

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

**EFECTO DE LA TEMPERATURA DEL AGUA EN EL CRECIMIENTO Y
RENDIMIENTO, EN CUATRO VARIEDADES DE ARROZ (*Oryza sativa* L.)**

NERSSY YAZMÍN GONZÁLEZ GÓMEZ

Santiago, Chile

2010

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

**EFECTO DE LA TEMPERATURA DEL AGUA EN EL CRECIMIENTO Y
RENDIMIENTO, EN CUATRO VARIEDADES DE ARROZ (*Oryza sativa L.*)**

**EFFECT OF WATER TEMPERATURE ON THE GROWTH AND YIELD IN
FOUR VARIETIES OF RICE (*Oryza sativa L.*)**

NERSSY YAZMÍN GONZÁLEZ GÓMEZ

Santiago, Chile

2010

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

**EFECTO DE LA TEMPERATURA DEL AGUA EN EL CRECIMIENTO Y
RENDIMIENTO, EN CUATRO VARIEDADES DE ARROZ (*Oryza sativa L.*)**

Memoria para optar al título profesional de:
Ingeniero Agrónomo

NERSSY YAZMÍN GONZÁLEZ GÓMEZ

	Calificaciones
PROFESOR GUÍA	
Sr. Edmundo Acevedo H. Ingeniero Agrónomo, M.S. Ph.D.	7,0
PROFESORES EVALUADORES	
Sra. Paola Silva C. Ingeniero Agrónomo, M.S. Dra.	7,0
Sr. Ricardo Marchant S. Ingeniero Agrónomo, M.Sc.	7,0
COLABORADOR	
Sr. Rodrigo Ortega B. Ingeniero Agrónomo, M.S. Ph.D.	

Santiago, Chile

2010

*A Dios,
a mis padres Mauricio y Nercy,
mis hermanos y para ti mi amor.*

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a Dios por darme la posibilidad de alcanzar mis objetivos y darme aliento cuando lo necesité.

A mi familia, especialmente a mis padres por su incondicional apoyo, aliento y esfuerzo entregado durante todo mi desarrollo personal y académico. A mis hermanos por su amistad, ayuda y compañía. A Gonzalo por su incesante amor, cariño y paciencia entregada durante estos años juntos.

Quiero agradecer a la Universidad de Chile, junto con la colaboración de mi profesor guía Edmundo Acevedo, quienes me entregaron las bases y el conocimiento necesario para desarrollar un trabajo de excelencia. A los integrantes del Laboratorio de Relación Suelo-Agua-Planta, especialmente Rosa Peralta, Mauricio Ortiz, Marcelo Becerra y la profesora Paola Silva por su buena disposición y ayuda entregada cuando la necesité. Al profesor Herman Silva por su palabra de apoyo y guía durante el desarrollo del proyecto y trabajo experimental.

Quiero agradecer a mis amigos que participaron y prestaron de importante ayuda durante el trabajo experimental. A Denisse Zamorano, incondicional compañera de memoria, a Valentina Vesely, por su importante ayuda durante la implementación del ensayo experimental, a Gabriela Osorio y Victoria Figueroa, por su disposición y ayuda durante todo el desarrollo de la memoria. A Sharyn Echaurren, Renato Muñoz, Cristian Duschner, Ricardo Moreno, Iván González, Nicolás Gomara y Marco Garrido. Ellos y muchos otros ayudaron e hicieron posible que este trabajo diera los resultados esperados.

ÍNDICE

	Página
ÍNDICE DE CUADROS.....	iii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	iv
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN.....	3
Hipótesis.....	7
Objetivos.....	7
MATERIALES Y MÉTODO.....	8
Materiales.....	8
Lugar del estudio.....	8
Material Vegetal.....	8
Método.....	8
Tratamientos.....	8
Diseño experimental.....	11
Manejo del agua para las condiciones térmicas.....	11
Condiciones térmicas de agua.....	12
Procedimiento.....	14
Variables.....	15
Análisis Estadístico.....	17
RESULTADOS.....	18
Temperatura del agua y ambiente.....	18

