15 y 2018/19, y superiores a 8,4 Mg ha⁻¹ en el año agrícola 2019/20. En un estudio realizado con el modelo de SimulArroz para el estado de RS, los años de ocurrencia de La Niña serían beneficiosos en el 56% de los casos (Tabla 11). Para los años de El Niño, se encontró que el 75% de los años serían desfavorables para el cultivo de arroz en Rio Grande do Sul (Nascimento, 2019).

Tabla 11. Porcentaje de años (%) en los que la productividad del arroz en Rio Grande do Sul es menor y mayor (entre parientes), en relación con el promedio de los años neutrales según la fase ENOS. Fuente: Nascimento (2019) - Equipo FieldCrops.

Fase de ENOS	Grupo de maduración						Media	
	Temprano		Medio		Tardío			
1. Frontera Oeste								
El Niño	68,75	(31,25)	62,50	(37,50)	62,50	(37,50)	62,50	(37,50)
El Niño muy fuerte*	100,00	-	100,00	-	100,00	-	100,00	-
La Niña	62,50	(37,50)	87,50	(12,50)	81,25	(18,75)	75,00	(25,00)
2. Campaña								
El Niño	62,50	(37,50)	75,00	(25,00)	81,25	(18,75)	81,25	(18,75)
El Niño muy fuerte*	100,00	-	100,00	-	100,00	-	100,00	-
La Niña	50,00	(50,00)	43,75	(56,25)	62,50	(37,50)	43,75	(56,25)
3. Región Central								
El Niño	43,75	(56,25)	56,25	(43,75)	50,00	(50,00)	43,75	(56,25)
El Niño muy fuerte*	100,00	-	100,00	-	100,00	-	100,00	-
La Niña	25,00	(75,00)	37,50	(62,50)	31,25	(68,75)	31,25	(68,75)
4. PI. Costera Interna								
El Niño	75,00	(25,00)	62,50	(37,50)	68,75	(31,25)	62,50	(37,50)
El Niño muy fuerte*	100,00	-	100,00	-	100,00	-	100,00	-
La Niña	43,75	(56,25)	50,00	(50,00)	43,75	(56,25)	43,75	(56,25)
5. PI. Costera Externa								
El Niño	93,75	(6,25)	68,75	(31,25)	62,50	(37,50)	75,00	(25,00)
El Niño muy fuerte*	100,00	-	100,00	-	100,00	-	100,00	-
La Niña	37,50	(62,50)	56,25	(43,75)	50,00	(50,00)	43,75	(56,25)
6. Zona Sur								
El Niño	68,75	(31,25)	62,50	(37,50)	75,00	(25,00)	62,50	(37,50)
El Niño muy fuerte*	100,00	-	100,00	-	100,00	-	100,00	-
La Niña	31,25	(68,75)	43,75	(56,25)	56,25	(43,75)	50,00	(50,00)

* Eventos de 1982/83 e 2015/16.

Al evaluar la influencia de ENOS en la productividad de los cultivos sobre las regiones arroceras de RS en los años agrícolas 2015/16 (El Niño muy fuerte) y 2016/17 (La Niña débil) utilizando el modelo SimulArroz (Figura 52), se pudo observar que, en los dos años, la productividad más alta ocurrió en la siembra temprana (15/9 y 15/10) en comparación con la siembra tardía (15/11 y 15/12).

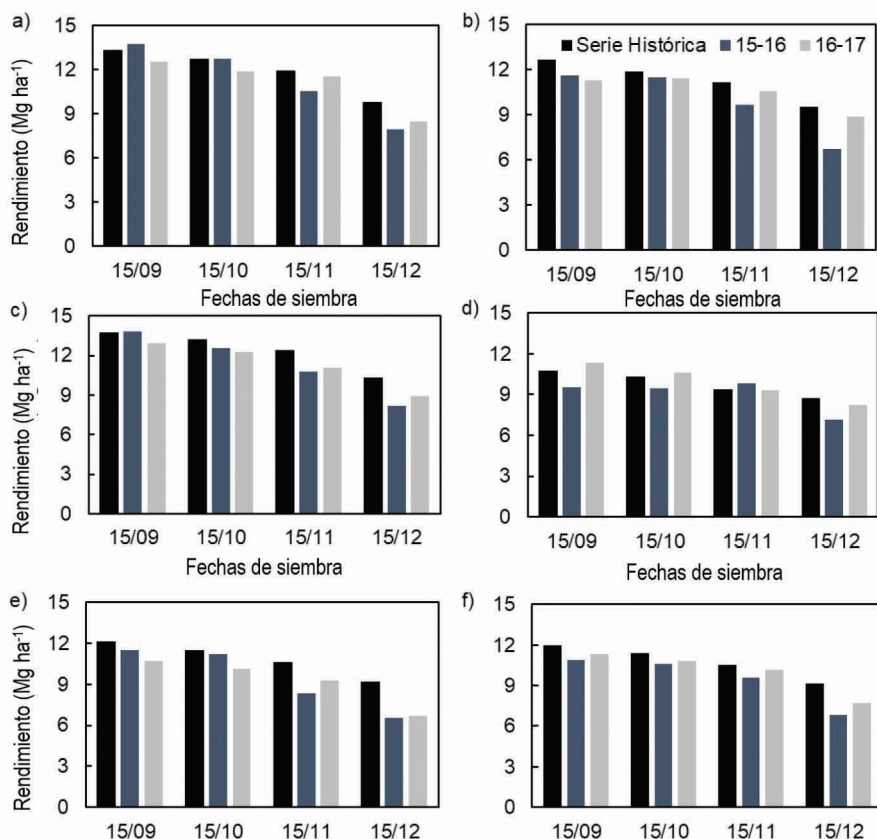


Figura 52. Rendimiento de granos de arroz de cultivares de ciclo medio simulados con el modelo SimulArroz en los años agrícolas 2015/2016 y 2016/17 y para el promedio climatológico de 30 años en las seis regiones arroceras de Rio Grande do Sul: Campaña (a), Región Central (b), Frontera Occidental (c), Planicie Costera Externa (d), Planicie Costera Interna (e), Zona Sur (f). Fuente: Rossato et al. (2018) - Equipo FieldCrops.

En general, en el año de El Niño la productividad fue mayor que en el año de La Niña en la siembra temprana. Esto ocurrió debido al posicionamiento de los momentos de mayor disponibilidad de radiación solar con los momentos más exigentes de las plantas: en el año de El Niño estudiado, el pico de radiación solar (que en la media climatológica ocurre en el mes de diciembre) ocurrió entre enero y febrero. En consecuencia, la reducción de la productividad fue menor con el retraso de la siembra en el año agrícola 2016/17 (Tabla 12).

Tabla 12. Reducción de la productividad de los granos de arroz en relación con el retraso de la fecha de siembra en las regiones arroceras del estado de Rio Grande do Sul en las campañas 2015/16 y 2016/17. Fuente: Rossato et al. (2018) - Equipo FieldCrops.

Región arroceras	Reducción de la productividad con el atraso de la fecha de siembra (kg ha ⁻¹ día ⁻¹)*	
	2015/16	2016/17
Campaña	65,2	41,6
Región Central	54,8	26,7
Frontera Oeste	63,0	44,3
Planicie Costera Externa	22,1	35,6
Planicie Costera Interna	58,8	42,7
Zona Sur	44,4	38,8
Media	51,4	38,3

* Reducción de la productividad del grano desde la siembra realizada el 15/9 hasta la siembra realizada el 15/12.

En los meses de verano, el fenómeno de El Niño puede provocar períodos de menor disponibilidad de radiación solar en la región sur de Brasil, y si esto sucede, habrá una disminución en el número de espiguillas por panoja y en consecuencia menos granos. El fenómeno de La Niña provoca una disminución de las precipitaciones en el Sur y, por tanto, hay menos nubosidad,

lo que se traduce en una mayor disponibilidad de radiación solar durante la fase de llenado de grano.

2.5. Cambio climático y el cultivo del arroz

El calentamiento global y el cambio climático asociado a él han sido objeto de debate en la comunidad científica en las últimas décadas con el fin de identificar posibles efectos antropogénicos y las causas naturales que afectan el clima terrestre. Si bien el forzamiento natural interno y externo ha estado provocando ciclos de calentamiento y enfriamiento de la atmósfera terrestre en los últimos milenios, desde la revolución industrial (siglo XVIII) el aumento de la concentración de CO₂ atmosférico se correlaciona positivamente con el aumento de la temperatura global en el siglo XX y en las primeras décadas del siglo XXI (IPCC, 2013). Los fenómenos meteorológicos extremos, como el aumento de la frecuencia de lluvias intensas, olas de calor y la falta prolongada de lluvia, se señalan como posibles impactos del cambio climático.

Los principales gases de efecto invernadero responsables del posible cambio climático son el dióxido de carbono, el óxido nítrico y el metano. Entre estos, el dióxido de carbono es el que tiene la mayor concentración en la atmósfera de la Tierra y es la fuente principal para la fotosíntesis en las comunidades vegetales del planeta. En un intento por comprender el impacto del cambio climático en la producción de alimentos, las Naciones Unidas (ONU) crearon el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC). Este panel tiene la función de publicar informes sobre el cambio climático, señalando sus causas y efectos en el planeta. Además, en este informe se dan a conocer los escenarios climáticos futuros del planeta debido a los escenarios de emisión de gases de efecto invernadero. En el quinto informe del IPCC (IPCC, 2013), se presentan cuatro escenarios climáticos futuros hasta finales del siglo XXI, denominados caminos de concentración de gases de efecto invernadero hasta el año 2100,

de las siglas en inglés RCP (*Representativa Concentration Pathways*). Los escenarios de RCP son 2,6, 4,5, 6,0 y 8,5 W m⁻². Los números para cada escenario identifican cuánta energía es retenida en la atmósfera por las diferentes concentraciones de gases de efecto invernadero en cada escenario y que conducen a un aumento de la temperatura global en cada escenario climático hasta el año 2100.

Para los escenarios RCP 2.6 y RCP 4.5, las proyecciones muestran que la concentración de CO₂ no debe exceder las 450 y 550 partes por millón (ppm) respectivamente (Thomson et al., 2011; Van Vuuren et al., 2011). En estos escenarios, habría una conciencia de las autoridades, realizando prácticas que reducirían considerablemente las emisiones hasta mediados de este siglo. En cuanto al escenario RCP 8.5, no habría conciencia y las emisiones de CO₂ seguirían aumentando hasta finales de siglo. La temperatura global también aumentaría según cada escenario. Por ejemplo, en el escenario RCP 2.6, la temperatura global aumentaría alrededor de 1 °C, y en el escenario RCP 4.5, el aumento sería de alrededor de 2 °C. En el escenario más pesimista (RCP 8.5), el incremento estaría por encima de 3,5 °C, llegando a 5 °C.

En la región sur de Brasil, las proyecciones futuras muestran una tendencia a mayores volúmenes de lluvia, lo que puede resultar en una mayor frecuencia de inundaciones y desbordes y crecidas, especialmente en áreas cercanas a los ríos. Sin embargo, incluso si las lluvias en esta región tienen una tendencia ascendente, no hay garantía de que no tengamos años de sequía (Pinheiro et al., 2013), como ocurrió en los años agrícolas 2004/2005 y 2019/2020, años de sequía severa en el Rio Grande do Sul, Uruguay y parte de Argentina.

Para las temperaturas, en general, podemos tener un aumento principalmente en las temperaturas mínimas, con noches más cálidas, inviernos menos intensos y olas de calor más frecuentes y más severas en verano. Estas proyecciones con tendencias de aumento de las lluvias junto con el aumento de la

temperatura aumentan la evaporación y evapotranspiración de los cultivos, lo que implica una mayor necesidad de agua para la agricultura.

Con el aumento de la concentración de CO_2 , podemos tener un efecto positivo directo sobre el crecimiento de las plantas, ya que el CO_2 es la fuente para la fotosíntesis. El arroz es una planta C_3 , que se beneficia más del aumento de la concentración de CO_2 atmosférico que las plantas C_4 . Sin embargo, si el aumento de temperatura va acompañado de un aumento de CO_2 en escenarios climáticos futuros, puede haber una disminución de los beneficios fisiológicos del CO_2 al aumentar la respiración y acortar el ciclo.

En un estudio sin precedentes realizado por el equipo FieldCrops sobre el impacto de los escenarios climáticos futuros en el cultivo de arroz en Rio Grande do Sul, considerando la genética actual y el manejo de los cultivos de arroz en las seis regiones arroceras del IRGA, existe potencial para aumentar la productividad de los granos en parte de las regiones con excepción de la Frontera Occidental (Figura 53), donde actualmente se da la mayor productividad en el estado pero en escenarios climáticos futuros puede incrementar la esterilidad de las espiguillas debido a las altas temperaturas diurnas (Walter et al., 2014).

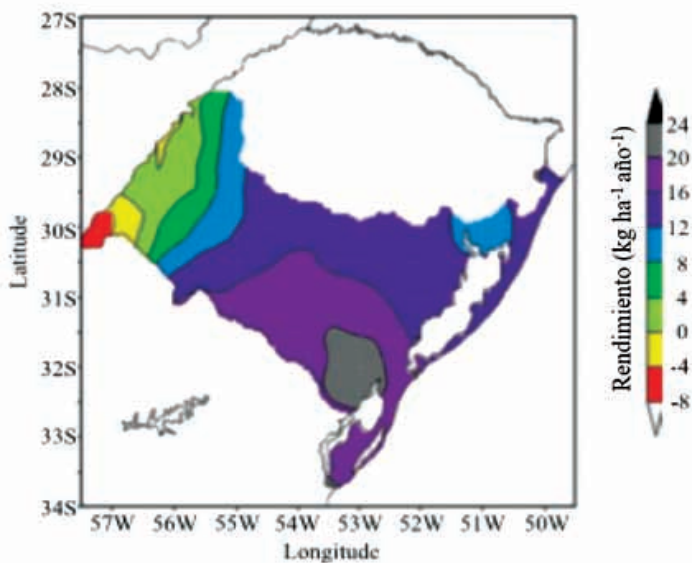


Figura 53. Tendencia anual de cambio en la productividad de los granos de arroz regado en Rio Grande do Sul para el período 1960 a 2099 proyectada en el escenario climático A1B (Solomon, 2007). Fuente: Walter et al. (2014) - Equipo FieldCrops.

Durante el siglo XXI, las proyecciones indican que las regiones más al sur de Rio Grande do Sul y Uruguay tendrían un mayor aumento de productividad por año (Figura 54). En la frontera occidental de Rio Grande do Sul, noreste de Argentina y Paraguay, podemos experimentar una disminución de la productividad hasta finales del siglo XXI (Walter et al., 2014). Los resultados también indican que, con el aumento de temperatura a lo largo del siglo XXI, la ventana para la siembra puede ampliarse. Por ejemplo, meses actualmente no recomendados para la siembra debido a las bajas temperaturas pueden resultar favorables para la implantación del cultivo del arroz, tanto en agosto como en los meses de otoño.

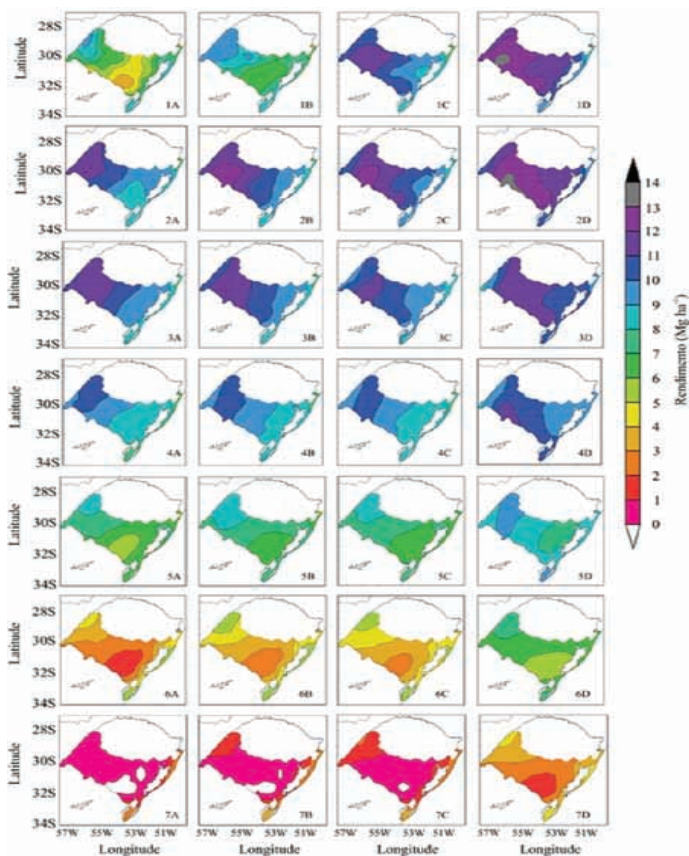


Figura 54. Rendimiento de granos de arroz regado en Rio Grande do Sul según la fecha de siembra: el primer día de agosto (1), septiembre (2), octubre (3), noviembre (4), diciembre (5), enero (6) y febrero (7). En los períodos 1960–1994 (A), 1995–2029 (B), 2030–2064 (C) y 2065–2099 (D), proyectados para el escenario climático A1B (Solomon, 2007). Fuente: Walter et al. (2014) - Equipo FieldCrops.

En las regiones tropicales, los cambios podrían ser aún mayores. Los estudios indican que los impactos negativos en la producción de arroz podrían ocurrir en la década de 2030 en Asia, principalmente debido al incremento de las temperaturas, que aumentan el gasto energético de la planta con la respiración (Masutomi et al., 2009). Estos resultados son señales para la búsqueda de estrategias de manejo y para el mejoramiento de futuros cultivares más adaptados a las altas temperaturas.

Foto: Emanuel Barchet



3. Fertilización, nutrición y manejo de suelo en arroz irrigado

César Eugenio Quintero¹; María de los Ángeles Zamero¹; Alencar Junior Zanon²; Anderson Haas Poersch²; Ary José Duarte Junior²; Bruna San Martin Rolim Ribeiro²; Filipe Selau Carlos³; Giovana Ghisleni Ribas²; Gonzalo Carracelas Garrido⁴; Ioran Guedes Rossato²; Isabela Bulegon Pilecco²; Lorenzo Dalcin Meus²; Michel Rocha da Silva²; Moises de Freitas do Nascimento²; Pablo Mazzuco de Souza²; Vladison Fogliato Pereira²; Nereu Augusto Streck².

La nutrición vegetal de acuerdo con la demanda ecofisiológica es un factor clave en la construcción de cultivos con alto potencial productivo. En este capítulo se presenta la tasa de absorción de los principales nutrientes en el cultivo de arroz bajo riego, la importancia de suministrar los nutrientes en la dosis y momento adecuado, y los efectos que el ambiente anaeróbico en cultivos inundados tiene sobre la disponibilidad de nutrientes en el suelo, con énfasis en la dinámica del nitrógeno en ese sistema. En base a esta información, se espera incrementar la eficiencia en el uso de recursos y la sostenibilidad de los cultivos de arroz.

3.1 Absorción de nutrientes y ecofisiología del arroz

La capacidad de absorción de nutrientes del cultivo a lo largo de su ciclo de desarrollo está vinculada a la disponibilidad y forma química del nutriente. La absorción de nutrientes ocurre en la solución del suelo (agua + nutrientes) y su tasa de absorción dependerá de la etapa de desarrollo de la planta. Por lo tanto, la ecofisiología y la nutrición vegetal tienen una estrecha correlación,

¹ Facultad de Ciencias Agropecuarias (FCA). Universidad Nacional de Entre Ríos (UNER). Departamento de Edafología e Fertilidad de suelo. Entre Ríos, Argentina.

² Universidad Federal de Santa Maria (UFSM), Departamento de Fitotecnia, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.

³ Universidad Federal de Pelotas (UFPel), Departamento de Suelos, Capão do Leão, Rio Grande do Sul, Brasil.

⁴ Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Tacuarembó, Uruguay.

en la que la armonía entre la disponibilidad de nutrientes y la demanda de la planta determina la tasa de acumulación de nutrientes, biomasa y, en consecuencia, el potencial productivo del cultivo.

La demanda atmosférica y el agua disponible en el suelo son factores clave para el inicio del transporte de nutrientes minerales desde el suelo a los órganos vegetales, ocurriendo mediante el proceso de transpiración. Al evaporar el agua a través de las hojas, se crea un gradiente de potencial hídrico desde las raíces hasta las hojas, creando un flujo de agua en la dirección del suelo > raíz > tallos > hojas > atmósfera, similar al bombeo de agua de una represa para el cultivo. En este bombeo de la solución del suelo en la dirección raíz > hoja, los procesos de absorción pasiva de minerales por la planta ocurren a través del flujo en masa, difusión e intercambio catiónico. En condiciones de nutrientes equilibrados según la necesidad de una planta de arroz, los nutrientes se absorben, transportan y distribuyen a los órganos de la planta (Figura 55).

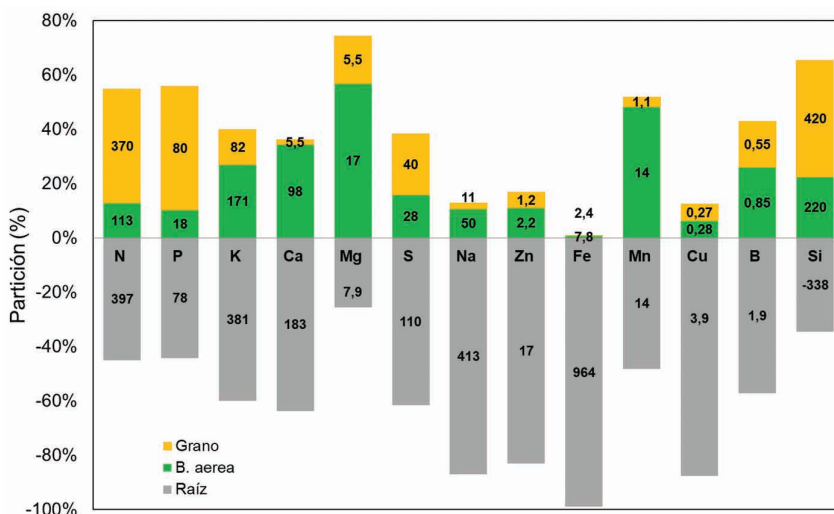


Figura 55. Partición de nutrientes en raíces, planta (tallos + hojas) y granos de arroz en condiciones de fertilización “completa” en el cultivar IRGA 424. El número dentro de la barra representa la cantidad de nutriente absorbido por plantas en miligramos para macronutrientes y microgramos para micronutrientes. Raíces con signo negativo para una mejor visualización. Fuente: Cesar Eugenio Quintero - Universidad Nacional de Entre Ríos (UNER).

La demanda de la planta de arroz de los seis macronutrientes en orden decreciente es nitrógeno (N) > potasio (K) > calcio (Ca) > azufre (S) = fósforo (P) > magnesio (Mg). Por otro lado, considerando la cantidad de nutrientes asignados en los granos, es decir, nutrientes que se exportan durante la cosecha, parece que la demanda se ve alterada, estando en orden decreciente $N > K = P > S > Ca = Mg$. En cuanto a los otros nutrientes, el silicio (Si) y el boro (B) son los que presentan mayor acumulación y exportación en granos (Figura 55). Sin embargo, la deficiencia de algún nutriente puede alterar la partición de fotoasimilados en granos, tallos, hojas y raíces (Marschner, 2012).

La demanda nutricional de los órganos reproductores (panículas) es dominante sobre los órganos estructurales (tallos, hojas y raíces), en los que la disponibilidad reducida de uno o más nutrientes impacta negativamente en el crecimiento de los compartimentos vegetales, a menor o mayor escala (Figura 55). Entre los nutrientes, el elemento cuya deficiencia tiene mayor impacto en la productividad es el N porque incide directamente en la composición de los principales componentes de la productividad (número de panículas, número de granos por panícula y peso de granos), siendo requerido por la planta en grandes cantidades y con gran exportación por los granos (Figuras 56 y 57).

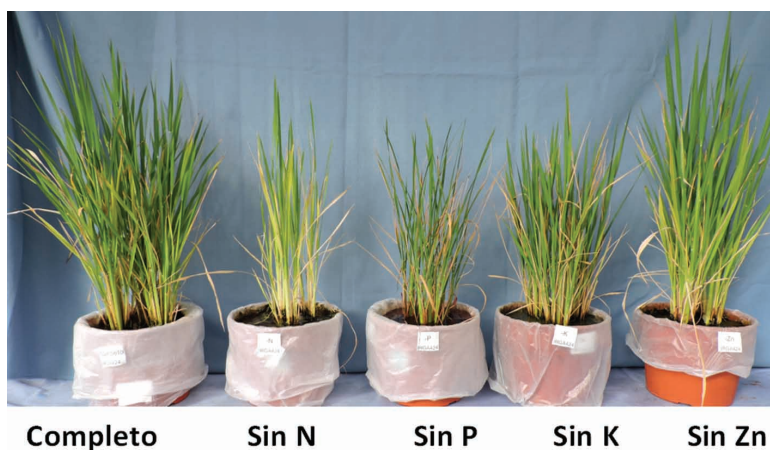


Figura 56. Efecto de la restricción de nutrientes sobre la morfología en plantas de arroz. Fuente: Cesar Eugenio Quintero - Universidad Nacional de Entre Ríos (UNER).

El fósforo (P) es la base para la composición del transporte, almacenamiento e intercambio de energía de la planta (ATP, NADP y NADPH) y la asimilación de fotoasimilados mediante la fotosíntesis. El P es el nutriente más exportado y removilizado para los granos, por lo que la restricción de este nutriente impacta más intensamente en la cantidad de granos por panícula (Figura 56). El potasio (K), a pesar de ser el mineral catiónico más abundante en una planta de arroz, no es un componente integral de los metabolitos u orgánulos celulares, desempeñando sus funciones de forma libre, presente en el citosol celular y las vacuolas como ión libre (K^+) y controlando el equilibrio osmótico intracelular. Debido a estas características, la deficiencia de K afecta la morfología de la planta con menos fuerza que N y P (Figura 56). En cuanto al requerimiento para la planta, el K es el segundo nutriente más requerido, sin embargo, con baja exportación en los granos. Como impacto, la deficiencia de K altera el macollamiento y el número de panículas, teniendo menos importancia en la formación del número de granos por panícula en comparación con N y P (Figura 57).

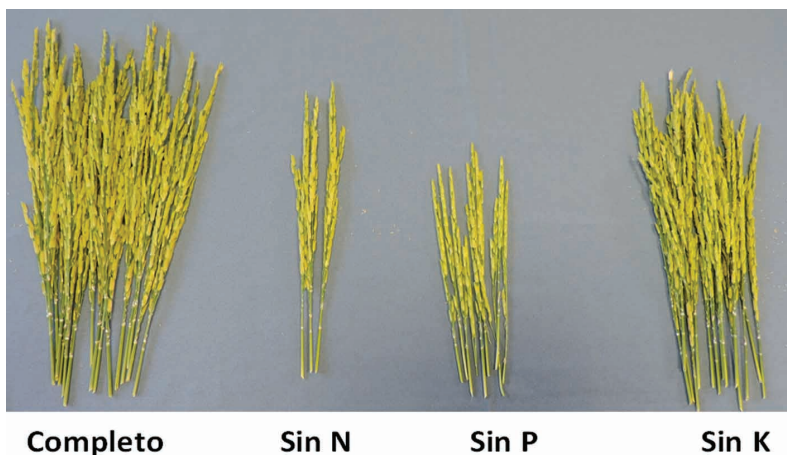


Figura 57. Deficiencia de nitrógeno, fósforo y potasio y su impacto en el número de panículas y el tamaño de las panículas en el arroz. Fuente: Cesar Eugenio Quintero - Universidad Nacional de Entre Ríos (UNER).

Durante el ciclo de desarrollo de la planta, la demanda de nutrientes varía y se puede determinar mediante la absorción de nutrientes. La tasa de absorción es la velocidad que la planta absorbe los nutrientes a lo largo del ciclo de desarrollo y varía según las condiciones edafoclimáticas, la genética y el manejo. Para comprender mejor cómo ocurre la tasa de absorción, en las Figuras 59 a 67 se presentan las curvas de absorción, partición y reasignación de macro y micronutrientes, con base en los resultados obtenidos en experimentos realizados en cultivos comerciales de alta productividad ($> 12 \text{ Mg ha}^{-1}$).

Desde la emergencia hasta V4, las plantas de arroz absorben hasta el 10% de la demanda total de N, P, K y S. Desde V4, la tasa de absorción aumenta linealmente hasta el final del macollamiento, cuando aproximadamente el 40% del P y S se absorbieron y el 60% de N y K (Figura 58). Hasta ese momento, la asignación de nutrientes está mayoritariamente dirigida a la emisión de hojas nuevas, con más del 60% de N (Figura 59) y K (Figura 61) y alrededor del 50% de P (Figura 60) y S (Figura 62) asignados en las hojas.

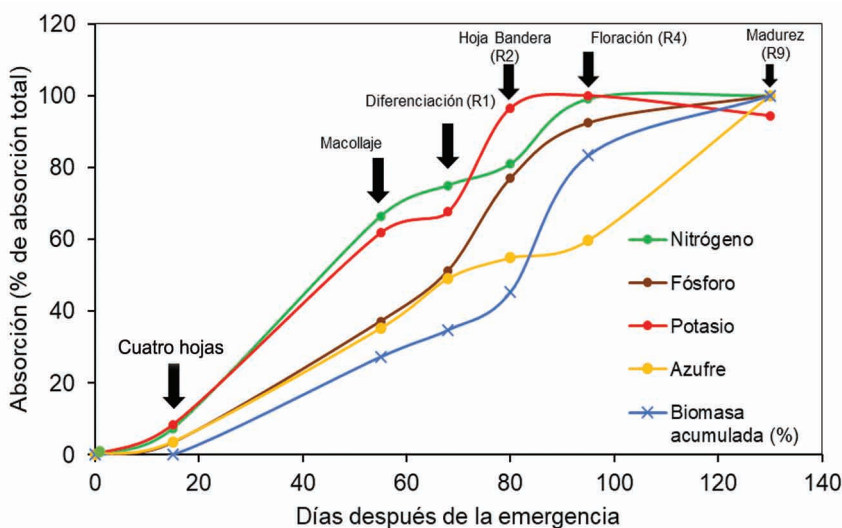


Figura 58. Tasa de absorción de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y azufre (S) en plantas de arroz a lo largo del ciclo de desarrollo en la variedad IRGA 424 RI. Macollaje = cerca del número final de macollos. Fuente: Cesar Eugenio Quintero - Universidad Nacional de Entre Ríos (UNER).

Al comienzo de la fase de desarrollo reproductivo (R1), la mayor parte de la demanda de nutrientes pasa de las hojas a los tallos y la formación de panículas (Figuras 59 a 62). De R1 a R4, la tasa de absorción de nutrientes aumenta, llegando al 100% del K absorbido en R2 (Figura 61) y N en R4, cuando una gran parte del N presente en los tallos y hojas comienza a translocarse a las panículas (Figura 59). A partir de R4, las plantas todavía absorben aproximadamente el 10% de P y el 50% de S (Figuras 60 y 62).

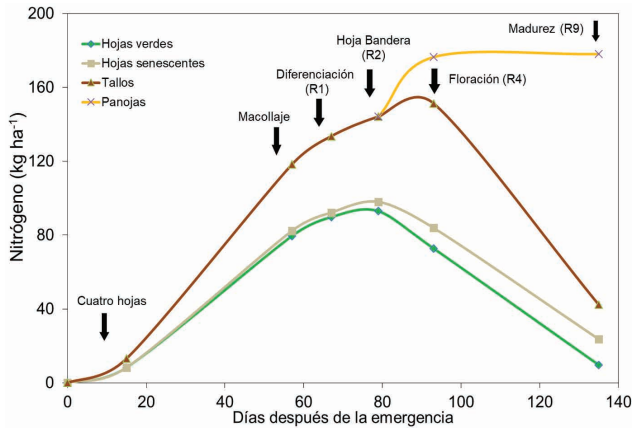


Figura 59. Tasa de absorción de nitrógeno (N) en diferentes compartimentos de la parte aérea (hojas, tallos y panículas) de la planta de arroz a lo largo del ciclo de desarrollo en la variedad IRGA 424 RI. Macollaje = cerca del número final de macollos. Fuente: Cesar Eugenio Quintero - Universidad Nacional de Entre Ríos (UNER).

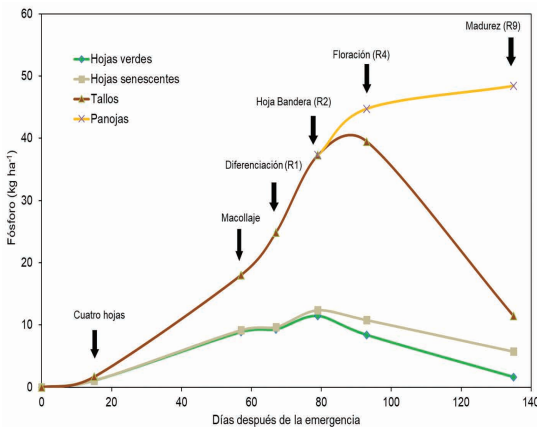


Figura 60. Tasa de absorción de fósforo (P) en diferentes compartimentos de la parte aérea (hojas, tallos y panículas) de la planta de arroz a lo largo del ciclo de desarrollo en la variedad IRGA 424 RI. Macollaje = cerca del número final de macollos. Fuente: Cesar Eugenio Quintero - Universidad Nacional de Entre Ríos (UNER).

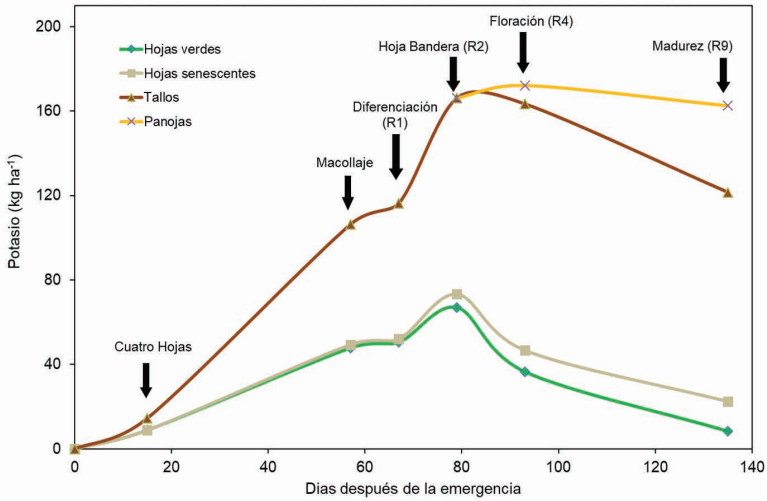


Figura 61. Tasa de absorción de potasio (K) en diferentes compartimentos de la parte aérea (hojas, tallos y panículas) de la planta de arroz a lo largo del ciclo de desarrollo en la variedad IRGA 424 RI. Macollaje = cerca del número final de macollos. Fuente: Cesar Eugenio Quintero - Universidad Nacional de Entre Ríos (UNER).

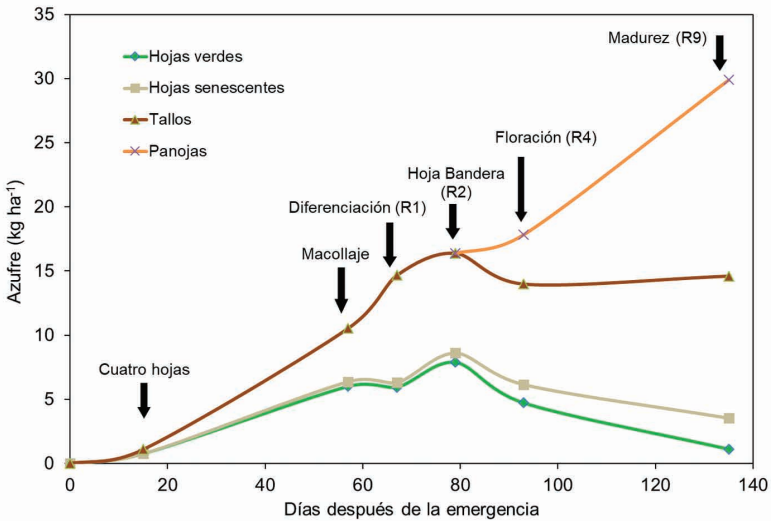


Figura 62. Tasa de absorción de azufre (S) en diferentes compartimentos de la parte aérea (hojas, tallos y panículas) de la planta de arroz a lo largo del ciclo de desarrollo en la variedad IRGA 424 RI. Macollaje = cerca del número final de macollos. Fuente: Cesar Eugenio Quintero - Universidad Nacional de Entre Ríos (UNER).

El calcio (Ca) juega un papel estructural y regulador de procesos en la planta. Es un nutriente poco móvil, con baja exportación en los granos, que presenta el requerimiento máximo hacia la floración (R4) (Figura 63A). El magnesio (Mg) tiene una función estructural en la composición de la clorofila y las enzimas activadoras de la fotosíntesis, estando directamente relacionado con la respiración, la tasa fotosintética y en la síntesis de ADN y ARN (Taiz et al., 2017). La absorción de Mg es baja hasta la diferenciación de la panícula (R1), con una alta tasa de absorción durante la fase reproductiva y una importante acumulación a los granos (Figura 63B).

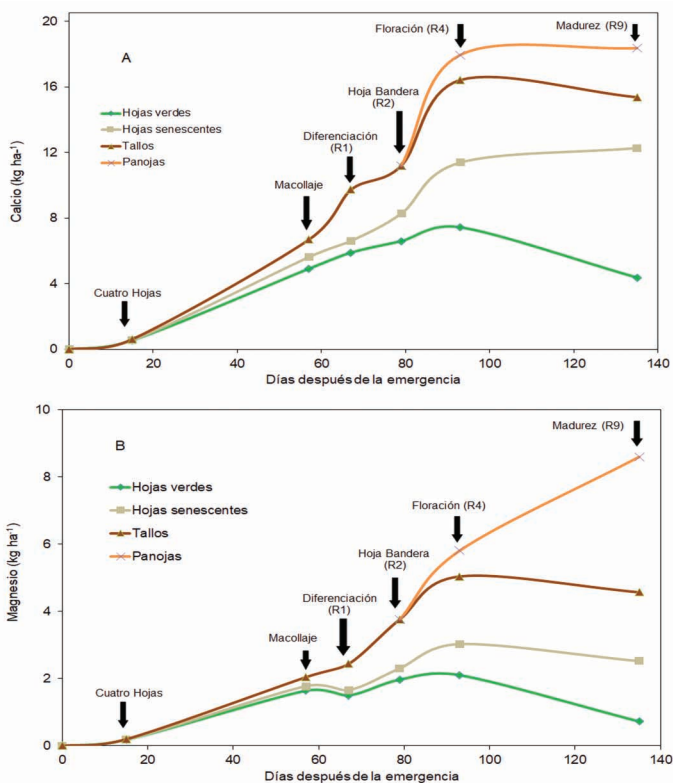


Figura 63. Asimilación de A - Calcio (Ca) y B - Magnesio (Mg) en diferentes compartimentos de la parte aérea (hojas, tallos y panículas) de la planta de arroz a lo largo del ciclo de desarrollo en el cultivar IRGA 424 RI. Macollaje = cerca del número final de macollos. Fuente: Cesar Eugenio Quintero - Universidad Nacional de Entre Ríos (UNER).

El sodio (Na) estimula el crecimiento celular y actúa como regulador en los procesos de expansión celular. En cuanto a la tasa de absorción, el Na tiene un comportamiento similar al Mg (Figura 64A). En situaciones de agua con alto contenido de sodio (cultivos cercanos a zonas costeras o cuando el agua de riego utilizada es de origen subterráneo) o suelos sódicos, puede producirse una intensa absorción de sodio y acumulación de este nutriente en los órganos de la planta, incluso a niveles tóxicos. Durante el ciclo de desarrollo, las fases en las que el arroz es más susceptible a la toxicidad del sodio (salinidad) son desde la emergencia hasta el inicio del macollamiento y la floración (SOSBAI, 2016).

La mayor parte del hierro (Fe) absorbido por la planta se retiene en las raíces (Figura 55). En la parte aérea, la concentración de Fe ocurre principalmente en el tallo, con acumulación máxima durante la etapa de floración de las plantas (Figura 64B). El Fe y el manganeso (Mn) están involucrados en la síntesis de clorofila y en el proceso fotosintético (Bashir et al., 2019). Mn es un activador de las enzimas respiratorias y juega un papel crucial en la actividad fotosintética (Taiz et al. 2017). El comportamiento de la absorción de Mn (Figura 65) es similar al del Na.

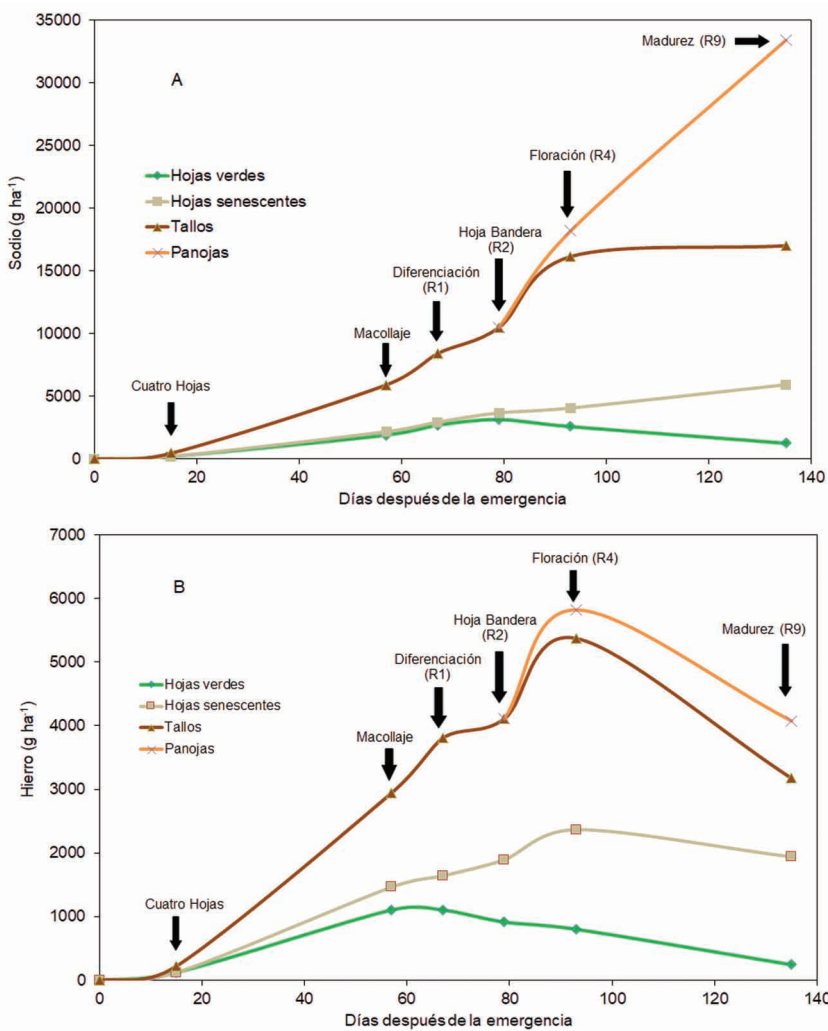


Figura 64. Asimilación de A - Sodio (Na) y B - Hierro (Fe) en diferentes compartimentos de la parte aérea (hojas, tallos y panículas) de la planta de arroz a lo largo del ciclo de desarrollo en la variedad IRGA 424 RI. Macollaje = cerca del número final de macollos. Fuente: Cesar Eugenio Quintero - Universidad Nacional de Entre Ríos (UNER).

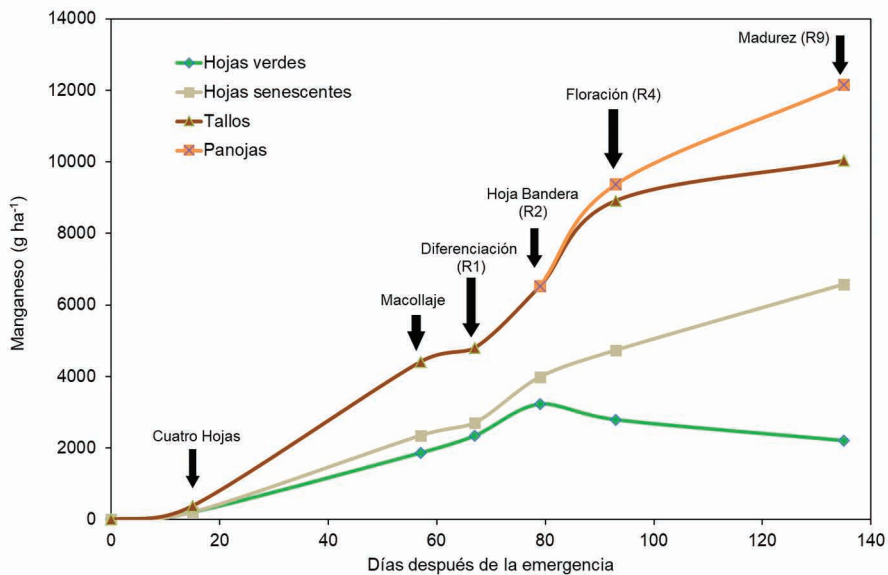


Figura 65. Asimilación de Manganeso (Mn) en diferentes compartimentos de la parte aérea (hojas, tallos y panículas) de la planta de arroz a lo largo del ciclo de desarrollo en la variedad IRGA 424 RI. Macollaje = cerca del número final de macollos. Fuente: Cesar Eugenio Quintero - Universidad Nacional de Entre Ríos (UNER).

El zinc (Zn) es un micronutriente poco móvil cuya función es la producción de hormonas, enzimas y ADN (Bashir et al., 2019). La absorción de Zn es lenta durante el macollamiento y aumenta a partir de R1, y la mayor parte del Zn absorbido se acumula en el tallo, luego durante la fase de llenado del grano será removilizado a la panícula (Figura 66A). De manera similar al Zn, la demanda de B aumenta desde la etapa R2 (Figura 66B). La función de B está relacionada con la formación de la pared celular, la translocación del azúcar y los procesos de reproducción del arroz, como la formación del tubo polínico (Shahid et al., 2018).

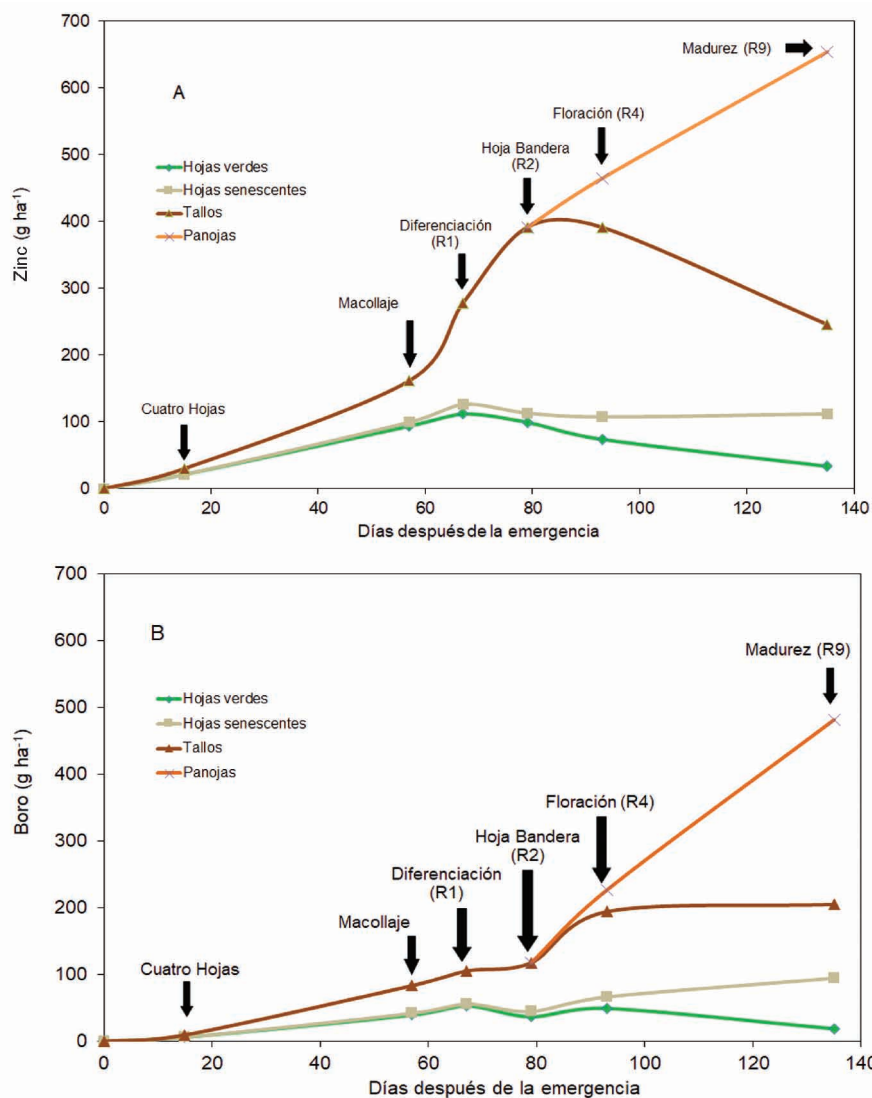


Figura 66. Asimilación de A - Zinc (Zn) y B - Boro (B) en diferentes compartimentos de la parte aérea (hojas, tallos y panículas) de la planta de arroz a lo largo del ciclo de desarrollo en la variedad IRGA 424 RI. Macollaje = cerca del número final de macollos. Fuente: Cesar Eugenio Quintero - Universidad Nacional de Entre Ríos (UNER).