Determinación del efecto de la temperatura del agua sobre el rendimiento, biomasa e índice de cosecha.....	20
Determinación del efecto de la temperatura del agua sobre los componentes del rendimiento.....	25
Determinación del efecto de la temperatura del agua sobre la altura de la planta.....	30
Determinación del efecto de la temperatura del agua sobre el crecimiento de los genotipos de arroz.....	32
DISCUSIÓN.....	37
Determinación del efecto de la temperatura del agua sobre el rendimiento, biomasa e índice de cosecha.....	37
Determinación del efecto de la temperatura del agua sobre los componentes del rendimiento.....	40
Determinación del efecto de la temperatura del agua sobre la altura de la planta.....	42
Determinación del efecto de la temperatura del agua sobre el crecimiento de los genotipos de arroz.....	43
CONCLUSIONES.....	44
BIBLIOGRAFÍA.....	45
APÉNDICES.....	51

ÍNDICE DE CUADROS

		Página
CUADRO 1	Características de las variedades comerciales de arroz utilizadas.	5
CUADRO 2	Tratamientos definidos por la combinación de cinco condiciones térmicas y cuatro variedades de arroz.	9
CUADRO 3	Días a floración de las variedades en las diferentes condiciones térmicas.	18
CUADRO 4	Temperaturas medias (°C) semanales durante las fases de desarrollo 1, 2, 3, 4 y temperaturas medias (°C) correspondientes a cada fase de desarrollo para cada condición térmica de agua y ambiente.	19
CUADRO 5	Efecto de la temperatura del agua sobre el rendimiento en cuatro variedades de arroz.	20
CUADRO 6	Efecto de la temperatura del agua sobre la biomasa en cuatro variedades de arroz.	23
CUADRO 7	Efecto de la temperatura del agua sobre el índice de cosecha en cuatro variedades de arroz.	24
CUADRO 8	Efecto de la temperatura del agua sobre el peso de 1000 granos en cuatro variedades de arroz.	26
CUADRO 9	Efecto de la temperatura del agua sobre el número de granos por metro cuadrado en cuatro variedades de arroz.	27
CUADRO 10	Efecto de la temperatura del agua sobre el porcentaje de granos vanos en cuatro variedades de arroz	28
CUADRO 12	Efecto de la temperatura del agua sobre la altura de plantas en cuatro variedades de arroz.	31
CUADRO 14	Efecto de la temperatura del agua sobre la tasa de crecimiento relativo en cuatro variedades de arroz.	33
CUADRO 15	Efecto de la temperatura del agua sobre la tasa de asimilación neta en cuatro variedades de arroz.	35

ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
FIGURA 1	Representación del sistema de riego y drenaje utilizado para el logro de las diferentes condiciones térmicas.	11
FIGURA 2	Condiciones térmicas aplicadas sobre cuatro variedades de arroz (Harika-GS, Oro, Diamante-INIA y Ámbar-INIA).	13
FIGURA 3	Inicio de panícula. Se reconoce visualmente cuando la panícula tiene entre 1 a 2 mm de longitud, al inspeccionar y disectar tallos principales.	14
FIGURA 4	Metodología utilizada para calcular el rendimiento y los componentes del rendimiento.	16
FIGURA 5	Índice de estabilidad de cuatro variedades de arroz (Harika-GS, Oro, Diamante-INIA y Ámbar-INIA) según distintas condiciones térmicas de agua aplicadas en diferentes estados fenológicos.	22
FIGURA 6	Efecto de la temperatura del agua sobre el índice de cosecha en cuatro variedades de arroz.	25
FIGURA 7	Efecto de la temperatura del agua sobre el porcentaje de granos vanos (PGV) en cuatro variedades de arroz.	29
FIGURA 8	Relación entre el rendimiento ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) y el porcentaje de granos vanos (PGV).	29
FIGURA 9	Relación entre el número de granos por metro cuadrado (NGM) y el porcentaje de granos vanos (PGV).	30
FIGURA 10	Efecto de la temperatura del agua sobre la altura de plantas hasta inicio de macolla (IM) en cuatro variedades de arroz	32
FIGURA 11	Efecto de la temperatura del agua sobre la tasa de crecimiento relativo (TCR) desde inicio de panícula en cuatro variedades de arroz	34
FIGURA 12	Efecto de la temperatura del agua sobre la tasa de asimilación neta (TAN) hasta inicio de panícula en cuatro variedades de arroz	36

RESUMEN

Chile tiene temperaturas bajas para el cultivo del arroz (<20°C). El International Rice Testing Program, IRTP (IRRI, 1983) clasifica a Chile en el patrón de temperatura VI B, que corresponde a un grupo climático inferior de acuerdo al período o períodos en que el crecimiento del arroz es afectado por baja temperatura. Además, el efecto de la temperatura del aire y del agua sobre el rendimiento del grano y los componentes del rendimiento varía según la etapa de crecimiento (Matsushima *et al.*, 1964a). La presente memoria tuvo por objeto evaluar diferencias en la tolerancia al frío en crecimiento y rendimiento entre cuatro variedades de arroz. Para ello las variedades se sometieron a diferentes condiciones térmicas en distintas etapas de desarrollo. El trabajo se realizó en condiciones semi-controladas, utilizando un sistema de piscinas. Los tratamientos incluyeron cuatro variedades de arroz (Ámbar-INIA, Diamante-INIA, Oro y Harika-GS) que fueron sometidas a cinco condiciones térmicas, según las etapas de crecimiento y desarrollo del cultivo. Para determinar el efecto de la temperatura del agua en diferentes estados fenológicos en relación al crecimiento, se realizó análisis de crecimiento y se calculó índices fisiológicos, tales como la tasa de crecimiento relativo (TCR) y la tasa de asimilación neta (TAN) en dos períodos de importancia durante el ciclo de vida del cultivo. Los índices fisiológicos indicaron que no hubo diferencias genotípicas a los efectos de las bajas temperaturas sobre el crecimiento de las plantas de arroz. Sin embargo, la altura de plantas registrada hasta inicio de macolla mostró diferencia en la respuesta de los genotipos. Por otra parte, se determinó el rendimiento y los componentes de rendimiento. La interacción condición térmica x variedad en rendimiento no fue significativa, sin embargo, se observó una tendencia diferente en la respuesta de las variedades con respecto a la condición térmica de agua. Además, los resultados mostraron interacción condición térmica x variedad para índice de cosecha y porcentaje de granos vanos (PGV). El PGV es el componente que afecta el rendimiento de las variedades susceptibles a los efectos de las bajas temperaturas. La variedad Oro presenta un comportamiento relativamente estable a condiciones críticas de temperatura de agua, por lo que puede ser considerada tolerante a las condiciones de bajas temperaturas que se presentan en el país.

Palabras Clave

Oryza sativa L., tolerancia a frío, baja temperatura, diferencias genotípicas, esterilidad floral.

ABSTRACT

This study studied whether there are differences in cold tolerance in growth and yield among four varieties of rice. The varieties were subjected to various thermal conditions at different stages of development. The work was done under semi-controlled conditions. The treatments included four varieties of rice (Ámbar-INIA, Diamante-INIA, Oro y Harika-GS) that were put under five thermal conditions, according to the growth stages and the crop development. Growth analysis was performed and physiological indices were calculated, such as the relative growth rate (RGR) and net assimilation rate (NAR) to determine the effect of water temperature at various growth stages on growth. The physiological indices indicated that there were no genotypic differences among genotypes. However, plant height recorded at the start of tillering showed differences in the response among genotypes. Moreover, we determined the yield and yield components. The thermal condition \times variety interaction for yield wasn't significant, however, a different tendency was observed in the response of the varieties to the thermal water conditions. The results showed thermal condition \times variety interaction for harvest index and percentage of empty spikelets (PGV). The PGV affects the performance of varieties susceptible to the effects of low temperatures. The Oro variety presents a relatively stable behavior in critical conditions of water temperature, so it can be considered tolerant to the low temperature conditions that prevail in Chile.

Key Words

Oryza sativa L., cold tolerance, low temperature, genotypic differences, floral sterility.

INTRODUCCIÓN

El arroz (*Oryza sativa L.*) es uno de los principales alimentos del mundo, constituyendo la base de la alimentación humana en extensas áreas del planeta y proporcionando más del 20% del consumo mundial de calorías. Con un volumen aproximado de 402 millones de toneladas de producto elaborado es el segundo cereal de mayor producción mundial, ocupando una superficie cercana a 152 millones de hectáreas. El aumento de la población mundial ha originado un alza del orden del 1,4% anual en el consumo de este cereal (Alvarado, 2007). Se estima que el aumento en el consumo del arroz generará un fuerte desafío de producción para el futuro, el que se va a traducir en la necesidad de utilizar tecnologías avanzadas capaces de obtener una alta productividad por hectárea.