El cobre (Cu) es uno de los micronutrientes con menor absorción por las plantas de arroz, y la mayor parte de la absorción ocurre después de la diferenciación de la panícula (Figura 67). Una de las principales funciones del Cu en la planta es en la translocación y transporte de fotoasimilados (Pes & Arenhardt, 2015).

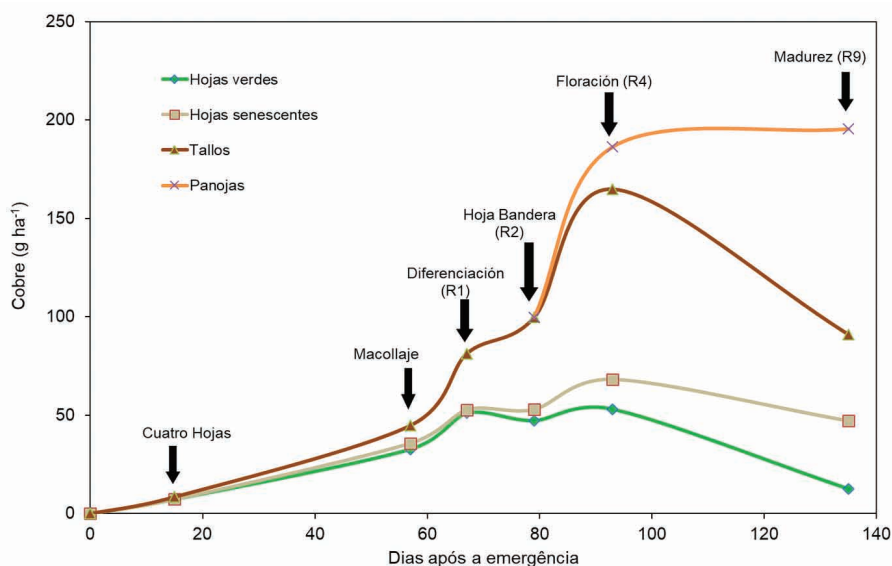


Figura 67. Asimilación de Cobre (Cu) en diferentes compartimentos de la parte aérea (hojas, tallos y panículas) de la planta de arroz a lo largo del ciclo de desarrollo en la variedad IRGA 424 RI. Macollaje = cerca del número final de macollos. Fuente: Cesar Eugenio Quintero - Universidad Nacional de Entre Ríos (UNER).

3.2. Inundación e impacto de la anaerobiosis en el suelo

El cultivo de arroz con riego por inundación tiene peculiaridades en la dinámica de los nutrientes en el suelo en comparación con los ambientes explorados por cultivos de secano o irrigados, pero no inundados. El establecimiento de la lámina de riego actúa como barrera física para la difusión del oxígeno, reduciendo la disponibilidad de este elemento en el suelo. Esta restricción altera la composición microbiana del suelo, con predominio de microorganismos anaeróbicos y anaerobios

facultativos, que utilizan aceptores de electrones alternativos al O_2 en la cadena respiratoria. Además, la condición de hipoxia (reducción de la concentración de oxígeno) altera el potencial redox, el pH y el ciclo biogeoquímico de los elementos químicos, influyendo en la disponibilidad de nutrientes para las plantas.

Uno de los reflejos directos de los cambios de reducción que ocurren en suelos inundados cultivados con arroz de regadío es la reducción de óxidos de hierro (Fe^{3+}) a la forma de hierro soluble (Fe^{2+}) (Tabla 13). El fósforo presenta una gran afinidad y tiene un fuerte vínculo con los óxidos de hierro. Así, uno de los impactos directos de la reducción de óxidos de hierro (Fe, Cu, Mn, Zn) es una mayor disponibilidad de fósforo para las plantas.

Tabla 13. Transformaciones que ocurren en los nutrientes, en función del ambiente aeróbico y anaeróbico. Fuente: Carlos, F.S. - UFPel (2020).

Nutrientes	Ambiente aeróbico	Ambiente anaeróbico
Nitrógeno	Nitrato (NO_3^-) forma predominante en el suelo	Amonio (NH_4^+) forma predominante en el suelo, porque no hay condiciones plenas para el establecimiento de microorganismos nitrificadores.
Fósforo	Adsorbido químicamente (enlaces fuertes) en óxidos de hierro	Mayor disponibilidad en la solución del suelo debido a la reducción de óxidos de hierro.
Potasio Calcio Magnesio	Retenidos e intercambiables en la CIC del suelo	El aumento de los tenores de Fe^{2+} desplazan el K^+ , Ca^{+2} y Mg^{+2} de la CIC y aumentan su concentración en la solución del suelo.

3.2.1. Acidez de suelos cultivados con arroz irrigado

Con la inundación del suelo, hay un consumo de iones H^+ y un consecuente aumento del pH (Figura 68) con una reducción en la disponibilidad de Al^{3+} en la solución del suelo. Este efecto del consumo de iones H^+ por reacciones redox se denomina “autoencalado” en suelos inundados.

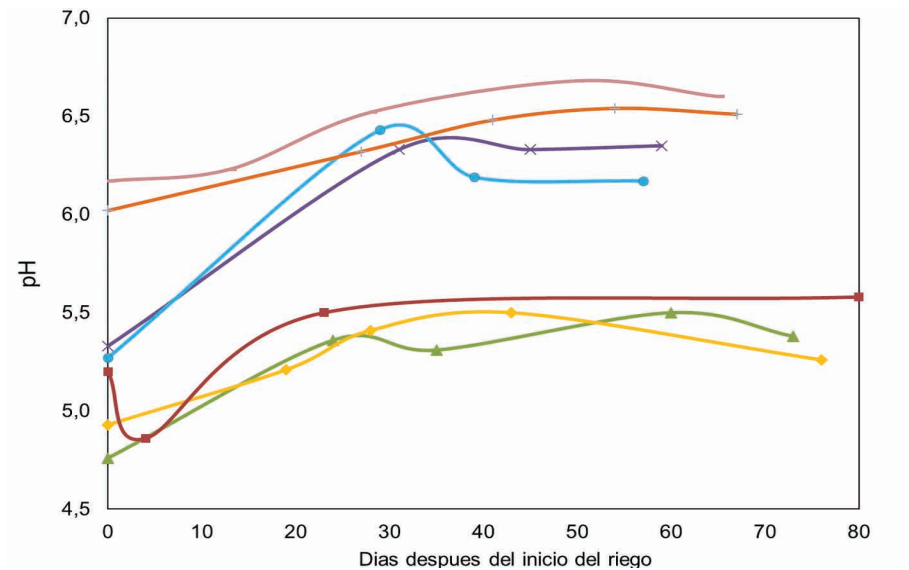


Figura 68. Evolución del pH del suelo luego de la inundación, en diferentes arrozales de regadío en la Provincia de Corrientes - Argentina. Fuente: Cesar Eugenio Quintero - Universidad Nacional de Entre Ríos (UNER).

Para que la estabilización del pH del suelo ocurra en condiciones favorables para el desarrollo de la planta, es necesario entre 2 y 5 semanas después del establecimiento de la lámina de inundación. En este sentido, la práctica del encalado en el cultivo de arroz de regadío sólo se sugiere cuando el pH en agua es inferior a 5,5 y la saturación de bases inferior al 65% en sistemas de cultivo de siembra en suelo seco. Por otro lado, en el sistema pregerminado no se indica encalado para corregir la acidez, sino para corregir deficiencias de calcio y/o magnesio.

3.2.2. Ciclo del nitrógeno en suelos inundados y fertilización nitrogenada

En ambientes inundados, el nitrógeno de la mineralización de materia orgánica o fertilizantes permanece en el suelo principalmente en forma de amonio (NH_4^+). Sin embargo, en algunos micrositios aeróbicos (primeros centímetros del suelo y cerca de las raíces), se dispone de oxígeno para el desarrollo de bacterias nitrificantes del amonio, lo que provoca pérdidas de N en el sistema por desnitrificación (Figura 69).

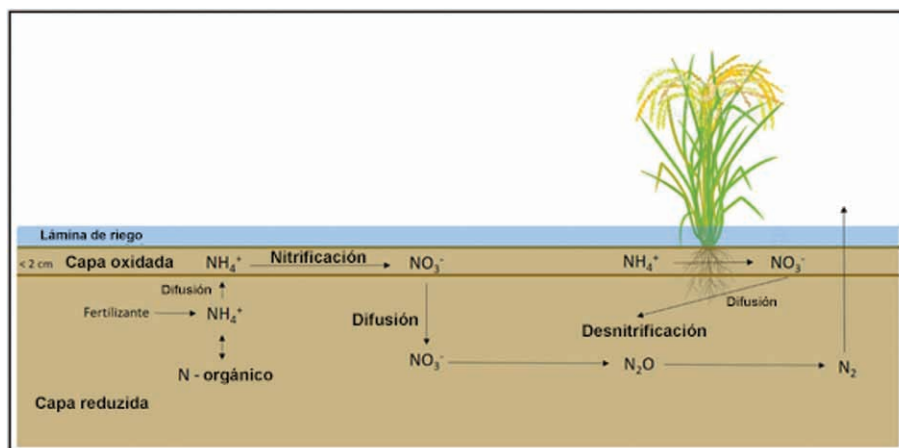


Figura 69. Reacción de nitrificación-desnitrificación y cinética de pérdida de nitrógeno en suelos inundados. Fuente: Adaptado de Bissani et al. (2004).

Para definir la necesidad de fertilización nitrogenada en el arroz, principalmente se tienen en cuenta dos criterios: el contenido de materia orgánica y la productividad esperada (Ítem 3.4). En general, los factores que forman parte de la expectativa de productividad son el potencial productivo de la variedad o híbrido, historia del área en respuesta a fertilización, condiciones climáticas y buen control de plagas, enfermedades y especialmente de malezas.

Así, las plantas con deficiencia en el suministro de N presentan síntomas como: clorosis, menor macollamiento y menor actividad fotosintética, lo que impacta en un menor rendimiento

de grano (Figura 70). Por otro lado, el exceso de nitrógeno puede provocar el acame o vuelco de plantas en algunos cultivares de arroz, alta esterilidad de las panículas y, además, mayor predisposición al ataque de enfermedades fúngicas.

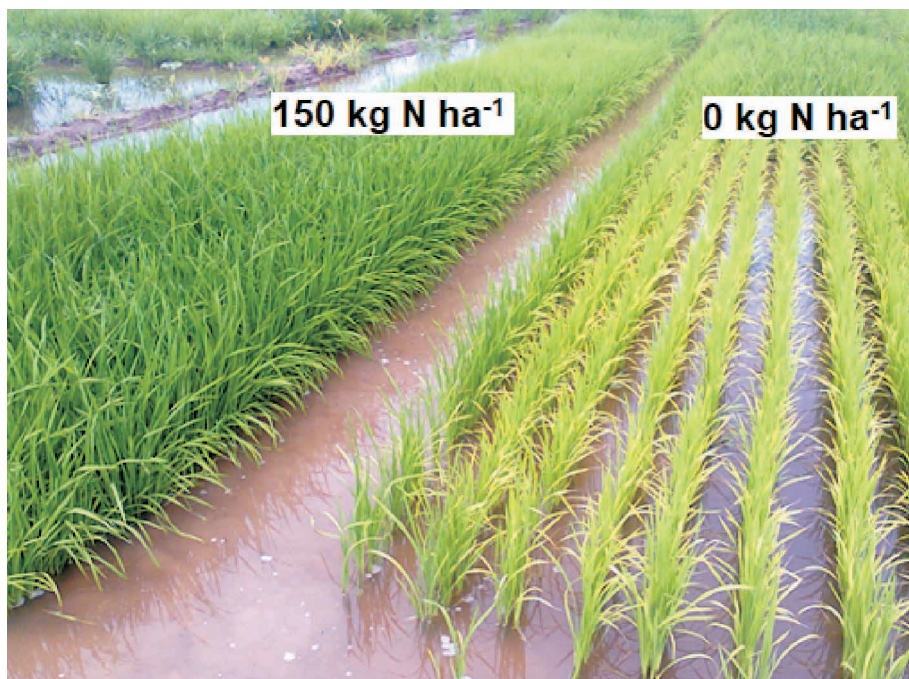


Figura 70. Dosis de nitrógeno en el cultivar de arroz Guri INTA CL. Parcela sin aplicación de N (a la derecha) y con la adición de 150 kg N ha⁻¹ (a la izquierda). EEA/IRGA, Cachoeirinha, 2014/15. Fuente: Filipe Selau Carlos - UFPel.

Los principales procesos de pérdida de N que se producen en el medio ambiente son la desnitrificación, la volatilización del amoníaco (NH₃) y la lixiviación. Sin embargo, los suelos cultivados con arroz de regadío tienen baja conductividad hidráulica y, en general, tienen una capa subsuperficial con alto contenido de arcilla que inhibe el movimiento vertical de NH₄⁺ y NO₃⁻.

El clima tiene una gran influencia en la respuesta del cultivo de arroz en relación a la fertilización, especialmente nitrógeno, debido a la variabilidad de la disponibilidad de radiación solar y en consecuencia del potencial de productividad. En general,

cuando hay mayor disponibilidad de radiación solar, la respuesta a la fertilización con nitrógeno es mayor.

3.2.3. Cationes básicos (potasio, calcio y magnesio)

El K no es un elemento directamente afectado por las reacciones redox que ocurren en suelos inundados. Sin embargo, el aumento de las concentraciones de Fe^{2+} en la solución del suelo, provoca un desplazamiento de los cationes básicos en la solución del suelo, resultando en un aumento en la disponibilidad de K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} para el cultivo de arroz de riego.

En este sentido, el K necesario para cubrir las necesidades del cultivo de arroz de regadío se suministra a través del suelo, satisfaciendo la concentración del nutriente en el suelo y en la CIC (Capacidad de Intercambio Catiónico - pH 7), aplicándose en general tanto en la fertilización de base como al voleo. El calcio y el magnesio se pueden suministrar mediante encalado y la inundación también contribuye indirectamente a aumentar la disponibilidad de estos elementos.

3.3. Toxicidad por hierro

El hierro (Fe^{2+}) es posiblemente uno de los elementos más abundantes en la solución del suelo. Debido a esto, la toxicidad por Fe^{2+} se encuentra entre los principales estreses abióticos en el arroz de regadío. A corto y mediano plazo, una alternativa para minimizar el efecto de la toxicidad del Fe^{2+} es el drenaje eficiente de la zona. Una alternativa a largo plazo puede ser encalar el área antes de sembrar el arroz, ya que el aumento de la concentración de Ca^{2+} y Mg^{2+} en la solución del suelo reduce la actividad iónica y, en consecuencia, la toxicidad para el cultivo del arroz.

3.4. ¿Cómo planear un programa de fertilización para altas productividades en Argentina?

Un plan de fertilización para altos rendimientos supone de por sí que los factores que definen el rendimiento y los que lo limitan o reducen están debidamente controlados. Esto implica que las expectativas de respuesta a las prácticas de fertilización son altas. Esta situación se da cuando se siembran variedades de alto potencial de rendimiento, en una época y densidad adecuada, con ajustado manejo del riego, la lámina de agua, el control de malezas, insectos y enfermedades.

Lo primero que se debe observar es el rendimiento actual. Si los rendimientos de los últimos años son inferiores a 6000 kg/ha seguramente existen limitaciones importantes que solucionar antes de iniciar un plan de fertilización de altos rendimientos. Las expectativas de respuesta son bajas. En esta situación, factores definitorios como la fecha de siembra o la densidad tienen un gran peso; posiblemente otros factores reductores contribuyan disminuyendo la productividad (Tabla 14).

Tabla 14. Relación entre el rendimiento actual, los factores limitantes y la expectativa de respuesta a la fertilización. Fuente: Cesar Eugenio Quintero - Universidad Nacional de Entre Ríos (UNER).

Productividad actual (Mg ha ⁻¹)	Diagnóstico	Expectativa de respuesta
< 6	Varios Factores definitorios y reductores, limitan el rendimiento. Fecha de siembra, densidad, control de malezas, etc.	Baja
6 – 9	Algunos Factores definitorios y reductores, limitan el rendimiento	Media/Alta
> 9	Buen control de las prácticas de manejo	Muy Alta

Para superar o reducir algunas limitaciones de sitio, primeramente se debe indagar sobre la condición físico-química del suelo. Un indicador sencillo para evaluar esto es el pH. Cuando el pH del suelo es mayor a 6,5 - 7,0 posiblemente existan limitaciones por exceso de Ca o Na. Si los suelos son dispersivos por Na, es recomendable la aplicación de yeso (Sulfato de Calcio) como enmienda, esto mejora la condición física del suelo, ayudando a la implantación del cultivo. En contraste, si el pH es ácido (< 5,5) y la saturación de bases es inferior al 50 - 60%, se debe analizar la aplicación de cal o dolomita (Carbonato de Ca/Mg) para reducir la toxicidad de Al. Las cantidades de enmienda a aplicar (yeso o cal) varían según el tipo de suelo, generalmente entre 2 y 4 tn/ha; y para ello se deben tener en cuenta todos los cationes intercambiables y la capacidad total de cambio.

3.4.1. Recomendaciones de fertilización para expectativas de respuesta alta y muy alta en Argentina

Estudios realizados en la Universidad de Entre Ríos (UNER – Argentina) han mostrado que los elementos más importantes que pueden limitar el rendimiento del arroz son el N, el P, el K y el Zn. Las recomendaciones de fertilización tienen en cuenta las necesidades del cultivo, la capacidad de suministrar nutrientes del suelo, la extracción de nutrientes en la cosecha, los precios, la rentabilidad y la respuesta económica a la fertilización. Por tanto, este ítem se sugieren las dosis económicas mínimas recomendadas para el cultivo de arroz en Argentina, en base a experimentos y estudios disponibles hasta el momento.

Fósforo (P)

La anaerobiosis del suelo generada por la inundación durante el cultivo de arroz provoca condiciones que favorecen una mayor disponibilidad de P. Los suelos bien dotados de materia orgánica, pueden desarrollar gran poder reductor y mineralizar

cantidades de P suficientes como para cubrir los requerimientos del arroz a expensas de las reservas de fósforo orgánico y no responder a la aplicación de P. Sin embargo, cuando ese pool se agota o los suelos son genéticamente pobres en materia orgánica, el fósforo liberado es insuficiente. Esto puede verse en los resultados de los ensayos realizados en Argentina (Tabla 15).

Tabla 15. Relación entre la disponibilidad de P en el suelo (Bray-Kurtz), la materia orgánica y la respuesta a la fertilización con fósforo (20 kg/ha) en arroz. Promedio de 33 ensayos en Argentina. Fuente: Cesar Eugenio Quintero - Universidad Nacional de Entre Ríos (UNER).

P disponible (ppm)	Materia Orgánica	Respuesta al P (kg ha ⁻¹)
< 8.5 (16 sitios)	< 3.5%	+ 481
< 8.5 (6 sitios)	> 3.5%	+ 135
> 8.5 (11 sitios)	Indiferente	- 242

Por otro lado, en suelos de pH superior a 7 la respuesta a P ha sido significativa (Quintero et al., 2015). En estas condiciones, la liberación de P que se produce por la anaerobiosis, al haber muy poco Fe activo para reducir, es escasa (Quintero et al., 2007). Coincidentemente en Arkansas (EEUU), reconocen que los análisis de P disponible no son efectivos para el arroz; sostienen que el pH del suelo es un mejor estimador de la respuesta y recomiendan mayores dosis de P cuando el pH del suelo es superior a 6,5. En base a estas experiencias es que se propone una tabla de interpretación y recomendación basada en la cantidad de P disponible, la materia orgánica y el pH de los suelos (Tabla 16). Debe tenerse en cuenta que la disponibilidad de fósforo en el suelo puede evaluarse mediante diferentes métodos de laboratorio en diferentes países. Cuando los niveles de fósforo nativo en el suelo son altos o muy altos, la respuesta a la fertilización es baja o nula. En tales casos, la fertilización se

recomienda sólo como arrancador y para el reemplazo parcial de los nutrientes extraídos en los granos.

Tabla 16. Interpretación del análisis de suelo y recomendación de fertilización para fósforo en arroz en Argentina. Dosis de P en kg ha⁻¹. Fuente: Cesar Eugenio Quintero - Universidad Nacional de Entre Ríos (UNER).

Características del suelo	P disponible – Método: a: Bray 1, b: Mehlich 1 (ppm)				
	Muy Bajo <4 ^a <2 ^b	Bajo 4-8 ^a 2-4 ^b	Medio 8-12 ^a 4-6 ^b	Alto 12-20 ^a 6-12 ^b	Muy Alto >20 ^a >12 ^b
Mat. Orgánica <3,5% y/o pH >6,5	> 30	20-30	15-20	10-15	10
Mat. Orgánica >3,5% y/o pH <6,5	20-30	15-20	10-15	10	10

Potasio (K)

El K juega un papel fundamental en la expansión celular, en el desarrollo de aerénquimas y en la translocación de fotoasimilados a los granos, por lo que tanto su deficiencia como exceso provocan estrés en las plantas.

La deficiencia de K se presenta por dos condiciones; por baja disponibilidad o por una relación negativa con los otros elementos catiónicos, como Ca, Mg y Na, por la competencia por los transportadores durante la absorción. La disponibilidad de K debe considerarse tanto por la disponibilidad de K intercambiable como por la proporción de K en el CIC. Para evaluar la disponibilidad y hacer sugerencias para la fertilización con potasio en Argentina, se puede utilizar la Tabla 17 como referencia.

Independientemente de la disponibilidad de K, en suelos donde se observen reacciones alcalinas (pH > 7), o en situaciones de salinidad (CE > 1,5 dS m⁻¹), se recomienda la aplicación de al menos 30 kg ha⁻¹ de K. La fuente más utilizada como fertilizante

es el Cloruro de Potasio (50% K) aplicado a la siembra. La fertilización con potasio se puede realizar durante la preparación del suelo, antes de la siembra y también después de la emergencia del cultivo. Las dosis altas se pueden fraccionar y aplicar en diferentes momentos hasta que se diferencia la panícula.

Tabla 17. Interpretación del análisis de suelo y recomendación de fertilización de potasio en arroz en Argentina. Fuente: Cesar Eugenio Quintero - Universidad Nacional de Entre Ríos (UNER).

K intercambiable ($\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$)	K disponible (mg kg^{-1})	Saturación K (%)	Clasificación	Dosis K (kg ha^{-1})
<0,10	<40	< 1	Muy Bajo	> 70
0,10-0,15	40-60	1-1,5	Bajo	55-70
0,15-0,25	60-90	1,5 - 2	Medio	40-55
0,25-0,45	90-180	2 - 2,5	Alto	30-40
>0,45	>180	>2,5	Muy Alto	< 30

Azufre (S)

El uso intensivo del suelo para la agricultura ha provocado una disminución de la materia orgánica por lo cual la deficiencia de azufre en los cultivos de arroz es cada vez más común. El análisis del suelo de S de sulfatos por debajo de 10 mg kg^{-1} indica la probabilidad de respuesta a la fertilización. Algunas mezclas químicas y físicas que contienen S se pueden utilizar en fertilización de base (superfosfato simple, yeso agrícola, etc). Otras fuentes pueden complementar o suplir la necesidad de S, como el sulfato de amonio, el sulfato de potasio y las ureas sulfatadas, que deben aplicarse antes del riego y/o hasta la diferenciación de la panícula (R0).

En cuanto a la fertilización con azufre en el cultivo de arroz de regadío, es importante que el suministro se realice en formas oxidadas, como por ejemplo en forma de sulfato. Cuando el azufre se suministra en forma de S elemental, es probable que las condiciones adecuadas para la oxidación de este S en caso de inundación no sean probables y, por lo tanto, no estén disponibles para las plantas.

Zinc (Zn)

Las condiciones de anaerobiosis del suelo que se establecen en el cultivo del arroz provocan una menor disponibilidad de zinc. Por ello, la respuesta a la aplicación de Zn en el arroz a nivel mundial es frecuente. Las condiciones con las respuestas más altas se observan en suelos con disponibilidad de Zn por debajo de $0,8 \text{ mg kg}^{-1}$, o $\text{pH} > 6,5$.

Nitrógeno (N)

Luego de la corrección de las deficiencias de manejo y de haber realizado el aporte necesario de los nutrientes mencionados anteriormente, el N es el elemento que permitirá elevar la productividad cerca de los niveles potenciales. La deficiencia de N está muy extendida y muy pocos suelos pueden proporcionar cantidades suficientes de N para altos rendimientos. La dosis de N a aplicar depende de la capacidad del suelo para aportar N para el cultivo (Tabla 18), y también deben tenerse en cuenta las características del cultivar, especialmente en relación con la susceptibilidad a enfermedades fúngicas y al vuelco o acame. La Tabla 18 muestra las dosis indicativas de N a aplicar en V3 antes del riego.

Tabla 18. Interpretación del análisis de suelo y recomendación de fertilización para Nitrógeno en arroz en Argentina. Fuente: Cesar Eugenio Quintero - Universidad de Entre Ríos (UNER).

Materia Orgánica del Suelo (%)	Aporte de N del suelo (kg ha ⁻¹)	Productividad sin fertilizante (Mg ha ⁻¹)	Dosis de N para altas productividades (kg ha ⁻¹)
>4,5	110 – 150	8 – 10	40 – 60
2,5 – 4,5	70 – 110	5 – 8	60 – 100
<2,5	<70	< 5	>100

La aplicación de N en el momento adecuado es extremadamente importante para maximizar la eficiencia de uso del fertilizante. Lo que en general se acepta cuando se busca una alta productividad, es que al menos dos tercios de la fertilización con nitrógeno en la cobertura deben aplicarse en suelo seco antes del inicio del riego, con la inundación del área dentro de los 3 días posteriores a la fertilización. El resto del aporte de nitrógeno debe aplicarse antes de diferenciar la panícula. En algunas situaciones, donde hay problemas con la velocidad y uniformidad del riego, se pueden usar fertilizantes con inhibidores de ureasa para mitigar la tasa de formación de NH₃.

3.5. Diagnóstico del estado nutricional del arroz a partir de tejido foliar

Para la planificación de la fertilización de un cultivo de arroz es importante realizar un diagnóstico del estado nutricional del tejido foliar. Este diagnóstico se realiza durante la temporada de crecimiento, generalmente en R2 (panoja embuchada), y la información proporcionará información adicional para el programa de fertilización de la próxima temporada de crecimiento.

El nivel crítico (NC) es la concentración mínima de un nutriente dado en la hoja debajo del cual la planta responderá en términos de productividad, crecimiento o desarrollo. El nivel de suficiencia (NS) se refiere a los rangos de concentración foliar para indicar si las concentraciones de cada nutriente son adecuadas.

Para la determinación de NC y NS se utiliza el método CND (Nutritional Composition Diagnosis), método de interpretación del análisis del tejido vegetal que toma en cuenta la interacción de los nutrientes presentes en la parte aérea para expresar el equilibrio nutricional en el tejido vegetal (Padre Y Dafir, 1992). En este método, se consideran todas las interacciones entre los nutrientes, de modo que el desequilibrio en la proporción de un nutriente afecta la disponibilidad de otro en la planta. Para determinar la composición de nutrientes en las plantas, es necesario recolectar material vegetal (hojas de diagnóstico) en puntos aleatorios y representativos del cultivo en hoja bandera (R2), según lo dispuesto en el manual de encalado y fertilización RS y SC. (CQFS-RS / SC, 2016).

Los valores de referencia de NC y NS para el cultivo de arroz en el sur de Brasil fueron estimados por el equipo FieldCrops a través de una base de datos de 74 cultivos (Tabla 19). La determinación de estos índices puede indicar el mejor manejo nutricional con el fin de incrementar la eficiencia del uso de los recursos y la sustentabilidad del sistema productivo, pues además de reducir el costo de producción mediante el uso adecuado de los nutrientes, también hay menor impacto ambiental debido a pérdidas reducidas y aplicaciones innecesarias de nutrientes.

Tabla 19. Ecuación de regresión entre el índice de CND (diagnóstico de composición nutricional) y la concentración de macro y micronutrientes en el tejido foliar de arroz, niveles críticos (NC) y nivel de suficiencia (NS) de los nutrientes en el tejido foliar calculado usando el método CND para arroz de regadío en el sur de Brasil. En las ecuaciones de regresión, la concentración de macronutrientes (N, P, K, Ca y Mg) está en g del nutriente por g de materia seca foliar y la concentración de micronutrientes (Zn, Fe, Mn y B) está en mg del nutriente por kg de materia seca foliar. Fuente: Pereira et al., (2020) - Equipo FieldCrops y UFSM.

Nutriente	Ecuación	R ²	NC	FS
.....g kg ⁻¹				
N	CND=4,9933ln(N) - 49,709	0,29	21,1	19,5 -22,6
P	CND=5,37945525ln(P) - 38,88422483	0,60	1,4	1,2-1,5
K	CND=5339738370ln(K) - 41,64523273	0,55	2,2	2-2,4
Ca	CND=2,5745ln(Ca) - 20,68	0,93	3,1	2,1- 4
Mg	CND=-0,00000632(Mg) ² + 002195414(Mg)-18,29618007	0,53	1,4	1,3-1,5
.....mg kg ⁻¹				
Zn	CND=2,3741ln(Zn) - 6,6611	0,95	16,5	16,5
Fe	CND=2,9045ln(Fe) - 16,437	0,92	286,9	286,8 - 287
Mn	CND=1,7016ln(Mn) - 10,199	0,97	371,4	197-546
B	CND=2,8178ln(B) - 3,7787	0,92	3,8	3,8

Se espera que este método comprenda mejor el estado nutricional de los cultivos de arroz y la eficacia de los fertilizantes utilizados. Para obtener más información, se está desarrollando un *software* llamado CND Arroz Irrigado. Donde los productores puedan tener el diagnóstico nutricional de las plantas a partir de entradas simples, como el contenido nutricional de las plantas en sus cultivos.

Foto: Magali Bastiani



4. Uso del agua en el arroz irrigado

Cleber Maus Alberto¹, Felipe Schmidt Dalla Porta¹, Gonzalo Carracelas Garrido², Alencar Junior Zanon³, Anderson Haas Poersch³, Ary José Duarte Junior³, Bruna San Martin Rolim Ribeiro³, Giovana Ghisleni Ribas³, Ioran Guedes Rossato³, Isabela Bulegon Pilecco³, Lorenzo Dalcin Meus³, Michel Rocha da Silva³, Moises de Freitas do Nascimento³, Pablo Mazzuco de Souza³, Vladison Fogliato Pereira³, Nereu Augusto Streck³.

El agua es un recurso escaso en todo el mundo (Mekonnen & Hoekstra, 2016) y racionalizar su uso es fundamental para producir alimentos de forma sostenible. La escasez de agua puede ser impuesta a los agricultores no solo por sequías, sino también por la legislación relacionada con el medio ambiente y por la presión política de los responsables de la toma de decisiones. El aumento de la población mundial, asociado a la mayor necesidad de producción de alimentos, podría determinar un aumento de la demanda de agua y una mayor competencia por este recurso entre los sectores agrícola, industrial y urbano.

Uno de los principales aspectos relacionados con la sostenibilidad en la agricultura es maximizar la eficiencia del uso del agua (EUA), aumentando la productividad del agua de riego utilizada o el total de entrada de agua incluyendo además las lluvias (kg arroz m⁻³ de agua aplicada). Otra forma de medir EUA, es calcular la productividad del agua en relación al agua transpirada (kg de arroz m⁻³ de agua transpirada), lo que puede indicar cultivares y manejos más eficientes en el uso del agua.

El cultivo de arroz de regadío en tierras bajas requiere grandes cantidades de agua, ya que es necesario mantener la lámina de agua en la superficie del suelo durante la mayor parte (aproximadamente $\frac{3}{4}$) del ciclo de desarrollo del cultivo, a fin de

¹ Universidad Federal de Pampa (UNIPAMPA), Campus Itaqui, Itaqui, Rio Grande do Sul, Brasil.

² Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Tacuarembó, Uruguay.

³ Universidad Federal de Santa Maria (UFSM), Departamento de Fitotecnia, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.

maximizar el crecimiento y la productividad de granos. En riego por inundación, el uso de agua por el cultivo del arroz varía de 8.000 a 15.000 m³ ha⁻¹, haciendo que la eficiencia de este recurso sea de aproximadamente 1,4 kg arroz por cada m³ de agua de riego utilizado en países como Uruguay y otras zonas subtropicales de Sudamérica respectivamente (Carracelas et al., 2019c). A pesar del gran consumo de agua, América del Sur todavía tiene una mayor eficiencia en relación a los valores reportados alrededor del mundo, que van desde 0,2 a 1,1 kg m⁻³ de agua (Bouman et al., 2007; Shudir - Yadav et al., 2020).

Además del riego por inundación continua, existen alternativas de manejo para el cultivo de arroz de regadío, a saber: riego de lámina variable o intermitente, MSA (Mojado y Secado Alternativo), control y seguimiento de lámina de agua, uso de mangas de riego y riego por aspersion mediante un pivote central (aeróbicos). Estas alternativas permiten maximizar la eficiencia y productividad del agua de riego.

La eficiencia en el manejo del riego en los arrozales de la Sudamérica subtropical ha ido en aumento en las últimas décadas, tanto por el consumo de agua que se ha reducido como por los niveles de productividad que han aumentado. Este incremento en la eficiencia se debe principalmente a la entrada temprana de agua asociada a la aplicación de nitrógeno en cobertura, además del lanzamiento de cultivares resistentes a enfermedades y con alto potencial productivo (Menezes et al., 2013). El manejo del riego es una práctica importante para elevar los niveles de productividad, ya que además de que el agua actúa incrementando la disponibilidad de nutrientes en la solución del suelo, tiene un papel fundamental en el manejo de malezas y en la regulación de cambios térmicos en suelo y aire. (Reche et al., 2016).

Existe más de una forma de gestionar el riego en los arrozales, que dependen de la región de producción y del sistema de cultivo adoptado: los suelos típicos de la producción de arroz se clasifican como “tierras bajas” (o suelos de llanura aluvial⁹),

⁹ Esta condición de inundación está relacionado con las características propiedades físicas de estos suelos, como baja profundidad efectiva, porosidad y aireación, alta densidad y principalmente la deficiencia en la capacidad de drenaje.

que tienen por característica principal la facilidad de inundación en al menos un período del año.

A continuación, se discute el método de riego superficial a través de dos sistemas, inundación o lámina continua y lámina variable MSA (del inglés Alternate Wetting and Drying - AWD), y el método de aspersión por pivote central para el cultivo de arroz. La elección del método y sistema de riego debe basarse en factores como el tipo de suelo, el grado de inversión, la planificación del uso de la tierra y la capacidad de suministro de agua.

4.1. Riego por inundación

El sistema de riego por inundación es un método de riego de superficie, caracterizado por el mantenimiento de una capa permanente de agua en el suelo durante la mayor parte del ciclo de cultivo. En este sistema se puede realizar tanto la siembra directa en suelo seco como el sistema pregerminado. En este método de riego superficial es necesario nivelar o sistematizar el cultivo para mantener la profundidad del agua durante el desarrollo del cultivo. La lámina aplicada debe ser suficiente para saturar el suelo y hacer frente a la evapotranspiración del cultivo y las pérdidas por percolación e infiltraciones laterales (Yoshida, 1981; Fornasieri Filho & Fornasieri, 2006).

Además del momento de inundación e inicio del riego, la altura uniforme de la lámina de agua es otro factor importante a gestionar, especialmente en las primeras etapas vegetativas. La altura de la lámina de agua debe ser de 2,5 a 5 cm, en estas condiciones se da el mejor desarrollo de la planta y eficiencia en el uso del agua. Láminas de más de 10 cm pueden causar una reducción del macollamiento y la elongación de la planta en las primeras etapas, aumentando las posibilidades de vuelco. Para saturar el suelo rápidamente y formar la lámina de agua en el inicio del riego, se recomienda un caudal promedio entre 3,0 a 5,0 L

$\text{s}^{-1} \text{ha}^{-1}$, mientras que para el mantenimiento de la lámina de riego se recomiendan caudales de $0,70$ a $1,75 \text{ L s}^{-1} \text{ha}^{-1}$ (Stone, 2015).

En el sistema de cultivo de arroz pregerminado, la inundación de la parcela se produce antes del proceso de siembra debido a las operaciones de preparación del suelo. Este sistema de cultivo tiene algunas desventajas y la principal es la alteración y pérdida de estructura del suelo, principalmente debido a la permanencia de la lámina de agua por largos períodos. Como ventaja de este sistema, se puede destacar el ahorro de agua durante el ciclo de cultivo, ya que las lluvias se pueden utilizar como fuente para la formación y mantenimiento del nivel del agua.

En el sistema de siembra de arroz en suelo seco, la formación de la capa de agua debe realizarse en el inicio del macollamiento, ya que el momento de inicio del riego y la velocidad con la que se completa la formación de la lámina de riego son claves en la gestión para una alta productividad. En un estudio de 266 arrozales en Rio Grande do Sul, se encontró que las pérdidas de productividad debido al retraso en completar el riego y la formación de la lámina de agua pueden alcanzar hasta $430 \text{ kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ (Figura 71). Estas pérdidas ocurren principalmente debido a la disminución en la eficiencia del uso de nitrógeno debido a la volatilización de la urea y la menor eficiencia en el control de malezas. La velocidad para completar el riego depende principalmente del caudal del sistema de riego, la cantidad de entradas de agua en el campo, el tipo de suelo y la ocurrencia de lluvias.

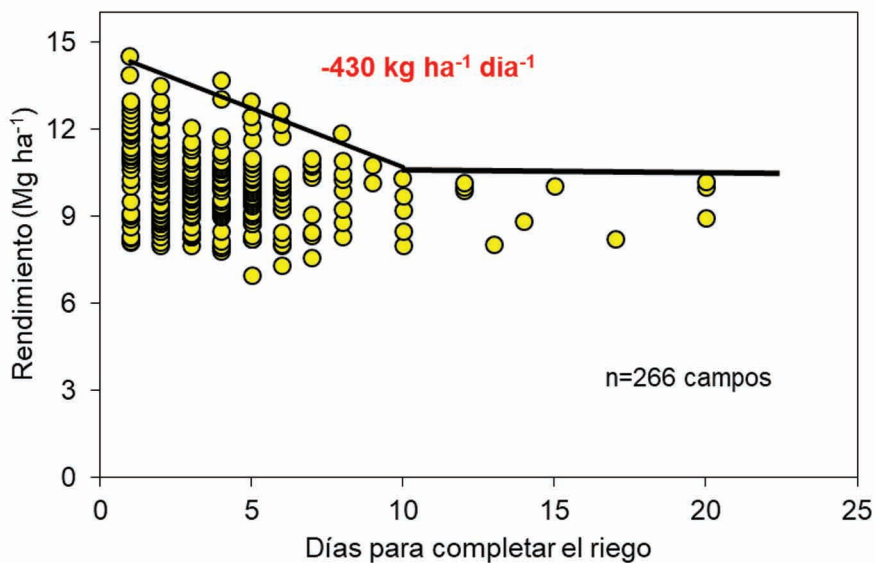


Figura 71. Productividad de grano (Mg ha^{-1}) en función de los días para completar el riego en los arrozales monitoreados por el proyecto 10+ en los años agrícolas 2016/2017, 2017/18 y 2018/19 en el estado de Rio Grande do Sul. La línea negra representa la función límite. El valor rojo ($-430 \text{ kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$) representa la máxima pérdida de productividad por día en función del número de días para completar el riego. El cultivar IRGA 424 RI representa el 94% de los puntos analizados. Fuente: Equipo FieldCrops, UFSM e Irga.

4.1.1. Manejos alternativos al riego por inundación continua

Existen varias alternativas de manejo al riego por inundación continua que tienen como objetivo aumentar la productividad del agua, reducir la acumulación de arsénico en los granos (Capítulo 8) y reducir los impactos ambientales debido a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (Linguist et al., 2015 ; Tarlera et al., 2016). Entre estos manejos alternativos, destacan el riego intermitente (RI) y las técnicas que alternan entre periodos de secado e inundación del suelo, conocido como mojado y secado alternos (MSA), del inglés *Alternate Wetting and Drying - AWD*.

4.1.1.1 Riego por inundación intermitente

El manejo del riego por inundación intermitente consiste en interrumpir el riego con el fin de dejar resumir la altura de la lámina de agua, y volver a inundar antes de que el suelo se seque, de manera que la humedad del suelo se mantenga siempre en condiciones próximas a la saturación. El aumento en la eficiencia del uso del agua se produce principalmente por el aumento en el uso de agua de lluvia y por la reducción de pérdidas laterales (Massey et al., 2014; Carracelas et al., 2019c).

Buscando perfeccionar esta técnica, estudios en Uruguay han identificado manejos que permiten reducir el gasto de agua sin disminuir el rendimiento de grano. Estas gestiones permitieron un ahorro de agua en torno al 35% ($4000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), en relación al riego por inundación continua, con mantenimiento de la productividad y calidad de los granos. Cuando se adopta el riego intermitente a lo largo de todo el ciclo de cultivo, existe la posibilidad de una reducción en el porcentaje de granos enteros, por lo que se deben tomar en cuenta las condiciones climáticas y los tipos de suelo de la región para la toma de decisiones.

4.1.1.2 Riego por Mojado y Secado Alternado (MSA) o *Alternate Wetting and Drying (AWD)*

Esta técnica consiste en periodos alternos de riego superficial y secado del suelo. La diferencia entre MSA y riego por inundación intermitente es que en el MSA hay un consumo completo de agua y secado del suelo. Este manejo puede estar asociado a diferentes niveles de estrés hídrico en las plantas, debido a la combinación de los días de mantenimiento del suelo seco y la fase de desarrollo del cultivo. No se recomienda que el potencial hídrico en el suelo alcance niveles por debajo de 20 kPa, ya que en este nivel de estrés se produce una reducción del rendimiento de grano (Carrijo et al., 2017). En un estudio realizado en Uruguay, utilizando MSA en la fase vegetativa, fue posible reducir

el consumo de agua en un 50% con una reducción en la productividad del grano de alrededor del 15% en relación al riego por inundación continuo (Figura 72). Se recomienda esta técnica cuando se intenta reducir la acumulación de arsénico en los granos de arroz.

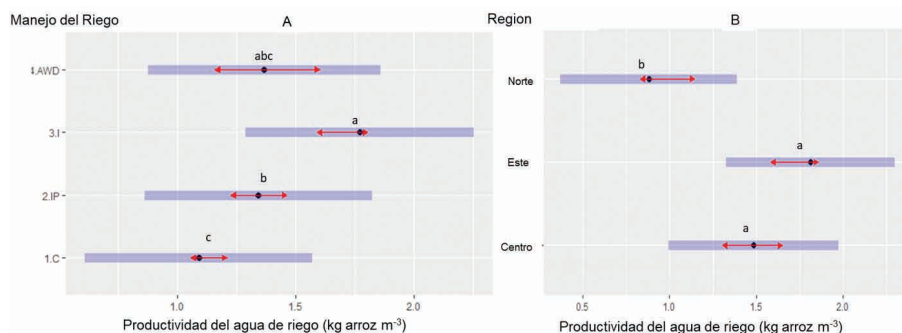


Figura 72 - Productividad del agua de riego en función del método de riego del arroz (A) y en diferentes regiones de Uruguay (B). Los círculos negros representan los promedios, las barras azules indican el error estándar y las flechas rojas el intervalo de confianza de Tukey. Letras diferentes indican una diferencia significativa entre tratamientos ($P < 0.5$). C: riego por inundación continuo, IP: riego intermitente hasta R1: riego intermitente durante todo el ciclo, AWD: alternancia entre suelo húmedo y seco (hasta el 50% de la capacidad de campo) hasta R1. Fuente: Carracelas et al. (2019c).

Es importante considerar que el ahorro de agua a nivel de cultivos comerciales sólo se justifica cuando está asociado a una reducción en el costo de riego, de manera que la disminución en la productividad del grano se compensa con la reducción de costos, o, cuando existe la posibilidad de explotar una mayor área de producción irrigada, de modo que esta área maximiza el beneficio total de la operación.

Para adoptar esta técnica, es necesario que el área tenga una nivelación uniforme y un buen flujo de agua, de modo que sea posible volver a inundar el área de manera rápida y precisa. De lo contrario, la posible reducción de la calidad industrial y/o productividad del grano hace inviable la práctica. Como alternativa de manejo para facilitar la re-inundación, el uso de mangas de riego (Figura 73) es un sistema eficiente y fácil de implementar a

escala comercial, con capacidad para incrementar la productividad y reducir el consumo de agua, debido a la facilidad y velocidad con la que se puede restaurar la lámina de agua (Massey et al., 2014). Otra técnica eficiente para adoptar este manejo es la nivelación con un nivel variable, que permite reducir costos y aumentar la velocidad del flujo de agua en el campo.



Figura 73 - Inicio del riego con el uso de mangueras poco después de la aplicación de nitrógeno en suelo seco en campos de arroz irrigados. Alegrete, Rio Grande do Sul, 2019. Fuente: Cássio Kostulski.

El uso de esta tecnología también facilita la adopción de MSA. El monitoreo del riego por imágenes satelitales y drones permite el monitoreo de cultivos y la detección rápida de áreas con problemas en riego, fertilización o enfermedades, facilitando decisiones de manejo en busca de maximizar la productividad del grano (Carracelas et al., 2017b).

4.1.2 Finalización del riego y manejo poscosecha

La supresión del riego en el cultivo de arroz y el manejo del rastrojo dejado por el cultivo juegan un papel importante en el manejo poscosecha y en la preparación temprana del área para la próxima cosecha. La cantidad de paja producida en un cultivo de arroz es directamente proporcional al rendimiento de grano, en una relación llamada índice de cosecha. El índice de cosecha (IC) de los cultivares modernos es de alrededor de 0,5, por lo tanto, para un cultivo que produce 12 Mg ha^{-1} de granos, la producción total de materia seca de partes aéreas será de 24 Mg ha^{-1} , de los cuales 12 Mg ha^{-1} serán residuos o rastrojo que quedarán en el suelo. Esto puede ser positivo desde el punto de vista del sistema de labranza cero, pero posiblemente dificulte la preparación del suelo para el próximo cultivo de arroz.

Quiénes determinarán la tasa de descomposición del rastrojo son los microorganismos presentes en el ambiente, donde los microorganismos aeróbicos son más eficientes en la descomposición de la paja que los microorganismos presentes en los suelos inundados. Por tanto, es importante suprimir el riego para que la cosecha se realice en suelo seco, ya que además de proporcionar ahorro de combustible y menor desgaste de la maquinaria, permite que la descomposición de la paja se produzca más rápidamente. La cosecha en suelo seco también evita que el productor tenga que laborear el suelo para corregir las huellas de la máquina, lo que proporciona las condiciones para que el próximo cultivo se lleve a cabo mediante siembra directa y también que el banco de semillas de malezas no sea estimulado para que germine.

En las cosechas realizadas a mediados de febrero y marzo en Rio Grande do Sul, Uruguay y Argentina se acentúa el rebrote del rastrojo. En este sentido, es importante realizar alguna práctica de manejo para controlar esta brotación, como por ejemplo, el uso de un rolo de cuchillas o la aplicación de un herbicida sistémico. Los beneficios de este manejo contribuyen a la descomposición de esta paja, favorecen que el rastrojo esté en contacto con el suelo y evitan que produzca semillas.

Para tomar una decisión sobre cuándo realizar la supresión del riego, es importante observar las condiciones climáticas, el tipo de suelo y el cultivar. En suelos arcillosos (con baja conductividad hidráulica), la supresión del riego puede ocurrir de 10 a 15 días después de la plena floración. Sin embargo, los suelos arenosos tienden a secarse más rápidamente, lo que asociado a altas temperaturas puede apresurar la maduración y provocar una pérdida acelerada de humedad en el grano, que puede comprometer el rendimiento de granos enteros. En estas situaciones, se recomienda que el productor suprima el riego más cerca de la cosecha para evitar una disminución en el rendimiento de granos enteros.

4.2. Riego por aspersión

El riego por aspersión tiene como objetivo aumentar la eficiencia del uso del agua en los arrozales, con la posibilidad de reducir el uso del agua entre un 40 y un 60% y aumentar la eficiencia en el uso de los recursos, siempre que las características técnicas del manejo del cultivo sean conocidas y adaptadas (Pinto et al., 2016). En América del Sur, el principal sistema de riego por aspersión es a través de un pivote central (Figura 74).



Figura 74 - Vista parcial de un pivote central en cultivo de arroz en tierras bajas, en el municipio de Maçambará, RS, 2019. Fuente: Rodrigo Toledo.

Pensando en el beneficio económico del productor, el riego por aspersión a través de un pivote central permite reducir los costos de producción hasta en un 15% debido a la menor demanda de mano de obra, eliminación o disminución de la preparación del suelo, menor depreciación de la maquinaria, reducción de costos con bombeo de agua, entre otros. La posibilidad de implementar la siembra directa es un factor importante a mencionar en este sistema de producción, la reducción de la actividad mecanizada, resultante de la remoción de curvas de nivel (taipas), permite el manejo conservacionista del suelo. Sumado a esto, también se facilita la posibilidad de rotación de cultivos e integración cultivo-ganadería (ILP), permitiendo al productor diversificar la matriz productiva e incorporar el cultivo tradicional de arroz en áreas no favorables para el cultivo de arroz inundado. Otro factor positivo es que la remoción de la lámina de agua reduce la emisión de CH₄ (metano), un gas importante que provoca el efecto invernadero, siguiendo los conceptos propugnados por la agricultura baja en carbono, mitigando los efectos del calentamiento global (Buendía et al., 1997).

Sin embargo, a pesar de todas las ventajas para el sistema de producción y la creciente adopción de este método de riego en los últimos años, su uso para la producción de arroz todavía genera dudas entre los productores. Entre las principales incógnitas, hay alguna duda sobre cómo el arroz cultivado tradicionalmente en sistemas de riego por inundación se adapta a las condiciones aeróbicas. También, cuáles son los mejores cultivares para usar en este sistema? Y cuál es el requerimiento de agua en las diferentes etapas de desarrollo? A continuación, se abordarán aspectos relacionados con la práctica del riego por aspersión a efectos de responder algunas de estas dudas.

4.2.1. ¿Cómo se ve afectado el desarrollo y crecimiento del arroz por la disponibilidad de agua?

Además de la temperatura del aire, la disponibilidad de agua también regula la duración del ciclo de desarrollo del arroz,

por lo que es esencial comprender la respuesta de las plantas en diferentes entornos de producción. El cultivo del arroz en suelos sin lámina de agua modifica las características básicas de sus procesos de crecimiento y desarrollo, ya que la exclusión de la inundación durante el ciclo de cultivo aumenta la temperatura del canopeo, lo que provoca una reducción o alargamiento del ciclo, dependiendo de las condiciones de disponibilidad de agua (Bosco et al., 2009).

En relación al déficit hídrico, el impacto en el desarrollo del arroz depende de la duración e intensidad de este estrés, y su respuesta se da según la etapa de desarrollo en que se encuentre el cultivo. En general, cuanto menos agua disponible mayor es el estrés, lo que hace que el ciclo del arroz se alargue (Bartz et al., 2017) (Figura 75).

La respuesta del alargamiento del ciclo se observa ampliamente en la Frontera Occidental de RS, donde hay un predominio del cultivo de arroz sobre las taipas con riego por inundación. Dependiendo del momento en que el agua llega a los distintos sectores del campo, existe una diferencia de ciclo entre las plantas. Las primeras plantas en recibir riego completan el ciclo antes que las plantas al final de la parcela o lote, generando un cultivo desuniforme en la maduración y en consecuencia menor productividad.

Debido a esta respuesta, conocer la evapotranspiración del cultivo (ET_c) asegura que un cultivar bajo un sistema de riego por aspersión finalice uniformemente su ciclo y exprese su máximo potencial productivo, ya que este parámetro es muy importante en la toma de decisiones sobre cuánto regar. Los cultivares de arroz de tierras bajas con láminas de riego superiores al 100% de ET_c completan el ciclo de desarrollo, a diferencia del arroz irrigado con láminas de agua de 0 y 50% de ET_c , que retrasan o no completan su ciclo de desarrollo en la mayoría de los casos o años (Figura 75).

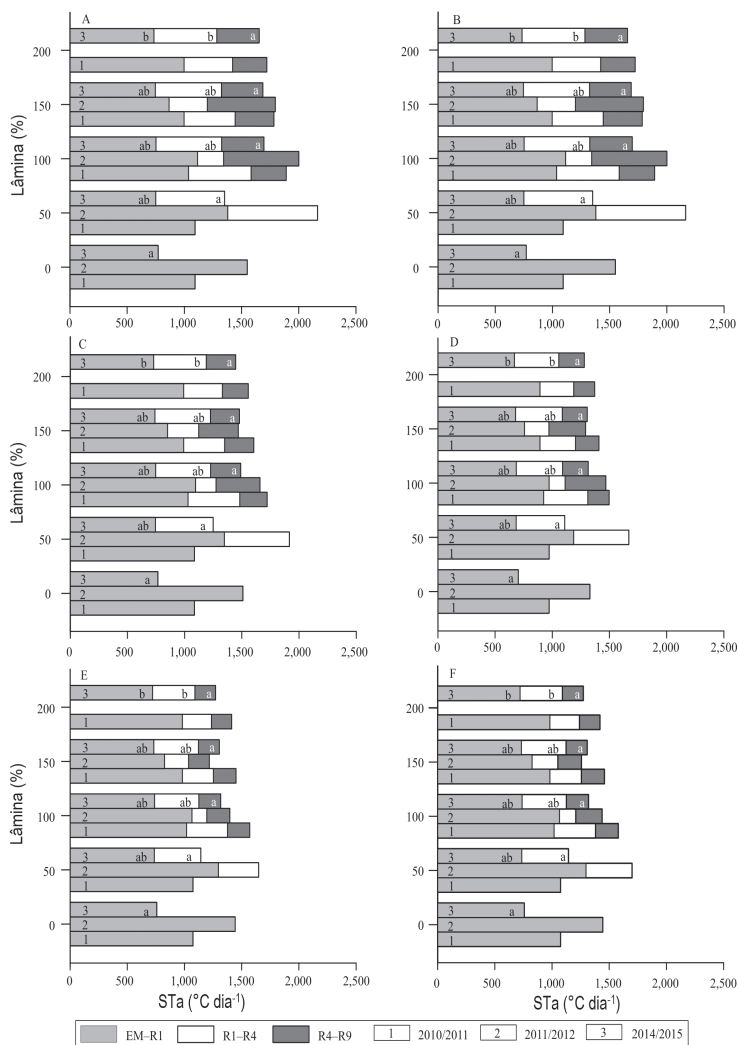


Figura 75. Suma térmica acumulada (STa, °C día) en las fases vegetativa (EM-R1), reproductiva (R1-R4) y llenado de grano (R4-R9) de arroz de tierras bajas regado por aspersores (0 %, 50%, 100%, 150% y 200% de la evapotranspiración del cultivo), calculado por seis métodos de suma térmica (A = 1.1; B = 1.2; C = 2.1; D = 2.2; E = 3.1 y F = 3.2), con datos de tres zafas (1 = 2010/11; 2 = 2011/12 y 3 = 2014/15) en Itaqui - Rio Grande do Sul - Brasil. Las letras minúsculas comparan los valores de cada método en cada etapa de desarrollo, para las profundidades de riego para la zafra 2014/15, y las mismas letras no difieren por la prueba de Tukey ($p < 0.05$). Fuente: Bartz et al. (2017) - Unipampa.

Para el crecimiento del cultivo, la tendencia es que haya una reducción en la altura de la planta, ya que no es necesario que la planta alargue sus entrenudos en respuesta a la lámina de agua. Además, en una situación de déficit hídrico se reduce la turgencia celular, impactando los procesos de fotosíntesis y respiración celular. Cuando existe déficit hídrico durante la fase vegetativa, el ciclo aumenta (Figura 76), el número de macollos disminuye y en consecuencia, también el número de panículas por área. En la fase reproductiva, el número de granos por panícula y el peso de granos son los componentes de productividad más penalizados.

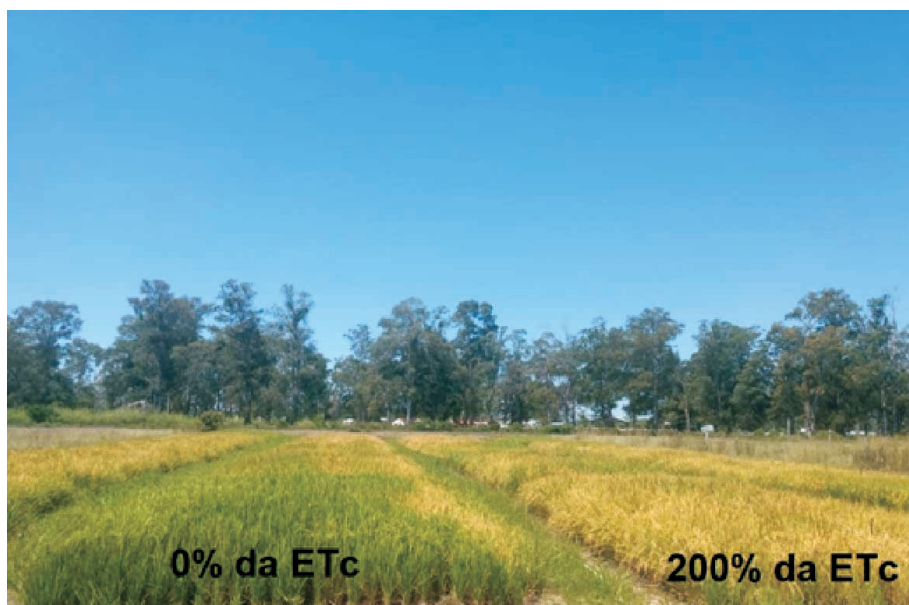


Figura 76. Experimento de campo en Itaqui - Rio Grande do Sul - Brasil, que demuestra la diferencia en el ciclo de desarrollo del arroz de tierras bajas sometido a diferentes dotaciones de riego de R1 a R9 (Counce et al., 2000) en la zafra 2017/18. Fuente: Equipo Field Crops y Unipampa.

4.2.2. ¿Cómo cuantificar la necesidad de riego?

Para cuantificar la necesidad de riego, debemos conocer las características físicas del suelo y las condiciones meteorológicas imperantes en el medio. De los parámetros físicos

del suelo, la tasa de infiltración y la curva de retención de agua en el suelo son las características más importantes, ya que determinarán la intensidad y el momento correcto del riego. En base a dichos atributos, es posible diseñar el sistema de riego por aspersión, evitando pérdidas de agua por escorrentía y determinando la frecuencia de riego requerida para el cultivo.

El manejo del riego se puede realizar con mediciones del contenido de agua del suelo, mediciones biométricas y fisiológicas de la planta o estimados a partir de factores climáticos. La elección del método para definir el manejo del riego dependerá de factores económicos y de las condiciones edafoclimáticas del sitio. El uso de tensiómetros para decidir cuándo regar el arroz de tierras bajas no es muy eficiente, ya que los valores de tensión hídrica en el suelo utilizado para el cultivo son cercanos a cero, debido a la alta demanda hídrica de las plantas. Por lo tanto, es necesario realizar un riego diario del cultivo, que en este método de riego donde se riega de acuerdo a la capacidad real de almacenamiento de agua en el suelo (CRA), puede generar pérdidas por exceso de agua aplicada dado que el suelo siempre está próximo a capacidad de campo (CC).

Una de las metodologías más utilizadas para definir cuándo y cuánto regar es la estimación de la evapotranspiración del cultivo (ETc). ETc es la suma de la pérdida de agua a través de la transpiración de la planta y la evaporación del agua del suelo. Para el cálculo de ETc, se multiplica la evapotranspiración de referencia (ETo) por el coeficiente de cultivo (Kc) (Allen et al., 1998).

Después de casi 10 años de estudio, trabajando con diferentes manejos de riego en arroz regado por aspersión (0, 50, 100, 150, 200 y 250% de ETc), se busco determinar el Kc adecuado para cultivares de arroz de tierras bajas actualmente disponible en el mercado (genéticamente mejorados para el sistema de riego por inundación). En estos experimentos se pudo observar que se obtienen altos rendimientos con riegos de 150 y 200% de ETc (hasta 12 Mg ha⁻¹) calculados en base a los coeficientes de cultivo indicados por Allen et al. (1998), para cada

fase de desarrollo (Cuadro 20); o sea, los cultivares de arroz actuales tienen una mayor demanda de agua para expresar su potencial productivo.

Para realizar el cálculo de la lámina de riego bruta (LB) para arroz regado por aspersión, tenemos la ecuación: $LB = ETo * Kc / Ea$. Donde LB es la lámina bruta de riego (mm); ETo la evapotranspiración de referencia (mm); Kc es el coeficiente de cultivo (Allen et al., 1998); y Ea es la eficiencia de aplicación del sistema de riego (0 a 1). Los valores de coeficiente de cultivo (Kc), utilizados hasta ahora (100% ETc), fueron 1,05 hasta 20 días después de la emergencia (DAE), 1,125 de 21 a 40 DAE, 1,2 de 41 a 95 DAE, y de 0,9 a 95 DAE (Allen et al., 1998).

Tabla 20. Láminas de riego de 100% y 200% de ETc (mm) y lluvia (mm) para las fases de EM-R1 (vegetativo), R1-R4 (floración) y R4-R9 (llenado de grano) (Counce et al., 2000) en cultivos de arroz regados por pivote central en el año agrícola 2018/2019. Uruguaiana/RS. Fuente: Equipo de FieldCrops.

	Fase de Desarrollo			Total (mm)
	EM-R1	R1-R4	R4-R9	
Lámina de 100% da ETc	117,00	158,95	106,94	382,89
Lámina de 200% da ETc	234,00	317,90	213,84	765,74
Lluvia	825,00	97,40	59,40	981,80

Así, como ejemplo práctico, se calcula la LB para el día 27/11/2019 para el municipio de Itaqui-RS con $ETo = 4,38$ mm, $Ea = 0,8$ (80%), a los 35 DAE, considerando una lámina de 100% de la ETc:

$$LB = 4,38 * 1,125 / 0,8 = 6,15 \text{ mm.}$$

4.2.3. Productividad de granos en áreas de riego por aspersión

La productividad del arroz regado por aspersión, siempre que se realice en un ambiente con un correcto manejo del riego, es similar a la productividad obtenida con el riego por inundación (Figura 77). Además de la lámina de riego aplicada al cultivo, la lluvia tiene una influencia directa en el rendimiento de grano. Años con mayor volumen de lluvia y una distribución más homogénea ayudan a abastecer el requerimiento de agua del arroz, reduciendo el número de riegos. Además, existe expresión genotípica, ya que cada cultivar puede tener diferentes potenciales de productividad cuando se cultiva en el sistema aeróbico.

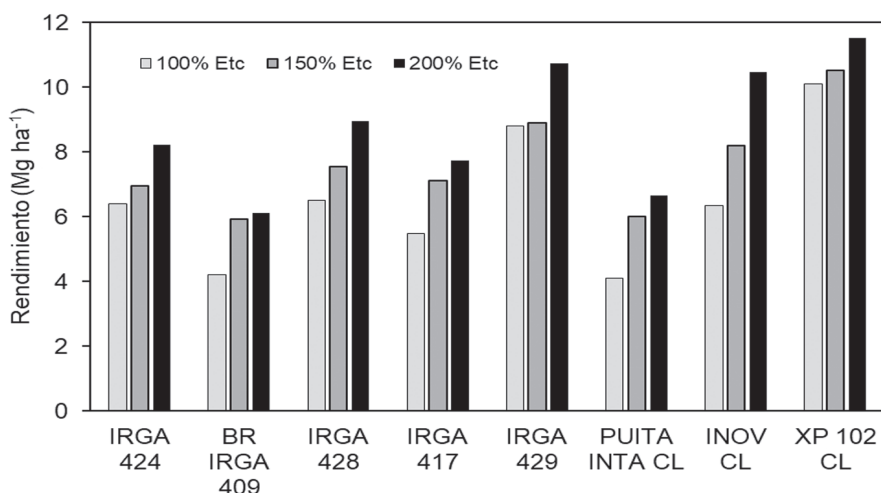


Figura 77. Rendimiento de diferentes cultivares e híbridos de arroz bajo diferentes láminas de riego por aspersión (100, 150 y 200% de Etc). Fuente: Equipo FieldCrops y Unipampa.

4.2.4. Calidad de granos

El precio obtenido por bolsa de arroz está ligado a la calidad de los granos, ya que la industria bonifica o penaliza sobre el precio final que se paga a los productores según la calidad de los

granos de arroz. La calidad de los granos se deriva de varios factores: la característica genética y las acciones relacionadas con el manejo del cultivo que son determinantes en la calidad del material entregado a la industria.

Según Meus et al. (2018), no hubo diferencia en la calidad del grano entre el arroz de tierras bajas regado por aspersión y el arroz regado por inundación. En este estudio, se demostró que la diferencia en la calidad del grano está más correlacionada con el genotipo que con el método de riego (Tabla 21).

Tabla 21. Porcentaje de granos enteros y partidos (%) y renta por beneficios (%) de cultivares de arroz de tierras bajas (IRGA 417, IRGA 424 e INOV CL) bajo riego por aspersión (150% de la evapotranspiración del cultivo) e inundación, en el año agrícola 2011/2012. Itaqui, RS, Brasil. Adaptado de Meus et al. (2018) - Equipo FieldCrops.

Variedades	Sistema de Riego	
	Aspersión	Inundación
	Beneficio	
IRGA 417	67,77 aA*	67,01 aA
IRGA 424	66,73 aA	67,49 aA
INOV CL	65,27 bB	66,93 aA
	Granos enteros	
IRGA 417	61,59 aA	63,53 aA
IRGA 424	53,24 bA	55,93 bA
INOV CL	42,81 cB	54,24 bA
	Granos quebrados	
IRGA 417	6,18 cB	3,48 bB
IRGA 424	13,49 bB	11,56 aB
INOV CL	22,47 aB	12,69 aC

*Medias seguidas de la misma letra minúscula en la columna y mayúscula en la línea no difieren por el test de Tukey ($p < 0,05$).

4.2.5. Índice de cosecha

El índice de cosecha (IC) es la relación entre la biomasa total de la planta y el rendimiento de grano y está relacionado con la eficiencia con la que los fotoasimilados producidos por la planta se transportan al producto final. El cultivo aeróbico puede afectar el IC en el cultivo del arroz (Figura 78).

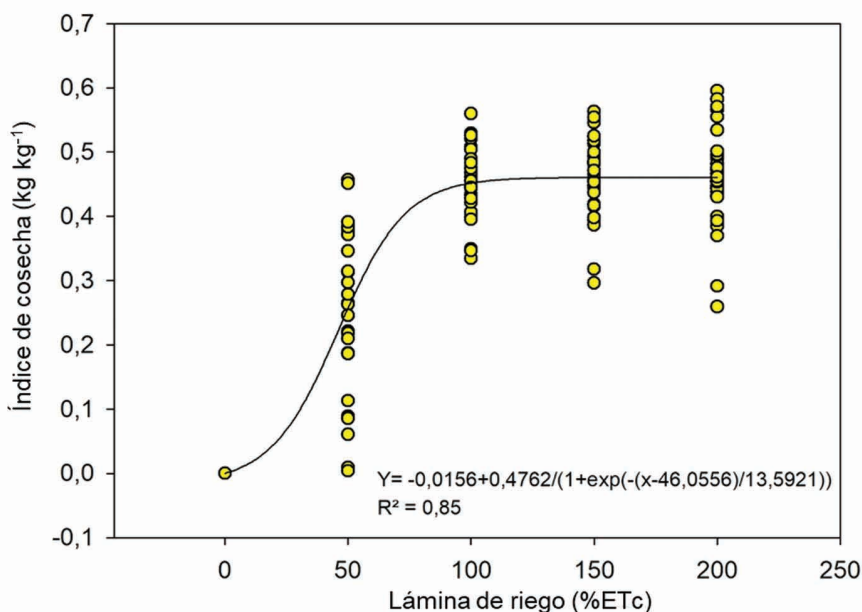


Figura 78. Índice de cosecha de arroz bajo diferentes niveles de riego por aspersión en los años agrícolas 2014/15, 2015/16 y 2016/17, del híbrido XP 102 y de los cultivares IRGA 428, IRGA 429, BR IRGA 409, PUITÁ INTA CL, IRGA 424 e IRGA 424 CL, en los municipios de Uruguaiana e Itaqui. Fuente: Equipo FieldCrops, Irga y Unipampa.

Los valores máximos encontrados en experimentos realizados con riego por aspersión por el Equipo FieldCrops (Figura 78) son más altos que los obtenidos por Kato et al. (2009), quienes obtuvieron un valor de 0,48 para arroz regado por aspersión en Japón. Los resultados observados aún se encuentran cercanos a los valores más altos encontrados en la literatura, obtenidos por Bueno & Lafarge (2009), que indican IC en arroz inundado de 0,56.

Finalmente, se puede observar que a partir del riego a 100% ET_c, el aporte de agua es adecuado, ya que los valores de IC se mantienen constantes, mostrando la misma eficiencia encontrada en la translocación de fotoasimilados de hojas y tallos para la producción de granos.

4.2.6. Consideraciones y desafíos del riego por aspersión de arroz

El Equipo FieldCrops está perfeccionando los estudios sobre el cultivo de arroz bajo un sistema de riego por aspersión en tierras bajas, con el fin de determinar la lámina y volumen de agua de riego ideal para cada fase de cultivo. El coeficiente de cultivo actual (K_c) propuesto por la FAO es más bajo que las necesidades de agua de los cultivares de arroz de las tierras bajas modernas, por lo que es necesario realizar una nueva determinación de este coeficiente.

Una preocupación es con respecto a las malezas, ya que la lámina de agua sirve como barrera física para su control. Sin embargo, la posibilidad de establecer cultivos de cobertura entre cultivos (otoño-invierno) y la posibilidad de rotación con otros cultivos en verano, permite alternar modos de acción de herbicidas pre y post emergentes, con mayor facilidad y más racionalidad. Estas estrategias permiten minimizar los casos de malezas resistentes. Otros desafíos en el cultivo de arroz en tierras bajas bajo pivote están vinculados al manejo nutricional de las plantas. Los fertilizantes (principalmente nitrógeno) muestran diferentes respuestas cuando se retira la inundación. La lámina de inundación actúa para prevenir la volatilización del nitrógeno, por lo que la hipótesis que aún debe probarse es que el nitrógeno en cobertura debería aplicarse con más frecuencia durante todo el ciclo de desarrollo.

Finalmente, el sistema de riego por aspersión mediante pivote central determina que el cultivo de arroz de regadío alcance una alta productividad, con mayores ahorros en energía, recursos humanos y ambientales, aumentando principalmente la eficiencia en el uso del agua.

Foto: Vladison Fogliato



5. Potencial y brecha de productividad de arroz irrigado

Giovana Ghisleni Ribas¹; Gonzalo Carracelas Garrido²; César Eugenio Quintero³; Alencar Junior Zanon¹; Anderson Haas Poersch¹; Ary José Duarte Junior¹; Bruna San Martin Rolim Ribeiro¹; Ioran Guedes Rossato¹; Isabela Bulegon Pilecco¹; Lorenzo Dalcin Meus¹; Michel Rocha da Silva¹; Moises de Freitas do Nascimento¹; Pablo Mazzuco de Souza¹; Vladison Fogliato Pereira¹; Nereu Augusto Streck¹.

Conocer el rendimiento potencial y la brecha de productividad de un cultivo ayuda en la toma de decisiones para orientar las prácticas de manejo y el desarrollo de políticas agrícolas que favorezcan al sector agrícola y garanticen la soberanía y seguridad alimentaria de los países. En este sentido, el potencial de productividad (PP) es la productividad de un cultivar que crece sin limitaciones de nutrientes, estreses bióticos (malezas, insectos y enfermedades) y agua, es decir que la tasa de crecimiento del cultivo está determinada por la radiación solar interceptada por el canopeo, la temperatura, el CO₂ atmosférico y las características genéticas (Evans, 1993; Van Ittersum & Rabbinge, 1997).

Sin embargo, lograr el PP en el cultivo del arroz significa lograr la perfección en relación con el manejo. Sabiendo que la realidad del productor difiere de este escenario, la búsqueda de PP no es rentable, ya que la respuesta de los insumos aplicados sigue retornos decrecientes cuando el rendimiento se acerca al techo de productividad (Figura 79).

Pensando en la ganancia del productor, las eficiencias técnicas y económicas máximas ocurren cuando 70 al 85% del

¹ Universidad Federal de Santa Maria (UFSM), Departamento de Fitotecnia, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.

² Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Tacuarembó, Uruguay.

³ Facultad de Ciencias Agropecuarias (FCA). Universidad Nacional de Entre Ríos (UNER). Entre Ríos, Argentina.

PP es alcanzado siendo la diferencia entre este nivel de PP y la productividad promedio de los cultivos denominada como Brecha de Productividad Explorable (Figura 79). Es mediante la optimización del manejo que es posible reducir esta brecha, maximizando la rentabilidad del cultivo de arroz (Cassman et al., 2003; Koning & Van Ittersum et al., 2009; Lobell et al., 2009).

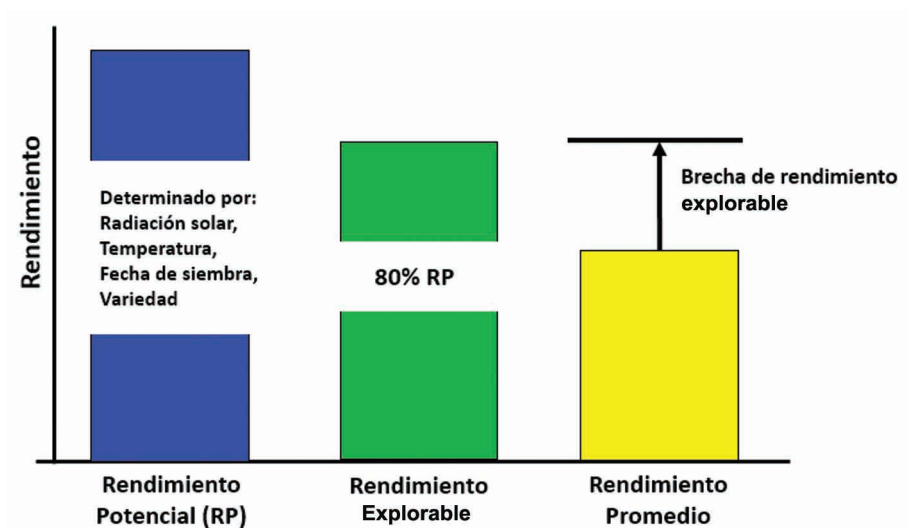


Figura 79. Diferentes niveles de productividad para el arroz irrigado, (a) Potencial de productividad (PP); (b) Productividad explorable; (c) Productividad media de los cultivos. Fuente: Adaptado de Van Ittersum et al. (2013).

La estimación de PP se convertiría en una tarea difícil sin herramientas digitales que simulen el crecimiento, el desarrollo y la productividad de los cultivos. Siempre que estén calibrados, los modelos matemáticos basados en procesos (Capítulo 10) son excelentes alternativas para determinar el PP y comprender cómo funcionan las plantas en un cultivo determinado (Lobell et al., 2009; Streck et al., 2013)

En Brasil, el PP varía según la región de cultivo en función de la latitud, la disponibilidad de radiación solar y la temperatura. Así, se desarrollaron estudios para estimar el PP del arroz de regadío en Brasil, siguiendo la metodología internacional de

GYGA¹⁰ (*Global Yield Gap Atlas*) e incluyeron sólo el estado de RS, ya que es responsable de más del 70% del arroz producido a nivel nacional (Conab, 2019). El modelo Oryza v3 se calibró para las condiciones de cultivo del arroz en Brasil y se utilizó para simular el PP de arroz de regadío.

Así, se identificó que el PP de arroz de regadío en Brasil es de 14,8 Mg ha⁻¹, similar a lo que ocurre en Uruguay (14 Mg ha⁻¹) y Argentina (15 Mg ha⁻¹), y superior al PP en Estados Unidos (9,4 Mg ha⁻¹), China (12,4 Mg ha⁻¹) y África (9,0 Mg ha⁻¹) (Espe et al., 2016; Van Ittersum et al., 2016; Deng et al. 2019; Ribas, 2019). La diferencia entre PP en la región subtropical de América del Sur y en otros países se debe a la mayor disponibilidad de radiación solar durante las fases de floración y llenado de grano, proporcionada por las condiciones climáticas subtropicales brasileñas en comparación con el clima tropical del sur y sureste de Asia. Además, las regiones de producción de arroz de regadío cercanas a los 30° de latitud (región subtropical) tienen un PP más alto en comparación con latitudes más bajas, ya que hay menos radiación solar disponible durante la temporada de crecimiento en la región tropical, mientras que en las regiones templadas existe un mayor riesgo de daños a los cultivos debido a las bajas temperaturas.

Sin embargo, la brecha de productividad (BP = potencial de productividad - productividad promedio) del arroz de regadío en Brasil fue mayor (47% PP) que en los EE.UU. (27% PP) y China (33% PP), fue similar a Uruguay (43% PP) y menor que África (60% PP) (Espe et al., 2016; Van Ittersum et al., 2016; Carracelas et al., 2019b; Deng et al., 2019). Para Argentina, utilizando un modelo ecofisiológico simple, se estimó que el PP ronda los 15 Mg ha⁻¹ y la brecha de productividad es de 54% (Quintero, 2009; Quintero et al., 2017).

¹⁰ "Global Yield Gap Atlas - GYGA" es una iniciativa global que tiene como objetivo estimar el potencial y brechas de productividad en cultivos agrícolas en todo el mundo con el fin de comprender cuánto y dónde todavía es posible maximizar verticalmente la producción de comida. Para obtener más información sobre la metodología GYGA, visite: <http://www.yieldgap.org>

La brecha de productividad determinada para la mayoría de los países incluidos en el atlas mundial (www.yieldgap.org) indica que sería posible incrementar la producción de arroz en las actuales áreas de cultivo de este cereal. Los niveles actuales de producción en Brasil y Uruguay representan el 53% y el 57% del potencial de productividad, respectivamente, lo que indica que sería posible incrementar la productividad actual mediante ajustes en las prácticas de manejo y adaptación de tecnologías (Figura 80).

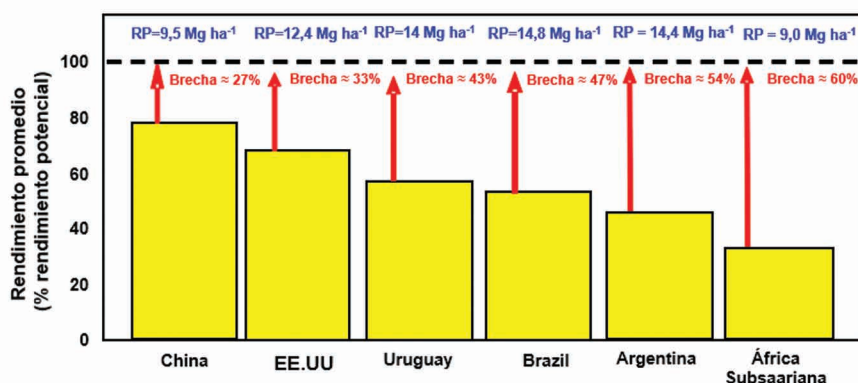


Figura 80. Brecha y potencial de productividad del arroz de regadío en las regiones productoras del mundo calculada utilizando la metodología GYGA. * Potencial de productividad estimado por modelo ecofisiológico simple. Fuente: GYGA, Equipo FieldCrops, UFSM y UNER.

5.1. Potencial y brechas de productividad del arroz irrigado en el sur de Brasil: un estudio de caso para el estado de Rio Grande do Sul

Se utilizó el modelo SimulArroz (Capítulo 10) para estimar el potencial de productividad del arroz de regadío para Rio Grande do Sul, Brasil, de 2015 a 2019. A partir de este, se estimó: el potencial de productividad (PP), la productividad promedio máxima del cultivo (mejores productores) y la productividad promedio del estado, en la Figura 81.

Las mejores chacras que son presentadas de Rio Grande do Sul producen el 73% del PP, mientras que los demás alcanzan

el 46% del PP (Figura 81). Estos resultados son cercanos a los reportados en California y Texas, Estados Unidos, donde la variación fue del 61 al 76% del PP para el cultivo de arroz (Espe et al., 2016). En este sentido, las estimaciones de este análisis sugieren que la productividad promedio (datos recolectados por los extensionistas de IRGA y miembros de los Equipos FieldCrops de UFSM, Unipampa y UFPel) de los cultivos de arroz irrigados en RS no alcanzó el 80% de la productividad alcanzable, existiendo así una brecha de productividad explotable (Van Ittersum et al., 2013).

En cuanto a la brecha de productividad del arroz en Rio Grande do Sul, se identificó que oscilaba entre 3,3 y 6,4 Mg ha⁻¹. Este resultado está por encima de los valores encontrados en California y Texas (Estados Unidos) por Espe et al. (2016) quienes reportaron una variación en la brecha de productividad de 1,1 a 3,5 Mg ha⁻¹. Por lo tanto, es necesario generar y transferir información de manejo por parte de las instituciones de investigación y extensión, con el objetivo de maximizar la eficiencia en el uso de los recursos y aumentar la productividad promedio de los cultivos de arroz de regadío (Figuras 81 y 82).

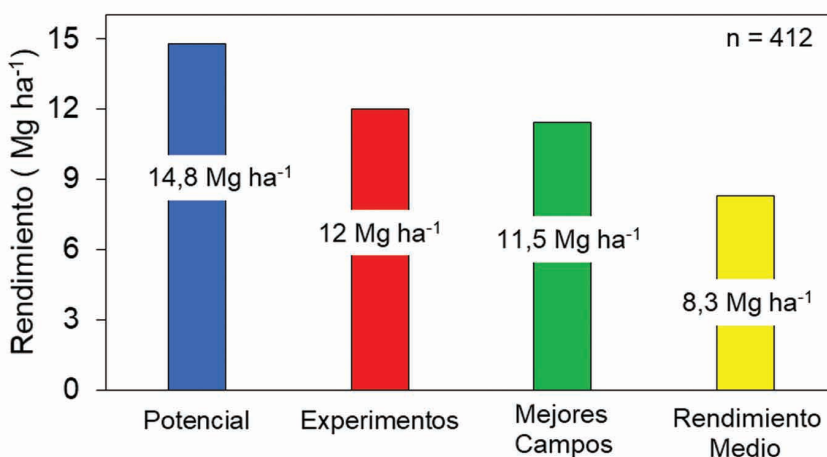


Figura 81. Potencial de productividad de arroz estimado por el modelo SimulArroz (barra en azul), rendimientos obtenidos en experimentos (barra en rojo), productividad promedio de grano de los mejores productores (barra en

verde) y productividad promedio del estado de Río Grande do Sul, Brasil (barra amarilla). La información de manejo fue recolectada por extensionistas de Irga y estudiantes del curso de Agronomía en la UFSM, Unipampa y UFPel. Irga proporcionó el rendimiento medio de grano. Estos datos se recopilaron en las seis regiones arroceras, en 412 cultivos en cuatro años agrícolas (2015/16, 2016/17, 2017/18 y 2018/19). Fuente: Equipo FieldCrops, IRGA, UFSM, UFPel y Unipampa.

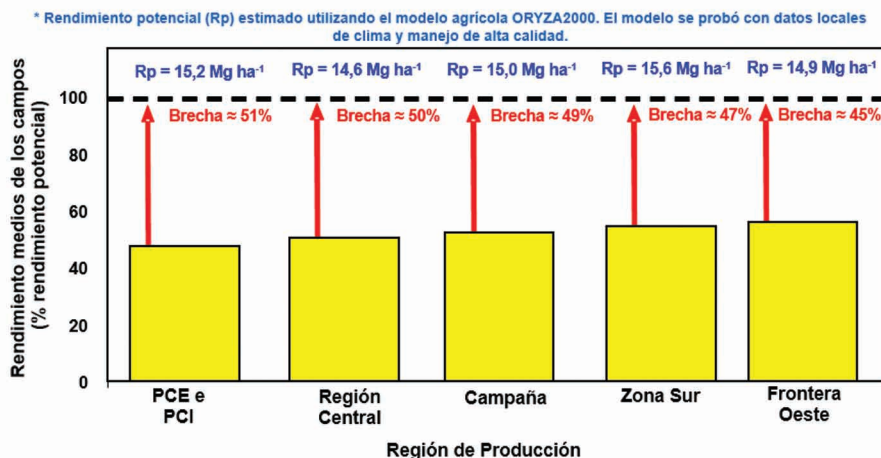


Figura 82. Estimación de los potenciales de rendimiento de grano y brechas de productividad relativa en cultivos de arroz en las seis regiones arroceras del estado de Rio Grande do Sul, Brasil (PCE = Llanura Costera Externa, PCI = Llanura Costera Interna, Región Central, Campaña, Zona Sur y Frontera Occidental). Fuente: Equipo FieldCrops, UFSM, UFPel, Irga y Unipampa.

5.2. Prácticas de manejo para altas productividades en cultivos de arroz irrigado en el sur del Brasil

La búsqueda de una alta productividad y la maximización del beneficio del productor están asociadas a la interacción entre la mejor genética, medio ambiente y manejo (G x A x M). A nivel de chacra, revisar y modificar el manejo es la opción más fácil y económica para explorar el potencial productivo de los cultivares de arroz y maximizar la eficiencia de los recursos que ofrece el medio ambiente (Evans, 1993). Los factores que limitan la productividad en los cultivos pueden ser biofísicos (eficiencia en el uso del agua y eficiencia en el uso de la radiación solar) o de

manejo (densidad y fecha de siembra, disposición de las plantas, manejo nutricional y fitosanitario).

En cuanto al grado de inversión, podemos decir que, en la mayoría de los casos, el aumento del gasto en insumos no incrementa directamente la productividad (Xavier et al., 2019). Cuando pensamos en aumentar la rentabilidad, debemos tener en cuenta que el momento y la necesidad de aplicación son más importantes que la cantidad de insumos aplicados. Además, el manejo cultural, como anticipar la época de siembra, elegir cultivares resistentes a enfermedades y anticipar el riego, son medidas que no aumentan los costos, pero tienen un gran impacto en la productividad, siendo una forma sencilla y directa de incrementar la rentabilidad del cultivo de arroz.

A continuación se presentan los principales factores de manejo que están influyendo en la productividad de los cultivos de arroz de regadío en Rio Grande do Sul, así como las prácticas que deben recibir más atención para minimizar las pérdidas de productividad. Estos factores de manejo se identificaron mediante cuestionarios aplicados a los productores durante los años agrícolas 2016/17, 2017/18 y 2018/19, totalizando 324 cultivos.

5.2.1. Época de siembra

Como se mencionó en los capítulos anteriores, la obtención de altos rendimientos depende de la alta disponibilidad de radiación solar, especialmente durante las fases reproductiva y de llenado de grano, siendo la fecha de siembra una estrategia sencilla para incrementar la utilización de la radiación solar. En los cultivos, este es el principal determinante de la productividad y merece ser discutido como una prioridad, ya que es una práctica que no genera costos extra para el productor.

En Rio Grande do Sul, el período de siembra recomendado comienza el 1 de septiembre. El retraso en la fecha de siembra a partir de ese momento conduce a la pérdida de 42 kg de arroz ha⁻¹ día⁻¹ (Figura 83). Sin embargo, es necesario evaluar la factibilidad

técnica de la siembra en septiembre en cada región arrocera del estado, ya que existe una gran diversidad entre las regiones productoras en relación a los riesgos de heladas, inundaciones y pérdida del número de plantas en el cultivo debido a la baja temperatura del suelo.

Además, priorizar la fecha de siembra y planificarla para el inicio en el período recomendado influye en la duración del ciclo del cultivar y en consecuencia en la duración de las fases de desarrollo, que en siembras realizadas en períodos con temperaturas suaves permite acumular más fotoasimilados durante el ciclo de desarrollo. Así, sabiendo que las respuestas de productividad son menores cuando la siembra se realiza tardíamente, se indica reducir la inversión en insumos (como nitrógeno) para maximizar la rentabilidad del productor.

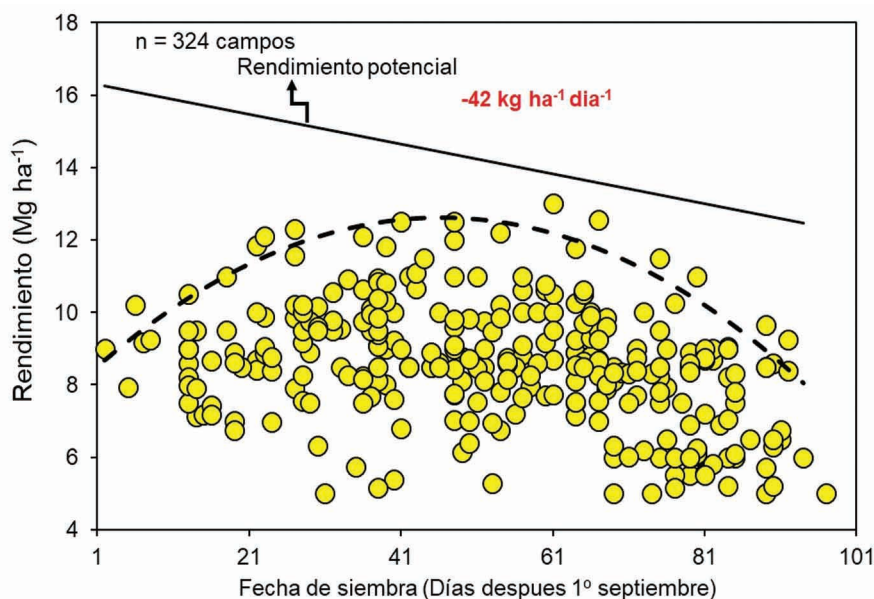


Figura 83. Relación entre rendimiento de grano (Mg ha⁻¹) de arroz irrigado y fecha de siembra. La línea continua indica el potencial productivo estimado por el modelo Oryza v3 y la línea negra discontinua corresponde a la función límite. El valor rojo (-42 kg ha⁻¹ día⁻¹) representa la pérdida de productividad por día debido a un retraso en la fecha de siembra a partir del 1 de septiembre. Fuente: Equipo FieldCrops, UFSM, UFPel, IRGA y Unipampa.

Un análisis más detallado del potencial de productividad en Rio Grande do Sul para la variedad IRGA 424 RI según la fecha de siembra indica que el potencial de productividad se reduce en $30 \text{ kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ en el período del 1 de septiembre al 13 de noviembre, $80 \text{ kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ del 14 de noviembre al 21 de diciembre, y $290 \text{ kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ después del 21 de diciembre (Figura 84). A pesar del mayor potencial productivo al inicio de la ventana de siembra, existe una mayor variabilidad a lo largo de los años en la siembra temprana, ya que pueden ocurrir heladas tardías durante el mes de septiembre y la temperatura del suelo aún puede estar por debajo de la ideal para la germinación de semillas. Durante los meses de octubre y noviembre la variabilidad del potencial de productividad ronda el 10%, lo que reduce el riesgo de pérdidas o estreses que pueden afectar la productividad de los cultivos.

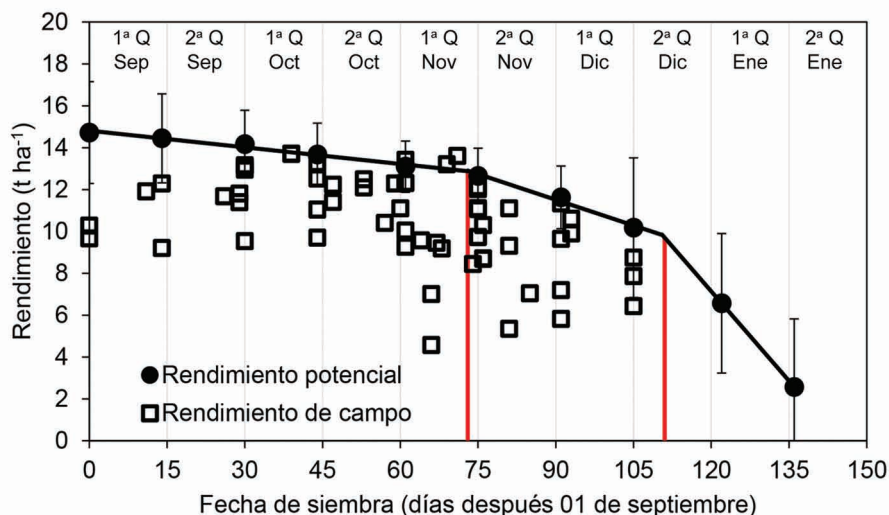


Figura 84. Potencial de rendimiento del arroz de regadío en el estado de Rio Grande do Sul, Brasil, en relación a la fecha de siembra. La línea negra completa representa el potencial productivo promedio estimado por el modelo SimulArroz para el cultivar IRGA 424 RI, a lo largo de RS en el período de 1980 a 2013. Las líneas verticales rojas completas representan los días 13/11 y 21/12, cuando aumenta la pendiente de la línea de pérdida de productividad. Los puntos en blanco son datos sobre la productividad de 60 cultivos muestreados en los años agrícolas 2013/2014 a 2017/2018 Fuente: Equipo FieldCrops y UFSM.

5.2.2. Momento de inicio del riego

La entrada de agua de riego y que marca el inicio del mantenimiento de la lámina de inundación, es un factor fundamental en la construcción de altos rendimientos de arroz de riego en Rio Grande do Sul. Los datos recolectados en 324 arrozales en dicha región indican que desde el inicio del macollamiento (etapa V3), puede ocurrir una reducción en la productividad de hasta $180 \text{ kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ (Figura 85); esto es debido a la reducción en la eficiencia de uso del nitrógeno y el control de malezas. Sin embargo, en la práctica se observa que los productores frecuentemente anticipan aún más el riego, por lo que es común que el agua ingrese luego de la emergencia del cultivo a V2. Con las malezas en etapas tempranas, esta decisión hace que la eficiencia del control (principalmente el arroz-maleza o arroz rojo) sea aún mayor, tanto por el efecto del agua como por favorecer la acción del herbicida post-emergente.

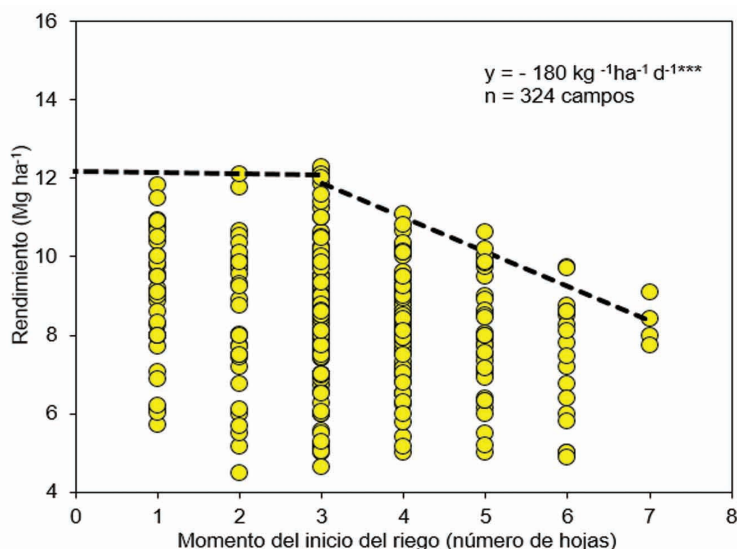


Figura 85. Relación entre la productividad de granos de arroz de riego (Mg ha^{-1}) en Rio Grande do Sul, Brasil, y el momento (en número de hojas) en que se inició el riego en los cultivos, en los años agrícolas 2015/16, 2016/17 y 2018/19. La línea negra punteada representa la función límite. Fuente: Equipo FieldCrops, UFSM, UFPel, Irga y Unipampa. *** $p < 0,001$.