El arroz cultivado en el mundo se clasifica en tres razas ecogeográficas (índica, japónica y javánica). La raza indica representa el 80% del arroz cultivado, y alimenta a alrededor de tres mil millones de personas, sobre todo en países en desarrollo, además es el tipo de arroz más comercializado (69%) en el mercado mundial. Los arroces del tipo japónica y glutinosos, alcanzan sólo un 9% y 2% del comercio mundial respectivamente (Cordero, 2008).

En Chile se cultiva la raza japónica, caracterizada por desarrollarse en climas templados (Alvarado y Cordero, 2007). La variedad más cultivada es Diamante-INIA, que ocupa 98% de la superficie nacional, y el porcentaje restante corresponde a la variedad Oro, también perteneciente a la raza japónica (Alvarado, 2007).

El arroz en Chile se cultiva entre los paralelos 34°10' (provincia de Colchagua) y 36°26' (provincia de Ñuble), siendo uno de los países más australes del mundo en que se siembra este cereal. Ocupa el cuarto lugar en superficie entre los cereales cultivados en el país, con aproximadamente 23.680 hectáreas, que producen 127 mil toneladas (ODEPA, CHILE, 2010).

Linares es la principal provincia productora de arroz en Chile con el 78% de la producción nacional concentrándose en la comuna de Parral. La temperatura media anual de la zona, varía entre 13° y 15°C. La diferencia térmica entre el mes más cálido y el mes más frío es aproximadamente 13-14°C en Linares, en tanto que la oscilación térmica diaria supera 14°C (Santibáñez y Uribe, 1993).

Chile es considerado un país con temperaturas bajas para el cultivo del arroz, es decir, tiene temperaturas inferiores a las óptimas requeridas por el cultivo. El International Rice Testing Program, IRTP (IRRI, 1983), clasifica a Chile en el patrón de temperatura VI B, que corresponde a un grupo climático inferior de acuerdo al período o períodos en que el crecimiento del arroz es afectado por la temperatura. Se consideran temperaturas críticas para el crecimiento de la planta de arroz aquellas bajo 20°C y sobre 30°C. Este rango de

temperaturas difiere de acuerdo a la variedad y el estado fisiológico de la planta (Yoshida, 1981).

Las variedades de arroz en Chile cumplen su ciclo de desarrollo en 135 a 150 días desde la siembra hasta la madurez de cosecha (octubre a marzo). Durante este período la planta completa los estados vegetativo, reproductivo y llenado de grano. Los períodos de germinación, plántula, y floración, se ven afectados por las bajas (<20°C) temperaturas. La capacidad de rendimiento o potencial del cultivo es determinado durante el estado reproductivo de la planta, y es durante este estado, en el que las bajas temperaturas producen significativas pérdidas para la industria arrocera (Alvarado, 2007). La ocurrencia de temperatura bajo 20°C en el estado de meiosis de las células madres del polen, induce un alto porcentaje de esterilidad de espiguillas, lo que determina la producción de granos vanos (Yoshida, 1981). Durante este periodo, temperaturas de 12°C no producen esterilidad si ocurren durante dos días solamente; sin embargo, pueden determinar un 100% de esterilidad si permanecen durante seis días. La esterilidad producida a causa de bajas temperaturas, es normalmente atribuida a la baja temperatura nocturna (Yoshida, 1981). Las pérdidas en Chile han sido estimadas entre 1 y 2 Mg·ha⁻¹, lo que se traduce entre 5 y 10 millones de dólares anuales para esta industria. Alvarado (1999) informó un aumento de 6% en la esterilidad floral por cada grado de disminución de temperatura bajo 20°C durante la etapa de formación del polen. Las pérdidas por esterilidad floral en Chile son del orden del 10 a 12%, cifra cercana al 13% informado para California y Australia; sin embargo, en años considerados fríos, con temperaturas medias inferiores a 20°C durante la floración, las pérdidas pueden alcanzar hasta un 60% (Alvarado, 1999).