5.2.3. Rotación de cultivos y barbecho

Pensando en la sostenibilidad y la rentabilidad del productor, es importante prestar atención a las nuevas estrategias que tienen como objetivo integrar, diversificar y aumentar la sinergia dentro del sistema productivo. Una alternativa que está ganando terreno en Rio Grande do Sul es la rotación de arroz con cultivo de soja. Entre los años 2013 a 2020, el cultivo de soja ocupó en el sur de Brasil de 250 a 340 mil hectáreas de tierras bajas (IRGA, 2020) que fueron manejadas por productores de arroz. Esta expansión también ocurrió en las áreas arroceras de Uruguay, Argentina y Paraguay. En general, la introducción de un cultivo de secano en suelos de tierras bajas es un gran desafío debido a la dificultad de drenaje provocada por la capa de suelo compactada con baja tasa de percolación y también por el riesgo de deficiencia de agua, dado que la profundidad de suelo a ser explorada por las raíces es pequeña.

Los beneficios que el cultivo de soja incorpora al sistema productivo son importantes. Cuando el monocultivo de arroz sucesivo se compara con cultivos de arroz que tienen soja como cultivo de rotación, hay un aumento del 20% en la productividad del arroz en aquellos casos que tenían soja como cultivo anterior (Figura 86). El aumento de la productividad del arroz en sucesión a la soja se atribuye principalmente a un mayor control de malezas.

Además del ciclo de nutrientes y los beneficios para la estructuración del suelo que promueve la rotación de cultivos, el cultivo de soja rotada con arroz permite el uso de herbicidas con otros mecanismos de acción, lo que asegura el control de malezas y reduce el costo de herbicidas en los próximos cultivos de arroz. Otra alternativa utilizada por los productores y que promueve un mayor control de malezas es la técnica de barbecho durante una zafra. Durante este período, el manejo debe realizarse con el objetivo de reducir el banco de semillas en el suelo y evitar la producción de semillas por las malezas emergidas. Los cultivos en barbecho en verano experimentaron un aumento del 11% en la productividad del arroz (Figura 86).

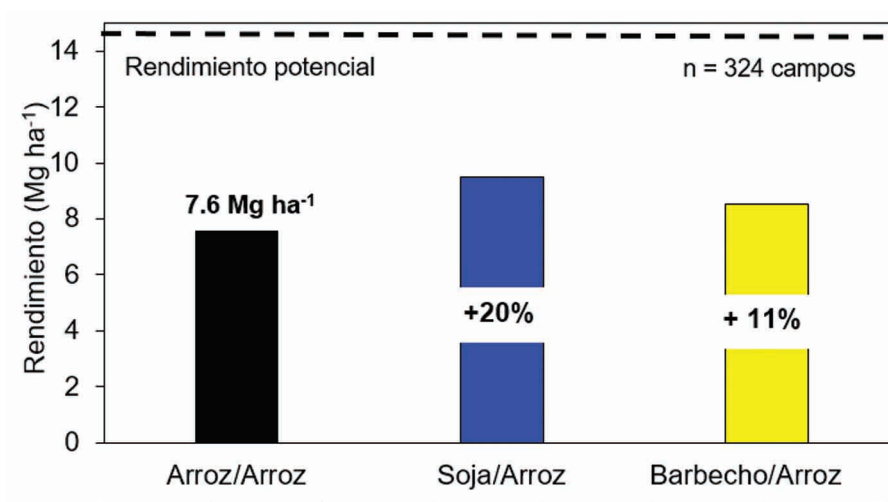


Figura 86. Rendimiento de arroz de regado en arrozales con diferentes sistemas de cultivo en Rio Grande do Sul, Brasil, en los años agrícolas 2015 a 2019 en 412 cultivos. Fuente: Equipo FieldCrops, UFSM, UFPel, IRGA y Unipampa.

5.2.4. Manejo de enfermedades

El manejo de enfermedades también es parte de las prácticas de manejo para altos rendimientos de arroz. En general, la presión de las enfermedades sobre el arroz en la región subtropical es considerablemente menor que en la región tropical. Sin embargo, en Rio Grande do Sul es común que ocurran enfermedades fúngicas, especialmente en la región costera, donde la mayor cantidad de días con alta humedad relativa durante el verano favorece la aparición de enfermedades (Menezes et al., 2013).

Podemos ver en la Figura 87 la variabilidad entre la respuesta al uso o no de fungicidas en cultivos en RS. Esto se puede explicar según los cultivares sembrados (resistentes, tolerantes y susceptibles), la fecha de siembra y las condiciones climáticas de la zafra. Así, especialmente en cultivos y regiones con historia de ocurrencia de enfermedades, debemos considerar estos factores al momento de decidir prácticas de manejo y obtener alta productividad.

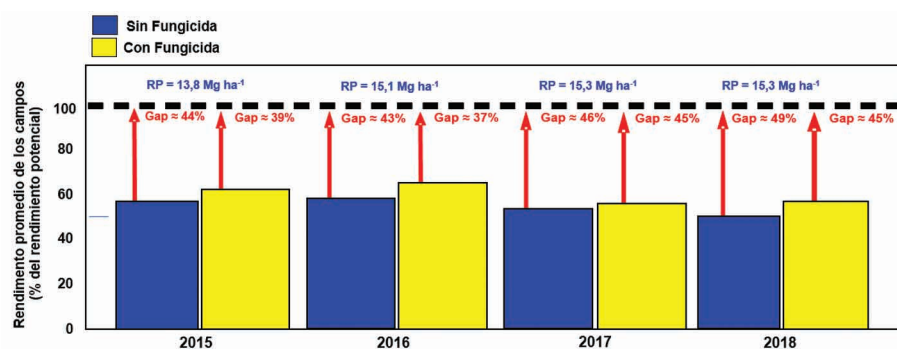


Figura 87. Productividad de cultivos de arroz regado con y sin aplicación de fungicidas en el Estado de Rio Grande do Sul, en los años agrícolas 2015 a 2019 en 412 cultivos. Fuente: Equipo FieldCrops, UFSM, UFPel, IRGA y Unipampa.

Foto: Gabriel Rodrigues Landskron



6. Arroz de tierras altas en Brasil

Alexandre Bryan Heinemann¹; Luís Fernando Stone¹; Silvando Carlos da Silva¹; Alberto Baêta dos Santos¹

El arroz de tierras altas, o arroz de secano, se cultiva en Brasil en latitudes inferiores a 20° Sur, con las mayores áreas de producción concentradas en los estados de Mato Grosso, Tocantins, Rondônia, Goiás, Maranhão y Pará. Según Conab. 2019, el área cultivada en el año agrícola 2018/2019 fue de 346,6 mil ha, lo que representa el 20% del área cultivada con arroz en Brasil, con una productividad promedio de 2,35 Mg ha⁻¹, contribuyendo con sólo 7,8% de la producción de arroz brasileña. El arroz de las tierras altas jugó un papel muy importante en la expansión de la frontera agrícola en el centro de Brasil en las décadas de 1980 a 1990, y alcanzó un máximo de 5 millones de hectáreas cultivadas en Brasil en 1987 (Martínez et al., 2014).

La dificultad de comercialización debido a la fuerte competencia con el arroz de regadío del sur de Brasil, las grandes fluctuaciones en la productividad, los bajos márgenes de ganancia y la calidad del grano, el arroz de secano ya no es el principal componente de la producción agrícola en el centro de Brasil. En la última década se ha observado una disminución en el área cultivada de alrededor del 70% (Heinemann et al., 2015, 2019), que tiende a aumentar si se acentúa la ocurrencia de deficiencia de agua por el cambio climático (Ramirez-Villegas et al. 2018).

¹ Embrapa Arroz e Feijão, Departamento de Pesquisa, Santo Antônio de Goiás, GO, Brasil.

Además de estos factores, es de destacar que las actividades del programa de mejoramiento de arroz de secano de Embrapa, desde la década de 1980, se han centrado en la selección directa para la producción de granos y una amplia adaptación a regiones altamente favorables (libres de estrés hídrico). En este proceso de selección genética, existe el riesgo de desarrollar genotipos especializados para áreas favorables, que no tienen suficiente plasticidad y, por tanto, no responden bien en condiciones de estrés (Heinemann et al., 2015).

Los arrozales de secano en Brasil están ubicados en la región del Cerrado, donde predominan los Oxisoles con baja capacidad de almacenamiento de agua. Durante la temporada de lluvias (octubre-abril), cuando se cultiva arroz, la distribución de las lluvias es irregular, siendo comunes las sequías de dos a tres semanas. La alta demanda evapotranspirativa de arroz, combinada con las características de los suelos, hace que estas sequías provoquen disminuciones considerables en la productividad del arroz, provocando fluctuaciones en la producción nacional.

El impacto relativo de la deficiencia de agua en el cultivo de arroz de secano ha aumentado en las últimas décadas en el centro de Brasil (Figura 88). En la década de 1980 predominaba el cultivar Douradão, con un impacto relativo de la deficiencia de agua entre 0 y 15%. Con la adopción de nuevos cultivares, hubo un aumento en la productividad, pero aumentó el impacto relativo de la deficiencia de agua en la región de estudio (Heinemann et al., 2019).

6.1. Caracterización del área de producción

La región central de Brasil, principal productora de arroz de secano, se estratificó en tres grupos ambientales denominados altamente favorables (AF), favorables (F) y menos favorables (PF) (Figura 89) mediante la aplicación de un modelo de simulación productividad, crecimiento y desarrollo del cultivo de arroz (Heinemann et al., 2015).

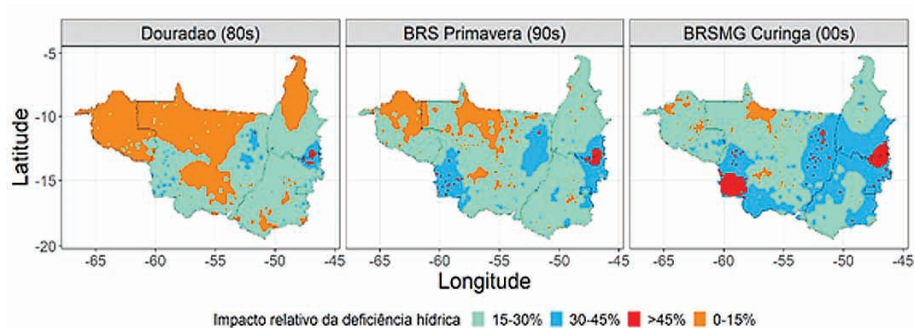


Figura 88. Impacto relativo del déficit hídrico en el cultivo de arroz en tierras altas de la región central de Brasil (Goiás, Mato Grosso, Rondônia y Tocantins) en los períodos de 1980 a 1989 (años 80), variedad Douradão, 1990 a 1999 (años 90), variedad BRS Primavera de 2000 a 2013 (00s), variedad BRSMG Curinga. Fuente: Adaptado de Heinemann et al. (2019).

Región Altamente Favorable (AF):

Esta región se caracteriza por una precipitación anual (1.581 mm) superior a la media (1.505 mm). La radiación solar global anual, el rango de temperatura del aire anual, la temperatura media anual máxima y mínima muestran valores medios de 6.894 MJ m⁻², 0,98 °C, 23,78 °C y 18,06 °C, respectivamente. La productividad promedio de esta región es superior al promedio nacional. En este ambiente predomina un suelo de textura más arcillosa y las fechas de siembra se concentran al inicio de la ventana de siembra (01/11 al 10/11) y la floración ocurre alrededor de los 71 días después de la emergencia (Cultivar BRS Primavera). Esta región representa sólo el 19% del área que comprende los estados de Goiás, Mato Grosso, Rondônia y Tocantins.

Región Favorable (F):

En esta región la precipitación anual es de 1.500 mm con radiación solar global anual, rango de temperatura del aire anual, temperatura media anual máxima y mínima de 6.944 MJ m⁻², 0,99 °C, 24,23 °C y 18,23 °C, respectivamente. Para este ambiente,

la floración promedio es de 70 días después de la emergencia (Cultivar BRS Primavera). Las texturas de suelo predominantes en esta región son franco arenoso (28%) y franco arcilloso (24%). Esta región representa el 44% del área de producción en los estados de Goiás, Mato Grosso, Rondônia y Tocantins.

Región Poco Favorable (PF):

En este entorno, la precipitación total anual es inferior a la media general (1.465 mm), mientras que los valores de radiación solar global anual, amplitud anual de la temperatura media anual máxima y mínima son superiores a las medias generales. La principal característica de esta región es el predominio de suelos con textura arenosa y franco arenosa (33 y 41%, respectivamente), con fechas de siembra concentradas al final de la ventana de siembra (30/12 y 01/10). Esta región representa el 37% del área que comprende los estados de Goiás, Mato Grosso, Rondônia y Tocantins.

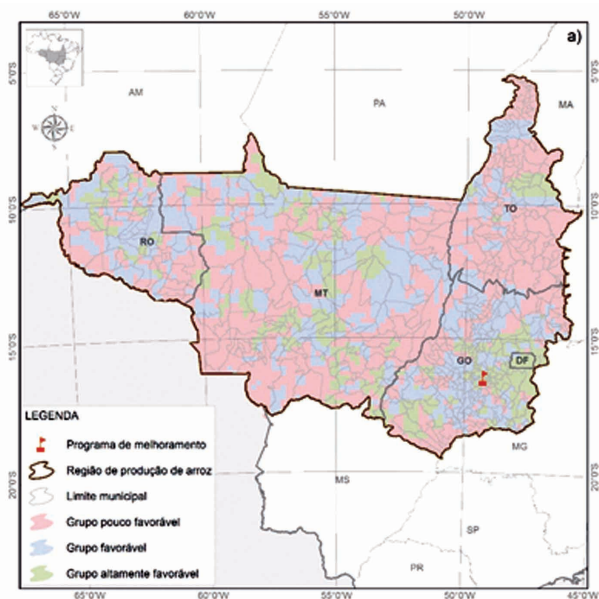


Figura 89. Distribución geográfica de las regiones altamente favorable (AF), favorable (F) y menos favorable (PF) para el arroz de secano en Brasil. Fuente: Adaptado de Heinemann et al. (2015).

6.2. Productividad potencial

La distribución geográfica de la productividad potencial del arroz de secano se ilustra en la Figura 90. Para calcular la productividad potencial se utilizaron 79 ensayos de campo, de 2011 a 2017, distribuidos en 34 municipios de la región de producción, denominada valor de cultivo (VCU) del programa de mejoramiento de arroz de secano de Embrapa Arroz e Feijão. Se consideró que la productividad potencial para cada grupo de pruebas en un mismo municipio es aquella en la que se encuentra el 5% de los valores de productividad más altos.

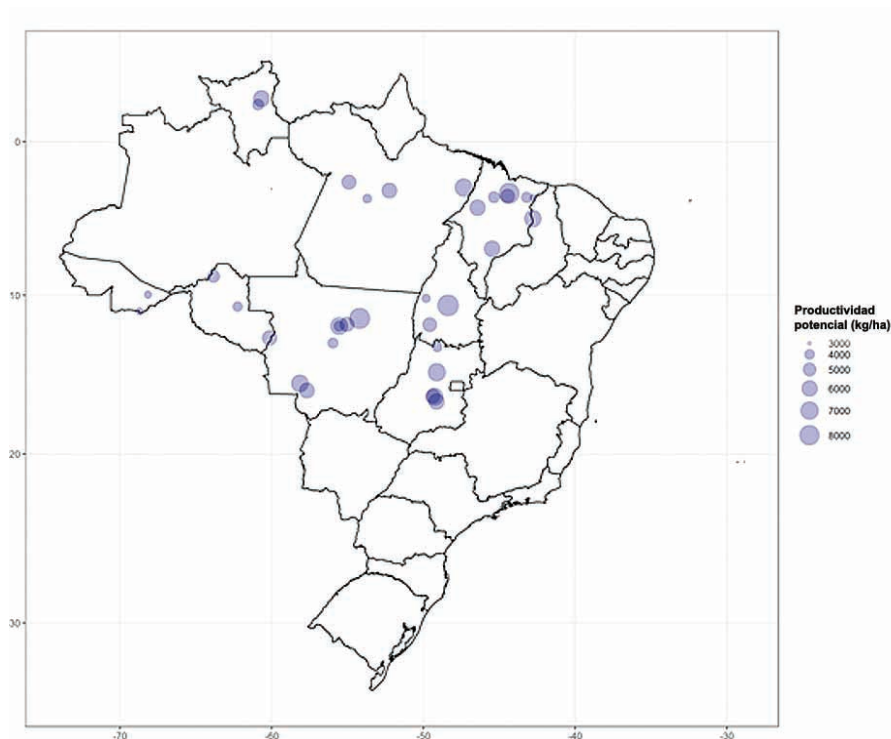


Figura 90. Distribución geográfica de la productividad potencial en la región productora de arroz de tierras altas en Brasil. IBGE, 2014. Fuente: Embrapa Arroz e Feijão.

6.3. Condicionantes agrometeorológicas de productividad

El arroz de las tierras altas puede alcanzar altos rendimientos cuando se cumplen sus requisitos climáticos. Sin embargo, cuando esto no ocurre, puede haber una reducción de la productividad, que será proporcional a la duración e intensidad de las adversidades meteorológicas durante el ciclo de cultivo.

Por lo tanto, para que el cultivo de arroz de secano tenga un buen crecimiento y desarrollo, la interacción clima-planta debe cuantificarse y monitorearse adecuadamente. Por tanto, debemos conocer los elementos climáticos a lo largo de los años, como la radiación solar, la temperatura del aire, la precipitación, el fotoperíodo, entre otros, que tienen una gran influencia en la producción de arroz.

6.3.1. Temperatura del aire

La temperatura del aire es uno de los elementos climáticos más importantes para el crecimiento, desarrollo y productividad del cultivo del arroz, ya que cada etapa de desarrollo requiere una temperatura crítica mínima, óptima y máxima. El cultivo de arroz de secano requiere, para el proceso de germinación, temperaturas del aire en el rango de 18 a 40 °C, 25 a 31 °C para la floración y alrededor de 30 °C para la maduración (Capítulo 2).

Las temperaturas del aire superiores a 35 °C, en condiciones de estrés hídrico, pueden hacer que las espiguillas se vuelvan estériles. La fase reproductiva comienza justo después de la diferenciación del primordio floral, en ese momento es cuando la planta es más sensible a las altas temperaturas del aire. Las temperaturas del aire durante el día superiores a 33 °C pueden interrumpir este proceso. De manera similar, las temperaturas del aire nocturnas superiores a 29 °C aumentan la susceptibilidad a la esterilidad de las espiguillas, lo que provoca reducciones en el rendimiento de grano. La segunda fase más sensible es la prefloración o, más concretamente, unos 10 días antes de la emisión de panículas. Como ocurre con las bajas

temperaturas, existen grandes diferencias entre cultivares en términos de tolerancia a las altas temperaturas del aire (Yoshida & Parao, 1976).

En épocas preferenciales de siembra, en la región del Cerrado brasileño, en principio, no existe una marcada influencia negativa de las bajas temperaturas del aire, ya que en la mayoría de las localidades, la temperatura mínima promedio en los meses de enero y febrero, período que generalmente coincide con la etapa reproductiva del cultivo, se encuentra por encima de los 17 °C. Sin embargo, en lugares de mayor altitud, es posible que exista alguna influencia de este elemento climático.

La influencia de las bajas temperaturas del aire puede ser bastante pronunciada para sembrar fuera de la temporada recomendada. Las temperaturas de 15 a 19 °C durante la fase reproductiva pueden afectar el desarrollo de microesporas, provocando la esterilidad de los granos de polen, lo que resulta en una alta esterilidad de las espiguillas (Ghadirnezhad; Fallah, 2014). El final de la fase reproductiva y el inicio de la fase de llenado de grano no deben coincidir con los meses de mayo, junio, julio y agosto, cuando la temperatura mínima del aire está por debajo de la requerida por el cultivo en la mayor parte del Cerrado brasileño (Fageria., 1984), incluso cuando es posible el riego suplementario (Lobato & Silva., 1995). Cuando hay bajas temperaturas del aire, como en los meses entre febrero y septiembre en el Cerrado brasileño, hay un alargamiento del ciclo, una disminución en el tamaño de la planta, menor índice de área foliar y productividad en el cultivo de arroz de secano.

6.3.2. Radiación solar

La radiación solar (R_s) que llega a la superficie terrestre es la fuente de energía para la fotosíntesis y evapotranspiración de las plantas. La R_s está formada por dos componentes: radiación directa (fracción de la radiación global que no interactuó con la atmósfera) y radiación difusa (fracción de la radiación global

que interactuó con los constituyentes de la atmósfera y fue irradiada en todas direcciones). La proporción de radiación difusa en relación a la radiación global es máxima en los momentos cercanos al amanecer y atardecer y en días completamente nublados, cuando toda la radiación global es difusa. En el proceso de fotosíntesis, las plantas utilizan sólo una fracción de la radiación incidente a una longitud de onda entre 0,4 y 0,7 μ , denominada radiación fotosintéticamente activa (RFA). La RFA puede considerarse aproximadamente el 50% de la radiación global incidente (Montheith, 1972).

La baja disponibilidad de radiación solar global disminuye significativamente la tasa fotosintética de las hojas, lo que resulta en una menor acumulación de materia seca (Sun et al., 2016). Su mayor impacto se encuentra principalmente en la fase de llenado de granos, lo que implica una reducción de la productividad debido a la disminución del número de granos m^{-2} y el peso de 1000 granos (Dingkuhn et al., 2015). El mayor rendimiento de arroz en ambientes subtropicales se puede explicar por la mayor acumulación de radiación solar global durante el ciclo de desarrollo de la planta (Santos et al., 2017).

La eficiencia de uso de la radiación (EUR, $g MJ^{-1}$) se define como la relación entre la biomasa aérea acumulada por la planta y la cantidad de radiación interceptada, o la eficiencia de convertir la radiación en materia seca. EUR es un parámetro esencial en los modelos de simulación de crecimiento de cultivos para la acumulación de biomasa, rendimiento de grano y la predicción del potencial productivo.

6.3.3. Fotoperiodo

El fotoperiodo se define en horas por día, como el intervalo entre los primeros rayos del sol al amanecer y los últimos rayos del sol al atardecer, es decir, es la duración del día más la duración del crepúsculo (mañana y tarde). La respuesta de la planta al fotoperiodo se llama fotoperiodismo. Dado que el arroz de secano

es una planta de días cortos, los días cortos (10 horas) acortan su ciclo y anticipan la floración. Yoshida & Parao (1976) caracterizaron los principales aspectos relacionados con la sensibilidad del cultivo del arroz al fotoperiodo. Los puntos que merecen ser destacados son: a) En cultivares que responden al fotoperíodo, la fase de desarrollo vegetativo del arroz se puede dividir en fase vegetativa básica o fase juvenil (BVP) y fase sensible al fotoperiodo (PSP). El PSP de cultivares poco sensibles al fotoperiodo es menor a 30 días, mientras que el cultivar considerado sensible al fotoperiodo es mayor a 31 días; b) Se considera fotoperiodo óptimo la duración del día en que la duración de la emergencia hasta la floración es mínima. El fotoperiodo óptimo, para la mayoría de los cultivares, es entre 9 y 10 horas; c) El fotoperiodo crítico es aquel en el que la planta tardará el tiempo máximo (días) en florecer o, según el cultivar, no florecerá en absoluto.

La reacción de las plantas de arroz al fotoperiodo puede clasificarse en: Insensible: cuando la PSP es corta (menos de 1 día) y la BVP varía de corta a larga; Poco sensible: cuando hay un aumento marcado en el ciclo de la planta cuando el fotoperíodo es superior a 12 horas; la duración de la PSP puede exceder los 30 días, pero la floración se producirá en cualquier fotoperíodo prolongado; Muy sensible: cuando hay un gran aumento en el ciclo con un aumento en el fotoperiodo; no hay floración más allá del fotoperíodo crítico; La BVP suele ser pequeña (no más de 40 días) (Steinmetz et al., 2006).

En general, se puede decir que, para las principales regiones productoras del mundo, el fotoperiodo no es un factor limitante, observando los tiempos de siembra recomendados. Esto se debe a que en el proceso de adaptación y, o en la creación de nuevos cultivares, se seleccionan aquellos que tienen ciclos de duración compatibles con las características fotoperiódicas de la región.

6.3.4. Precipitaciones

Las características del régimen hídrico, expresadas por la cantidad y distribución de las lluvias durante el ciclo de cultivo de

arroz de secano, son los factores más limitantes en la producción de granos. En el Cerrado brasileño, las sequías (verano) son comunes durante la temporada de lluvias. En general, estos períodos secos se caracterizan por una alta demanda de evaporación, altos niveles de radiación solar y altas temperaturas del aire. Además, el Cerrado se caracteriza por el predominio de suelos con alta velocidad de infiltración de agua, baja capacidad de almacenamiento de agua y baja fertilidad natural (Espinoza et al., 1982).

6.4. Zonificación de riesgo climático

Debido a la distribución irregular de las lluvias, el riesgo climático, que se caracteriza por la cantidad de agua en el suelo disponible para los cultivos, se acentúa por la frecuente disminución de la cantidad de agua. A menudo, esta irregularidad de las precipitaciones se traduce en periodos sin lluvia que duran de 5 a 35 días, lo que puede reducir la producción de cereales (Heinemann, 2010). Sin embargo, se cree que el efecto negativo provocado por la disminución de agua se puede minimizar conociendo las características de las precipitaciones de cada región y el comportamiento de los cultivos en sus diferentes fases fenológicas; es decir, sembrando en aquellos períodos en los que la probabilidad de descenso del nivel del agua de la lluvia es menor, especialmente durante la fase de floración y llenado de grano. Aún en esta línea de investigación, Stone et al. (1980) observaron que, en condiciones de estrés hídrico, el arroz de secano mostró reducciones en el número de granos por panícula, en el peso de granos, en la producción total de materia seca, en la altura de la planta y en el índice de cosecha, así como un aumento en el porcentaje de espiguillas estériles.

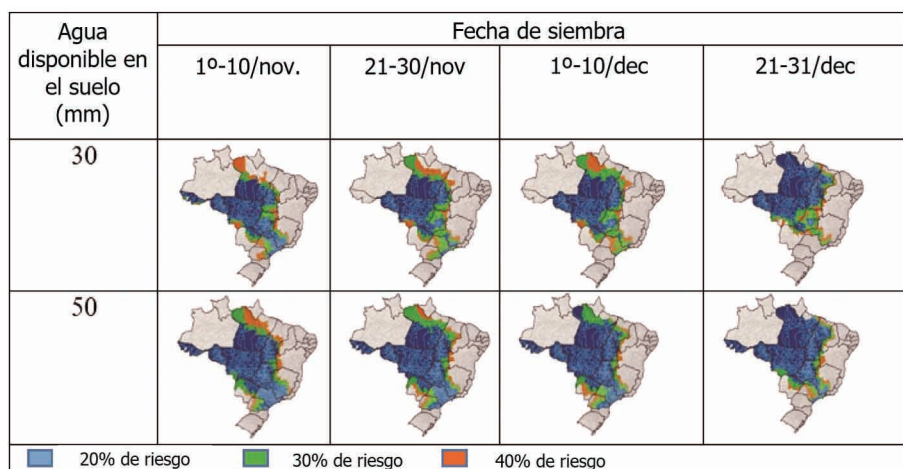
Dependiendo de la etapa de desarrollo del cultivo, los efectos negativos por estrés hídrico pueden variar. Si se produce estrés hídrico durante la fase vegetativa, puede producirse una reducción en la altura de la planta, el número de macollos y el área foliar. Sin embargo, la planta puede recuperarse si las

necesidades de agua se satisfacen a tiempo para permitir la recuperación antes de la floración. Sin embargo, si se produce estrés durante la fase reproductiva, no tiene sentido satisfacer las necesidades de agua en las siguientes fases, ya que el efecto será severo, hasta el punto de afectar considerablemente la productividad.

Para reducir los efectos negativos derivados del déficit hídrico, es necesario sembrar en periodos en los que las fases de floración y llenado de grano coincidan con una mayor oferta de lluvias. Y esto es posible con una zonificación de riesgo climático mediante un estudio de balance hídrico.

Para estimar los riesgos climáticos a los que se expone el cultivo de arroz de secano, se utilizó el modelo para calcular el balance hídrico SARRA (Sistema Regional de Análisis de Riesgos Agroclimáticos), considerando la lluvia, la evapotranspiración potencial, el cultivo, la capacidad hídrica disponible del suelo y las etapas de desarrollo del arroz de tierras altas. Las áreas y períodos más apropiados para el cultivo de arroz de secano en Brasil, como porcentaje de riesgo, se muestran en el Cuadro 22.

Tabla 22. Zonificación del riesgo climático para el arroz de secano en Brasil. Fuente: Steinmetz e Silva (2017).



6.5. Riego

El uso de riego por aspersión complementario minimiza el riesgo de deficiencia de agua, lo que resulta en aumentos significativos en la productividad del arroz de secano. Considerando que la productividad en este sistema puede alcanzar niveles similares a los obtenidos con riego por inundación, con calidad equivalente, el cultivo de arroz bajo aspersión es una alternativa interesante.

La mayor ventaja del riego por aspersión en el cultivo de arroz de secano es su contribución a la estabilidad de la producción al reducir el estrés hídrico. Además, el riego proporciona una mayor productividad y una mejor calidad del producto. Rodrigues & Arf (2002), en Selvíria, MS, en el año agrícola 1999/00, verificaron un aumento del 30% en la productividad del arroz mediante el uso de riego suplementario por aspersión. Para la misma ubicación, el aumento alcanzó el 91%, en 2000/01 (Soratto et al., 2002). Arf y col. (2002) encontraron, en un año de sequías, que el riego suplementario promovió aumentos en la productividad que oscilaron entre el 113 y el 177%.

Los frecuentes períodos de estrés hídrico que sufre el cultivo de arroz de secano durante la temporada de crecimiento provocan una menor calidad del grano en comparación con el arroz de regadío. El porcentaje de espiguillas estériles y granos yesosos aumenta considerablemente cuando ocurre deficiencia de agua durante las fases de emisión de panículas y llenado de granos (Sant'Ana, 1989). Con el uso de riego por aspersión, la planta de arroz no está sujeta a estrés hídrico y, como resultado, el proceso de llenado de granos no se interrumpe. En consecuencia, el número de granos por panícula y el peso de granos (Soratto et al., 2002) son mayores y el número de espiguillas estériles es menor (Rodrigues & Arf, 2002). La formación inadecuada de granos y la presencia de granos yesosos conducen a un mayor porcentaje de granos quebrados. Arf y col.

(2002) encontraron que el riego por aspersión incrementó el beneficio y el rendimiento de granos enteros, principalmente en el año con sequías. Además del aumento de la productividad y calidad del arroz, es posible utilizar los equipos de riego para otros cultivos (poroto y trigo, por ejemplo), en la cosecha otoño-invierno, promoviendo así un mayor uso de los equipos y brindando una mayor rentabilidad al agricultor.

Un aspecto importante a considerar en el riego por aspersión es el intervalo entre riegos. Stone y col. (1986), en un estudio realizado en Goiânia (GO), concluyó que, combinando productividad y economía, el riego del arroz por aspersión debe realizarse de tal manera que el potencial hídrico del suelo, medido a 0,15 m de profundidad, no alcance valores inferiores a -0,025 MPa.

Es difícil cuantificar con precisión el volumen total de agua necesario cuando se usa riego suplementario, ya que depende de la cantidad y distribución de la lluvia. El requerimiento total de agua para el cultivo de arroz de secano generalmente varía de 600 a 700 mm, sin embargo, considerando los cultivares tempranos y el uso de labranza cero, este valor se puede reducir a alrededor de 450 mm. Considerando sólo el riego suplementario, las profundidades de riego alcanzan valores por debajo de 200 mm por ciclo, en las regiones Sudeste, Medio Oeste y Norte de Brasil.

El requerimiento de agua del arroz irrigado por aspersión se puede estimar a partir de tanques evaporimétricos, basándose en la relación entre la evaporación de agua medida en el tanque USWB Clase A (ECA) y la evapotranspiración del cultivo (ETc), usando el coeficiente del tanque (Kp) y el coeficiente de cultivo (Kc), de modo que $ETc = ECA.Kp.Kc$.

Doorenbos y Kassam (1979) presentaron valores de Kp para el clima y el entorno que rodea al tanque. Los valores de Kc para las diferentes etapas del cultivo del arroz (Cuadro 23) son más altos para el arroz sembrado en suelo preparado convencionalmente (PC) que para el cultivado con labranza cero (PD). Stone y Silveira (2004) encontraron que la evapotranspiración bajo PD fue un 15% menor que en PC (Tabla 24), lo que reduce la necesidad de riego suplementario.

Tabla 23. Coeficientes de cultivo referentes a arroz de tierras altas sembrado a un espaciamiento de 0,20 m entre líneas.

*Fuente: Adaptado de Stone e Silva (1999).

Estadio	Duración (día)	Coeficiente de cultivo (Kc)	
		PC ^{1*}	PD ^{2*}
Emergencia – Inicio de macollaje	20	0,58	0,18
Inicio de macollaje – Diferenciación de la panícula	45	0,72	0,67
Diferenciación de la panícula – Grano pastoso	55	1,34	1,28
Grano pastoso – Madurez	15	0,67	0,53

Tabla 24. Estimación de la evapotranspiración y la necesidad de riego suplementario en arroz de tierras altas, en el sistema convencional de labranza del suelo y sin labranza.

Municipio	Evapotranspiración (mm/ciclo)		Lámina de riego suplementaria (mm/ciclo)	
	PC ¹	PD ²	PC ¹	PD ²
Guaíra – SP	629	530	106	70
Unai – MG	565	482	194	167
Vicentinópolis – GO	578	495	71	46
Primavera do Leste – MT	487	417	73	45

¹ Labranza convencional de suelo; ² Siembra directa; Fuente: Adaptado de Stone e Silveira (2004).

En un trabajo desarrollado en Embrapa Arroz e Feijão, utilizando el modelo de simulación ORYZA2000 v.3 (Bouman et al., 2001) y datos de 30 años de 52 estaciones meteorológicas, se estimó la necesidad de riego suplementario para el cultivo de arroz de secano en los estados de Goiás, Mato Grosso, Rondônia

y Tocantins. Fueron consideradas las necesidades de agua promedio para ocho fechas de siembra del 01/11 al 01/10, las características físico-hídricas de los suelos que representan el 70% de la región, variando la capacidad hídrica disponible del 3 al 8% para los primeros 16 cm de profundidad y las características fenotípicas del cultivar de arroz de secano BRS Primavera.

El estado de Rondônia presentó la menor demanda de suplementación hídrica y el estado de Goiás la más alta (Tabla 25), debido a las características del régimen de lluvias en estos estados. Rondônia está influenciada por sistemas que operan en la Amazonía, por ejemplo, complejos convectivos de mesoescala tropical, y Goiás está influenciada por sistemas extratropicales, como frentes fríos y líneas de inestabilidad. En general, las mayores demandas de suplementación de agua se verificaron al inicio y al final del período de siembra considerado.

Tabla 25. Necesidad de suplementación hídrica para el cultivo de arroz de tierras altas para los estados de GO, MT, RO e TO en diferentes fechas de siembra. Fuente: Adaptado de Stone et al. (2015).

UF	Día de siembra							
	01/11	10/11	20/11	30/11	10/12	20/12	30/12	10/01
Lámina (mm ciclo⁻¹)								
GO	143	142	144	148	151	155	164	175
MT	142	137	132	131	135	138	141	146
RO	130	124	120	120	122	125	126	133
TO	146	140	134	130	132	133	136	140

Otra forma de calcular la cantidad de agua que se aplicará al suelo sembrado con arroz es utilizando un tensiómetro y la curva de retención de agua del suelo. Los tensiómetros son dispositivos que miden el potencial agua de la matriz del suelo. La curva de retención relaciona el contenido de agua o humedad del suelo con la fuerza con la que el suelo retiene el agua. Es una propiedad físico-hídrica del suelo, determinada en laboratorio.

Los tensiómetros deben instalarse en el suelo a dos profundidades, 0,15 m y 0,30 m, en al menos tres lugares de la superficie plantada, cuando se trata de riego por pivote central. Estos puntos deben corresponder a 4/10, 7/10 y 9/10 del radio de pivote, en línea recta desde la base. El tensiómetro de 0,15 m se llama “decisión”, porque indica el momento de riego, mientras que el tensiómetro de 0,30 m se llama “control”, porque indica si el riego se está haciendo bien, sin exceso o falta de agua. El riego debe realizarse cuando el promedio de las lecturas de los tensiómetros de decisión se encuentre alrededor de $-0,025$ MPa (Stone et al., 1986).

El procedimiento para determinar la cantidad de agua a aplicar es el siguiente: con la curva de retención de humedad se verifica cuánto corresponde $-0,025$ MPa al contenido de agua en el suelo, expresado en m^3 de agua m^{-3} de suelo. Luego, se calcula la diferencia entre el contenido de humedad a $-0,006$ MPa (tensión objetivo u óptima) y $-0,025$ MPa. Esta diferencia, multiplicada por la profundidad de 0,30 m, indicará la lámina neta de riego. Esto se debe al hecho de que la capa de suelo de 0-0,30 m de profundidad abarca casi todas las raíces de arroz regadas por aspersión y que la lectura del tensiómetro de decisión representa el potencial matricial promedio del agua del suelo en esta capa.

Foto: Patricio Orozco-Contreras



7. Arroz irrigado en clima tropical en Brasil

Alberto Baêta dos Santos¹; Mellissa Ananias Soler da Silva¹; Luís Fernando Stone¹; Alexandre Bryan Heinemann¹

Entre los cereales más cultivados y consumidos en el mundo, el arroz merece ser destacado por varios aspectos: es un alimento en el que el grano sale del campo y se consume prácticamente sin proceso de industrialización; atiende a poblaciones con alto y bajo poder adquisitivo; ocupa el segundo lugar en producción y extensión de superficie cultivada, siendo superado sólo por el trigo; participa con aproximadamente el 33% de la producción mundial de cereales y juega un papel estratégico tanto económica como socialmente para los pueblos de las naciones más pobladas del mundo.

En la región tropical de Brasil, el arroz se cultiva en unas 183.746 hectáreas, lo que corresponde a aproximadamente el 13,2% del área total cultivada en el sistema de riego de Brasil. Las tierras bajas tropicales del valle de Tocantins-Araguaia ocupan alrededor de 1,2 millones de hectáreas de suelo clasificado como Inceptisol y tienen un gran potencial para su uso en la producción de arroz de riego. La región tropical tiene características favorables para el uso agrícola con el sistema de riego por inundación en la época de lluvias, apto para el cultivo de arroz de riego (Figura 91) (Santos, 2004).

¹ Embrapa Arroz e Feijão, Departamento de Pesquisa, Santo Antônio de Goiás, GO, Brasil.



Figura 91. Distribución geográfica de los municipios que cultivan arroz regado en llanuras aluviales en la región tropical de Brasil. Fuente: IBGE (2014).

El estado de Tocantins es el tercer productor de arroz de riego en Brasil y, en la región tropical, es el mayor productor, con una superficie cultivada de 119,7 mil hectáreas. En el año agrícola 2018/19 se cosecharon 665,8 mil toneladas de arroz paddy (Conab, 2019). En la región suroeste del estado de Tocantins, los municipios de Formoso do Araguaia, Lagoa da Confusão, Cristalândia, Dueré y Pium son responsables del 96% del arroz producido en el estado, según Conab (2019). Esta región es considerada una de las más prometedoras para la expansión del arroz de regadío. Como ejemplo de la región tropical con potencial productivo para el cultivo, está el valle de Javaés, una inmensa zona de llanura entre el Araguaia y sus afluentes, Urubu, Javaés y Formoso, con más de 500 mil ha, considerada la mayor

superficie continua para riego por gravedad en el mundo. La producción de arroz en las llanuras aluviales de Tocantins es estratégica para diversificar el suministro de este alimento y garantizar la seguridad alimentaria en el país, ya que actualmente el 81% de la producción de este grano proviene de los estados de SC y RS (Embrapa Arroz e Feijão, 2019).

La cadena de producción de arroz de regadío juega un papel importante en la generación de divisas y empleos para el estado de Tocantins (Fragoso et al., 2013). En la época seca, la ausencia de lluvias, combinada con la baja humedad relativa y la baja temperatura nocturna, favorecen la incidencia de enfermedades fúngicas, siendo estas áreas utilizadas principalmente por los productores de soja para obtener semillas de buena calidad fisiológica y sanitaria (Pelúzio et al., 2010; Almeida et al., 2011). Desde 2006, el estado de Tocantins cultiva soja en el vacío sanitario. Esta liberación, otorgada por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Abastecimiento, se debe a las condiciones climáticas y territoriales que se encuentran en los municipios de Lagoa da Confusão, Dueré y Formoso do Araguaia (Arruda et al., 2016).

Se ha comprobado que la productividad del arroz de regadío en la región tropical es menor que la obtenida en la subtropical. Esto suele ser el resultado de los efectos nocivos de ciertos factores bióticos y abióticos en el cultivo. Como factores bióticos, consideramos la altísima incidencia de enfermedades fúngicas, como el añublo (*Magnaporthe oryzae*), insectos plaga, como chinches (*Oebalus* spp.) y malezas, con destaques para el porotillo (*Aeschynomene* spp.), capín de arroz (*Echinochloa* spp.), Ciperáceas (*Cyperus* spp.) y arroz maleza o arroz rojo (*Oryza sativa*) (Santos, 2004). Como factores abióticos, los estreses térmicos pueden estar afectando negativamente la productividad del arroz, debido a la elevación de la temperatura del agua de riego, que, en determinados momentos, alcanza valores extremadamente altos provocando estrés en las plantas de arroz (Santos et al., 2003). Además, la menor productividad en

condiciones tropicales también se puede atribuir a la reducción del ciclo del cultivo y la menor respuesta a los fertilizantes, especialmente nitrógeno (N) (Santos, 2004).

En el ecosistema de la llanura aluvial predominan suelos de diferentes clases. En estos sistemas se debe realizar un manejo que preserve el suelo y el agua, con una mínima degradación del medio ambiente, lo que significa que los futuros sistemas agrícolas deben ser económicamente viables, ecológicamente sostenibles y social y políticamente aceptables (Fageria et al., 1999).

7.1. Manejo de agua

En regiones de gran representatividad del cultivo de arroz de regadío como el Sur, el manejo del riego con lámina continua, sin intervalos de oxidación, se encuentra entre las técnicas necesarias para lograr alta productividad en los arrozales. Sin embargo, en la región tropical, la diferencia de suelo, especialmente su permeabilidad, clima y diversidad de atributos de las cuencas hidrográficas, particularmente debido a la alteración estacional del nivel freático, dificulta su adopción (Santos et al., 2015).

En Tocantins, la temperatura del agua de riego del arroz llega con frecuencia a valores superiores a los 35 °C, alcanzando temperaturas de hasta 52 °C. Como alternativa al riego por inundación continuo, se ha demostrado que el manejo del riego por inundación intermitente es eficaz para minimizar el estrés térmico causado por mantener la lámina del agua en la superficie del suelo. El riego por inundación intermitente también puede contribuir a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y aumentar la eficiencia del uso del agua de riego (EUA) en el cultivo del arroz (Tarlera et al., 2016).

La inundación continua del suelo afecta sus atributos físicos, provocando la compactación del suelo al aumentar su densidad y reducir la macroporosidad y la porosidad total (Mentges et al., 2013). Estas condiciones son desfavorables para el

desarrollo de la mayoría de los cultivos de cereales. Además, aunque la descomposición de los residuos orgánicos en los suelos anaeróbicos es más lenta que en los aeróbicos (Kögel Knabner et al., 2010), la alteración del suelo puede acelerar las pérdidas de carbono orgánico del suelo (COS) y del N asociado con la materia orgánica del suelo. Por tanto, las inundaciones intermitentes también pueden ser una opción para mejorar la calidad del suelo y favorecer el cultivo de especies mesófitas, como la soja, fuera de temporada.

En un estudio realizado en el municipio de Dueré, TO, durante dos años consecutivos, Santos et al. (2003) encontraron que el mantenimiento del suelo saturado, pero sin la formación de lámina de agua en superficie, durante todo el ciclo o incluso la floración proporcionó una mayor productividad de grano en comparación con la inundación continua durante todo el ciclo o hasta la diferenciación del primordio floral (R1). Mientras que las plantas más altas y de mayor rendimiento de grano entero se verificaron con inundación continua durante todo el ciclo o inundadas después de la floración. También en la región tropical, en Goianira, GO, se encontró que la ausencia de lámina de agua durante todo el ciclo del arroz proporcionó un rendimiento de grano equivalente al obtenido con inundaciones continuas, lo que se reflejó en una mayor eficiencia en el uso del agua de riego (EUA). El volumen de agua aplicado fue 30% y 63% menor en el manejo de inundaciones intermitentes y suelos saturados, respectivamente, en relación a inundaciones continuas. Como resultado, la EUA pasó de 0,28 en el manejo de inundaciones continuas a 0,46 kg de granos m⁻³ de agua en el suelo saturado, considerando las lluvias ocurridas en el período, y de 0,44 a 1,13 kg de granos m⁻³ agua sin lluvia, respectivamente. El alto requerimiento hídrico verificado bajo inundación continua se debió a las mayores pérdidas por percolación y flujo lateral, debido al alto contenido de arena del suelo, alrededor del 50%.

La mayor de los EUA debido a la inundación intermitente, sin embargo, está condicionado por el intervalo de tiempo

adecuado entre la desaparición de lámina de agua de la superficie y su reemplazo. Medeiros et al. (1995), en Roraima, compararon inundaciones continuas, inundaciones intermitentes, saturación del suelo y combinaciones de estos sistemas de riego y encontraron que el sistema más eficiente, con el menor costo de bombeo, era la inundación intermitente durante todo el ciclo, con humedad del suelo equivalente a potenciales de matriz entre -20 y -40 kPa y un turno de riego promedio de cuatro días.

La condición de secar el suelo en riego por inundación intermitente es el factor más importante que afecta la productividad del arroz. La inundación intermitente moderada, en la que la fotosíntesis no se inhibe durante el período de secado del suelo y las plantas pueden rehidratarse por la noche, no sólo pueden ahorrar agua (23,4 a 42,6%), sino también aumentar la productividad de granos, del 6,1 al 15,2%, y la EUA del 27 al 51%, en relación a la inundación continua (Yang et al., 2017). Según estos autores, para que esto suceda, la reposición de agua debe realizarse a un potencial hídrico del suelo de -10 a -15 kPa o a un potencial hídrico foliar al mediodía de aproximadamente -0,60 a -0,80 MPa, o el nivel freático se mantuvo de 10 a 15 cm por debajo de la superficie del suelo.

Las inundaciones intermitentes moderadas pueden mejorar la calidad del arroz, reducir la acumulación de arsénico (As) en los granos y reducir la emisión de CH_4 , disminuyendo así el potencial de calentamiento global y la intensidad de los gases de efecto invernadero. Sin embargo, un régimen severo de inundaciones intermitentes, en el que la fotosíntesis se inhibe severamente durante el período de secado del suelo y las plantas no pueden rehidratarse durante la noche, puede reducir drásticamente el rendimiento y la calidad del grano, aunque también puede aumentar la EUA y reducir las emisiones de CH_4 en comparación con las inundaciones continuas (Yang et al., 2017).

7.2. Manejo de nitrógeno

Para la conservación y sostenibilidad de la productividad de los cultivos, el manejo adecuado de la fertilidad del suelo es una práctica importante, incluida la del N, que se encuentra entre las técnicas necesarias para lograr un alto potencial productivo en los sistemas agrícolas de regadío. El N es el nutriente de mayor demanda metabólica para las plantas, y su deficiencia suele ser un factor limitante en el crecimiento de los cultivos. El N es un componente de la clorofila, afecta la expansión del área foliar de la planta, lo que aumenta la eficiencia en la interceptación de la radiación solar y la tasa fotosintética y, en consecuencia, el rendimiento de grano (Fageria & Stone, 2003).

El cultivo de arroz en el sistema de cultivo de riego por inundación es muy exigente en nutrientes, y el N se encuentra entre los más requeridos, ya que es un factor importante para la expresión de la productividad potencial del grano (Fageria et al., 2008). El N tiene una dinámica extremadamente compleja en el cultivo de arroz de regadío, con gran variabilidad en sus formas químicas debido al contenido de agua del suelo (condiciones aeróbicas o anaeróbicas), lo que se refleja directamente en la eficiencia del uso del nutriente por parte del cultivo.

La deficiencia de N en el cultivo de arroz de regadío se observa con frecuencia en suelos de tierras bajas tropicales. Entre las principales razones de su aparición se encuentran las pérdidas por diversos procesos, como la volatilización del amoníaco en el suelo, las pérdidas gaseosas de óxidos de nitrógeno (NO_2 , N_2O , NO) y nitrógeno elemental (N_2), la lixiviación de nitrato en el suelo fuera del alcance del sistema radicular, las pérdidas de NH_3 por la parte aérea de las plantas (Fageria & Baligar, 2005), y la disminución del contenido de materia orgánica, como consecuencia de cultivos sucesivos (Munda et al., 2018).

La eficiencia en el uso de nitrógeno por el arroz es de alrededor del 30-35% y aproximadamente el 50% del N se pierde en el medio ambiente (Zhu & Chen, 2002). La eficiencia aparente de recuperación del fertilizante nitrogenado (el porcentaje de

fertilizante N recuperado en la biomasa vegetal aérea al final de la temporada de crecimiento) es solo del 33% en promedio (Yang et al., 2017). En este escenario, la adopción de tecnologías basadas en inundaciones intermitentes podría reducir la acumulación de N en las plantas y la eficiencia del uso de N al estimular las pérdidas de N al aumentar la volatilización, nitrificación y desnitrificación del amoníaco (Rhine et al., 2011). Según Yang et al. (2017), la estimulación de las pérdidas de N a través de inundaciones intermitentes depende de las condiciones de secado del suelo. Es posible que las inundaciones intermitentes moderadas no aumenten las pérdidas de N debido a la reducción de la lixiviación vertical de $\text{NH}_4^+\text{-N}$ y el N total y, por lo tanto, es posible que no disminuyan la eficiencia del uso de N.

La mayor parte del N del suelo se encuentra en formas orgánicas, que deben mineralizarse para liberarlo y ponerlo a disposición de las plantas. Por tanto, no es posible establecer una curva de calibración para este nutriente. Para hacer la recomendación de N, se determina la curva de respuesta de la planta a las dosis aplicadas.

En la recomendación de N para el arroz de regadío en la región subtropical, el contenido de materia orgánica del suelo (MOS) se utiliza como indicador de la disponibilidad de nutrientes y se basa en la expectativa de respuesta a la fertilización (Scivittaro & Gomes, 2006). En la región tropical, la recomendación local para la fertilización con nitrógeno en el arroz de regadío ha sido la aplicación de parte del N en el surco, en el momento de la siembra, y parte de la cobertura.

En la región tropical, debido a la práctica común de preestablecer dosis y tiempos de aplicación de N en el arroz de regadío, existe el riesgo de suministrar el nutriente en cantidad inadecuada y fuera de la época de mayor demanda de la planta. Para un mejor ajuste entre estos tiempos, se ha sugerido el monitoreo de los niveles de N foliar y clorofila como una alternativa a los métodos convencionales para este diagnóstico.

En estudios realizados en la región tropical por Santos et al. (2017), las etapas en las que los valores del Índice de

Suficiencia de N (ISN), obtenidos con el uso del medidor de clorofila, indicaron que la necesidad de la primera aplicación de N fue V3 - V4, es decir, antes o al inicio del macollamiento, y la segunda aplicación de N fue V7 - V8, es decir, con momento del macollamiento efectivo, definido según la escala de Counce et al., (2000).

La falta de sincronismo entre el momento de aplicación y el momento de mayor demanda de N por parte de las plantas proporciona una baja eficiencia de recuperación de N por el arroz de regadío. Debido a que está predefinido, la dosis de N utilizada puede estar subestimada o sobreestimada. Esto puede llevar, por un lado, a una caída en la productividad del grano, y por otro, a un aumento de los costos por el uso innecesario de fertilizantes, lo que conlleva una disminución en la ganancia del agricultor, además de impactar negativamente al medio ambiente a través de la lixiviación de nitratos, mayor emisión de gases del proceso de desnitrificación, es decir, riesgo de contaminación ambiental.

El uso del medidor de clorofila, llamado medidor de clorofila, equipo portátil que proporciona lecturas, unidades SPAD, que corresponden al contenido de pigmento presente en la hoja y se ha utilizado para estimar el contenido de N de la hoja, ya que la clorofila y el N se correlacionan positivamente en la misma. cultivo (Turner & Jund, 1991; Carvalho et al., 2012; Pcojeski et al., 2012) y con rendimiento de grano. El uso del medidor de clorofila es una alternativa práctica a los métodos convencionales para definir la necesidad de N en el arroz de regadío en las tierras bajas tropicales.

Es posible mantener la producción a largo plazo en llanuras aluviales tropicales, con una degradación ambiental mínima. Producir de manera sostenible significa reducir costos y evitar el desperdicio de energía y materias primas. Significa aumentar la productividad, la competitividad del capital y el trabajo y abrir nuevos mercados, crear empleos de calidad y aumentar la rentabilidad.

Foto: Pablo Mazzuco



8. Arsénico en la producción de arroz de América del Sur

César Quintero¹ & Romina Befani¹

El arsénico (As) es un elemento químico ampliamente distribuido en la corteza terrestre (rocas, sedimentos y suelos), atmósfera, aguas naturales y organismos. Es un metaloide que se combina con otros elementos para formar compuestos orgánicos e inorgánicos. Forma especies químicas de As inorgánicos como arsenito (AsIII) y arseniato (AsV), y especies orgánicas como ácido monometilarsónico [MMA (V)], ácido monometilarsenioso [MMA (III)], ácido dimetilarsínico [DMA (V)] y ácido dimetil arsénico [DMA (III)], óxido de trimetil arsina (TMAO), arsenobetaina (AB) y arsenocolina (AC). Está clasificado como carcinógeno de clase 1, y su toxicidad depende de su forma química. En general, el As inorgánico (As_i) se considera más tóxico que las formas orgánicas (Smith et al., 2002).

Las especies inorgánicas (As_i: As_{III} y As_V) están asociados con impactos negativos en la salud, como el cáncer (Meharg et al., 2009), la hipertensión, la diabetes y los nacimientos prematuros (OMS, 2011). El arroz tiene niveles naturalmente más altos de As_i (Williams et al., 2007), ya que las plantas de arroz tienen una mayor capacidad para absorberlo y acumularlo en el grano en comparación con otros cultivos alimentarios básicos (Das et al., 2004). En 2009, la Unión Europea estableció que más del 50 % del As inorgánico que se consume proviene de los cereales, en especial el arroz. Este y otros estudios despertaron una fuerte

¹ Facultad de Ciencias Agropecuarias (FCA). Universidad Nacional de Entre Ríos (UNER). Cátedra de Edafología, Fertilidad de suelo y nutrición de cultivos. Entre Ríos, Argentina.

ola de investigación sobre el arsénico en el arroz, con abundante producción científica.

8.1 El arsénico en el sistema suelo-agua-arroz-atmósfera

Durante la inundación en el cultivo del arroz, la disponibilidad de As_i en los poros del suelo aumenta significativamente en comparación con los sistemas de cultivo de otros cereales en ambientes aeróbicos. La anaerobiosis lleva a que el AsV débilmente móvil se reduzca a $AsIII$, altamente móvil y disponible. Por otro lado, los microorganismos juegan un papel clave en la transformación del As mediante reacciones de oxidación/reducción y metilación/volatilización, lo que resulta en algunos escenarios de mayor oferta de MMA y DMA. En este entorno de alta disponibilidad de fuentes inorgánicas y orgánicas de As , las raíces de arroz absorben fácilmente As a través de sus eficientes canales de transporte de silicio (Si). Esta combinación de alta disponibilidad de As como es el ambiente anaeróbico y raíces muy eficientes para absorberlo determina que el arroz sea el cereal con mayor concentración de As , muy por encima de otros granos (Figura 92).

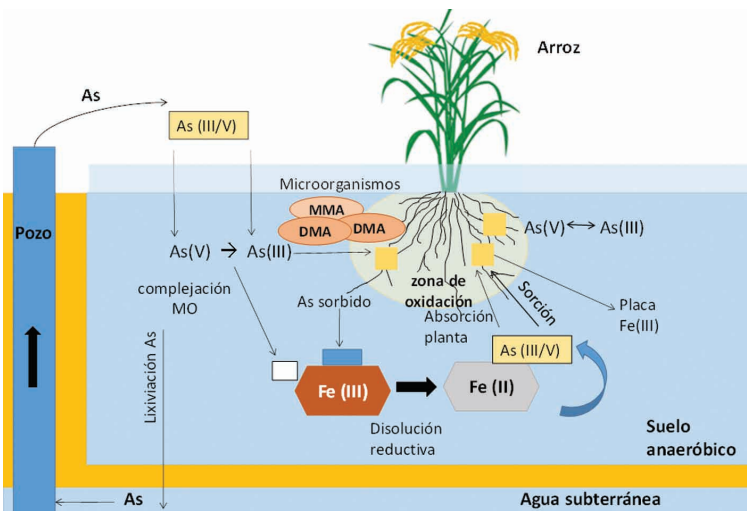


Figura 92. Ciclo do Arsénico (As) en el sistema suelo-agua-arroz-atmosfera. Fuente: Adaptado de Gillispie et al. (2015).

La formación de la placa de hierro (Fe) en las raíces del arroz, la disponibilidad de metales (óxidos/hidróxidos de Fe y Mn), la materia orgánica, la mineralogía de arcilla y los iones compuestos competidores (fosfatos y silicatos) influyen en la movilidad de AsV y AsIII.

En el ambiente existe un nivel natural de As que se modifica por la acción antrópica (actividades mineras, actividades agrícolas con aplicación de herbicidas, fertilizantes y riego, entre otras). La principal fuente natural de As en el suelo es el material de origen del cual se deriva el suelo, asociado con los procesos de meteorización de material inorgánico y emisiones volcánicas. Se estima como nivel general un valor promedio de 5-10 mg kg⁻¹ de As total en suelos no contaminados en todo el mundo (Han et al., 2003; Hossain et al., 2008).

En el caso de los suelos agrícolas, considerando los efectos tóxicos del As, se han establecido valores límite máximos para el As total entre 10 y 50 mg kg⁻¹ (Duressa & Leta, 2015). En Argentina, país que cuenta con legislación sobre As en suelos y agricultura, se determina que para uso agrícola el suelo tiene un nivel máximo de 20 mg kg⁻¹ (Ley Nacional No. 1995). En Uruguay, la referencia es la que establece la Directiva Canadiense de Calidad Ambiental (CCME), donde el límite para suelos agrícolas es de 12 mg kg⁻¹. Los niveles de As total registrados en Uruguay y Argentina están por debajo de los valores reportados a nivel mundial y muy por debajo del límite establecido para suelos agrícolas según las directrices de calidad ambiental de Canadá (Carracelas et al., 2019a). En las normas internacionales se mencionan niveles de referencia de As específicos para las condiciones reducidas de los suelos de arroz. Por ejemplo, en Alemania este nivel es de 50 mg kg⁻¹, mientras que la legislación china establece 30 mg kg⁻¹ cuando el pH del suelo es inferior a 6,5 y 25 mg kg⁻¹ para suelos con pH 6,5-7,5.

La movilización de As en el agua está controlada por procesos geoquímicos de interacción entre el agua y la fase sólida, tales como: adsorción-desorción, intercambio iónico y reacciones

redox de disolución-precipitación. Especialmente la disolución reductora de óxidos y oxihidróxidos de Fe, la reducción de la precipitación de sulfatos y piritas. Los registros de As total en aguas subterráneas en diferentes provincias de Argentina muestran valores entre un mínimo de $2 \mu\text{g L}^{-1}$ y un máximo de $5.300 \mu\text{g L}^{-1}$, que responden a características geológicas locales (Smedley et al., 2008). Un valor total de As de $100 \mu\text{g L}^{-1}$ en agua es la concentración máxima recomendada para riego por la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) (FAO, 1985). Este límite de $100 \mu\text{g L}^{-1}$ para riego junto con $500 \mu\text{g L}^{-1}$ para fuente de agua para animales fue adaptado por la legislación de los países de América del Sur. Cuando hablamos de agua para consumo humano, la mayoría de países aceptan hasta $50 \mu\text{g L}^{-1}$, mientras que la recomendación de la OMS es menos de $10 \mu\text{g L}^{-1}$. Tanto en Argentina como en Uruguay, las fuentes de agua para riego de arroz presentan valores de As muy por debajo de los límites establecidos para las aguas de riego superficial (Carracelas et al., 2019c; Quintero et al., 2014).

La concentración de As en los cultivos depende de su forma química en el suelo. El As en el suelo se encuentra fundamentalmente en dos estados de oxidación: el arseniato que domina los sistemas oxidados, y el arsenito que se limita a ambientes de anoxia como los suelos de arroz. La inundación del suelo tiende a incrementar la disponibilidad de As porque favorece la reducción de AsV a AsIII, siendo este último más móvil, soluble y tóxico en la solución del suelo y más fácilmente absorbido por las raíces del arroz (Williams et al., 2007). Esto explica por qué el arroz cultivado en sistemas de riego continuo por inundación absorbe más As que otros cereales. Aun así, esta mayor absorción de As en el arroz se debe también a su fisiología; ciertos compuestos como el AsIII son similares en tamaño a los compuestos que contienen silicio, un nutriente esencial que el arroz absorbe en gran cantidad. Así, AsIII y las especies metiladas no disociadas utilizan el mismo transportador a través del cual entra el ácido silícico a la célula. El arseniato actúa como análogo del fosfato con respecto al transporte a través de la membrana

plasmática de la raíz, siendo el fosfato más eficaz en este mecanismo. Es por eso que, en ambientes de suelos inundados, donde AsIII es la especie dominante, es poco probable que la regulación del transportador de P afecte significativamente la acumulación de As en los granos de arroz. Sin embargo, es posible que en la rizósfera del arroz las raíces desarrollan una zona aeróbica, donde el arsenito puede oxidarse a arseniato y competir con el fosfato por la absorción de la planta.

Debido a las similitudes químicas entre el arseniato y el fosfato, el As puede reemplazar al fosfato en biomoléculas como el ATP, con impactos negativos en el crecimiento y el metabolismo de las plantas. Además, el DMA y el MMA pueden causar la enfermedad llamada “panícula erecta”, que reduce significativamente la productividad de ciertos cultivares de arroz (Rahman et al., 2007). La panícula erguida (pico de loro, o *Straighthead*) es un trastorno fisiológico del arroz que se caracteriza por flores estériles que, al no llenar el grano, permanecen erectas en la madurez, en lugar de inclinarse hacia abajo debido al peso de los granos llenos. Se desconoce la causa exacta, pero la inundación continua, el bajo pH del suelo, la alta disponibilidad de hierro, los altos niveles de materia orgánica y la presencia de As están relacionados con la aparición de este desorden de la panícula erecta.

El contenido de As en los tejidos del arroz muestra el siguiente patrón de acumulación: Raíces> Hojas> Tallos> Cáscara> Grano de arroz integral> Grano de arroz pulido (Zhu et al., 2008). Afortunadamente, más del 90% del As que absorbe la planta de arroz permanece en las raíces y muy poco llega al grano. Existen diferencias en la cantidad de As acumulado en los granos entre diferentes cultivares de arroz. Varios estudios han encontrado que la acumulación de As en el grano es mayor en las variedades de arroz Indica que en las Japonicas (Jiang; Shi; Wu, 2012; Carracelas et al., 2019a) En el grano de arroz, la especie de As más común encontrada son arsenito, ácido dimetilarsínico y, en menor medida, arseniato. El ácido monometilsónico es la frecuencia más baja en el grano. Las

especies inorgánicas son absorbidas más eficientemente por las raíces que las especies metiladas, pero su tasa de translocación a la parte aérea es mucho menor que en las especies orgánicas.

Existe una distribución preferencial de las especies de As dentro del grano, con predominio de formas inorgánicas en los tejidos externos, dispersándose DMA en el endospermo. Durante el procesamiento del arroz, se eliminan algunas fracciones del grano que contienen cantidades importantes de As, como la cáscara y el pericarpio. Por lo tanto, la concentración de As en el arroz pulido es mucho menor que la del arroz paddy, y el proceso de pulido es muy ventajoso ya que reduce la mayor parte del As de tipo inorgánico.

El riesgo de consumir As en el arroz está relacionado principalmente con los hábitos alimentarios de las diferentes culturas. Teniendo en cuenta la cantidad consumida, y considerando que el As inorgánico es la especie más dañina para la salud humana, se han establecido límites de tolerancia máxima de concentración de As en el arroz (Meharg; Zaho, 2012), (Tabla 26).

Tabla 26. Niveles máximos de Arsénico (As) en arroz de acuerdo con el CODEX Alimentarius. Fuente: FAO & WHO (2019).

Clase de arroz	Nivel máximo (NM) mg As kg ⁻¹	Parte del producto donde se aplica la norma	Forma de As
Arroz pulido	0,20	Todo el producto	Inorgánico
Arroz descascado	0,35	Todo el producto	Inorgánico
Arroz pulido	0,30	Todo el producto	Total

Por su parte, la Resolución MERCOSUR No. 12/11 establece en el reglamento técnico del MERCOSUR como límite máximo de As total el valor de 0,3 mg kg⁻¹ para el grano de arroz y sus productos derivados, excepto el aceite (MERCOSUR, 2011).

8.2. Lo que sabemos sobre los países sudamericanos

Entre los países sudamericanos, Argentina fue uno de los pioneros en medir los niveles de As en su producción de arroz cuando en 2010, Quintero et al., encontraron un valor promedio de As total de $0,34 \text{ mg kg}^{-1}$, con variación entre zonas de producción y cultivares. También se llevó a cabo la especiación de las formas químicas presentes en los granos de arroz, encontrándose la mayoría de As en forma de DMA y una pequeña proporción de As_i (Quintero et al., 2014; Farias et al., 2015). Este trabajo avanzó con un muestreo representativo de las diferentes zonas y cultivares sembrados en Argentina, donde se encontró que 32% de las muestras excedieron $0,3 \text{ mg kg}^{-1}$ de As total, y sólo 4,7% estuvieron por encima del límite de $0,2 \text{ mg kg}^{-1}$ de As_i (Oteiza et al., 2020). Todos los estudios coinciden en que el aumento de la concentración de As total se debe al aumento de la fracción orgánica, principalmente DMA (Farias et al., 2015; Oteiza et al., 2020).

En Uruguay, estudios realizados en diferentes regiones determinaron un promedio de As_i de $0,07 \text{ mg kg}^{-1}$, por debajo del límite propuesto por los estándares regionales e internacionales. La técnica de riego con mojado y secado alternado (MSA) resultó en menores niveles de As_i acumulado en los granos, además, se encontró que la acumulación de As_i también es dependiente del cultivar de arroz utilizado (Carracelas et al., 2019c). Otro estudio donde se realizó un muestreo representativo del país, los niveles promedio de As total en el grano fueron de $0,21 \text{ mg kg}^{-1}$, donde el 78% de las muestras registraron niveles por debajo del límite establecido en los países del Mercosur. En el caso de As_i , el promedio registrado fue de $0,06 \text{ mg kg}^{-1}$, donde no se registraron muestras superiores a $0,2 \text{ mg kg}^{-1}$ de As_i establecido por la OMS. Además, el 88% de las muestras estuvieron por debajo de $0,1 \text{ mg kg}^{-1}$ de As_i , que es el límite establecido para la alimentación de los bebés (Campos et al., 2020).

En Brasil, en muestras de diferentes variedades sembradas en Rio Grande do Sul, se encontraron valores de As total de $0,027$

a 0,63 mg kg⁻¹. En Santa Catarina, de 0,07 a 0,427 mg kg⁻¹, y en Mato Grosso (en suelo aeróbico) menos de 0,006 mg kg⁻¹ (Kato et al., 2018). También se realizó la especiación de 24 muestras de arroz descascarillado (integral), donde el contenido de As_i varió entre 0,068 y 0,174 mg kg⁻¹ (Kato et al., 2018).

8.3. Prácticas de manejo agronómico para reducir el As en arroz

Las condiciones anaeróbicas en el cultivo del arroz facilitan la movilización de As en la solución del suelo, principalmente como As(III), que es asimilado por las raíces. El poder reductor que aporta la materia orgánica del suelo, junto con los microorganismos juegan un papel clave en la transformación del As mediante las reacciones de reducción y metilación del As (Kumarathilaka et al., 2018). Como estrategia para minimizar la absorción de As, el riego alternativo con humectación y secado es positivo, ya que promueve la condición del suelo oxidado y disminuye la movilidad de absorción de As (Li et al., 2019). Otro método efectivo para reducir la acumulación de metales pesados en los granos de arroz es la selección y mejoramiento genético de cultivares, con el objetivo de seleccionar aquellos que tengan menor absorción y acumulación en granos (Khanam et al., 2020).

Se han evaluado diferentes métodos de riego en arroz con el fin de disminuir la concentración de As en los granos, estudiándose cultivos de secano (sin riego), riego por pivote central y riego intermitente en diferentes etapas. La disminución de la anaerobiosis disminuye el As en los granos, pero en algunos casos, la productividad puede verse afectada por un manejo ineficiente del riego. Se están evaluando nuevas alternativas de manejo del riego con periodos de suelo seco de corta duración durante diferentes fases de cultivo para reducir la acumulación de este metal sin afectar la productividad (Más información en el Capítulo 4). En Argentina se evaluaron alternativas de riego con secado del suelo durante la fase vegetativa durante cuatro años

agrícolas, realizados en la región donde se encontraron los valores más altos de As en los granos (Figura 93). Los resultados de productividad y concentración de As en los granos (enteros y pulidos) se pueden encontrar en la Tabla 27.

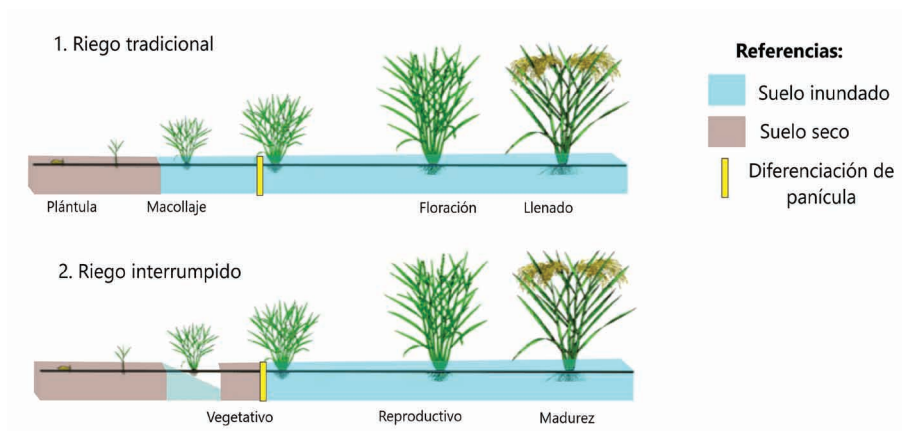


Figura 93. Sistemas de riego en arroz para reducir la acumulación de arsénico en los granos. Fuente: Cesar Eugenio Quintero - UNER.

Además de las condiciones ambientales y la productividad, la concentración de As varía significativamente entre años. En años con lluvias frecuentes y menor radiación solar, donde la productividad se reduce, la concentración de As en el grano es mayor, como en el ciclo 2015/16 (Tabla 27). Este hecho se debe a que aumentan las condiciones anaeróbicas del suelo. En años secos, con mayor oferta de radiación solar, aumenta la productividad y disminuye la concentración de As. Debido al riego, la concentración de As en los granos se mantiene en niveles medios.

La diferencia entre variedades también es significativa, tanto en productividad como en concentración de As. Las variedades de arroz largo fino (Guri INTA CL e IRGA 424) presentan altos rendimientos y una concentración relativamente baja de As. Así como las variedades de grano medio (Fado), mostraron alta productividad y concentración de As menor que los cultivares Guadiagrán e Hispamar.

Tabla 27. Productividad y concentración de Arsénico (As) en granos de cultivares de arroz. Entre Ríos, Argentina. Cesar Eugenio Quintero - Universidad Nacional de Entre Ríos (UNER).

Fuente de variación	Productividad de granos Mg ha ⁻¹	As-i integral mg kg ⁻¹	As-t integral mg kg ⁻¹	As-i pulido mg kg ⁻¹	As-t pulido mg kg ⁻¹
Año agrícola					
2015-16	6.455 a	0,16 c	0,89 b	0,12 b	0,77 b
2016-17	9.007 c	0,12 b	0,48 a	0,07 a	0,43 a
2017-18	12.218 d	0,11 b	0,53 a	0,06 a	0,43 a
2018-19	8.077 b	0,09 a	0,56 a	0,06 a	0,54 a
Cultivar					
Fado	9.239 c	0,10 a	0,50 a	0,06 a	0,42 a
Guadiagrán	6.993 a	0,13 b	0,68 b	0,09 bc	0,57 b
GURI INTA	1.1054 e	0,10 a	0,42 a	0,06 a	0,39 a
Hispamar	8.415 b	0,15 b	0,87 c	0,10 b	0,77 c
IRGA 424	1.0475 d	0,11 a	0,51 a	0,08 ab	0,44 a
Sistema de riego					
Tradicional	9.251 a	0,13 b	0,76 b	0,09 b	0,67 b
Intermitente	9.123 a	0,11 a	0,45 a	0,07 a	0,38 a

Los promedios con la misma letra no presentan diferencias significativas ($p \leq 0,05$). Prueba: LSD Fisher.

La relación entre la concentración de As total y las especies orgánicas e inorgánicas se ve claramente en la Figura 94. El As total puede alcanzar valores superiores a 2 mg kg⁻¹. Como se reporta en otros estudios, aunque se registran niveles elevados, el As se encuentra principalmente en formas metiladas y con baja toxicidad. Incluso en entornos de alta oferta de As, pocas muestras excedieron el límite del CODEX de 0,2 mg kg⁻¹ de As_i en el grano (FAO y OMS, 2019).

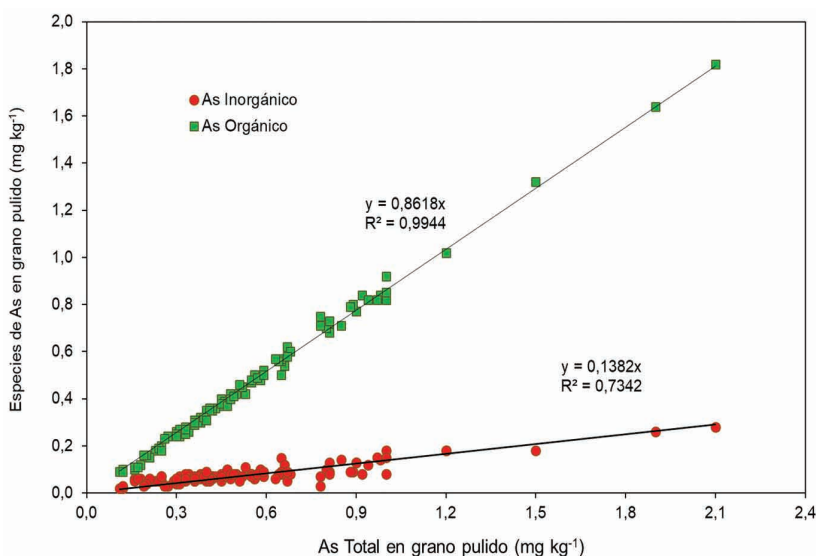


Figura 94. Relación entre la concentración de As total y As inorgánico y orgánico en granos de arroz pulidos. Fuente: Cesar Eugenio Quintero - Universidad Nacional de Entre Ríos (UNER).

En resumen, la concentración de As en los granos es una preocupación del consumidor que afecta el comercio internacional. En algunas condiciones, es posible registrar altos niveles de As total en los granos, pero, afortunadamente, el aumento de la cantidad de As en los granos se debe al aumento de las formas orgánicas menos tóxicas. En unos pocos casos existe un registro de muestras con valores de As_i altos (por encima del límite CODEX). El manejo del riego y la selección de cultivares son las herramientas de manejo disponibles para reducir la concentración de arsénico en los granos.



9. Oferta y demanda de arroz en Brasil y en el mundo

Isabela Bulegon Pilecco¹; Alencar Junior Zanon¹; Anderson Haas Poersch¹; Ary José Duarte Junior¹; Bruna San Martin Rolim Ribeiro¹; Giovana Ghisleni Ribas¹; Ioran Guedes Rossato¹; Lorenzo Dalcin Meus¹; Michel Rocha da Silva¹; Moisés de Freitas do Nascimento¹; Pablo Mazzuco de Souza¹; Vladison Fogliato Pereira¹; Nereu Augusto Streck¹

El arroz es uno de los principales alimentos para la población humana, representando más del 20% de las calorías consumidas en el mundo (Awika et al., 2011). Entre los diez países productores de arroz más grandes del mundo, nueve se encuentran en el continente asiático. China, el mayor consumidor y productor de arroz del mundo, representa el 28% de la producción mundial de arroz (FAO, 2014). Si China pasa de ser autosuficiente a importar arroz, para abastecer sólo el 10% del consumo interno, necesitará importar más del 35% del total de arroz exportado en el mundo (Deng et al., 2019). Por lo tanto, es fundamental discutir y diseñar escenarios sobre la oferta y demanda de arroz en el mundo para los próximos años.

El papel del arroz en la nutrición humana varía según las regiones del mundo debido a los hábitos culturales y las condiciones socioeconómicas. En los países asiáticos y africanos el consumo de arroz es muy elevado, alcanzando valores entre 91 y 219 kg habitante⁻¹ año⁻¹. En América Latina, países como Perú y México consumen entre 36,5 y 91 kg habitante⁻¹ año⁻¹ de arroz, mientras que países como Uruguay, Chile, Argentina y Paraguay consumen menos de 36,5 kg habitante⁻¹ año⁻¹ de arroz. Brasil es el mayor productor y consumidor de arroz fuera del continente asiático, con un consumo anual de alrededor de 12 Mt y un consumo promedio per cápita de 55 kg habitante⁻¹ año⁻¹

¹ Universidad Federal de Santa Maria (UFSM), Departamento de Fitotecnia, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.

(FIESP, 2018). Sin embargo, según MAPA (2018) y FIESP (2018), la demanda brasileña de arroz en 2028 será de 12,2 y 13 Mt, respectivamente. El volumen producido en el país es pequeño en relación al continente asiático, pero el potencial para incrementar su producción es grande, tanto en forma vertical como horizontal, lo que convierte a Brasil en un potencial exportador de arroz.

Entre las cosechas 2000/2001 y 2017/2018, el rendimiento medio de los cultivos en Brasil aumentó un 95%, de 3,2 a 6,1 Mg ha⁻¹ (Conab, 2019). Rio Grande do Sul (RS) es el mayor productor de arroz del país, siendo responsable del 70% de la producción nacional, en un área de 1 millón de hectáreas y una productividad promedio (7,6 Mg ha⁻¹) superior al promedio de país, pero muy por debajo de la productividad potencial del cultivo en Brasil, que se acerca a los 15 Mg ha⁻¹ (IRGA, 2020; GYGA, 2020).

Cuando pensamos en un aumento horizontal en la producción de arroz brasileño, es esencial notar que, a pesar del potencial de aumento del área, la tendencia percibida es de una reducción en el área de arroz en Brasil. Esto se debe a que el cultivo en el sistema seco, fue ampliamente utilizado durante la apertura de nuevas áreas en el Medio Oeste del país, ya que es poco exigente en insumos y tolerante a suelos con mayor acidez, siendo posteriormente reemplazado por actividades de mayor valor comercial, como el cultivo de soja o la ganadería. Así, la reducción se produjo principalmente en las tierras altas, donde se produce el arroz de seco, que actualmente representa el 28% del área cultivada con arroz en Brasil y el 10% de la producción brasileña de este cereal (Conab, 2019). Siguiendo esta tendencia, hay perspectivas de que, en aproximadamente diez años, el arroz se cultivará sólo en sistema regado/inundado en Brasil, lo que permitirá un aumento en la productividad promedio del cultivo, ya que el arroz de seco es un cultivo de alto riesgo, con baja productividad y calidad de grano (Santos et al., 1995).

Considerando estas preguntas sobre la producción de arroz en Brasil, Pilecco et al. (2020) evaluó dos escenarios, donde el primero (C1) considera que la productividad del arroz de regadío aumentará según la tasa histórica (1980 a 2019), y el segundo

(C2) que la productividad alcanzará el 80% del potencial productivo del cultivo (Figura 95). Así, existen perspectivas de que, si se da la primera situación, la productividad del arroz será de 8,6 Mg ha⁻¹ en 2028 y la producción de este cereal no será suficiente para satisfacer el consumo de la población brasileña estimado por FIESP (2018), requiriendo un pequeño aumento en el área de producción de cultivos (6%). Sin embargo, será suficiente para cubrir la demanda de arroz estimada por MAPA (2018). Si la productividad del arroz de regadío aumenta un 29%, alcanzando el 80% del potencial productivo del cultivo para Brasil, llegará a 12 Mg ha⁻¹ en 2028. En esta situación, la producción de arroz brasileña podría suplir las demandas de consumo estimadas por FIESP y por MAPA (13 y 12,2 Mt, respectivamente), lo que puede reducir la superficie sembrada con arroz de regadío en más del 20% en ambos casos, o generar un excedente de producción superior a 4 Mt.

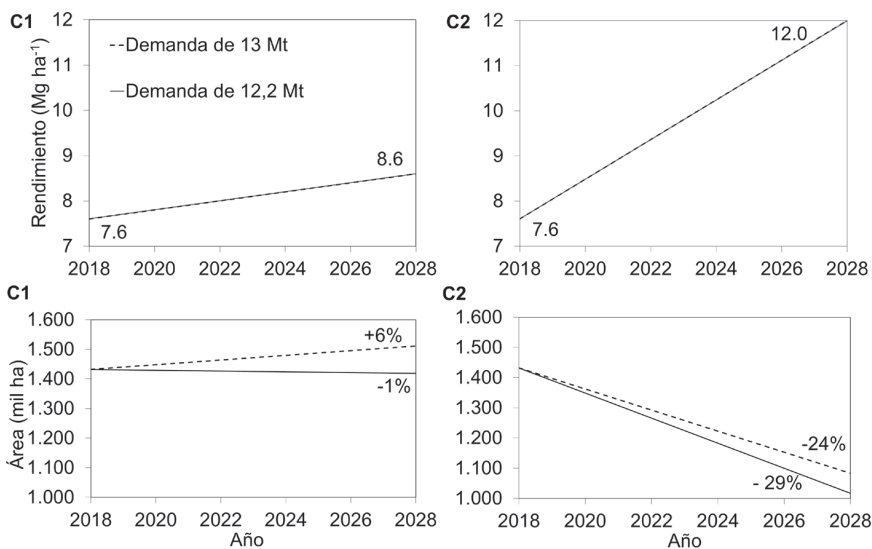


Figura 95. Opciones para cumplir con escenarios de alta y baja demanda de arroz para 2028: cambio de productividad (Mg ha⁻¹) (paneles superiores) o área cultivada (miles de ha) con arroz de regadío (paneles inferiores), para dos escenarios de mayor productividad: siguiendo la tasa histórica de ganancia de productividad (C1, paneles izquierdos) y la productividad alcanzando el 80% del potencial del cultivo (C2, paneles derechos). Adaptado de Pilecco et al., 2020 - Equipo FieldCrops y UFSM.

En Brasil, el consumo de arroz ha ido disminuyendo anualmente, a medida que aumenta el ingreso per cápita de la población. En el mundo no se observa esta tendencia, ya que, durante las próximas tres décadas, la producción mundial de arroz debería aumentar en un 40% para que sea posible satisfacer la demanda global de este cereal (OMM, 2012). El excedente de producción brasileña generado por el aumento vertical de la producción conducirá a la necesidad de reajustar el mercado interno, ya que la mayoría de las áreas de producción de arroz de regadío no son aptas para otros cultivos, ya que se encuentran en regiones con mal drenaje (Streck et al., 2008). Así, una opción sería la expansión de la industria y los productores de arroz brasileños en el mercado internacional, con el objetivo de abastecer parte de la demanda mundial de arroz.

En relación con 2005/2007, la demanda mundial de cereales aumentará un 60% para 2050 (Van Ittersum et al., 2016). En este escenario, África subsahariana, que tendrá un aumento aún mayor en la demanda de alimentos, será la región del mundo con mayor riesgo para la seguridad alimentaria y, por lo tanto, con mayor necesidad de productos agrícolas en otros lugares. La mayoría de los países del continente africano no serán autosuficientes en la producción de alimentos hasta 2025 (Van Ittersum et al., 2016). Además, los países de esta región no podrán abastecer la demanda interna estimada de cereales, incluso si aumentan su productividad y alcanzan el 80% del potencial productivo en todos los cultivos para el 2050 (Van Oort et al., 2015).

Considerando un consumo per cápita de arroz de aproximadamente 55 kg habitante⁻¹ año⁻¹, el excedente de producción de arroz brasileño podrá alimentar hasta 90,6 millones de personas, considerando el aumento de la producción hasta el 80% del potencial productivo y una demanda interna consumo de 12,2 Mt por año (Pilecco et al., 2020). En 2026, la población del continente africano será de 1.500 millones de personas, por lo que este excedente puede alimentar al 6% correspondiente de la población del continente africano en 2026. Así, Brasil, que ya es un importante proveedor global de alimentos (Marin et al., 2016), tendrá un protagonismo aún mayor en la búsqueda mundial de la seguridad alimentaria.



10. Ecofisiología digital

Silvio Steinmetz¹; Cristóvão Basílio Pereira¹; Emerson Langie dos Santos¹; Santiago Vianna Cuadra²; Ivan Rodrigues de Almeida²; Nereu Augusto Streck³; Rômulo Pulcinelli Benedetti³; Ary José Duarte Júnior³; Alencar Júnior Zanon³; Giovana Ghisleni Ribas³; Michel Rocha da Silva³; Ricardo Machado Kroeff⁴; Solismar Damé Prestes⁵; Lorenzo Dalcin Meus³; Ioran Guedes Rossato³; Isabela Bulegon Pilecco³; Vladison Fogliato Pereira³; Anderson Haas Poersch³; Pablo Mazzuco de Souza³; César Eugenio Quintero⁶.

En la era digital, la agricultura está experimentando una gran revolución tecnológica, la denominada Agricultura 4.0. En esta “nueva” agricultura, el uso de herramientas digitales ya no es utilizado sólo por la investigación científica y ha ido ganando cada vez más espacio como herramienta de gestión, manejo y planificación en la agricultura, ya que son herramientas de bajo costo operativo que ayudan en la toma de decisiones y manejo de ecosistemas. A continuación, se presentan tres herramientas que se destacan en este contexto: el modelo SimulArroz, el programa GD Arroz y la aplicación PlanejArroz.

10.1. Modelo SimulArroz

La modelización agrícola es una herramienta importante que agiliza y proporciona una reducción en los costos de investigación (un gran aliado de la agricultura 4.0) y también que se puede utilizar para determinar el potencial productivo de los cultivos agrícolas y predecir las etapas de desarrollo, ayudando al productor en las prácticas de manejo.

¹ Embrapa Clima Temperado, Capão do Leão, Rio Grande do Sul, Brasil.

² Embrapa Informática Agropecuária, Campinas, São Paulo, Brasil.

³ Universidad Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.

⁴ Instituto Rio Grandense do Arroz, Cachoeirinha, Rio Grande do Sul, Brasil.

⁵ Instituto Nacional de Meteorologia, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

⁶ Facultad de Ciencias Agropecuarias (FCA). Universidad Nacional de Entre Ríos (UNER). Entre Ríos, Argentina.

SimulArroz es un modelo ecofisiológico dinámico basado en procesos (*process-based model*), desarrollado por el Equipo FieldCrops de la Universidad Federal de Santa María, para simular la productividad del arroz de riego en el estado de Rio Grande do Sul, Brasil. SimulArroz es el resultado de dos modelos de arroz anteriores, ORYZA2000 (Bouman et al., 2001), que es el modelo de simulación de cultivo de arroz del International Rice Research Institute (IRRI - The International Rice Research Institute), en el Filipinas e InfoCrop (Aggarwal et al., 2006), ambos modelos de arroz desarrollados y probados en ecosistemas de arroz en Asia. Lo que diferencia a SimulArroz de estos dos modelos es que contiene un submodelo de aparición de hojas, y el número final de hojas en el tallo principal y además contiene niveles tecnológicos de cultivo de arroz.

Parte del código fuente de ORYZA2000 e InfoCrop se utilizó en el software SimulArroz, y el resto del código fuente se desarrolló para adaptar el modelo a cultivares de arroz en Rio Grande do Sul (Walter et al., 2012; Rosa et al., 2015), diferenciando SimulArroz de otros modelos. Es, por tanto, un producto para satisfacer las demandas de simulación numérica para ecosistemas arroceros de regadío.

Una aplicación del modelo SimulArroz que merece mención es su uso en la Zonificación de Riesgo Climático Agrícola (ZARC) para arroz de regadío en Rio Grande do Sul (Steinmetz et al., 2018). A través del modelo, se definieron períodos de siembra teniendo en cuenta los niveles de productividad y el riesgo climático. Un avance de esta naturaleza es posible debido a la confiabilidad de un modelo cuyo desempeño ha sido probado en la captura de los impactos ambientales en el cultivo del arroz, como los efectos del cambio climático (Walter et al., 2014).

En el curso de este libro hemos explorado otras aplicaciones de esta herramienta. El Capítulo 5 analiza el uso del modelo SimulArroz en estudios sobre el potencial de productividad del arroz de regadío para el medio ambiente subtropical. En el Capítulo 2, tenemos la cuantificación del impacto del Fenómeno

El Niño-Oscilación Sur (ENOS) y el cambio climático en la productividad de los cultivos, respectivamente. A través de esto es posible tener una noción de la robustez y confiabilidad de una herramienta de Agricultura Digital 4.0 aplicada en el contexto de la ecofisiología del arroz abordada en este libro.

SimulArroz calcula los principales procesos ecofisiológicos de un ecosistema de arroz, como la acumulación de biomasa de raíces, hojas, tallos y panículas, el desarrollo del cultivo (fenología por la escala de Counce et al., 2000) y la emisión de hojas (escala de Haun, 1973) en el transcurso de un día. En la versión 1.1, SimulArroz simula el rendimiento potencial del cultivo y la productividad en tres niveles tecnológicos del cultivo (alto, medio y bajo).

El software SimulArroz v.1.1 se divide en dos partes: (a) el código Fortran del modelo matemático que contiene las ecuaciones y subrutinas que describen los procesos de crecimiento, desarrollo y productividad del cultivo de arroz y (b) la interfaz gráfica en Java que permite al usuario ejecutar el modelo de crecimiento, desarrollo y productividad del cultivo del arroz desde una pantalla que es fácil de entender e interactuar.

Los detalles sobre cómo descargar el *software* para usarlo en computadoras de escritorio y portátiles en los sistemas operativos *Windows* e *IOS*, así como las instrucciones y el manual para usar el *software*, están disponibles en www.ufsm.br/simularroz. En el sitio *web*, la versión 1.1 del modelo SimulArroz también está disponible para su descarga gratuita.

La parte inédita del modelo SimulArroz en relación con ORYZA, InfoCrop y otros modelos de simulación de cultivo de arroz en todo el mundo es el submodelo que calcula la emisión de hojas y el número final de hojas en el tallo principal. Estas dos variables del desarrollo foliar son importantes desde el punto de vista práctico del cultivo del arroz, ya que las prácticas de manejo como el inicio del riego y la primera fertilización nitrogenada en el sistema arrocerero de riego inundado deben realizarse cuando las plantas tienen 2 a 3 hojas y la segunda fertilización nitrogenada en cobertura de R0 o R1, cuando aún quedan 2 a 3 hojas hasta

la aparición de la hoja bandera. Debido a que este submodelo es un diferencial de SimulArroz, a continuación se describe cómo funciona el submodelo de emisión de hojas en el modelo SimulArroz y también se presentan los resultados de las pruebas del modelo SimulArroz en la predicción de la fenología y la productividad del arroz en Rio Grande do Sul basada en los datos de cultivos a campo.

10.1.1. Emisión de hojas en el modelo SimulArroz

La emisión de hojas en el tallo principal del arroz se calcula mediante:

$$TAF = TAF_{m\acute{a}x_{1,2}} \cdot f(T) \cdot f(C)$$

donde TAF es la tasa diaria de aparición de hojas (hojas día⁻¹), TAF_{max_{1,2}} es la tasa máxima diaria de aparición de la primera y segunda hojas (hojas día⁻¹), f(T) es la función de respuesta de TAF a temperatura del aire y f(C) es la función de cronología. La f(T) se calcula mediante la ecuación:

$$f(T) = [2(T - Tb)^\alpha (Tot - Tb)^\alpha - (T - Tb)^{2\alpha}] (Tot - Tb)^{2\alpha}$$

donde $Tb \leq T \leq Tmax$ $f(T) = 0$ para $T < Tb$ o $T > Tmax$ $a = \ln 2 / \ln [(Tmax - Tb) (Tot - Tb)]$, donde Tb, Tot y Tmax son las temperaturas cardinales (base, óptima y máxima, respectivamente) para TAF, y T es la temperatura media diaria del aire (°C). f(C) es la función de cronología que hace disminuir la TAF a partir de la tercera hoja, ya que las reservas de semillas sólo contribuyen a la emisión de la primera y segunda hojas, y a medida que aparecen nuevas hojas en el falso tallo la distancia que cada hoja nueva necesita superar para aparecer en el falso tallo aumenta hasta la hoja bandera. Así, después de V2, se produce una reducción del TAF según las siguientes ecuaciones:

$$f(T) = 1 \text{ se } HS < 2$$

$$f(C) = HS / 2^b \text{ se } HS \geq 2$$

donde b es el coeficiente de sensibilidad con un valor de $-0,3$ (Streck et al., 2003) y HS es el número de hojas acumuladas en el tallo principal y representado por la Etapa de Haun (Haun, 1973) y calculado por:

$$HS = \sum TAF$$

Las temperaturas cardinales de emisión de las hojas utilizadas para calcular $f(T)$ son 11 °C (Ellis et al., 1993; Infeld et al., 1998), 26 °C (Ellis et al., 1993) y 40 °C (Gao et al., 1992), respectivamente. $f(T)$ es igual a cero cuando la temperatura del aire está por debajo de la temperatura mínima o por encima de la temperatura máxima de emisión de hojas y cuando la temperatura del aire es óptima para la emisión de hojas, $f(T)$ es igual a uno y la emisión de hojas ocurre a la tasa máxima.

El número final de hojas en el tallo principal (NFF), es decir, el HS de la hoja bandera, se calcula dinámicamente en el modelo de SimulArroz de la siguiente manera: el día que el modelo calcula la diferenciación de panícula (R1), se agregan tres hojas y este valor es el número de la hoja de la bandera (Streck et al., 2009). De esta forma, el NFF se resuelve implícitamente en el modelo, variando según el ciclo del cultivar o grupo de maduración y la fecha de siembra.

10.1.2. Validación del modelo SimulArroz

El Equipo FieldCrops realizó experimentos durante cinco años en cultivos (en campo) en todas las regiones arroceras de Rio Grande do Sul y Argentina para validar el modelo SimulArroz. El desempeño del modelo en la simulación de la productividad del arroz en experimentos realizados en diferentes regiones arroceras de Rio Grande do Sul se muestra en la Figura 96. El

modelo funcionó bien en la simulación de la productividad promedio para cada región arrocera, además de capturar los diferentes potenciales productivos de cada una de las seis regiones productoras de arroz, siendo la Frontera Occidental la que tiene el mayor potencial productivo. En Argentina, con base en experimentos llevados a cabo durante tres años agrícolas, el modelo se desempeñó satisfactoriamente simulando la productividad del grano en las dos principales provincias productoras de arroz del país (Figura 97).

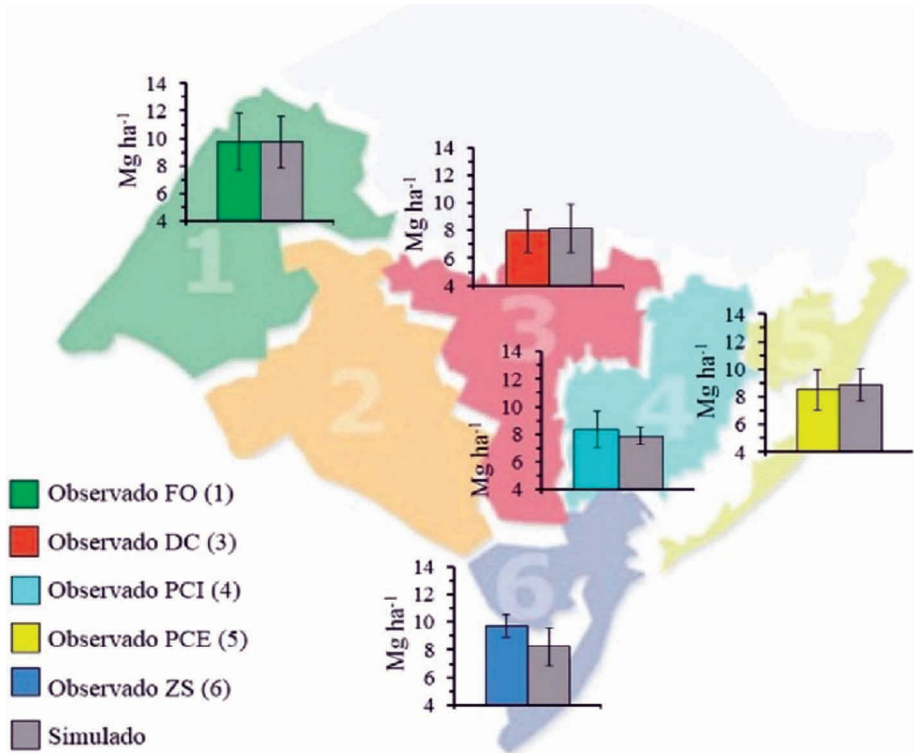


Figura 96. Productividad de grano (Mg ha⁻¹) del cultivo de arroz observada y simulada por el modelo SimulArroz v.1.1 en campos de arroz en Rio Grande do Sul durante varios años agrícolas (años agrícolas 1984/85 a 2009/10). Fuente: Adaptado de Rosa et al., 2015 - Equipo FieldCrops.

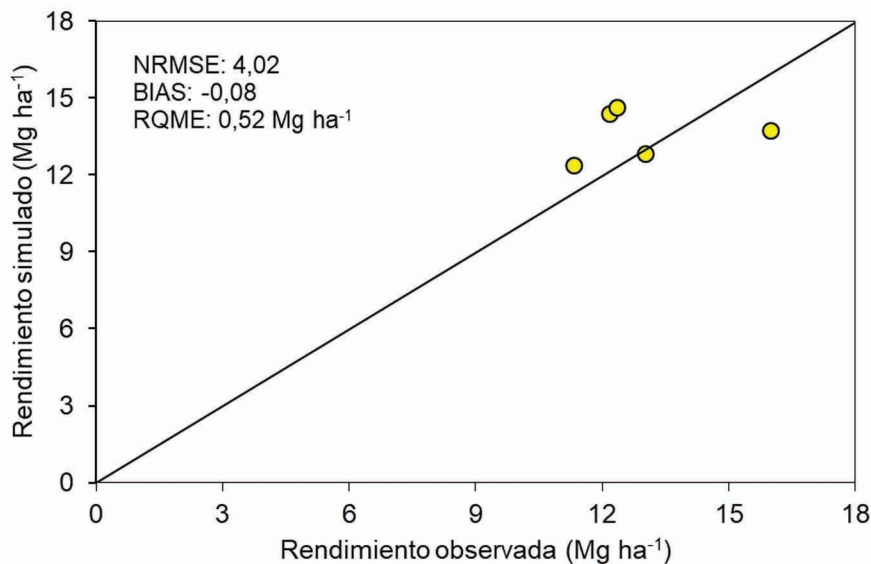


Figura 97. Desempeño del modelo SimulArroz en la estimación de la productividad potencial de granos de arroz del cultivar IRGA 424 RI en las provincias de Corrientes y Entre Ríos, Argentina en los años agrícolas 2016/17, 2018/19 y 2019/20. NRMSE: Cuadrado Medio del Error Normalizado. RQME raíz cuadrada media del error, BIAS: índice que verifica la tendencia a subestimar o sobreestimar Fuente: Equipo FieldCrops, INTA y UNER-FCA.

El desempeño del modelo SimulArroz en la simulación de emisión foliar en tres cultivares de arroz (IRGA 424 RI, Guri INTA CL y Puitá INTA CL) se muestra en la (Figura 98A). El error del modelo fue de 1 a 2 hojas y las otras estadísticas indican un buen desempeño del modelo para esta variable. Para la fenología, el error en la estimación de las etapas R1, R4 y R9 fue de 3 a 8 días (Figura 98B).

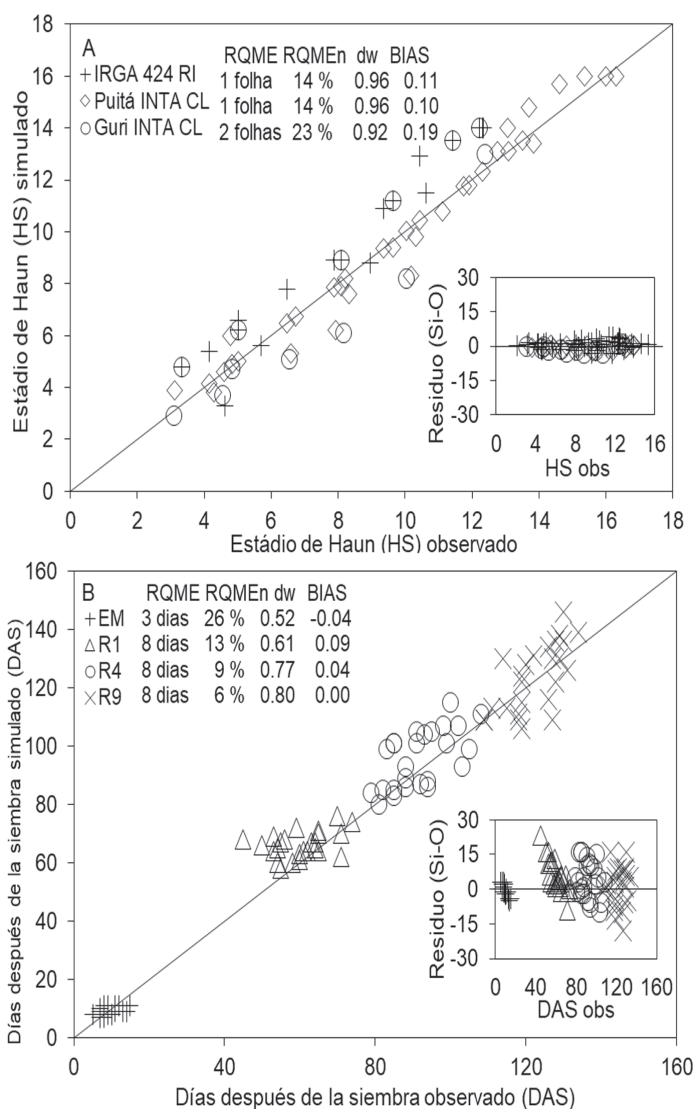


Figura 98. Evaluación del modelo SimulArroz en la simulación Haun Stage (HS) (A) y Días después de la siembra (B): fase siembra-emergencia (EM), diferenciación de panículas (R1), antesis (R4) y madurez fisiológica (R9). El modelo se corrió en el modo de nivel potencial, para tres cultivares de arroz de regadío y dos años agrícolas en Rio Grande do Sul. N es el número de observaciones, RQME raíz cuadrada media del error (hojas; días - unidades), RQME n (%), BIAS, dw: índices que verifican la tendencia a subestimar o sobreestimar. Fuente: Ribas et al., 2020 - Equipo FieldCrops.

En cuanto a las simulaciones de productividad, el modelo presenta un error de 0,8 a 1,3 Mg ha⁻¹ (Figura 99). El rango de rendimientos observado considerando el conjunto de cultivares y ubicaciones fue de 4 a 14 Mg ha⁻¹ y el modelo capturó efectivamente esta variación.

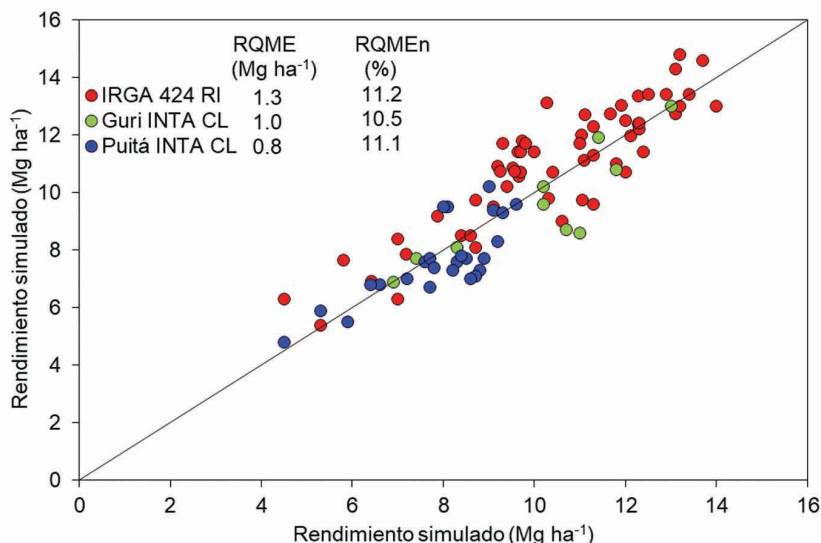


Figura 99. Evaluación del modelo SimulArroz para la productividad observada al 13% de humedad en experimentos con diferentes fechas de siembra. El modelo se ejecutó en modo de alto nivel tecnológico para tres cultivares, en cinco regiones arroceras de Rio Grande do Sul en los años agrícolas 2013/14, 2014/15, 2016/17 y 2017/18. RQME raíz cuadrada media del error. Fuente: Ribas et al. (2020) - Equipo FieldCrops.

El modelo SimulArroz también se calibró y evaluó para tres híbridos de arroz (QM 1010 CL, INOV CL y PRIME CL). El error en la simulación del número de hojas varió de 0,6 a 1,4 hojas (Figura 100a) y el error en la simulación de las etapas R1, R4 y R9 varió de 4,1 a 5,7 días (Figura 100b). La productividad se simuló con un error que varió de 2,0 a 2,6 Mg ha⁻¹ (Figura 101). En la calibración de estos tres híbridos de arroz, la partición de materia seca entre los compartimentos de la parte aérea (hojas, tallo y panículas) fue diferente en comparación con los cultivares de arroz convencionales, y los híbridos asignaron más materia seca a los tallos para soportar panículas más grandes. (Ítem 1.4).

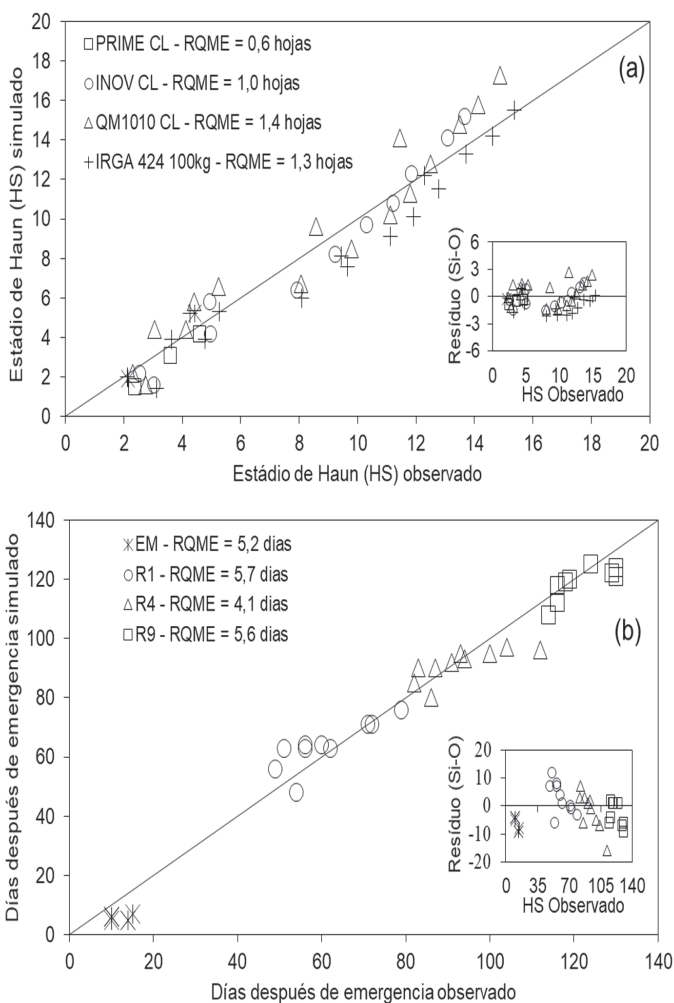


Figura 100. (a) Número de hojas en el tallo principal (HS) y (b) días después de la siembra las etapas de emergencia (EM), diferenciación de panícula (R1), anthesis (R4) y madurez fisiológica (R9) observadas y simuladas con el modelo SimulArroz para tres híbridos de arroz (PRIME CL, INOV CL y QM 1010 CL) y un cultivar de arroz convencional (IRGA 424) en el año agrícola 2014/2015 en cuatro regiones arroceras de Rio Grande do Sul, Brasil. Los gráficos insertados en cada panel son los residuos (simulados-observados) versus los valores observados. RQME raíz cuadrada media del error. Fuente: Ribas et al. (2017) - Equipo FieldCrops.

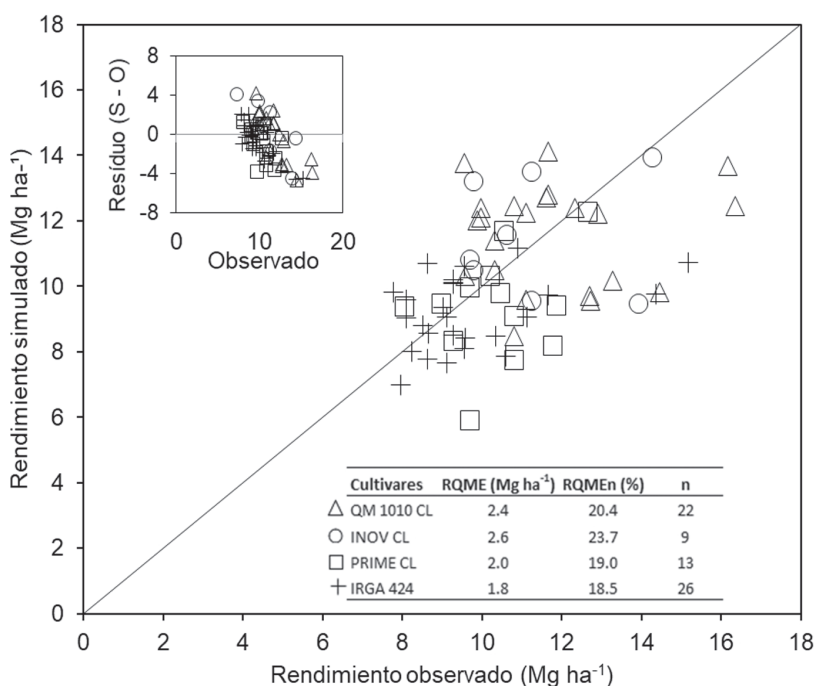


Figura 101. Productividad simulada de tres híbridos de arroz (QM 1010 CL, INOV CL y PRIME CL) y un cultivar convencional (IRGA 424), observado y simulado por el modelo SimulArroz en Santa Vitória do Palmar, Uruguaiiana, Cachoeirinha, Cachoeira do Sul, Camaquã, Bagé y Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil, en los años agrícolas 2010/2011, 2011/2012, 2012/2013, 2013/2014 y 2014/2015. Los datos simulados están en alto nivel tecnológico de SimulArroz. RQME raíz cuadrada media del error. Fuente: Ribas et al. (2016) - Equipo FieldCrops.

10.2. Programa GD Arroz

El programa GD Arroz también se puede considerar como una herramienta digital de la llamada agricultura 4.0. Su propósito es ayudar a los productores a realizar prácticas de manejo del arroz de riego de acuerdo con las etapas de desarrollo de la planta (EDP), según lo recomendado por la Sociedad de Arroz de Riego del Sur de Brasil (SOSBAI, 2007, 2014). El problema es que la EDP y, especialmente, la diferenciación de panículas (DP o R1), es muy variable porque depende de la temperatura. Por esta

razón, es preferible expresar el estadio R1 y el otro EDP en días, pero estimado a través de grados-día (GD), o suma térmica, en lugar del número de días calendario (Streck et al., 2006b; Steinmetz et al., 2010).

En base a este principio, se desarrolló el programa GD Arroz, que es el resultado de una alianza entre Embrapa Clima Temperado (CPACT), Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA), el Instituto Meteorológico Nacional (INMET) y la desaparecida Fundación Estatal de Investigación Agropecuaria (FEPAGRO). La versión *Web* se lanzó en agosto de 2015 y la aplicación, para la plataforma *Android*, en agosto de 2016. Durante este período, la versión *Web* tuvo un promedio anual de alrededor de 8.500 visitas, considerando el período de septiembre de un año a agosto del año siguiente.

El promedio de visitas de noviembre a enero fue un 196% superior al del resto del período. Esto indica que el programa se está utilizando más para la aplicación de urea en cobertura, que se suele realizar en ese momento y que en cultivos grandes se aplica por avión. El análisis de estas accesiones sugiere que el programa podría utilizarse mejor como una herramienta para programar las prácticas de manejo asociadas con las otras etapas de desarrollo de la planta, como recomienda SOSBAI (2007, 2014). Por otro lado, el número de “instalaciones” de la aplicación supera las 1.000 y sugiere la necesidad de implementar, además, la versión “*off line*” para que pueda ser utilizada en lugares sin acceso a *internet*.

10.2.1. Principios básicos del programa

La ecuación utilizada para calcular los grados-día fue:

$$GD = \sum_{i=1}^n (T_m - T_b)$$

donde: GD (°C día) representa la suma de la diferencia entre la temperatura media diaria (T_m) y la temperatura base (T_b) de 11 °C (Infeld et al., 1998), de la emergencia ($i = 1$) en cada una de las seis etapas (n). La temperatura media diaria del aire se obtuvo

mediante la media aritmética entre las temperaturas máxima y mínima. Antes de calcular la temperatura media diaria, se aplicaron los límites de 34 °C y 21 °C, respectivamente, para las temperaturas máxima y mínima, es decir, se descartaron valores superiores a estas.

Esta ecuación también es utilizada para el cálculo de grado-día por el programa "DD50", considerándose una modificación del concepto original de grado-día para estimar el desarrollo de la planta (GDD), pues establece límites para los valores diarios de T_x y T_n . Esto indica que valores superiores a estos límites no harán que las plantas se desarrollen más rápidamente (Slaton et al., 1996; Wilson Jr. et al., 2015). Los valores de suma térmica requeridos para alcanzar cada uno de los seis EDP, para los siete subgrupos, son los indicados en Steinmetz et al. (2015a).

El programa utiliza la misma serie de datos de temperatura del aire y los mismos parámetros, criterios y subgrupos de cultivares utilizados por Steinmetz et al. (2013), pero incorporando el subgrupo 7, que involucra cultivares de ciclo tardío. Sin embargo, en lugar de VBA (Visual Basic para Aplicaciones), utilizado dentro de la hoja de cálculo de Excel, las ecuaciones fueron escritas en un programa numérico, en el lenguaje FORTRAN, permitiendo el cálculo automático del número de días entre la emergencia y cada una de las seis etapas, así como la fecha probable de ocurrencia del estadio referido.

El programa considera como información de entrada la serie histórica (30 años) de temperaturas máximas y mínimas diarias del aire, así como las temperaturas del año actual. Se aplicaron ecuaciones de regresión generadas en el proceso de validación del método grado-día (Steinmetz et al., 2015b) a los datos obtenidos sobre la duración de las fases desde la emergencia hasta cada una de las seis etapas, excepto la etapa R1, donde se utilizan las ecuaciones descritas en Steinmetz et al. (2014).

Los datos relativos del año en curso se calculan, para cada uno de los siete subgrupos de cultivares, utilizando los requerimientos térmicos promedio de los subgrupos indicados

en Steinmetz et al. (2015a). Sin embargo, en este caso, se utilizan los datos de Tm diarios que utiliza diariamente el Instituto Nacional de Meteorología (INMET).

Los valores del número de días de la emergencia hasta cada una de las seis etapas y la respectiva fecha de ocurrencia de estas etapas, en el año de cultivo en curso, así como la desviación (días) entre los períodos calculados con la Tm diaria del año de cultivo y la Tm diarios del promedio histórico (30 años), se actualizan diariamente mediante cómputo automático por parte del programa, de acuerdo con los datos recibidos de INMET. El programa recalcula estos valores diariamente, en función de los datos diarios recibidos, que sustituyen a los datos históricos según la fecha actual. Finalmente, el programa actualiza automáticamente los valores almacenados en la base de datos que alimenta la página *Web*.

10.2.2. Utilización de GD Arroz

Para utilizar el programa, en la versión *Web*, debe acceder a la página del Laboratorio de Agrometeorología Embrapa Clima Temperado, en la siguiente dirección: “<http://agromet.cpact.embrapa.br>” y seleccionar “Grados-día (Arroz)”. La aplicación, para *Android*, se puede descargar a través de “*Google Play*”.

Para obtener la información deseada, el usuario debe proporcionar alguna información sobre el cultivo de arroz, como se describe a continuación:

Información de entrada al programa

Localidad

Seleccione una de las siguientes 17 ubicaciones: Alegrete; Bagé; Cachoeirinha; Capão do Leão (Pelotas); Eldorado do Sul (Guaíba); Cruce del Sur; Maquiné (Osório); Quaraí; Río Grande; Santa María; Santana do Livramento; Santa Vitória do Palmar; São Borja; San Gabriel; Taquari; Torres o Uruguaiana.

Si la ubicación deseada no es una de las 17 anteriores, seleccione la más cercana. Las 17 ubicaciones son las que tenían series largas de datos de temperatura media diaria del aire (Tm), y para la mayoría de ellas se utilizaron series de 30 años (1976-2005).

Subgrupo

Seleccione uno de los siete subgrupos de duración del ciclo biológico, en el que se incluye el cultivar a utilizar. Los subgrupos y el ciclo de cultivo (desde la emergencia hasta la maduración) en cada subgrupo son los siguientes:

- 1 - Muy precoz 1 (MP1) (<100 días)
- 2 - Muy precoz 2 (MP) (100-105 días)
- 3 - Precoz 1 (P1) (106-110 días)
- 4 - Precoz 2 (P2) (111-120 días)
- 5 - Medio 1 (M1) (121-130 días)
- 6 - Medio 2 (M2) (131-135 días)
- 7 - Tardío (T) (136-150 días)

Estos subgrupos se establecieron en base a los cuatro grupos (muy precoz, precoz, medio y tardío) indicados por SOSBAI (2007, 2014).

Cultivar

Seleccione el cultivar que se utilizará. Cabe señalar que la fecha de una etapa determinada, de cualquier cultivar, se estima para el subgrupo al que pertenece el cultivar y no para el cultivar en sí. Sin embargo, debido a que los cultivares fueron clasificados en siete subgrupos, la fecha de cualquier etapa, de un determinado subgrupo, es muy cercana a la que se esperaría para cualquiera de los cultivares pertenecientes al subgrupo, como lo indican los resultados de Steinmetz et al. (2019).

Estadio

Seleccione una de las seis etapas de desarrollo de la planta, según la escala de Counce et al. (2000), indicado a continuación:

V4 - Planta de 4 hojas

R1 - Diferenciación de panículas

R2 - Embarrigado - Hoja bandera

R4 - Inicio de la floración

R8 - Inicio de la maduración

R9 - Maduración completa

Día de emergencia

Seleccione la fecha de la emergencia, disponible para el período del 1 de septiembre al 31 de diciembre. Considere la fecha de emergencia del 50%, es decir, cuando haya surgido aproximadamente el 50% de las plántulas del cultivo (plántulas de hasta 2 cm de altura). El programa se desarrolló considerando, fundamentalmente, el sistema de siembra en suelo seco (convencional, cultivo mínimo y labranza cero).

Información generada por el programa

Luego de completar la información de entrada, el programa ofrece las opciones de “Consulta por ubicación” o “Consulta por mapas”.

Para ejemplificar cómo funciona el programa, seleccione las siguientes variables: Ubicación: Santa María; Subgrupo: 6 - Medio 2 (131-135 días); Cultivar: IRGA 424 IR; Estadio: R1 - Diferenciación de panículas; Fecha de emergencia: 15/10. Luego de completar los campos indicados, seleccione “Consulta por ubicación”.

Consulta por localidades

Para este tipo de consultas, el programa genera tres tipos de información, como se muestra en la Figura 102, a saber: a) una tabla con datos relacionados con el “Promedio (30 años)”, el

“Cultivo” y la “Desviación del promedio (días)”; b) un diagrama esquemático del EDP principal de arroz (escala de Counce et al., 2000) destacando, en forma remarcada, la etapa que se consulta, que es R1, en este ejemplo; c) justo debajo de la ilustración sobre EDP, se indican las principales prácticas de manejo recomendadas por la Sociedad de Arroz de Riego del Sur de Brasil (SOSBAI, 2007, 2014) asociadas con cada uno de los seis EDP (Figura 102).

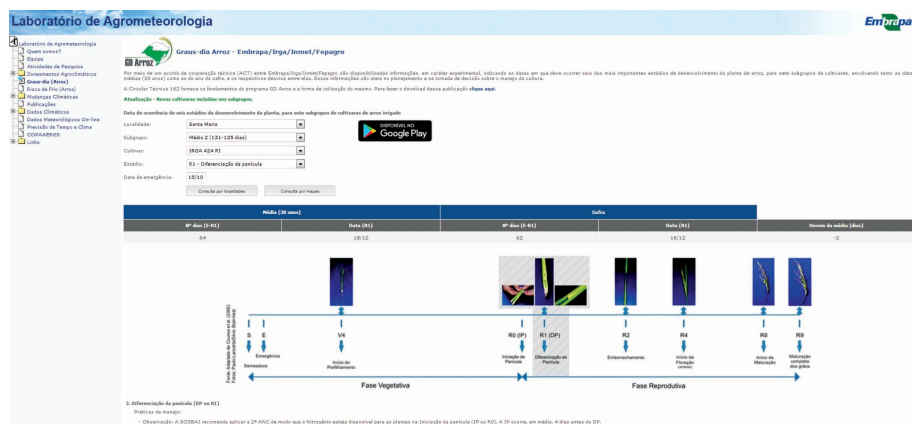


Figura 102. Información de salida del programa GD Arroz (Consulta por ubicación - Versión web), que involucra el número promedio de días desde la emergencia hasta la diferenciación de la panícula (E-R1), la fecha promedio de R1, en promedio 30 años de cultivo, desviación de la media (días), y diagrama esquemático de las principales etapas de desarrollo de la planta de arroz, con énfasis en la etapa de diferenciación de panícula (R1) de Counce et al. (2000). Fuente: Embrapa.

En “Promedio (30 años)”, el campo “Número de días (E-R1)” indica que este cultivar, al igual que los demás cultivares del subgrupo medio 2, con un promedio de treinta años de datos de Tm diaria, requirió 64 días después de la emergencia para alcanzar la etapa de diferenciación de panículas. El campo “Fecha (R1)” indica que 64 días después de la emergencia (15/10) corresponde al 18/12. Esto indica la fecha promedio en la que ocurrió la etapa R1 en estos treinta años.

En “Safrá”, utilizando los datos y Tm de la cosecha 2019/2020, el campo “Nº días (E-R1)” indica que este cultivar necesitó

62 días después de la emergencia para lograr la diferenciación panicular. En consecuencia, el campo “Fecha (R1)” indica que 62 días después de la emergencia (15/10) corresponde al 16/12, mostrando, por tanto, que hubo un avance de 2 días desde la fecha promedio de 30 años, como se indica en Campo “Desviación del promedio (días)” (Figura 102). Esto significa que, en el período comprendido entre el 15/10 (emergencia) hasta que se alcanza la suma térmica requerida para la ocurrencia de la etapa R1, del cultivo en cuestión, la temperatura promedio del aire (T_m) fue superior a la T_m del promedio histórico (30 años).

Al hacer clic en la imagen rayada que ilustra la etapa R1 (o DP), hay un detalle de esa etapa en la planta, indicando el modo de apertura del tallo principal, la panícula en el “punto algodón” y una ampliación de la misma (Figura 103).

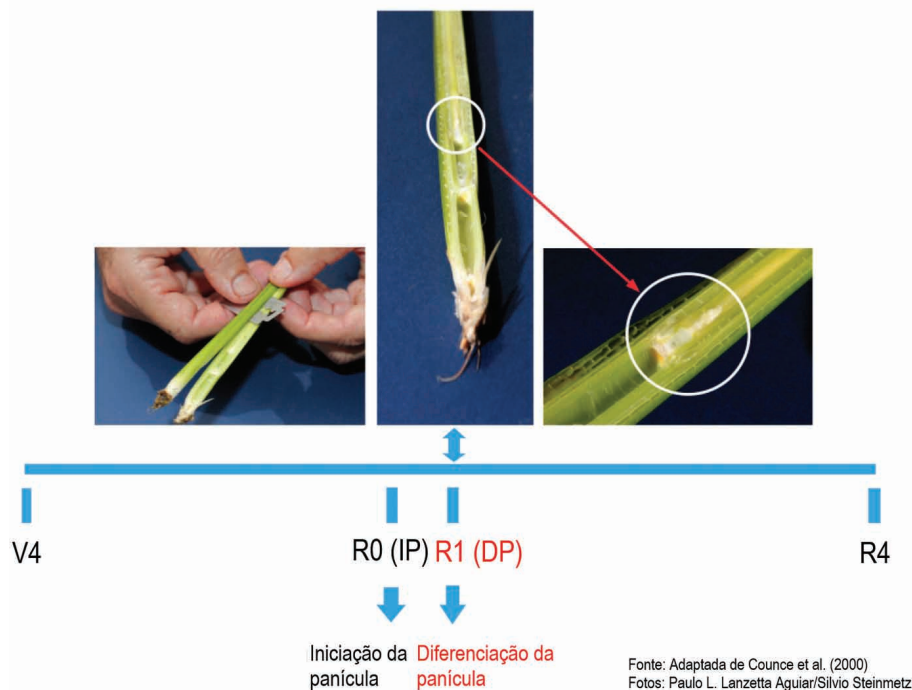


Figura 103. Detalles de la etapa de diferenciación de la panícula (R1) indicando el modo de apertura del tallo principal (a la izquierda), la panícula en “punto algodón” (en el centro) y su agrandamiento (a la derecha). Fuente: Embrapa.

Justo debajo del diagrama esquemático con el EDP se encuentra la recomendación de SOSBAI (2007, 2014) sobre la práctica de manejo para esta etapa, que es la siguiente: “SOSBAI recomienda realizar la segunda aplicación nitrogenada en cobertura (ANC) de modo que el nitrógeno esté disponible en la iniciación de panícula (IP o R0). La IP ocurre, en promedio, 4 días antes de la DP o R1”. Las recomendaciones de SOSBAI (2007, 2014) también están disponibles para los otros cinco EDP.

Consulta por mapas

Otra posibilidad que ofrece el programa es visualizar en forma de mapas la información generada. Los mapas disponibles se derivaron de la interpolación de un modelo del relieve del Estado de Rio Grande do Sul y el número de días entre la emergencia y cada una de las seis etapas fenológicas, en las diecisiete localidades donde se estimaron estos parámetros mediante el método grado-día. Esta interpolación se obtuvo mediante el resultado de técnicas estadísticas de regresión múltiple, que generaron ecuaciones para cada diez días de fecha de emergencia; desde el primer decenio de septiembre hasta el segundo decenio de diciembre y luego aplicadas al modelo espacial. En total, se generaron 462 mapas que representan los siete subgrupos de maduración, seis etapas y once fechas de emergencia.

La información disponible en los mapas se refiere a clases de “N° días (etapa E)” para períodos de emergencia de 10 días, en promedio de 30 años, considerando el valor intermedio del decenio. Así, el mapa para los primeros diez días de octubre se refiere a la emergencia del 5 de octubre, el mapa para el segundo decenio de octubre se refiere a la emergencia del 15 de octubre, y así sucesivamente.

Esta consulta de mapa tiene como finalidad indicar al usuario la información que genera el programa, no sólo para la localidad seleccionada, sino también para las localidades/ municipios de su entorno y, principalmente, para aquellos sitios

que no cuentan con series de datos meteorológicos como de las 17 ubicaciones utilizadas en este programa.

La Figura 104 caracteriza la espacialización de clases de “N° días (E-R1)” para la misma información de entrada por “ubicaciones” previamente indicadas, es decir: Santa María, subgrupo medio 2, cultivar IRGA 424 RI (también válido para otros cultivares pertenecientes a este subgrupo), con fecha de emergencia el 15 de octubre (representada por el mapa del segundo decenio de octubre). La Figura 104 indica que la duración de la fase EM-R1 es similar en todo el municipio de Santa María y también en los municipios que pertenecen a la misma clase (de 62 a 66 días), representada por la segunda tonalidad más oscura de azul. Por lo tanto, en todos estos municipios, la aplicación de cualquier práctica de manejo asociada a esta etapa podría ser en una fecha similar a la de Santa María. El principio de funcionamiento del programa es el mismo para cada una de las otras cinco etapas de desarrollo de la planta de arroz.

En algunas situaciones, la dificultad para definir la fecha del 50% de la emergencia del cultivo debido a la desuniformidad de emergencia de las plántulas, provocado por la escasez y/o irregularidad en la distribución de las lluvias, puede influir en la precisión de la fecha de ocurrencia de cada una de las seis etapas, estimada por el método grado-día. Si hay dos fechas de emergencia diferentes, para cultivos sembrados en la misma fecha, se recomienda considerarlos como dos cultivos en lugar de hacer el promedio de las dos fechas de emergencia.

- 4 Laboratório de Agrometeorologia
 - Quem somos?
 - Equipe
 - Atividades de Pesquisa
 - Zoneamentos Agroclimáticos
 - Graus-dia (Arroz)**
 - Tiempo da Frio (Arroz)
 - Mudanças Climáticas
 - Publicações
 - Dados Meteorológicos On-line
 - Previsão de Tempo e Clima
 - COPAAERGS
 - Links



Graus-dia Arroz - Embrapa/Irga/Inmet/Fepagro

Por meio de um acordo de cooperação técnica (ACT) entre Embrapa/Irga/Inmet/Fepagro são disponibilizadas informações, em caráter experimental, indicando as datas em que deve ocorrer seis dos mais importantes estádios de desenvolvimento da planta de arroz, para sete subgrupos de cultivares, envolvendo tanto as datas médias (30 anos) como as do ano da safra, e os respectivos desvios entre elas. Essas informações são úteis no planejamento e na tomada de decisão sobre o manejo da cultura.

A Circular Técnica 162 fornece os fundamentos do programa GD Arroz e a forma de utilização do mesmo. Para fazer o download dessa publicação [clique aqui](#).

Atualização - Novas cultivares incluídas nos subgrupos.

Data de ocorrência de seis estádios de desenvolvimento da planta, para sete subgrupos de cultivares de arroz irrigado

Localidade:

Subgrupo:

Cultivar:

Estádio:

Data de emergência:



Número de dias de emergência ao estádio R1



Localidades

- 1 - Alagrete
- 2 - Bagé
- 3 - Cachoeirinha
- 4 - Capão do Leão (Pelotas)
- 5 - Eldorado do Sul (Guaíba)
- 6 - Encruzilhada do Sul
- 7 - Maquiné (Osório)
- 8 - Quaraí
- 9 - Rio Grande
- 10 - Santa Maria
- 11 - Santa Vitória do Palmar
- 12 - Santana do Livramento
- 13 - São Borja
- 14 - São Gabriel
- 15 - Taquari
- 16 - Torres
- 17 - Uruguaiana

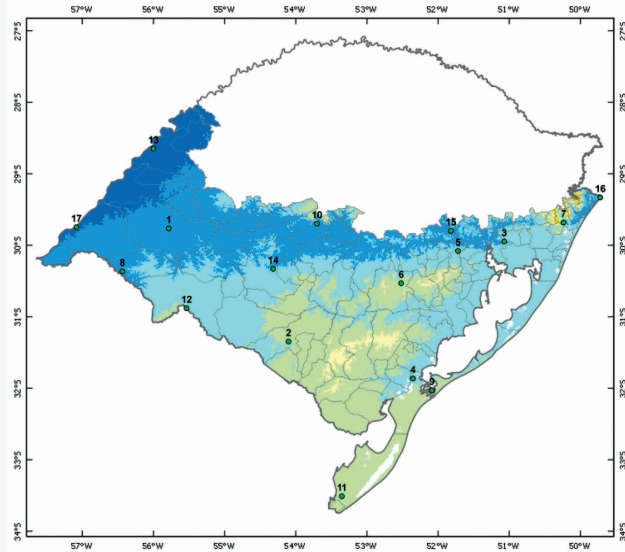


Figura 104. Información de salida del programa GD Arroz (Consulta con mapas - versión web) que indica el mapeo del número promedio de días desde la emergencia hasta la diferenciación de panículas (E-R1), en promedio de 30 años, para la fecha de emergencia de 2^{do} decenio de octubre y para el cultivar (subgrupo) elegido, en las principales regiones productoras de arroz de riego de Rio Grande do Sul. Fuente: Embrapa.

La Figura 105 muestra la pantalla de presentación de la aplicación, mientras que las Figuras 106 y 107 ilustran, respectivamente, información relacionada con las consultas por “ubicaciones” y “mapas”.

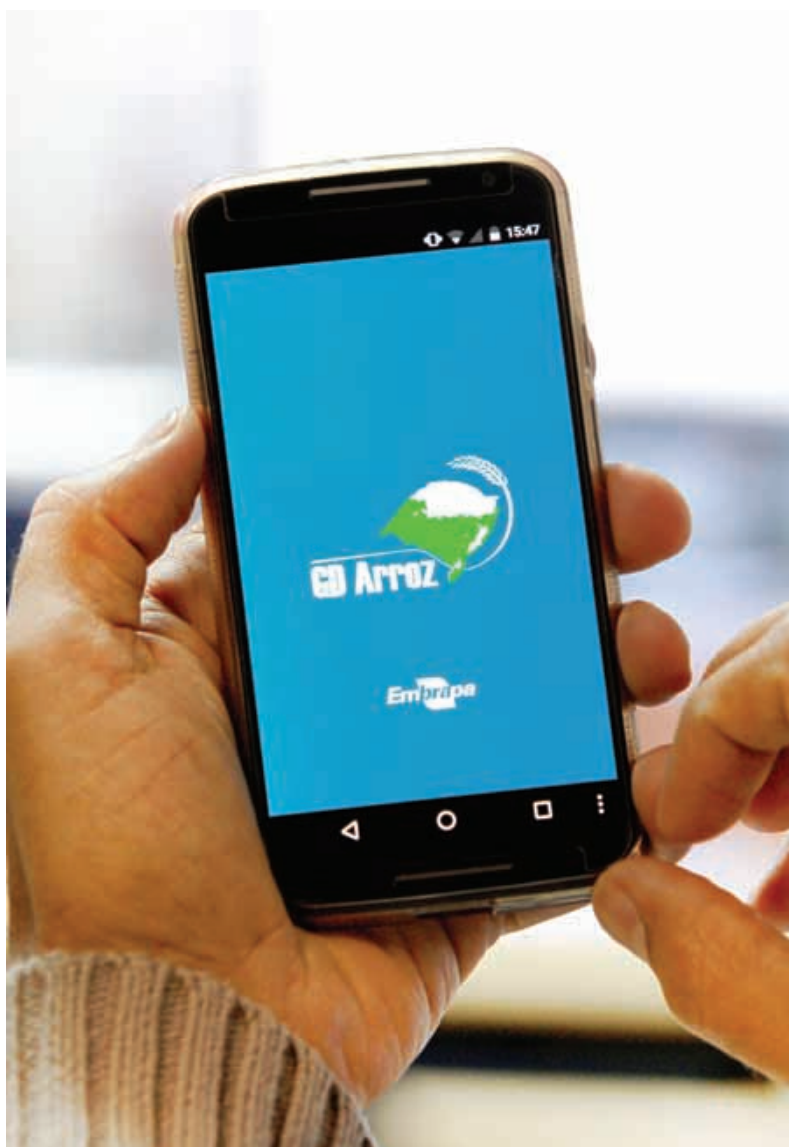


Figura 105. Pantalla de presentación de la aplicación GD Arroz. Fuente: Embrapa.

CONSULTA LOCAL
CONSULTA MAPA

MÉDIA (30 ANOS)	
Número de días	64
Data	18/12

SAFRA	
Número de días	62
Data	16/12

DESVIO DA MÉDIA	
Número de días	-2

PRÁTICAS DE MANEJO

1) Observação: A SOSBAI recomenda aplicar a 2ª ANC de modo que o Nitrogênio esteja disponível para as plantas na Iniciação da panícula (IP ou R0). A IP ocorre, em média, 4 dias antes da DP.

Figura 106. Información de salida (consulta por ubicación) en la aplicación GD Arroz. Fuente: Embrapa.



Figura 107. Información de salida (consulta de mapas) en la aplicación GD Arroz. Fuente: Embrapa.

10.2.3. Prácticas de manejo

Como se mencionó anteriormente, justo debajo de la ilustración sobre EDP, se indican las principales prácticas de manejo recomendadas por SOSBAI (2007, 2014) asociadas con cada uno de los seis EDP. Cabe señalar que éstas prácticas de manejo, así como los períodos más adecuados, son sólo sugerencias de SOSBAI. La decisión de usarlos o no debe ser tomada por el productor o en conjunto con el asesor o agente de asistencia técnica que lo oriente.

10.2.4. Recomendación

Considerando que la fecha de ocurrencia de cada una de las seis etapas puede estar influenciada por otros factores (Steinmetz et al., 2013), se recomienda que los usuarios, o los propios productores, utilicen la información generada por este programa como una herramienta complementaria, no única, para la planificación y la toma de decisiones sobre cuándo realizar las prácticas de manejo.

Agradecimientos

Como se indica en Steinmetz et al. (2015a), este programa es el resultado del esfuerzo de una gran cantidad de personas entre investigadores, extensionistas y pasantes de las instituciones involucradas, así como una gran cantidad de productores que ayudaron en el proceso de validación de los resultados. Un agradecimiento especial al Centro de Tecnología de la Información (NTI) de Embrapa Clima Temperado por el desarrollo de las versiones *Web* y *Aplicación* de GD Arroz.

10.3. Aplicativo PlanejArroz

La App PlanejArroz, desarrollada en alianza entre Embrapa Clima Temperado con la Universidad Federal de Santa María (UFESM), el Instituto Río Grandense do Arroz (IRGA) y el Instituto Nacional de Meteorología (INMET); es una aplicación para dispositivos móviles que puede ser considerada como una herramienta digital denominada Agricultura 4.0, tecnologías digitales que se integran y conectan mediante *softwares*. Está destinado a la planificación del manejo y la estimación de la productividad del arroz de regadío en Rio Grande do Sul, conteniendo dos módulos: uno denominado “Manejo”, que se basa en la predicción del desarrollo fenológico de las plantas de arroz por acumulación de grados-día a lo largo del ciclo, con el objetivo de planificar y tomar decisiones sobre las principales prácticas de manejo cultural. Este módulo estima las fechas, considerando el promedio histórico del clima y los datos climáticos del cultivo actual, de ocurrencia de seis etapas de desarrollo, de 41 cultivares recomendados para Rio Grande do Sul. El otro módulo, denominado “Productividad”, utiliza el Modelo de SimulArroz, que estima el rendimiento de grano, también a lo largo de los años y en la zafra, para los cultivares IRGA 424 RI, Guri INTA CL y Puitá INTA CL.

El propósito del módulo “Manejo” es ayudar a los productores a realizar prácticas de manejo de cultivos de acuerdo con las etapas de desarrollo de la planta (EDP), según lo recomendado por la Sociedad de Arroz de Riego del Sur de Brasil (SOSBAI, 2018). El problema es que la EDP y, especialmente, la diferenciación de panículas (DP o R1), es muy variable porque depende de la temperatura. Por este motivo, es preferible expresar el estadio R1 y el resto de EDP en días, pero estimados a través de grados-día (GD), en lugar del número de días del calendario (Streck et al., 2006b; Steinmetz et al. 2010).

Este módulo es una mejora del programa GD Arroz. En el capítulo anterior (10.2) se puede encontrar información detallada sobre GD Arroz.”

Además del manejo, la fecha de siembra, así como el ciclo del cultivar, pueden tener un gran impacto en la productividad del arroz de regadío (Menezes et al., 2013; Steinmetz et al., 2009). Los modelos basados en procesos (de *English Process-based Models*), como SimulArroz, por ejemplo, son herramientas que pueden utilizarse para estimar la productividad de los granos de arroz, en diferentes momentos y regiones productoras (Rosa et al., 2015; Ribas et al., 2016), siendo útil incluso como subsidio para el establecimiento de políticas públicas como las que se originan en la Zonificación de Riesgo Climático Agrícola - ZARC (Steinmetz et al., 2018; 2019).

El programa PlanejArroz, disponible en los formatos Aplicación (*Google Play*) y *Web* (<http://planejarroz.cpact.embrapa.br>), es una herramienta útil para los productores y otros usuarios involucrados en los diferentes segmentos de la cadena de producción de arroz en Rio Grande do Sul. En este ítem, el objetivo es caracterizar el contenido, los principios operativos básicos y el uso de la aplicación PlanejArroz con el propósito de planificar el manejo y estimar la productividad del arroz de regadío en el Estado de Rio Grande do Sul.

10.3.1. Fundamentos del software

La aplicación PlanejArroz tiene dos funcionalidades, una para el manejo de cultivos y la otra para la estimación de la productividad.

10.3.1.1. Manejo

Para estimar la fecha “promedio” de ocurrencia de cada uno de los seis EDP, el programa utiliza la serie histórica de 30 años (1987-2016) (Power/NASA, 2018) de las temperaturas del aire máxima (Tx) y mínima (Tn) diaria, mientras que para la “safra” se utilizan los datos de Tx y Tn que diariamente utiliza el Instituto Meteorológico Nacional (INMET). La temperatura media diaria

(T_m) se obtiene mediante la media aritmética entre T_x y T_n . La ecuación para calcular los grados-día fue la de Slaton et al. (1996), utilizando la temperatura base de 11 °C (Infeld et al., 1998). Para los tres primeros cultivares (IRGA 424 RI, Guri INTA CL y Puitá INTA CL), que fueron los más sembrados en la safra o campaña 2018/2019, los grados-día acumulados (GD), obtenidos experimentalmente, en cuatro años agrícolas (datos obtenidos por el primer autor, no publicados). Para los demás cultivares se utilizó la GD promedio de los subgrupos a los que pertenecen (Steinmetz et al., 2015a).

Se aplicaron ecuaciones de regresión generadas en el proceso de validación del método grado-día (Steinmetz et al., 2015b) a los datos obtenidos sobre la duración de las fases desde la emergencia hasta cada una de las seis etapas, excepto la etapa R1, en el que las ecuaciones descritas en Steinmetz et al. (2014). Los valores del número de días desde la emergencia hasta cada una de las seis etapas y la respectiva fecha de ocurrencia de estas etapas, en el año de cosecha, así como la desviación (en días) entre los períodos calculados con la T_m diaria del año de cosecha y la T_m diaria promedio de los 30 años, se actualizan diariamente mediante cómputo automático por parte del *software*, de acuerdo con los datos recibidos de INMET. El *software* recalcula estos valores diariamente, de acuerdo con los datos diarios recibidos que reemplazan los datos históricos según la fecha actual. Finalmente, el *software* actualiza automáticamente los valores almacenados en la base de datos que alimenta la página *Web* y la aplicación.

Los mapas fueron elaborados en un entorno de geoprocésamiento basado en la interpolación del modelo de relieve del Estado de Rio Grande do Sul con una ecuación obtenida para cada período de diez días mediante regresión múltiple entre las variables independientes, altitud, latitud y longitud, y el “número de días después de la emergencia” para cada una de las seis etapas, como variable dependiente, en las veintidós localidades donde se estimó este parámetro por el

método grado-día. Como resultado de la combinación de los tres cultivares más sembrados, más siete grupos de maduración, de once decenios (del primero de septiembre al dos de diciembre), y de las seis fases fenológicas, se produjeron 660 mapas, que representan las clases de “número de días después de la emergencia” para una determinada etapa, en los diferentes ambientes de producción de arroz del estado.

10.3.1.2. Productividad

El programa utiliza promedios de 10 años de rendimiento de grano desde el primer período de diez días de septiembre hasta el segundo período de diez días de diciembre, denominándolos “Promedio (30 años)”, para los tres cultivares mencionados anteriormente, calculados por el modelo SimulArroz utilizando el nivel tecnológico “medio” (Rosa et al., 2015) durante los mismos 30 años que la base de datos climática utilizada para la fenología. El usuario puede visualizar la productividad de la “Safrá” con los datos diarios recibidos de INMET y la “Desviación de la media”, que representa la diferencia entre los datos promedio y el de la cosecha actual. El usuario también puede ver los mapas de productividad promedio de 30 años que se crearon en un entorno de geoprocésamiento, utilizando el método Kriging ordinario.

10.3.2 Utilización del PlanejArroz

A continuación, se muestran ejemplos de uso de la aplicación, con algunas imágenes. El aspecto de su pantalla de inicio se muestra en la Figura 108.

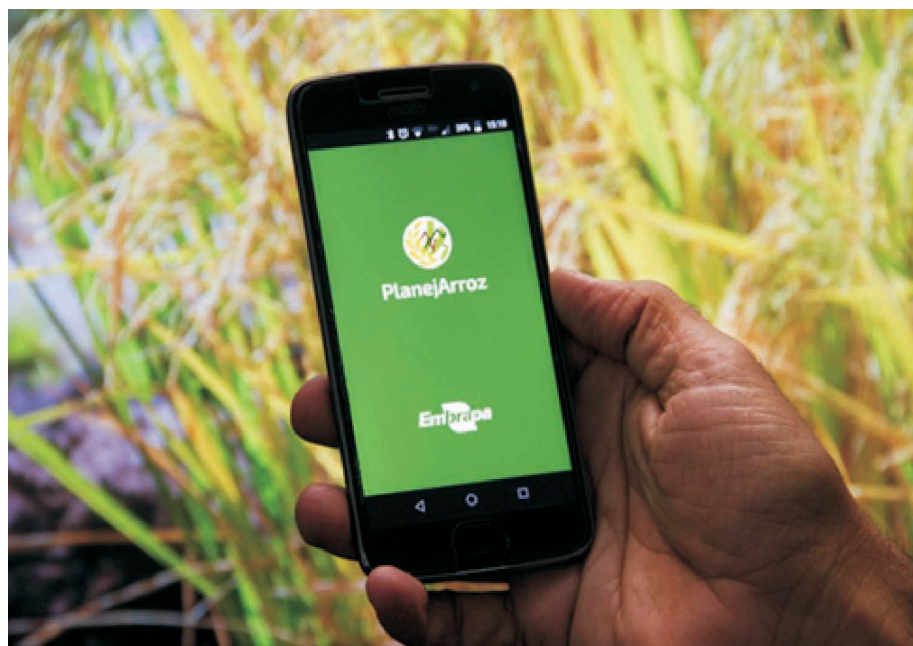


Figura 108. Pantalla de inicio de la aplicación PlanejArroz. Fuente: Paulo L. L. Aguiar.

Manejo

Si el “Interés” del usuario es “Manejo”, los siguientes pasos son indicar el “Municipio”, el “Cultivar”, el “Estadio”, la “Fecha de Emergencia” y, finalmente, la “Consulta”.

Município

Seleccione el municipio de Rio Grande do Sul que le interese escribiendo las tres primeras letras. En total son 131 municipios, que forman parte de las seis regiones arroceras que utiliza el Instituto Rio Grandense do Arroz (Menezes et al., 2012). La información para estos municipios se generó a partir de una red de 22 estaciones meteorológicas automáticas del Instituto Nacional de Meteorología (INMET), como se muestra en la Figura 109.

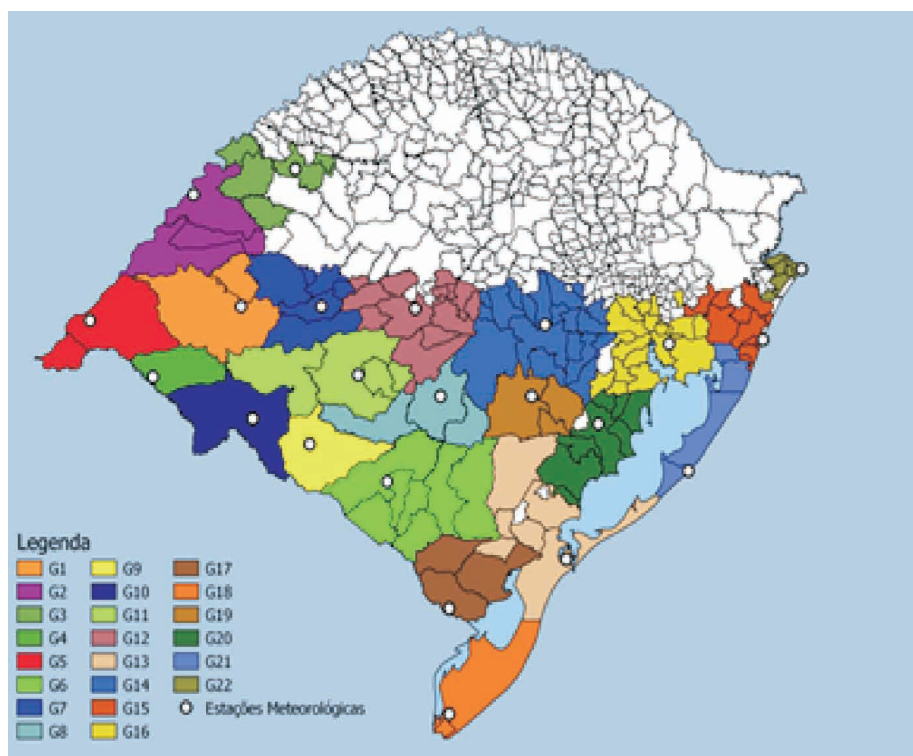


Figura 109. Agrupaciones de municipios asignados a cada una de las 22 estaciones meteorológicas automáticas del INMET utilizadas en planejArroz, siendo que: G1 (Alegrete), G2 (São Borja), G3 (São Luiz Gonzaga), G4 (Quaraí), G5 (Uruguaiana), G6 (Bagé), G7 (São Vicente do Sul), G8 (Caçapava do Sul), G9 (Dom Pedrito), G10 (Santana do Livramento), G11 (São Gabriel), G12 (Santa Maria), G13 (Rio Grande), G14 (Rio Pardo), G15 (Tramandaí), G16 (Porto Alegre), G17 (Jaguarão), G18 (Santa Vitória do Palmar), G19 (Encruzilhada do Sul), G20 (Camaquã), G21 (Mostardas), G22 (Torres). Mapa elaborado por Ary J. Duarte Júnior - Equipo FieldCrops y UFSM.

Cultivar

Selecione el cultivar de los 41 enumerados, que la Sociedad de Arroz de Riego del Sur de Brasil recomienda para el cultivo en Rio Grande do Sul (SOSBAI, 2018).

Estadio

Seleccione una de las seis etapas de desarrollo de la planta, según la escala de Counce et al. (2000), es decir: V4-Planta de 4 hojas; R1-Diferenciación de Panícula; R2-Embuchado/Hoja Bandera; R4-Comienzo de la floración; R8-Comienzo de la maduración; R9-Maduración completa.

Fecha de emergencia

Seleccione la fecha de la emergencia disponible para el período del 1 de septiembre al 31 de diciembre. Considere la fecha de emergencia del 50%, es decir, cuando haya emergido aproximadamente el 50% de las plántulas del cultivo (plántulas de hasta 2 cm de altura). El programa se desarrolló considerando, fundamentalmente, el sistema de siembra en suelo seco (convencional, cultivo mínimo y labranza cero).

Para ejemplificar, se seleccionaron las siguientes variables: Municipio: “Santa María”; Cultivar: “IRGA 424 IR”; etapa: “R1 - Diferenciación de panículas”; Fecha de emergencia: “5/10”. Después de completar los campos indicados, seleccione “Consulta”. Los resultados de esta consulta aparecen, en secuencia, como se muestra en las Figuras 110, 111, 112 y 113.

En “Promedio 30 años”, el campo “N° días (E-R1)” indica que este cultivar, en promedio de treinta años de datos de Tm diarios, requirió 69 días después de la emergencia para alcanzar la etapa R1. El campo “Fecha (R1)” indica que 69 días después de la emergencia (5/10) corresponde al día 13 de diciembre (Figura 110). Esto indica la fecha promedio en la que ocurre la etapa R1 en estos treinta años.

En “Safra”, el campo “N° días (E-R1)” fue 67 días y “Fecha (R1)” fue 11/12, por lo que la “Desviación del promedio (días)” menos 2 días (Figura 111). Esto significa que, en el período comprendido entre el 5/10 (emergencia) hasta la acumulación de grados-día necesarios para que se produzca la etapa R1 del cultivo en cuestión, es decir el 11/12, la temperatura media del aire (Tm) fue superior a la Tm del promedio histórico (30 años). Debajo de la tabla e imágenes de la etapa seleccionada, en planta y en

cultivo, se indican las recomendaciones de SOSBAI (2018) sobre las prácticas de manejo que se deben realizar en campo (Figura 111).

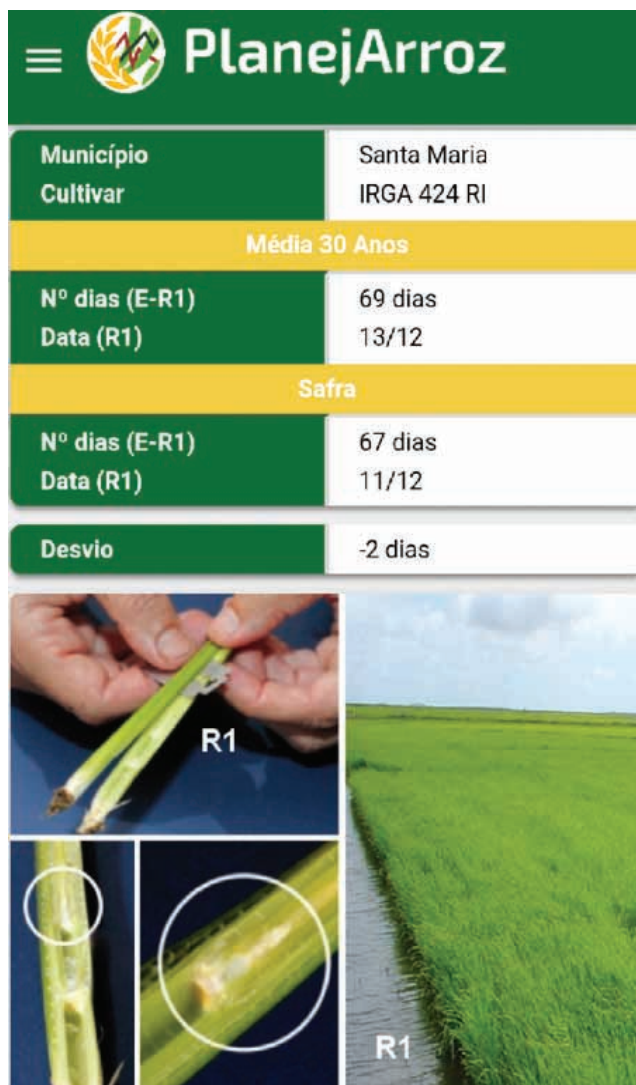


Figura 110. Información de salida de la Aplicación PlanejArroz para “Manejo” que involucra la tabla con el número promedio de días desde la emergencia hasta la diferenciación de panícula (E-R1), la fecha promedio de R1, en promedio de 30 años y en la safra o campaña actual, desviación de la media (días), imágenes de la etapa R1 en la planta y cultivo y manejo recomendado por SOSBAI (2018) para la etapa R1. Fuente: Equipo FieldCrops, UFSM, Embrapa e INMET.

En la secuencia, se muestra, en forma de mapas, la espacialización de la información generada (Figura 111). Esta consulta de mapa tiene como objetivo indicar al usuario no sólo la información del municipio seleccionado, sino también de los municipios circundantes.

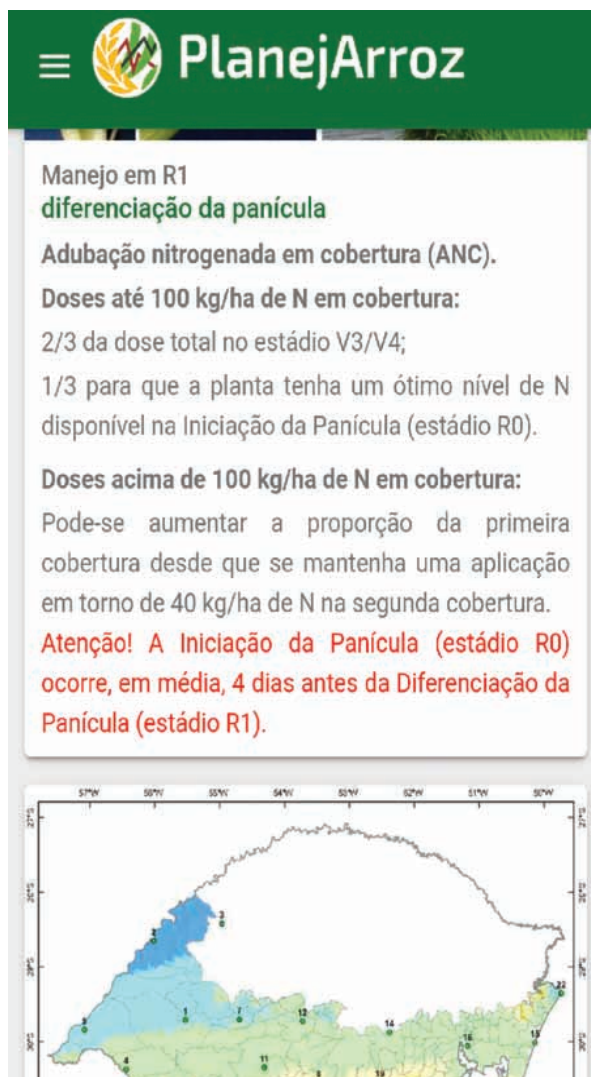


Figura 111. Información de salida de la Aplicación de PlanejArroz para “Manejo” que involucra el manejo recomendado por SOSBAI (2018) para la etapa R1. Fuente: Equipo FieldCrops, UFSM, Embrapa e INMET.

La información disponible en los mapas se refiere a clases de “N° días (E-Estadio)” para períodos de emergencia de 10 días, en promedio de 30 años, considerando el valor intermedio del período de diez días. Así, el mapa para los primeros diez días de octubre se refiere a la emergencia del 5 de octubre, el mapa para el segundo decenio de octubre se refiere a la emergencia del 15 de octubre, y así sucesivamente.

La Figura 112 indica las clases de “N° de días (EM-R1)” para la misma información de entrada por “Manejo” usado anteriormente, es decir: Santa María, cultivar IRGA 424 RI, con fecha de emergencia el 5 de octubre. Así, indica que la duración de la fase EM-R1 es similar en la mayor parte del municipio de Santa María y también en los municipios que pertenecen a la misma clase (de 69 a 72 días), representada por el color verde en el mapa. Por tanto, en todos estos municipios, la aplicación de cualquier práctica de manejo asociada a esta etapa podría ser en una fecha similar a la de Santa María.

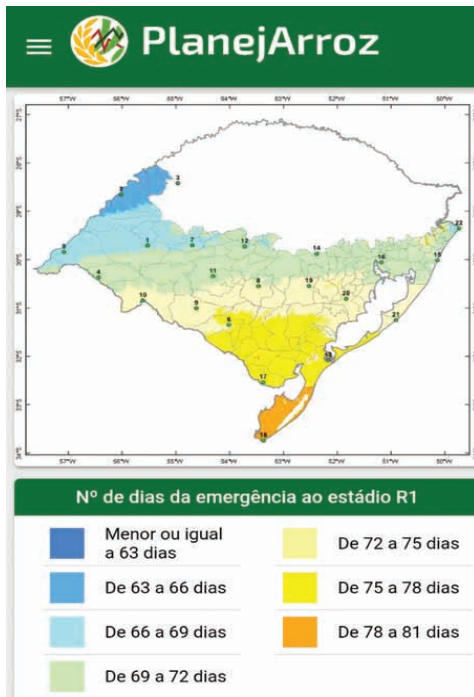


Figura 112. Información de salida de la Aplicación PlanejArroz para “Manejo” que involucra el mapa con el número promedio de días (ND) desde la emergencia hasta la diferenciación de panícula (E-R1) en los 131 municipios de Rio Grande do Sul, la ubicación de las 22 estaciones meteorológicas automáticas de INMET y las clases ND del mapa. Fuente: Equipo FieldCrops, UFSM, Embrapa e INMET.



Figura 113. Información de salida de la Aplicación PlanArroz de “Manejo” que involucre las clases del número promedio de días de la emergencia a la diferenciación de la panícula (EM-R1) del mapa, y los municipios de las 22 estaciones meteorológicas automáticas del INMET. El principio de funcionamiento del programa es el mismo para cada una de las otras cinco etapas de desarrollo de la planta de arroz. Fuente: Equipo FieldCrops, UFSM, Embrapa e INMET.

En algunas situaciones, la dificultad para definir la fecha del 50% de la emergencia del cultivo debido a la desuniformidad de emergencia de las plántulas, provocado por la escasez y/o irregularidad en la distribución de las lluvias, puede influir en la precisión de la fecha de ocurrencia de cada una de las seis etapas,

estimada por el método grado-día. Si hay dos fechas de emergencia diferentes, para cultivos sembrados en la misma fecha, se recomienda considerarlos como dos cultivos en lugar de hacer el promedio de las dos fechas de emergencia.

Productividad

Si el “Interés” del usuario es “Productividad”, los siguientes pasos son indicar el “Municipio”, el “Cultivar”, la “Fecha de Emergencia” y, finalmente, la “Consulta”.

Municipio

Seleccione el municipio de interés dentro de los 131 listados.

Cultivar

Seleccione una de las tres variedades disponibles, o sea, IRGA 424 RI, Guri INTA CL y Puitá INTA CL.

Fecha de emergencia

Seleccione la fecha correspondiente al 50% de emergencia de las plántulas del cultivo. Para la productividad, al igual que para el manejo, el programa se desarrolló considerando, fundamentalmente, el sistema de siembra en suelo seco (convencional, cultivo mínimo y labranza cero).

Para ejemplificar, se utilizó información similar a la de fenología, es decir: Municipio: “Santa María”; Cultivar: “IRGA 424 RI”; Fecha de emergencia: “5/10”. Luego de completar los campos indicados y seleccionar “Consulta” aparecerán los resultados, en secuencia, como se indica en las Figuras 114, 115, 116.

En “Productividad (30 años) - kg/ha” se obtiene el valor de 10.707 kg/ha, mientras que en “Productividad (safra) - kg/ha” indica 12.297 kg/ha, correspondiente a una “Desviación - kg/ha” de 1.590 kg/ha o una “Desviación -%” de 14,8%. Esto indica que los datos meteorológicos utilizados en el SimulArroz (Tx, Tn y radiación solar) del cultivo en cuestión, hasta el día en que se realizó la consulta, fueron más favorables para la productividad del cultivo que el promedio de los datos históricos (30 años).

Debajo de la tabla hay un gráfico que compara la productividad promedio de 30 años y la safra en consulta (Figura 114).

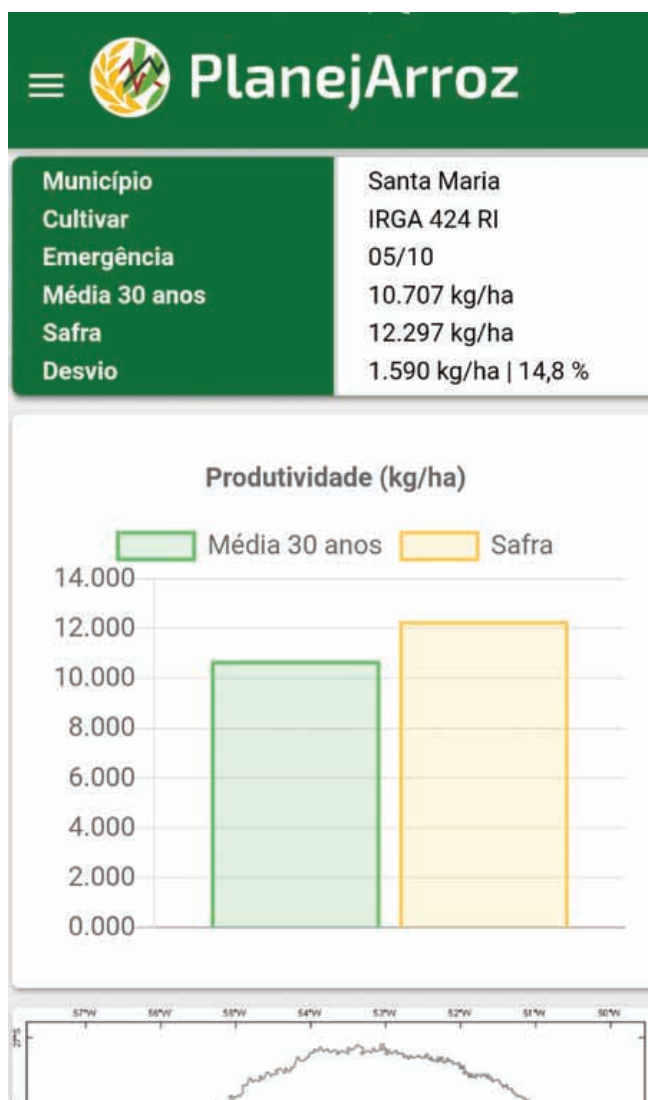


Figura 114. Información de salida de la Aplicación PlanejArroz para “Productividad” que involucra la tabla con el “Promedio de 30 años”, en la “Safra” y “Desviación” entre ambos, en kg/ha y en porcentaje, y un gráfico comparativo del Promedio de 30 años y Safra. Fuente: Equipo FieldCrops, UFSM, Embrapa e INMET.

A continuación, se muestra el mapa que muestra la espacialización de la productividad, seguido de las clases de productividad y los municipios en los que se utilizan como base de datos las 22 estaciones meteorológicas automáticas del INMET (Figuras 115, 116). En este caso, el mapa indica que, en un promedio de 30 años, en todos los municipios que tienen el mismo color que Santa María, la productividad estimada es similar utilizando el cultivar IRGA 424 RI, cuya fecha de emergencia ocurrió el 5 de octubre.

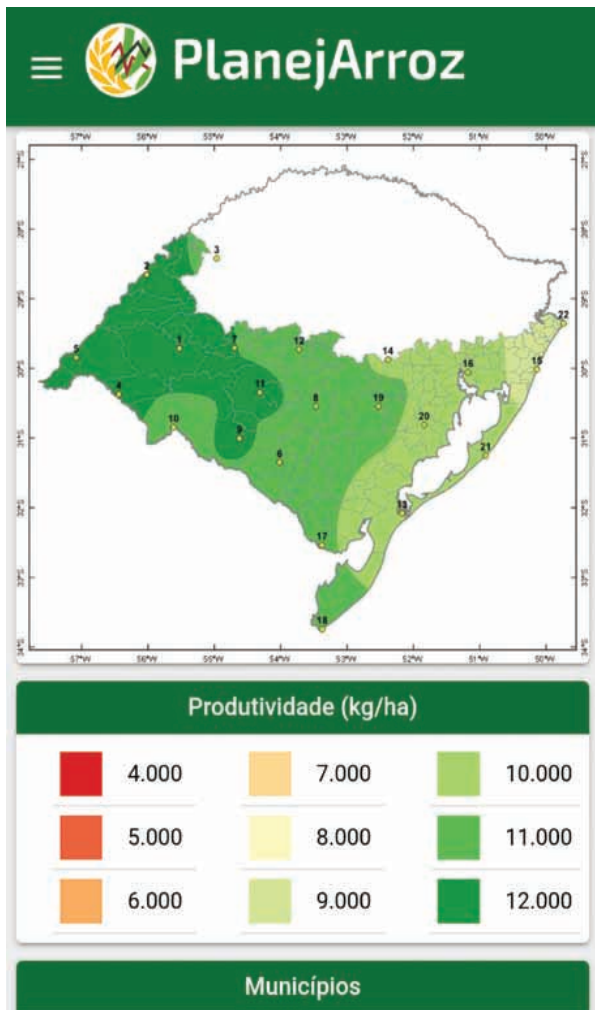


Figura 115. Información de salida de la Aplicación PlanejArroz para “Productividad Promedio de 30 años”, en los 131 municipios de Rio Grande do Sul, la ubicación de las 22 estaciones meteorológicas automáticas del INMET y las clases de productividad de mapa. Fuente: Equipo FieldCrops, USFM, Embrapa e INMET.



Figura 116. Información de salida de la Aplicación PlanejArroz para “Productividad” que involucra las clases de productividad del mapa y los municipios donde están instaladas las estaciones meteorológicas automáticas INMET. Fuente: Equipo FieldCrops, UFSM, Embrapa e INMET.

Consideraciones finales

PlanejArroz (Aplicación y *Web* para la plataforma *Android*) es una herramienta que puede ayudar al productor a realizar las prácticas de manejo en los momentos más adecuados, como recomienda SOSBAI (2018), para estimar la fecha de ocurrencia de seis etapas de desarrollo del (EDP) asociado con estas prácticas. Sin embargo, cabe señalar que estas prácticas de manejo, así como los períodos más adecuados, son solo sugerencias de SOSBAI. La decisión de usarlos o no debe ser

tomada por el productor o en conjunto con el agente de asistencia técnica que lo oriente.

Asimismo, considerando que la fecha de ocurrencia de cada una de las seis etapas puede estar influenciada por otros factores (Steinmetz et al., 2013), se recomienda que los usuarios, o los propios productores, utilicen la información generada por esta aplicación como una herramienta complementaria, y no solo, para la planificación y toma de decisiones sobre cuándo realizar las prácticas de manejo.

Además de la parte de manejo, la estimación de rendimiento de grano de PlanejArroz también puede ser útil en la planificación del cultivo en cuanto a, por ejemplo, la elección del tiempo de siembra, según el cultivar, que presenta, en términos promedio (30 años), los niveles más altos de productividad de granos. Asimismo, una vez establecido el cultivo, es posible establecer, con mucha anticipación, la productividad esperada a alcanzar, con base en los datos promedio (30 años) del municipio. Por otro lado, utilizando información del módulo “Manejo”, es posible estimar la fecha probable de cosecha tomando como referencia la fecha de ocurrencia de la etapa R9.

Cabe señalar que la productividad estimada por PlanejArroz se basa en el nivel “medio” de tecnología. Como resultado, es probable que existan diferencias en relación a la productividad obtenida en las condiciones del cultivo. Estas diferencias pueden ser más expresivas en cultivos que utilizan niveles de tecnología muy diferentes en relación con el nivel medio. Como resultado, se sugiere utilizar el módulo Productividad de PlanejArroz como herramienta para obtener una estimación razonable de la productividad a obtener en lugar de esperar una alta precisión de esta estimación de productividad.

Además de lo mostrado en este capítulo, la aplicación proporciona otra información, como: “Archivo”, donde se almacenan las consultas más recientes; “Acerca de”, que aborda las razones para desarrollar este programa, así como las

asociaciones involucradas; “Contacto”, indica las personas con las que se puede contactar en caso de duda o necesidad de información específica.

Finalmente, se cree que esta aplicación es un producto inédito y diferenciado, por las siguientes razones:

1 - permite obtener información tanto en relación al Manejo como a la Productividad del cultivo, para los principales municipios productores de arroz de Rio Grande do Sul;

2 - es una herramienta digital moderna que se ajusta al concepto de Agricultura 4.0;

3 - es gratuito y está disponible tanto en esta aplicación como a través de la *Web* (<http://planejarroz.cpact.embrapa.br>);

4 - es el resultado del esfuerzo de cuatro instituciones públicas (Embrapa, UFSM, Irga e INMET), que son referentes en sus áreas de especialización.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a los líderes de las cuatro instituciones involucradas, quienes hicieron todo lo posible para asegurar que este trabajo se llevara a cabo. Si bien se han involucrado diferentes directores de estas instituciones, se agradece especialmente al Dr. Clênio N. Pillon, ex Director de Embrapa Clima Temperado, al Dr. Paulo Afonso Burmann, Magnífico Rector de la Universidad Federal de Santa María (UFSM), Eng. Agr. Guinter Frantz, presidente del Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA) y el meteorólogo Francisco de Assis Diniz, exdirector general del Instituto Nacional de Meteorología (INMET). Fue durante el mandato de estos líderes que se inició esta asociación y que se llevó a cabo la mayor parte del trabajo.

10.4. Aplicación del modelo SimulArroz en el pronóstico de cosecha de arroz en Rio Grande do Sul

El monitoreo y pronóstico de cultivos son factores clave para planificar las cadenas de producción de granos en todo el mundo. Entre los métodos de pronóstico o estimación de rendimiento de cultivos utilizados, la entrevista o encuesta a los agricultores por parte de técnicos agrícolas y agrónomos sobre la productividad esperada es el más simple y el más utilizado en todo el mundo. Durante las últimas dos décadas, los modelos matemáticos se han utilizado como una herramienta adicional para la estimación de cosechas en los Estados Unidos y Europa. En 2016, el Equipo FieldCrops fue pionero en la prueba de una metodología para pronosticar cultivos de arroz de regadío en Brasil utilizando el modelo SimulArroz y el modelo climático regional RegCM4, con el pronóstico de cultivo 100% basado en modelos matemáticos basados en procesos (Silva et al., 2016). Usando esta metodología, la diferencia entre la estimación estándar de cultivos y la estimación basada en modelos fue del 14%.

Basado en el pronóstico de la cosecha de maíz en el Corn-Belt de los Estados Unidos, en 2016 el Equipo FieldCrops en asociación con IRGA desarrolló una metodología más simple para la estimación de cultivos, utilizando el modelo SimulArroz, datos meteorológicos actuales y históricos e información de manejo (fecha de siembra, variedad y área sembrada) para pronosticar la cosecha de arroz de regadío en el sur de Brasil. En esta metodología, la información de manejo y los datos meteorológicos se insertan en el modelo SimulArroz, formando una columna de rendimientos estimados para el final del año agrícola. A medida que avanzó la cosecha, los datos meteorológicos se fueron actualizando de la siguiente manera: desde el inicio de la siembra hasta la fecha de pronóstico se utilizan los datos meteorológicos de la cosecha (actualizados) y a partir de la fecha de pronóstico se rellenan los datos meteorológicos de la campaña con datos meteorológicos promedio de años anteriores hasta esa cosecha, formando una serie de rendimientos estimados para la safra (Figura 117).

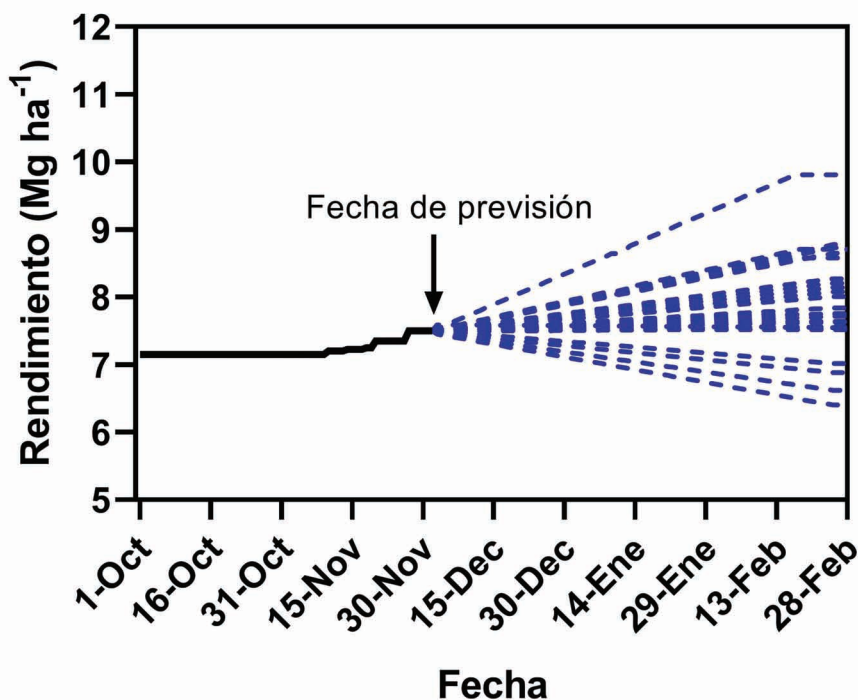


Figura 117. Gráfico que muestra cómo se realiza la previsión de cultivos utilizando el modelo SimulArroz. La línea negra está formada por datos meteorológicos de la cosecha en curso desde la siembra hasta la fecha prevista (indicada por la flecha negra). A partir de la fecha de pronóstico, se utiliza una serie histórica de más de 30 años de datos meteorológicos para generar una nube de rendimientos (cada línea azul representa un rendimiento estimado), que se utiliza para calcular la probabilidad de que el cultivo ocurra arriba, por debajo o promedio. Fuente: Silva et al (2020) – Equipo FieldCrops.

La nueva metodología se probó en cuatro cultivos de arroz en el estado de Rio Grande do Sul, Brasil (2014/2015, 2015/2016, 2016/2017 y 2017/2018). La metodología logró incrementar la precisión propuesta anteriormente, disminuyendo la diferencia del 14% al 8,1% en relación con la metodología estándar para estimar la cosecha de arroz en Brasil (Figura 118). Utilizando el modelo SimulArroz, se desarrollaron dos nuevas metodologías para estimar el rendimiento de arroz, que se pueden insertar en el actual sistema brasileño de predicción de cosecha. Entre los

beneficios de estas metodologías se encuentran una mejor caracterización de la respuesta de la planta al medio ambiente, la reducción del empirismo y la automatización de la previsión.

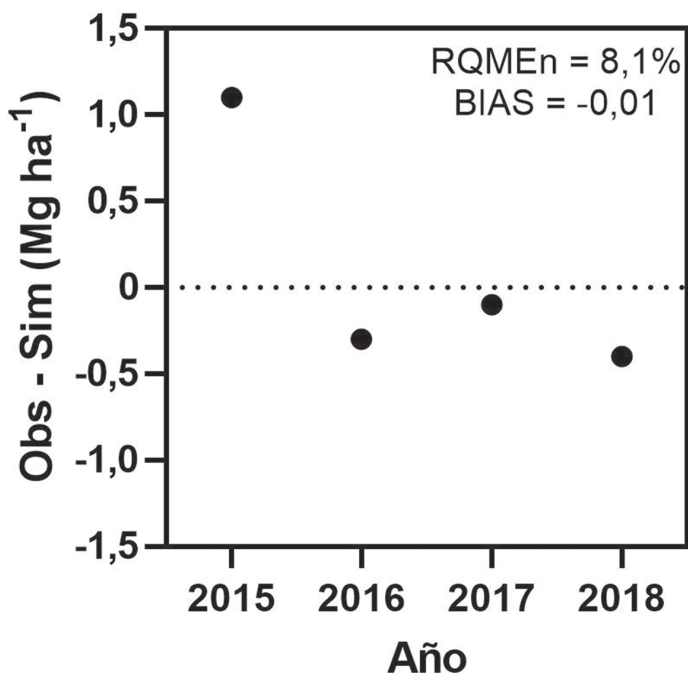


Figura 118. Diferencia entre la estimación de la cosecha de arroz usando el modelo de SimulArroz y la estimación de la cosecha basada en entrevistas con productores rurales durante los años agrícolas 2014/2015, 2015/2016, 2016/2017 y 2017/2018 para el estado de Rio Grande do Sul - Brasil. RQMEn: raíz cuadrada media del error normalizado; BIAS: índice que verifica la tendencia a subestimar o sobreestimar el rendimiento de grano. Fuente: Equipo FieldCrops.



11. La Excelencia, experiencia e importancia de la Transferencia de Tecnología para incrementar la productividad del arroz en América Latina y el Caribe

Luciano de Campos Carmona¹

En 1999, la FAO patrocinó un estudio en colaboración con el Fondo Latinoamericano para Arroz de Riego (FLAR) para analizar el grado y las razones fundamentales de la diferencia entre la productividad potencial y la productividad actual de los cultivos de arroz en América Latina y el Caribe (ALC). Este estudio concluyó que, si bien la región utiliza genotipos con alto potencial de productividad en prácticamente todas las áreas cultivadas, la productividad obtenida por los agricultores fue mucho menor que el potencial de las variedades disponibles. Esta discrepancia de productividad es el resultado de numerosas deficiencias, principalmente por el uso de prácticas de manejo inadecuadas, por lo que las variedades no expresan su alto potencial. El estudio identificó debilidades en los programas de transferencia de tecnología como la causa fundamental de esta diferencia en la productividad.

Entre 2003 y 2006, el Fondo Común de Productos Básicos (CFC) financió un proyecto realizado por el FLAR y el Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA) en Rio Grande do Sul (Brasil), el FLAR y FUNDARROZ (Venezuela) enfocado en un programa efectivo de transferencia de mejores prácticas de manejo que llevaron a un aumento de 2 a 4 Mg ha⁻¹ en el rendimiento de grano de los productores con una reducción significativa en los costos de producción.

¹ Especialista en producción de arroz FLAR. E-mail: l.carmona@cgiar.org A.A. 6713. Cali. Colômbia. Consultor FAO, FONTAGRO e CFC.

En Rio Grande do Sul, el programa se institucionalizó y se denominó Proyecto 10 y posteriormente Proyecto 10+. Estos dos proyectos se enfocaron en la transferencia de tecnología utilizando el sistema “Produtor a Produtor®” y fueron en gran parte responsables de acercar el conocimiento agronómico, las prácticas de manejo sustentable y la integralidad de la tecnología a la gran mayoría de productores del estado.

Con los resultados positivos del proyecto financiado por la CFC y la mejora de la productividad y competitividad de los productores de arroz en los países socios del FLAR, se creó el Programa FLAR de Agronomía y Transferencia de Tecnología, que actualmente se ofrece a todos sus países socios. El objetivo del programa es incrementar la productividad del arroz de regadío en los países socios del FLAR, lo que redundará en una mayor competitividad en el mercado por parte de los productores, además de fortalecer la capacidad de los socios para identificar y transferir prácticas de manejo del cultivo, aumentando la productividad de los granos y reducir la diferencia entre la productividad media y la productividad obtenida por los mejores productores.

La estrategia consta de los siguientes pasos:

1 - Diagnóstico del patrón tecnológico del sector arrocero en cada país e identificación de los puntos fundamentales para las etapas de validación de tecnología y futuros programas de transferencia de tecnología.

2 - Planificación de acciones específicas a desarrollar de acuerdo al diagnóstico realizado.

3 - Implementación I: validación y adecuación de las tecnologías propuestas en las parcelas demostrativas con productores.

4 - Ejecución II: parcelas demostrativas a mayor escala.

5 - Implementación III: transferencia de tecnología a gran escala.

Los proyectos que coordina el Programa de Transferencia de Tecnología del FLAR se llevan a cabo mediante la metodología

híbrida denominada sistema “Producer to Producer®”, que utiliza componentes de varios sistemas de transferencia ampliamente conocidos a nivel mundial, como el *Village Leader de China*, que consiste en seleccionar un productor líder y trabajar con grupos de productores basados en *Rice Check* de Australia; así como realizar visitas periódicas similares a las de *Capacitación y Visitación de Israel*. A través de este sistema híbrido, se seleccionan productores líderes en diferentes regiones y se desarrollan actividades de transferencia de tecnología con estos productores. Con cada productor líder, se puede llegar a un gran número de productores y, por lo tanto, un solo extensionista trabajando con pocos grupos de productores puede tener un impacto relevante en su área de operación.

El método de extensión consta de tres días en campo y, posteriormente, dos reuniones técnicas con cada grupo de productores, es decir, un grupo por productor líder. Los tres primeros se realizan en las áreas demostrativas de los principales productores, el cuarto es en la comunidad y el quinto está dirigido individualmente a cada productor del grupo.

El primer día de campo tiene lugar aproximadamente 15 días después de la emergencia del cultivo, donde el productor líder explica los puntos estratégicos de manejo a su grupo. Entre ellos podemos mencionar: la importancia de sembrar dentro de la fecha recomendada, el uso de una densidad de siembra adecuada, la eficiencia del tratamiento de semillas, la eficiencia de la aplicación temprana de herbicida, el manejo de la fertilización nitrogenada en suelo seco (cuando las plantas de arroz se encuentran en la etapa máxima de tres hojas) y el manejo eficiente del riego inmediatamente después del control de malezas.

El segundo día de campo tiene lugar en la fase de floración, donde demostramos al grupo de productores aspectos relacionados con el vigor y la salud del cultivo. El tercer y último día de campo se realiza sobre la cosecha de la parcela demostrativa donde el productor la cosecha y compara el resultado con los rendimientos obtenidos en los campos vecinos que fueron manejados con su manejo convencional.

El cuarto evento (reunión técnica) es una amplia presentación de los resultados de todas las áreas demostrativas del proyecto para todos los grupos de productores. El evento final es un ejercicio de planificación del manejo que se realizará en la siguiente campaña, donde se atiende a los productores de cada grupo de manera individual o en subgrupos (3-4 productores).

La Tabla 28 presenta un resumen con alguna información importante para comprender las brechas de productividad en América Latina y el Caribe (ALC), tales como: superficie cultivadas, rendimiento promedio de las áreas irrigadas (REND); rendimiento potencial a nivel experimental (PRE); potencial de rendimiento real (PRR), brecha de productividad real (LRP), que viene dada por la diferencia entre el rendimiento potencial real y el rendimiento promedio nacional; la intensidad con la que se cultivan estas áreas (Intensivo - 1 cultivo anual - 2 cultivos anuales); intensidad de uso de agroquímicos (IUA), donde: (1 - bajo, 2 - moderado, 3 - medio, 4 - alto, 5 - excesivo); y un análisis cualitativo de las fortalezas institucionales locales en producción de semillas (Sem), investigación (Pes) y extensión (Ext) donde: (1 - inexistente, 2 - débil, 3 - razonable, 4 - promedio y 5 - ampliamente activo).

En el contexto de ALC, el mayor obstáculo para el aumento de la productividad es sin duda la ausencia total de programas de transferencia de tecnología enfocados a la problemática real de los productores, actualmente este espacio está ampliamente ocupado por empresas que comercializan agroquímicos, las cuales cuentan con personal comercial especializado y programas de financiamiento para sus productos. En la región Tropical y el Caribe, es común utilizar más de veinte productos diferentes en el ciclo de cultivo (herbicidas, insecticidas, acaricidas, bactericidas, fungicidas, fertilizantes foliares, etc.) aplicados por calendario y sin criterios técnicos. Sumando a ello, en muchos casos los programas de investigación y producción de semillas adolecen de una escasez de recursos humanos y financieros y en muchos casos se han extinguido o nunca existieron.

Tabla 28. Resumen de las principales características de los países productores de ALC. Fuente: Luciano Carmona (2020).

	Area (ha)	REND (Mg ha ⁻¹)	PRE (t ha ⁻¹)	PRR (Mg ha ⁻¹)	L.R.P (Mg ha ⁻¹)	Características			Fortalezas Inst.		
						Irri	Inten	IUA	Sem	Pes	Ext
Brasil (RS)	960.000	8,0	12,8	10,5	2,5	100	1	3	4	5	4
Uruguay	142.000	8,5	12,8	10,2	1,7	100	1	3	5	5	2
Argentina	234.000	6,6	11,5	9,2	2,6	100	1	1	4	4	3
Chile	25.500	5,5	10,5	8,6	3,1	100	1	1	3	3	1
Bolivia	178.000	5,5	10,2	8,2	2,7	10	1	3	1	2	1
Perú	278.000	8,2	15,5	11,2	3,0	95	1	4	3	2	1
Ecuador	345.000	5,0	10,5	8,2	3,2	70	1/2	5	2	2	1
Venezuela	210.000	5,5	11,0	8,8	3,3	100	2	4	3	3	3
Guyana	280.000	4,0	10,5	7,5	3,5	100	2	2	2	3	3
Panamá	90.000	5,0	10,5	8,2	3,2	20	1	5	2	2	1
C. Rica	60.000	5,0	11,0	8,1	3,1	30	1/2	5	4	2	2
Nicaragua	86.000	5,5	11,5	8,2	2,7	60	2	5	2	1	2
Honduras	12.000	4,5	11,4	8,3	3,8	50	1	4	1	1	1
Dominicana	270.000	5,5	12,0	9,0	3,5	100	2	5	2	2	2
México	32.000	6,6	11,5	9,5	2,9	80	1	3	2	2	3

Como estrategias exitosas para incrementar la productividad a nivel nacional y disminuir los costos unitarios de producción, el Programa de Agronomía FLAR trabaja con el objetivo de ajustar los procesos de manejo que realizan los

productores, resumidos en ocho principios básicos de gestión para alta productividad o Agronomía de Precisión. En la Tabla 28 se pueden observar brechas de productividad del orden de 3 Mg ha⁻¹ en todos los países de ALC, es decir, no hay limitación genética, sino una limitación de manejo. En este contexto, en los últimos 15 años fueron identificados los puntos clave en el manejo que, cuando se usan juntos y con precisión, invariablemente aumentan la productividad promedio de manera significativa.

Los principios son:

1 - Preparación temprana: considerando que el período ideal de siembra para altos rendimientos varía entre 15 y 45 días en todas las áreas arroceras de ALC e invariablemente coincide con períodos de lluvias medias a altas, es fundamental que los productores tengan las áreas listas para siembra en el período anterior a las temporadas recomendadas.

2 - Época de siembra: consiste en efectuar el cultivo en un momento en el que la fase reproductiva coincide con la mayor oferta de luz en cada ambiente particular.

3 - Densidad de siembra: como estrategia para el manejo de plagas, enfermedades y vuelco, recomendamos una población inicial de 150-200 plantas m⁻², las cuales se obtienen con densidades entre 60-100 kg ha⁻¹ de semillas.

4 - Tratamiento de semillas: práctica muy importante que tiene como objetivo controlar exclusivamente los insectos que atacan el cultivo en las primeras etapas con eficiencia y bajo impacto ambiental.

5 - Fertilización equilibrada: basado en el potencial productivo de la variedad y oferta ambiental (fertilidad natural y aporte de luz según época de siembra) con especial cuidado en el manejo del nitrógeno, el cual debe aplicarse del 70% al 100% (dependiendo de la eficiencia del manejo del agua) antes de la etapa V3 (3 hojas) en condiciones de suelo seco e incorporada inmediatamente con agua (máximo 3 días).

6 - Manejo de malezas: manejo integrado que incluye la preparación temprana y el uso de herramientas como desecación, uso de herbicidas pre-emergentes y aplicaciones de post-emergencia

poco después del establecimiento (V2-V3) antes de la fertilización con nitrógeno con subsiguiente inundación permanente.

7 - Manejo del riego: manejo de láminas bajas siempre inmediatamente después de la fertilización nitrogenada, complementando el control de malezas, incorporando nitrógeno (urea) que se aplicó al suelo seco y ayudando a controlar insectos plaga.

8 - Rotación de cultivos: práctica fundamental para mantener altos rendimientos, debido a todas las ventajas conocidas, pero principalmente para el manejo del arroz-maleza y como alternativa de segundo cultivo en regiones donde el arroz de regadío se cultiva en monocultivo intensificado.

Existen enormes desafíos para que esta práctica sea recomendada y utilizada masivamente por los productores de arroz en ALC, pero ya tenemos buenos ejemplos como el uso de la soja en Rio Grande do Sul y el maíz en Venezuela como alternativas viables para programas de rotación con arroz de riego.

Los institutos de investigación como IRGA y la Universidad Federal de Santa María (UFSC) a través de, por ejemplo, el Equipo FieldCrops - en Rio Grande do Sul, el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA) - en Uruguay, y el FLAR ya están dirigiendo esfuerzos para generar y transferir conocimientos y tecnología. Además, es necesario que los productores de arroz comprendan que los procesos agrícolas y el trabajo con sistemas de producción integrados pueden ser la forma de hacer que sus negocios sean económicamente viables.

Otros temas que merecen ser destacados para el éxito de los proyectos de transferencia de tecnología son el fortalecimiento de la investigación, la promoción del uso de semillas de calidad y la creciente inversión en extensión y transferencia de conocimiento. Con base en la información de la Tabla 28, podemos ver que existe una gran variación en las fortalezas institucionales de cada país, pero podemos agruparlas en dos grupos:

1 - Países del Cono Sur: Cuentan con instituciones con programas activos de investigación, producción de semillas y

esfuerzos de extensión. Estos países han experimentado incrementos significativos en la productividad a nivel nacional en la última década, ya que han implementado mejores prácticas agronómicas a través de programas específicos de transferencia de tecnología. Sin embargo, todavía encontramos una brecha de productividad real del orden de 2 a 3 Mg ha⁻¹, esta brecha se puede reducir considerablemente a medida que se identifiquen formas más eficientes para transferir las técnicas de “agronomía de precisión”. Cabe señalar que alrededor del 40% de los productores aún no utilizan estas prácticas en la región. Además, el refinamiento del manejo por parte de los productores que ya utilizan esta tecnología, consiste en prácticas que pueden ayudar a reducir la brecha de productividad real.

2 - Países de la Zona Tropical: En general, presentan programas de investigación con pocos o ningún recurso, problemas en sus sistemas de producción de semillas y ausencia casi total de programas específicos de transferencia de tecnología. En este contexto, todo este espacio lo ocupan técnicos vendedores de insumos que, junto con sus propios programas de financiamiento, aprovechan la falta de información de los agricultores para vender cantidades absurdas de agroquímicos. En esta región se observan dos grandes problemas: el primero es la baja productividad del orden de 3,2 Mg ha⁻¹ y el segundo son los costos de producción, del orden de 500 dólares por hectárea, ambos pueden reducirse considerablemente con el uso de prácticas agronómico más precisas.

Hay un gran margen para mejorar la competitividad de los productores de arroz de ALC, aumentando la productividad de los granos y reduciendo los costos de producción, mediante el uso de técnicas mejoradas de manejo y agricultura de procesos. Para que esto suceda es fundamental que entendamos los problemas reales de los agricultores y que se sumen esfuerzos en todos los programas de investigación, pero sobre todo, tenemos que fortalecer los programas de transferencia de tecnología local para que el conocimiento llegue de manera eficiente y efectiva a los agricultores de la región.

Consideraciones finales

Lograr altos rendimientos y rentabilidad en el cultivo del arroz, conocer la ecofisiología de los cultivares actualmente sembrados, el sistema de producción y las particularidades de cada zona de producción, será la línea divisoria entre un cultivo exitoso o un cultivo insatisfactorio. En este sentido, se buscó mediante la cooperación y unión de universidades públicas e instituciones de investigación y extensión rural en Brasil, Argentina, Uruguay y Colombia, resumir claramente los conceptos y prácticas de ecofisiología y manejo del arroz, combinados con la agricultura digital (4.0) y la infinidad de posibilidades que se abren.

El conocimiento de cómo crece y se desarrolla la planta de arroz nos permite comprender cómo y cuándo se forman los componentes de la productividad durante el ciclo de desarrollo del cultivo, lo que permite tomar decisiones que aumentan el potencial de rendimiento y la rentabilidad del cultivo. En este libro explicamos estos procesos, contextualizándolos en base a los resultados de la investigación “*On farm*” y “*Big Data*”, satisfaciendo las necesidades de la investigación del siglo XXI.

Finalmente, esperamos que con la información contenida en este libro, podamos ayudar a los productores rurales, técnicos y estudiantes de campo en la comprensión de los sistemas de producción de arroz, con el objetivo de llevar a cabo una agricultura de proceso, basada en la ecofisiología aplicada y los conceptos presentados en este libro, haciendo esta información como una herramienta de toma de decisiones para realizar ajustes a las prácticas de manejo actuales que llevan a cabo los agricultores.

Referencias

AGGARWAL, P. K. et al. InfoCrop: a dynamic simulation model for the assessment of crop yields, losses due to pests, and environmental impact of agro-ecosystems in tropical environments. **Agricultural Systems**, v. 89, p. 1-25, 2006. DOI: 10.1016/j.agsy.2005.08.001.

ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, 1998. 300p.

ALMEIDA, R. D. de; PELÚZIO, J. M.; AFFÉRI, F. S. Divergência genética entre cultivares de soja, sob condições de várzea irrigada, no sul do Estado Tocantins. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, p.108-115, 2011.

AMARAL, A. dos; SANTOS, E. C. dos. Efeito da umidade e da temperatura do solo na emergência de plântulas de arroz. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 5, n. 1, p. 43-54, 1983.

ARAUJO, R. G. et al. A influência do evento El Niño - Oscilação Sul e Atlântico Equatorial na precipitação sobre as regiões norte e nordeste da América do Sul. **Acta Amazonica**. vol.43, n.4, pp.469-480, 2013.

ARF, O. et al. Preparo do solo, irrigação por aspersão e rendimento de engenho do arroz de terras altas. **Scientia Agrícola**, v .59, n. 2, p. 321-326, 2002.

ARRUDA, M. H. M. de. et al. Qualidade fisiológica de lotes de sementes de soja com diferentes percentuais de sementes esverdeadas. **Magistra**, v.28, p.194-200, 2016.

AWIKA, J. M. Major cereal grains production and use around the world. In: AWIKA, J. M.; PIIRONEN, V.; BEAN, S. (Eds.). **Advances in Cereal Science: Implications to Food Processing and Health Promotion**. American Chemical Society, p. 1-13, 2011.

BARTZ, A. C. et al. Thermal time in sprinkler-irrigated lowland rice. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, p. 475-484, 2017.

BASHIR, K., SEKI, M., NISHIZAWA, N. K. The transport of essential micronutrients in rice. **Molecular Breeding**, v. 39, n. 168, p. 1-17. <https://doi.org/10.1007/s11032-019-1077-1>.

BISSANI, C.A. et al. **Fertilidade dos solos e manejo da adubação das culturas**. Porto Alegre, Gênese, 2004. 328p.

BOTTA, R. A., et al. Estratégia de manejo de *Tibraca limbativentris* Stål (HEMIPTERA: PENTATOMIDAE) na entressafra da cultura do arroz irrigado. **Brazilian Journal of Agriculture**, 89(3), 224-231, 2015,

BOSCO, L. C.; GRIMM, E. L. ; STRECK, N. A. . Crescimento e desenvolvimento de genótipos de arroz cultivados em solo alagado e não-alagado. **Revista Ceres**, v. 56, p. 796-804, 2009.

BOUMAN, B. A. M. et al. **ORYZA2000**: modelling lowland rice. Los Baños: IRRI e Wageningen University and Research Centre, 2001. 235 p.

BOUMAN, B. A. M.; LAMPAYAN, R. M.; TUONG, T. P. **Water Management in Irrigated Rice: Coping With Water Scarcity**. International Rice Research Institute, Los Baños (Philippines) 54 p. 2007.

BUENDIA, L. V. et al. Understanding the nature of methane emission from rice ecosystem as basis of mitigation strategies. **Applied Energy**, v. 56, p. 433-444, 1997.

BUENO C. S.; LAFARGE T. Higher crop performance of rice hybrids than of elite inbreds in the tropics: Hybrids accumulate more biomass during each phenological phase. **Field Crops Research**, v. 112, n. 2, p. 229-237, 2009.

CALVERT, L.; SEDANO, R. **Caracterización de la Enfermedad del Entorchamiento. Un complejo de *Polymixia graminis* y el virus de la necrosis rayada del arroz**. Proyecto IP-4. Mejoramiento del Germoplasma de Arroz para America Latina Y El Caribe. CIAT. Informe Anual, 2001.

CAMPOS, F. et al. Arsenic content and speciation in Uruguayan Rice. **Proceedings of 7th International Temperate Rice Conference**, Brasil, 2020. ISBN 978-65-00-00331-4. 247 pag.

CARBONELL, R.M. et al. **Guía para el trabajo de campo en el manejo integrado de plagas del arroz**. IIA/FLAR/CIAT, Havana, Cuba, 76 p, 2001.

CARLI, C. de et al. Número de dias e de graus-dia entre a iniciação e a diferenciação da panícula em cultivares de arroz irrigado. **Ciência Rural**, v. 46, n. 3, p. 428-433, 2016.

CARMONA, P. S. **IRGA 75 Anos**: A contribuição da estação experimental do arroz para o desenvolvimento da orizicultura gaúcha. Integrar Gestão e Inovação Agropecuária, Triunfo, Edição Especial, 2015.

CARRACELAS, G. et al. Evolución del rendimiento del arroz producido en Uruguay y comparación con otros países arroceros. In: ZORRILLA, G.; MARTÍNEZ, S.; SARAIVIA, H. **Arroz 2017**. Série Técnica, n. 233, Montevideo, Uruguai: INIA, 2017, p. 51-55. <http://doi.org/10.35676/INIA/ST.233>

CARRACELAS, G. et al. Irrigation management and variety effects on rice grain Arsenic levels in Uruguay. **Journal of Agriculture and Food research**, v. 1, 2019a. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2019.100008>

CARRACELAS, G. et al. Potencial y brecha de rendimiento de arroz irrigado en Uruguay y otros países arroceros. In: TERRA, J.; MARTÍNEZ, S.; SARAIVIA, H. (Eds.) **Arroz 2019**. INIA Serie Técnica, n. 250, Montevideo (Uy): INIA, 2019b, p. 53-56. <http://doi.org/10.35676/INIA/ST.250>

CARRACELAS G. et al. Irrigation management strategies to increase water productivity in *Oryza sativa* (rice) in Uruguay. **Agricultural Water Management**, v. 222, p. 161-172, 2019c. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.05.049>

CARRIJO, D. R.; LUNDY, M. E.; LINQUIST, B. A. Rice yields, and water use under alternate wetting and drying irrigation: A meta-analysis. **Field Crops Research**, v. 203, p. 173–180, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.12.002>

CARVALHO, M. A. de F.; SILVEIRA, P. M. da; SANTOS, A. B. dos. **Utilização do clorofilômetro para racionalização da adubação nitrogenada nas culturas do arroz e do feijoeiro**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão. 2012. 14p. (Embrapa Arroz e Feijão. Comunicado técnico, 205).

CASSMAN, K. G. et al. Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 28, n. 1, p. 315-358, 2003.

CEREZA, T. V. et al. Antagonism between fungicide-insecticide treatments and dietholate in irrigated rice seeds. **Journal of Seed Science**, Londrina, v. 41, n. 1, p. 13-21, 2019.

CHANDLER, R. F. Jr. **An adventure in applied science**: A history of the International Rice Research Institute. 1992. 240p.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DO ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. Brasília: CONAB, v. 6, n. 12, 2019. 126 p. ISSN: 2318-6852.

COUNCE, P. A.; KEISLING, T. C.; MITCHELL, A. J. A uniform, objective, and adaptive system for expressing rice development. **Crop Science**, v. 40, p. 436-443, 2000.

CRUZ, R. P. da; MILACH, S. C. K. Melhoramento genético para tolerância ao frio em arroz irrigado. **Ciência Rural**, v. 30, p. 909-917, 2000.

DAS, H. K. et al. Arsenic concentrations in rice, vegetables, and fish in Bangladesh: a preliminary study. **Environ Int**, v. 30, p. 383-387, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.09.005>.

DE CARLI, CRISTIANO et al. Número de dias e de graus-dia entre a iniciação e a diferenciação da panícula em cultivares de arroz irrigado. **Ciência Rural**, v. 46, p. 428-433, 2016.

DENG, N. et al. Closing yield gaps for rice self-sufficiency in China. **Nature Communications**, v. 10, n. 1, p. 1–9, 2019.

DINGKUHN, M. et al. Improving yield potential of tropical rice: achieved levels and perspectives through improved ideotypes. **Field Crops Research**, v. 182, n. 1, p. 43-59, 2015.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efectos del agua en el rendimiento de los cultivos**. Roma: FAO, 1979. 212p.

DURESSA, T. F. & LETA, S. (2015). Determination of levels of As, Cd, Cr, Hg and Pb in soils and some vegetables taken from river Majo water irrigated farmland at Kota village Oromia State, East Ethiopia. **International Journal of Sciences, Basic and Applied Research**, 21: 352-372.

ELLIS, R.H. et al. Rates of leaf appearance and panicle development in rice (*Oryza sativa* L.): A comparison at three temperatures. **Agric. For. Meteorol.**, v. 66, p. 129–138, 1993.

ERENOGLU et al. Uptake and transport of foliar applied zinc (⁶⁵Zn) in bread and durum wheat cultivars differing in zinc efficiency. **Plant and Soil**, v. 241, p. 251-257, 2002.

ESPE, M. B. et al.. Yield gap analysis of US rice production systems shows opportunities for improvement. **Field Crops Research**, v. 196, p. 276-283, 2016.

ESPINOZA, W. et al. **O clima da região dos Cerrados em relação à agricultura**. Planaltina, GO: Embrapa-CPAC, 1982. 37 p. (Embrapa-CPAC – Circular Técnica, 9).

EVANS, L. T. **Crop Evolution, Adaptation, and Yield**. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 1993.

FAGERIA, N. K. **Adubação e nutrição mineral da cultura do arroz**. Rio de Janeiro: Campus; Goiânia: Embrapa-CNPAF, 1984. 341 p.

FAGERIA, N. K.; STONE, L. F.; SANTOS, A. B. dos. **Maximização da eficiência de produção das culturas**. Brasília,: Embrapa Comunicação para transferência de Tecnologia; Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1999. 294p.

FAGERIA, N. K.; STONE, L. F. Manejo do nitrogênio. In: FAGERIA, N. K.; STONE, L. F.; SANTOS, A. B. dos (Eds.) **Manejo da fertilidade do solo para o arroz irrigado**. Santo Antônio de Goiás, Embrapa Arroz e Feijão. Cap.3, p.51-94. 2003.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. **Advances in Agronomy**, n. 88, p.97-185, 2005.

FAGERIA, N. K.; SANTOS, A. B. dos; CUTRIM, V. dos A. Dry matter and yield of lowland rice genotypes as influence by nitrogen fertilization. *Journal of Plant Nutrition*, 31:788-795, 2008.

FAO; WHO. Guidelines for the study of dietary intakes of chemical contaminants. World Health Organization, Geneva, p 104, 1985.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Crop production**. 2014. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/>

FAO; WHO. **CODEX ALIMENTARIUS**: International food standards. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). World Health Organization (WHO). General standard for contaminants and toxins in food and feed. CXS 193-1995. FARÍAS, S. S. et al. On-line speciation and quantification of four arsenical species in rice samples collected in Argentina using an HPLC-HG-AFS coupling. **Microchemical Journal**, v. 120, p. 34–39, 2015.

FERREIRA, E. **Manual de identificação de pragas do arroz**. Embrapa-CNPAF, Documentos, 90. Santo Antonio de Goiaís, GO, 110 p. 1998.

FIESP - FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Outlook Fiesp 2028**: projeções para o agronegócio brasileiro. São Paulo: FIESP, 2018. 86p. ISBN: 978-85-7201035-1.

FISCHER, R. A. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. **Journal of Agricultural Science**, v. 105, n. 2, p. 447-461, 1985.

FORNASIERI FILHO, D.; FORNASIERI, J. L. **Manual da cultura do arroz**. Jaboticabal: FUNEP, 2006. 589p.

FRAGOSO, D. B. et al.. **Caracterização e diagnóstico da cadeia produtiva do arroz no Estado do Tocantins**. Brasília: Embrapa, 2013. 40p.

FRUET, B. L.; MEROTTO, J. A.; ULGUIM, A. R. Survey on Rice Weed Management and Public and Private Consultant Characteristics in Southern Brazil. **Weed technology**, v. 1, p. 1-22, 2019.

GAO, L. Z. et al. Rice clock model - A computer model to simulate rice development. **Agric. For. Meteorol.**, v. 60, p. 1-16, 1992.

GHADIRNEZHAD, R.; FALLAH, A. Temperature effect on yield and yield components of different rice cultivars in flowering stage. **International Journal of Agronomy**, v. 2014, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2014/846707>

GILLISPIE, E.C. et al. Soil Pollution Due to Irrigation with Arsenic-Contaminated Groundwater: Current State of Science. **Current Pollution Report**, 1, 1–12 (2015).

GILMORE, E. C. Jr.; ROGERS, J. S. Heat units as a method of measuring maturity in corn. **Agronomy Journal**, Madison, v.50, n.10, p. 611-615, 1958.

GRIMM, A. M.; BARROS, V. R. Barros; DOYLE, M. E. Climate variability in Southern South America associated with El Niño and La Niña events. **J. Climate**, v. 13, p. 35-58, 2000.

GRIMM, A. M.; BARROS, V. R. Barros; DOYLE, M. E. The El Niño impact on the summer monsoon in Brazil: regional processes versus remote influences. **J. Climate**, v. 16, p. 263-280, 2003.

GROHS, D. S. et al. **Crítérios para o manejo de doenças no arroz irrigado**. 1. ed. Cachoeirinha: Instituto Rio Grandense do Arroz, 2010. v. 1. 48p .

GRÜTZMACHER, A. D. et al. Danos de Spodoptera frugiperda (J.E. Smith, 1797) (Lepidoptera: Noctuidae) e seus efeitos sobre a produção de grãos na cultivar de arroz Embrapa 6-Chuí. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 5, n. 2, p. 135-141, 1999

GYGA - GLOBAL YIELD GAP ANALYSIS. **Gyga**: site institucional. 2020. Disponível em: <http://www.yieldgap.org>. Acesso em 20 abr 2020.

GUEDES, J. V. C.; PERINI, CLÉRISON R.; ALENDE, V. P.; CURIOLLETTI, L.E.; STACKE, R. F.; VALMORBIDA, I. Decisão racional. **Cultivar Grandes Culturas**, v. XVI, p. 46-51, 2015.

HAN, F. X. et al. Assessment of global industrial-age anthropogenic arsenic contamination. **Naturwissenschaften**, v. 90, p. 395–401, 2003. <https://doi.org/10.1007/s00114-003-0451-2>

HARDKE, J. T. **Arkansas Rice Production Handbook**. University of Arkansas Division of Agriculture Cooperative Extension Service MP192, Little Rock, 2013.

HAUN, J. R. Visual quantification of wheat development. **Agronomy Journal**, v. 65, p. 116-119, 1973. DOI: 10.2134/agronj1973.00021962006500010035x.

HAY, R.; PORTER, J. **Physiology of crop yield**. Editora Blackwell: 2ª ed., 2006. 330p.

HEIFFIG, L. S. et al. Fechamento e índice de área foliar da cultura da soja em diferentes arranjos espaciais. **Bragantia**, v. 65, p. 285-295, 2006.

HEINEMANN, A. B. Caracterização dos padrões de estresse hídrico para a cultura do arroz (ciclo curto e médio) no Estado de Goiás e suas consequências para o melhoramento genético. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 4, p. 29-36, 2010.

HEINEMANN, A. B. et al. Variation and impact of drought-stress patterns across upland rice target population of environments in Brazil. **Journal of Experimental Botany**, v. 66, p. 3625–3638, 2015. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv126>

HEINEMANN, A. B. et al. Upland rice breeding led to increased drought sensitivity in Brazil. **Field Crops Research**, v. 231, p. 57-67, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.11.009>.

HILL, J. E.; HARDY, B. **Proceedings of the Second Temperate Rice Conference**. International Rice Research Institute (IRRI), n. 281816, 1999. 714p.

HOSSAIN, M. et al. Effects of arsenic-contaminated irrigation water on growth, yield, and nutrient concentration in rice. **Commun. Soil Sci. Plant Anal.** 39, 302–313. <https://doi.org/10.108MI0103620701759~3>. 2008.

INFELD, J. A.; SILVA, J. B. da; ASSIS, F. N. de. Temperatura-base e graus-dia durante o período vegetativo de três grupos de cultivares de arroz irrigado. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 6, n. 2, p.187-191, 1998.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Summary for policymakers. In: STOCKER, T. F. et al. (Ed.). **Climate change 2013: the physical science basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University, 2013. 33p.

IRGA - INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ. **IRGA**: Site institucional. Porto Alegre, 2020. Disponível em: <http://irga.rs.gov.br>. Acesso em: 10 jun. 2020.

ISHIMARU T., et al. Formation of grain chalkiness and changes in water distribution in developing rice caryopses grown under high-temperature stress. **Journal of Cereal Science**. 50 166–174, 2009.

ISLAM, M. S.; MORISON, J. I. L. Influence of solar radiation and temperature on irrigated rice grain yield in Bangladesh. **Field Crops Research**, v. 30, n. 13-28, p. 13-28, 1992.

JIANG, S.; SHI, C.; WU, J. Genotypic differences in arsenic, mercury, lead and cadmium in milled rice (*Oryza sativa* L.). **International Journal of Food Sciences and Nutrition**, [S. l.], v. 63, n. 4, p. 468–475, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.3109/09637486.2011.636343>

KATO, Y., OKAMI, M.; KATSURA, K. Yield potential and water use efficiency of aerobic rice (*Oryza sativa* L.) in Japan. **Field Crops Research**, v. 113 n.3, p. 328-334, 2009.

KATO, L. S. et al. Elemental composition of Brazilian rice grains from different cultivars and origins. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 318, p. 745–751, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10967-018-6122-8>

KHANAM, R. et al. Metal(loid)s (As, Hg, Se, Pb and Cd) in paddy soil: Bioavailability and potential risk to human health. **Science of the Total Environment**, v. 699, p. 134330, 2020.

KONING, N.; VAN ITTERSUM, M. K. Will the world have enough to eat? **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 1, p. 77-82, 2009.

KOBATA, T.; UEMUKI, N. High temperatures during the grain-filling period do not reduce the potential grain dry matter increase of rice. **Agronomy Journal**, v. 96, n. 2, p. 406-414, 2004.

KÖGEL-KNABNER, I. et al. Biogeochemistry of paddy soils. **Geoderma**, v.157, n.1-2, p.1-14, 2010.

KUMARATHILAKA, P. et al. Arsenic speciation dynamics in paddy rice soil-water environment: Sources, physico-chemical, and biological factors - a review. **Water Research**, v. 140, p. 403-414, 2018.

LANGNER, J. A. et al., Observed and estimated leaf appearance of landrace and improved maize cultivars. **Ciência Rural**, v. 48, n. 01, 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20160775>.

LI, C. et al. Impact of Alternate Wetting and Drying Irrigation on Arsenic Uptake and Speciation in Flooded Rice Systems. **Agric. Ecosyst. Environ**, v. 272, p. 188-198, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.11.009>

LINARES, O. F. African Rice (*Oryza glaberrima*): History and future potential. **Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)**, v. 99, p. 16360-16365, 2002.

LINQUIST, B. A. et al. Reducing greenhouse gas emissions, water use, and grain arsenic levels in rice systems. **Glob. Chang. Biol**, v. 21, n.1, p. 407-417, 2015. <https://doi: 10.1111/gcb.12701>

LOBATO, E. J. V.; SILVA, S. C. da. **Parâmetros meteorológicos, fenologia e produtividade do arroz de terras altas sob condições de Cerrado**. Goiânia: Embrapa-CNPAP, 1995. 11 p. (Embrapa-CNPAP – Comunicado Técnico, 30).

LOBELL, D. B.; CASSMAN, K. G.; FIELD, C. B. Crop yield gaps: their importance, magnitudes, and causes. **Annual Review Environment Resources**, v. 34, p. 179-204, 2009. DOI: 10.1146/annurev.enviro.041008.093740.

MALL, R. K.; AGGARWAL, P. K. Mudança climática e produção de arroz em diversos agro-ambientes da Índia. I. Avaliação de modelos de avaliação de impacto. **Mudança climática** , v. 52, p. 315-330, 2002.

MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Projeções do agronegócio Brasil 2017/18 a 2027/28**, projeções de longo prazo. Brasília: MAPA - Secretaria de Política Agrícola, 2018. 112p. ISBN 978-85-7991-116-3

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 3.ed London: Elsevier, 2012. 643p

MARIN F. R. et al. Intensificação sustentável da agricultura brasileira Cenários para 2050. **Revista de Política Agrícola**, v. 25, n. 3, 2016.

MARTÍNEZ, C. P. et al. Rice breeding in Latin America. **Plant Breeding Reviews**, v. 38, p. 187-277, 2014. <https://doi.org/10.1002/9781118916865>.

MASSEY, J. H. et al. Farmer adaptation of intermittent flooding using multiple-inlet rice irrigation in Mississippi. **Agric. Water Manag.**, v. 146, p. 297-304, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.08.023>.

MASUTOMI, Y. et al. Impact assessment of climate change on rice production in Asiain comprehensive consideration of process/parameter uncertainty in general circulation models. **Agric. Ecosyst. Environ**, v. 131, n. 3-4, p. 281-291, 2009. [10.1016/j.agee.2009.02.004](https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.02.004).

MEDEIROS, R. D. de; HOLANDA, J. S. de; COSTA, M. de C. Manejo de água em arroz irrigado no Estado de Roraima. **Lavoura Arrozeira**, v.48, n.420, p.12-14, 1995

MEHARG, A. A. et al. Geographical variation in total and inorganic arsenic content of polished (white) rice. **Environ. Sci. Technol.**, v. 43, n. 1612–1617, 2009. <https://doi.org/10.1021/es802612a>.

MEHARG, A.A.; ZHAO, F.J. **Risk from Arsenic in Rice Grain**. In: Arsenic & Rice. Springer, Dordrecht. 2012. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-94-007-2947-6_3.

MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA, A. Y. Sustainability: Four billion people facing severe water scarcity. **Sci. Adv.**, v. 2, n. 1500323, p. 1-6, 2016. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500323>.

MENEZES, V. G. et al. **Projeto 10**: estratégias de manejo para aumento da produtividade e da sustentabilidade da lavoura de arroz irrigado no RS: avanços e novos desafios. Cachoeirinha: IRGA/Estação Experimental do Arroz, 2012.

MENEZES, V. G. et al. **Projeto 10** – Management Strategies to Increase Productivity and Sustainability of Irrigated Rice Growth in the State of Rio Grande do Sul, Brasil: Developments and new challenges. Cachoeirinha: IRGA / Estação Experimental do Arroz. 100p. 2013.

MENTGES, M. I. et al. Alterações estruturais e mecânicas de solo de várzea cultivado com arroz irrigado por inundação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, n.1, p.221-231, 2013.

MERCOSUL. MERCOSUR/GMC/RES. **Nº 12/11** - Regulamento Técnico Mercosur sobre limites máximos de contaminantes inorgânicos en alimentos. 2011. Disponível em: www.puntofocal.gov.ar/doc/r_gmc_12-11.pdf. Acesso em: 2019.

MEUS, L. D. et al. Classification of rice grains of lowland cultivars grown under flood irrigation and sprinkler irrigation. **Engenharia Agrícola**, v. 38, n. 4, p. 599-605, 2018.

MONTEITH, J.L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. **Journal of Applied Ecology**, Oxford, v. 9, n. 3, p. 747-766, 1972.

MORALES, J.F.; WARD, E.; CASTAÑO, M. et al. Emergence and partial characterization of rice stripe necrosis virus and its fungus vector in South America. **European Journal of Plant Pathology**, v. 105, p. 643-650, 1999.

MUNDA S. et al. Dynamics of soil organic carbon mineralization and C fractions in paddy soil on application of rice husk biochar. **Biomass and Bioenergy**, n. 115, p.1–9, 2018.

NALLEY, L. et al. Quantifying the agronomic and economic performance of hybrid and conventional rice varieties. **Agronomy Journal**, v. 108, n. 4, p. 1514–1523, 2016.

NASCIMENTO, M. F. **O fenômeno ENOS e variabilidade na produtividade de Arroz irrigado simulado pelo modelo SimulArroz**. 2019. 20p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2019.

NORMILE, D. Reinventing Rice to Feed the World. **Science**, v. 321, p. 330-333, 2008.

OGOSHI, C. et al. Effectiveness of fungicides for rice blast control in lowland rice cropped in Brazil. **Tropical and Subtropical agroecosystems**, v. 21, p. 505-511, 2018.

OTEIZA, J. M. et al. Arsenic in Argentinean polished rice: Situation overview and regulatory framework. **Food Control**, [S. l.], v. 109, n. September 2019, p. 106909, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.106909>

PARENT, L. E.; DAFIR, M. A Theoretical Concept of Compositional Nutrient Diagnosis. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, v. 117, n. 2., p. 239-242, 1992. <https://doi.org/10.21273/JASHS.117.2.239>.

PASCALÉ, A. J.; DAMARIO, E. A. **Bioclimatologia agrícola y agroclimatologia**. Buenos Aires: Universidade de Buenos Aires, 2004. 550 p.

PELÚZIO, J. M. et al. Adaptabilidade e estabilidade de cultivares de soja em várzea irrigada no Tocantins. **Revista Ciência Agronômica**, v.41, p.427-434, 2010.

PEREIRA, J. A.; GUIMARÃES, E. P. **History of Rice in Latin America**. In: *Rice: origin, antiquity and history*. 2010.

PEREIRA, V. F. et al. Manejo da adubação nitrogenada e diagnóstico da composição nutricional do arroz no sul do Brasil. **Revista Plantio Direto**, v. 173, p. 35-38, 2020.

PES, L. Z.; ARENHARDT, M. H. **Fisiologia vegetal**. Santa Maria, RS : Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Politécnico, Rede e-Tec Brasil, 2015. 81 p. ISBN: 978-85-63573-90-2

PILECCO, I. B. et al. Can Brazil produce enough rice to meet demand in 2028? **Ciência e Natura**, v. 42, p. 33, 2020.

PINHEIRO, A.; GRACIANO, R. L. G.; SEVERO, D. L. Tendência das séries temporais de precipitação da região Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 3, p. 281-290, 2013.

PINTO, M. A. B. et al. Produtividade de arroz irrigado por aspersão em terras baixas em função da disponibilidade de água e de atributos do solo. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 51, n. 9, p.1584-1593, 2016.

POCOJESKI, E; SILVA, L. S. da, BUNDT, A. da C, MARCHESAN, E; CAMARGO, E. R.; SCIVITTARO, W. B. Estimativa do teor de nitrogênio em arroz irrigado com o clorofilômetro e a cartela de cores. **Ciência Rural**, n.42, p.1982-1988, 2012.

POWER/NASA. **Prediction of Worldwide Energy Resource**. Disponível em: www.power.larc.nasa.gov/com-common/php/POWER_AboutAgroclimatology.php. Acesso em: 5 out. 2018.

QUINTERO, C. E. et al. Effects of soil flooding on phosphorus availability in soils of Mesopotamia, Argentina. **J. Plant Nutr. Soil Science**, v. 170, p. 500-505, 2007.

QUINTERO, C. E. **Factores limitantes para el crecimiento y productividad del arroz en Entre Ríos, Argentina**. Tese de Doutorado. Ediciones de la Fundación para el Desarrollo Agropecuario, 2009. ISBN: 978-987-25076-1-9. 167 p. Disponível em: <http://hdl.handle.net/2183/5680>.

QUINTERO, C. E.; DUARTE, O.; DÍAZ, E.; BOSCHETTI, G. **Evaluación de la concentración de arsénico en arroz**. Jornada Técnica nacional Cultivo Arroz. Concordia, p. 129-134, 2010.

QUINTERO, C. E. et al. Concentration and origin of arsenic species in rice cv Cambá grow in Entre Ríos (Argentina). In LITTER, M. I. et al. (Eds.). **Proceeding of the 5th International Congress on Arsenic in the Environment, Buenos Aires, Argentina**. One Century of the Discovery of Arsenicosis en Latin America (1913-2014) (pp. 449–451). London: Taylor & Francis Group, 2014.

QUINTERO, C. E. et al. Fertilización balanceada de arroz en Entre Ríos. Revista Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica. **Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica (IAH)**, v.17, p.20-23, 2015.

QUINTERO, C. E. **Arsenic concentration in grains of commercial rice varieties, under two irrigation systems. Argentina**. Proceedings of 7th International Temperate Rice Conference. Brasil, p. 200-203, 2020. ISBN 978-65-00-00331-4.

RAHMAN M. A. et al. Accumulation of arsenic in tissues of rice plant (*Oryza sativa*) and its distribution in fractions of rice grain. **Chemosphere**, v. 69, p. 942-948, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.05.044>

RAMIREZ-VILLEGAS, J. et al. Breeding implications of drought stress under future climate for upland rice in Brazil. **Global Change Biology**, v. 24, n. 5, p. 2035-2050, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.11.009>.

RECHE, M. H. L. R. et al. Microbial, physical and chemical properties of irrigation water in rice fields of Southern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 88, n. 1, p. 361-375, 2016.

RHINE, M.D. et al. Nitrogen fertilization on center pivot sprinkler irrigated rice. **Crop Management**, v.10, n.1, p.0-0, 2011.

RIBAS, G. G. et al. Acúmulo de matéria seca e produtividade em híbridos de arroz irrigado simulados com o modelo SimulArroz. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 1907-1917, 2016.

RIBAS, G. G. et al. Number of leaves and phenology of rice hybrids simulated by the SimulArroz model. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, p. 221-226, 2017. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v21n4p221-226.

RIBAS, G. G. **Potencial e lacunas de produtividade em arroz irrigado no Rio Grande do Sul**. 2019. 93 f. Tese (Doutorado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), RS, 2019.

RIBAS, G. G. et al. An update of new flood-irrigated rice cultivars in the SimulArroz model. **Pesquisa Agropecuária Brasileira (Online)**, v. 55, p. 1-10, 2020.

RIBEIRO, B. S. M. R. Can leaf area in rice be defined by a mathematical model?. **Revista Ceres**, v. 66, p. 191-199, 2019.

RICKMAN, R. W.; KLEPPER, B. L. The phyllochron: Where do we go in the future? **Crop Science**, v. 35, n.1, p. 44-49, 1995.

RODRIGUES, R. A. F.; ARF, O. Manejo de água em cultivares de arroz de terras altas. In: CONGRESSO DA CADEIA PRODUTIVA DE ARROZ, 1., REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE ARROZ, 7., 2002, Florianópolis, SC. **Anais**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2002. p.365-368. (Embrapa Arroz e Feijão. Documentos, 134).

ROSA, H. T. et al. Simulação do crescimento e produtividade de arroz no Rio Grande do Sul pelo modelo SimulArroz. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 1159-1165, 2015. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n12p1159-1165>.

SÁNCHEZ, B.; RASMUSSEN, A.; PORTER, J. Temperatures and the growth and development of maize and rice: a review. **Global Change Biology**, v. 20, p. 408-417, 2014. <https://doi.org/10.1111/gcb.12389>.

SANT'ANA, E. P. Cultivo do arroz irrigado por aspersão. **Informe Agropecuário**, v. 14, n. 161, p. 71-75, 1989.

SANTOS, A. B.; COSTA J. D. Behaviour of upland rice varieties at different plant densities, under and without supplemental irrigation. **Scientia Agricola**, v. 52, p. 1-8, 1995.

SANTOS, A. B. dos; SILVA, S. C. da; ZIMMERMANN, F. J. P. Efeitos do manejo da irrigação na temperatura da água e no comportamento do arroz irrigado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 3.; REUNIÃO DA CULTURA DE ARROZ IRRIGADO, 25.; 2003, Balneário Camburiú, SC. **Anais...** Itajaí: EPAGRI, 2003. p.181-183.

SANTOS, A. B. dos. Importância e características. In: SANTOS, A. B. dos. (Ed.). **Cultivo da soca de arroz irrigado**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2004, p.15-36.

SANTOS, A. B. dos; STONE, L. F.; SILVA, S. C. da. **Estratégia de irrigação para a cultura do arroz na Região Tropical**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2015. 6 p. (Embrapa Arroz e Feijão. Comunicado técnico, 231).

SANTOS, M. P. dos; et al. Yield and morphophysiological indices of irrigated rice genotypes in contrasting ecosystems. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 47, n. 3, p. 253-264, 2017.

SEVERO, D.O. et al. Avaliação do dano da lagarta-da-panícula (*Pseudaletia* spp.) em arroz irrigado. In: **Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado**, 6., 2009, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: Palotti, 2009. P.351-353.

SHARMA, S. D. **Rice: origin, antiquity and history**. 1st ed, 2010. 558 p.

SILVA, M. R. da. et al., Modelagem numérica para previsão de safra de arroz irrigado no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira (Online)**, v. 51, p. 791-800, 2016.

SILVA, M. R.da. **Previsão de safra de arroz e introdução de um submodelo de brusone no modelo SimulArroz**. 2020. 66 f. Tese (Doutorado no Programa de Pós-Graduação em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), RS, 2019.

SINCLAIR, T. R.; MUCHOW, R. C. Occam's Razor, radiation use efficiency and vapor pressure. **Field Crops Research**, v. 62, p. 239-243, 1999.

SLATON, N.; HELMS, S.; WELLS, B. **DD50 computerized rice management program**. In: HELMS, R.S. (Ed.). Rice production handbook. Little Rock, AR: University of Arkansas, 1996. p. 24-27. (Miscellany Publication, 192).

SMEDLEY, P.L. et al. **Arsenic in groundwater and sediments from La Pampa Province, Argentina**. In: Bundschuh et al. *Natural Arsenic in Groundwaters of Latin America*, Taylor & Francis, 35–45, 2008.

SMITH, A.H., et al. Arsenic epidemiology and drinking water standards. American Association for the Advancement of Science. **Policy Forum**, v. 296, n. 5576, p. 2145-2146, 2002. <https://doi.org/10.1126/science.1072896>.

SOSBAI - SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO. **Arroz irrigado**: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil. Pelotas: Sosbai, 2007. 154 p.

SOSBAI - SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO. **Arroz irrigado**: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil. Bento Gonçalves: Sosbai, 2014. 192 p.

SOSBAI - SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO. 2018. **Arroz irrigado**: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil. Gramado: Sosbai, 209 p., il.

SOLOMON, S. et al. **Climate change 2007: the physical science basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: IPCC, 2007. 996p.

SORATTO, R. P.; RODRIGUES, R. A. F.; ARF, O. Manejo de água em cultivos de arroz irrigados por aspersão no sistema de plantio direto. In: CONGRESSO DA CADEIA PRODUTIVA DE ARROZ, 1., REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE ARROZ, 7., 2002, Florianópolis, SC. **Anais**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2002. p.369-372. (Embrapa Arroz e Feijão. Documentos, 134).

STANSEL, J. W. The rice plant: its development and yield. In: MILLER, J.C. **Six decades of rice research in Texas**. College Station: Texas A&M University, p. 9-21, 1975.

STEINMETZ, S.; AMARAL, A. G. Mapeamento do risco de frio durante o período reprodutivo do arroz irrigado no Rio Grande do Sul. **Documentos 108-Embrapa**, Pelotas, 2002. ISSN 1516-8840.

STEINMETZ, S.; SILVA, S. C. da; SANTANA, N. M. P. de. **A cultura do arroz no Brasil**. In: SANTOS, A.B. dos; STONE, L.F.E.; VIEIRA, N.R. de A. Santo Antônio de Goiás, GO: Embrapa Arroz e Feijão, 2006. 1000 p.

STEINMETZ, S. et al. **Produtividade de cultivares de arroz irrigado em função da época de semeadura.** Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2009. 22 p. (Embrapa Clima Temperado. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 111).

STEINMETZ, S. et al. **Uso de graus-dia para estimar a data de diferenciação da panícula (DP) de seis subgrupos de cultivares de arroz irrigado visando à adubação nitrogenada em cobertura no Rio Grande do Sul.** Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2010. 75p. (Embrapa Clima Temperado. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 121).

STEINMETZ, S. et al. **Uso do método de graus-dia para estimar a data de ocorrência dos principais estágios de desenvolvimento de subgrupos de cultivares de arroz irrigado no Rio Grande do Sul.** Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2013. 108 p. Versão resumida (Embrapa Clima Temperado. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 205).

STEINMETZ, S. et al. **GD Arroz:** programa baseado em graus-dia para estimar a data de diferenciação da panícula visando a adubação nitrogenada em cobertura. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2014. 12p. (Embrapa Clima Temperado. Circular Técnica, 155).

STEINMETZ, S. et al. **GD Arroz:** programa baseado em graus-dia como suporte ao planejamento e à tomada de decisão no manejo do arroz irrigado. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2015a. 8p. (Embrapa Clima Temperado. Circular Técnica, 162).

STEINMETZ, S. et al. Validação do método de graus-dia para estimar a data de ocorrência dos principais estágios de desenvolvimento de cultivares de arroz irrigado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 9, 2015b, Pelotas. **Anais...** Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2015. Disponível em: <<http://www.cbai2015.com.br/anais/index.php?secao=trabalhoS>>

STEINMETZ, S.; SILVA, S. C. da. **Início dos estudos sobre Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) no Brasil.** Santo Antônio de Goiás, GO: Embrapa Arroz e Feijão, 2017. 27 p. (Documentos / Embrapa Arroz e Feijão, ISSN 1678-9644; 312). <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1064577/1/CNPAF2017doc312.pdf>.

STEINMETZ, S. et al. **Períodos de Semeadura para o Arroz Irrigado no Rio Grande do Sul com Base na estimativa de Produtividade de Grãos e em Níveis de Risco Climático.** Pelotas: Embrapa Clima Temperado. 57p. 2018.

STEINMETZ, S. et al. **Irrigated rice sowing periods based on simulated grain yield**. *Agrometeoros*, v. 27, n. 2, p. 377-386, dez. 2019.

STONE, L. F.; SANTOS, A. B. dos; STEINMETZ, S. Influência de práticas culturais na capacidade de retenção de água no solo e no rendimento do arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 15, n. 1, p. 63-68, 1980.

STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A.; SILVA, S. C. da. **Tensão da água do solo e produtividade do arroz**. Goiânia: Embrapa-CNPAP, 1986. 6p. (Embrapa-CNPAP. Comunicado Técnico, 19).

STONE, L. F.; SILVA, S. C. da. **Uso do tanque Classe A no controle da irrigação do arroz de terras altas**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1999. 2p. (Embrapa Arroz e Feijão. Pesquisa em Foco, 28).

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. da. Arroz irrigado por aspersão. **Informe Agropecuário**, v. 25, n. 222, p. 70-76, 2004.

STONE, L.F. et al., **Irrigação**. In: BORÉM, A.; NAKANO, P.H. (Ed.). Arroz: do plantio a colheita. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2015. p.135-160.

STRECK, N. A.; WEISS, A.; XUE, Q.; BAENZIGER, P. S. Improving predictions of developmental stages in winter wheat: A modified Wang and Engel model. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 115, n. 3-4, p. 139-150, 2003.

STRECK, N. A. et al. Duração do ciclo de desenvolvimento de cultivares de arroz em função da emissão de folhas no colmo principal. **Ciência Rural**, v. 36, n. 4, p. 1086-1093, 2006a.

STRECK, N. A et al. Avaliação da resposta ao fotoperíodo em genótipos de arroz irrigado. **Bragantia**, v. 65, n. 4, p. 533-541, 2006b.

STRECK, N. A. et al. Modelagem da emissão de folhas em arroz cultivado e em arroz-vermelho. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 43, n. 5, p. 559-567, 2008.

STRECK, N. A. et al. Relationship between panicle differentiation and main stem leaf number in rice genotypes and red rice biotypes. **Scientia Agricola**, v. 66, p. 195-203, 2009.

STRECK, Nereu Augusto et al. Desenvolvimento vegetativo e reprodutivo em gladiolo. **Ciência Rural**, v. 42, n. 11, p. 1968-1974, 2012.

STRECK, N. A.; et al. SimulArroz: um aplicativo para estimar a produtividade de arroz no Rio Grande do Sul. In: **Congresso brasileiro de arroz irrigado**, 8., 2013, Santa Maria. **Anais.**: Sosbai, 2013. p.1618-1627.

SUDHIR, Y. et al. Evaluation of trade-offs in land and water productivity of dry seeded rice as affected by irrigation schedule. **Field Crops Research**. 128, 180–190, 2012.

SUN, J. et al. Nitrogen can improve the rapid response of photosynthesis to changing irradiance in rice (*Oryza sativa* L.) plants. **Scientific Reports**, v. 6, p. 1-10, 2016.

TAGLIAPIETRA, E. L. et al. Optimum Leaf Area Index to Reach Soybean Yield Potential in Subtropical Environment. **Agronomy Journal**, v. 110, p. 1-7, 2018.

TAIZ, L. et al. *Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal*. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888 p.

TARLERA, S. et al. Yield-scaled global potential of two irrigation management systems in a highly productive rice systems **Scientia Agricola**, v. 73, n. 1, p. 43-50, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-9016-2015-0050>.

THOMSON, A. M. et al. RCP4.5: A pathway for stabilization of 28 radiative forcing by 2100. **Climatic Change**, v. 109, p. 77-94, 2011. <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-29011-0151-4>.

TONETTO, F. et al. Adubação nitrogenada e o vírus do enrolamento do arroz (rsnv). **Revista Plantio Direto**, v. 29, p. 15-18, 2019.

TURNER, F. T.; JUND, M. F. Chlorophyll meter to predict nitrogen topdress requeriment for semidwarf rice. **Agronomy Journal**, n. 83, p. 926-928, 1991.

ULGUIM, A.R.; SILVA, B.M.; AGOSTINETTO, D.; AVILA NETO, R.C.; ZANDONÁ, R.R. Resistance mapping of the genus *Cyperus* in Rio Grande do Sul and selection pressure analysis. **Planta Daninha**, v.37, p.e019186679, 2019.

VAN ITTERSUM, M. K.; RABBINGE, R. Concepts in production ecology for analysis and qualification of agricultural input-output combinations. **Field Crops Research**, v. 52, p. 197–208, 1997.

VAN ITTERSUM, M. K. et al. Yield gap analysis with local to global relevance – a review. **Field Crop Research**, v. 143, p. 04-17, 2013.

VAN ITTERSUM, M. K. et al. Can sub-Saharan Africa feed itself? **Proceedings of the National Academy of Science**, v. 113, n. 52, p. 14964-14969, 2016.

VAN OORT, P. A. J. et al. Assessment of rice self-sufficiency in 2025 in eight African countries. **Global Food Security**, v. 5, p. 39-49, 2015.

VAN VUUREN, D. P. RCP2.6: Exploring the 9 possibility to keep global mean temperature increase below 2°C. **Climatic Change**, v. 109, n. 95, 2011: <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-011-0152-3>.

XAVIER, A. I. et al. Análise econômico-produtiva em lavouras de arroz na região central do rio grande do sul. **Revista Plantio Direto**, v. 169, p. 1, 2019.

XUE, Q; WEISS, A; BAENZINGER, P.S. Predicting leaf appearance in field grown winter wheat: evaluating linear and non-linear models. **Ecological Modelling**, Amsterdam v.175, p.261-270, 2004.

WALTER, L. C. et al. Adaptação e avaliação do modelo infocrop para simulação do produtividade de grãos da cultura do arroz irrigado. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 3, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162012000300010>

WALTER, L. C. et al. Climate change and its effects on irrigated rice yield in the state of Rio Grande do Sul, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, n. 12, p. 915-924, 2014.

WEBER, N. C. et al. Quantitative and qualitative damages of *Oebalus poecilus* on irrigated rice in southern Brazil. **Revista Ceres**, v. 67, n. 2, p.126-132, 2020.

WEERAKOON, W. M. W.; INGRAM, K. T.; MOSS, D. N. Efeitos do dióxido de carbono atmosférico e do nitrogênio fertilizante na interceptação de radiação pelo arroz. **Plant and Solo** , v. 220, p. 99-106, 2000.

WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Evaluation of certain contaminants in food**: seventy-second report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, WHO Technical Report Series [Internet], Nº 959.

WILLIAMS, P .N.; RAAB, A. Market Basket Survey Shows Elevated Levels of As in South Central U. S. Processed Rice Compared to California: Consequences for Human Dietary Exposure. **Environ. Sci. Technol.**, v. 41, p. 2178–2183, 2007. <https://doi.org/10.1021/es061489k>.

WILSON, J. R. et al. DD50 computerized rice management program. Little Rock, AR: University of Arkansas: Division of Agriculture: Cooperative Extension Service . **Agriculture and Natural Resources**. Computer Technical Series, 2015. Disponível em: <https://www.uaex.edu/publications/PDF/FSA-2124.pdf>. Acesso em: 15 jul 2015.

WMO - WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Guide to Agricultural Meteorological Practices**. 2012.

YANG, J.; ZHOU, Q.; ZHANG, J. Moderate wetting and drying increases rice yield and reduces water use, grain arsenic level, and methane emission. **The Crop Journal**, v.5, n.2, p.151–158, 2017.

YOSHIDA, S.; PARAO, F. T. Climatic influence on yield components of lowland rice in the tropics. **IRRI Climate and Rice**, Los Baños, p. 471-494, 1976.

YOSHIDA, S. **Tropical Climate and Its Influence on Rice**., Los Baños, Philippines: IRRI Research Paper Series 20 International Rice Research Institute, 1978.

YOSHIDA, S. **Fundamental of Rice Crop Science**. Los Baños, Philippines: International Rice Research Institute, 1981. 269p.

ZANON, A. J. et al. Contribuição das ramificações e a evolução do índice de área foliar em cultivares modernas de soja. **Bragantia**, v. 74, p. 279-290, 2015.

ZANON, A. J. et al. Growth habit effect on development of modern soybean cultivars after beginning of bloom in Rio Grande do Sul. **Bragantia**, v. 75, n. 4, p. 446 - 458, 2016.

ZHU, Z.L.; CHEN, D. L. Nitrogen fertilizer use in China contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies. **Nutr. Cycl. Agroecosyst.**, v. 63, p. 117-127, 2002.

ZHU, Y. G. et al. High percentage inorganic arsenic content of mining impacted and non-impacted Chinese rice. **Environ. Sci. Tech**, v. 42, n. 13, p. 5008–5013, 2008. <https://doi.org/10.1021/es8001103>.

Patrocinadores Plata



Patrocinadores Diamante

Ebro



Alvorada



JOHN DEERE



VENCE TUDO



FLAR



Agricultura
é a nossa vida



www.dagramas.com.br



Patrocinadores Oro



Realización