La posición de los puntos de crecimiento con respecto a la lámina de agua afecta el crecimiento del arroz (Tsunoda y Matsushima, 1962). Hasta el inicio de panícula, los puntos de crecimiento de las hojas, los macollos y panículas están bajo el agua, y la temperatura del agua afecta el crecimiento y el desarrollo de la planta. Sin embargo, la elongación de las hojas y el crecimiento en altura de la planta se ven afectados posteriormente, tanto por la temperatura del aire como por la del agua. En la etapa de meiosis, la panícula está sobre la superficie del agua, los efectos de la temperatura del agua disminuyen, y la temperatura del aire controla el crecimiento de las panículas y el llenado de los granos (Tsunoda y Matsushima 1962, Matsushima *et al.*, 1964b).

En la mayoría de las condiciones, la temperatura del agua es superior a la temperatura del aire, y con el aumento de la altura de la lámina de agua, es posible extender el período en que la temperatura del agua controla el crecimiento de las panículas. Por lo tanto, cuando la temperatura del aire desciende por debajo de la temperatura crítica para el crecimiento de la planta de arroz, el aumento de la altura de la lámina de agua a alrededor de 15-20 cm en la etapa de meiosis, es un método eficaz para proteger a la planta del arroz contra la esterilidad causada por la baja temperatura del aire (Nishiyama *et al.*, 1969), sin embargo, este sistema no es efectivo cuando la temperatura del agua es muy baja (Tinarelli, 1989).

El rendimiento del arroz, está determinado por el número de panículas por metro cuadrado,

el número de granos por panículas y el peso de los granos. Cada componente de rendimiento se determina en una etapa en la vida de la planta (Matsushima, 1970). Por ello los efectos de la temperatura del aire y del agua sobre el rendimiento y los componentes del rendimiento, varían con la etapa de crecimiento (Matsushima *et al.*, 1964a). En las primeras etapas de crecimiento, desde la germinación y emergencia hasta el inicio de panícula, la temperatura del agua afecta el número de panículas por planta, el número de granos por panícula, y el porcentaje de granos que llegan a madurez. En etapas posteriores, desde la etapa de floración hasta llenado de grano, la temperatura del aire influye en el rendimiento porque afecta el porcentaje de granos no fertilizados y el porcentaje de granos que llegan a madurez.

Hay diferencias genotípicas en la tolerancia a bajas temperaturas en la etapa de floración (Sasaki and Wada, 1973). En general los genotipos de la raza Japónica son más tolerantes a baja temperatura que los genotipos de la raza Índica (Yoshida, 1981). Hay también diferencias genotípicas a la tolerancia al agua fría en la etapa de plántula y se cree que estas diferencias no se relacionan a la tolerancia al frío que presentan los genotipos en la etapa de formación del polen (Yoshida, 1981). Estudios realizados por Alvarado y Castillo (2002) revelan que la germinación fue afectada por la baja temperatura y por el tiempo de exposición, presentándose una gran variabilidad de respuesta en los cultivares y líneas avanzadas estudiados.

En Chile no hay un conocimiento acabado de acuerdo a la variabilidad de respuesta de los genotipos de arroz a baja temperatura. En el Cuadro 1 se muestran las características de las variedades de arroz más usadas en Chile, la variedad Oro fue liberada en 1964 por la Estación Experimental Huencuecho, Diamante-INIA en 1980 por el Instituto de Investigaciones Agropecuarias, y Ámbar-INIA en 2003 (Alvarado, 2007). Ámbar-INIA fue la primera variedad de arroz glutinosa liberada por el Programa de Mejoramiento Genético de Arroz de INIA en Chile que tiene bajo contenido de amilosa (5%) (Cordero, 2008). Harika-GS corresponde a una línea desarrollada por profesionales de la Universidad Técnica Federico Santa María (Ortega, 2007) que está en tramitación para ser liberada, y hasta la fecha no hay antecedentes publicados en relación a sus características.

Cuadro1. Características de las variedades comerciales de arroz utilizadas.

Características	Oro	Diamante-INIA	Ámbar-INIA
Altura (cm)	77 - 113	80 - 98	66
Caña	Firme	Firme	Firme
Panícula	Semierecta	Semierecta	Erecta
Forma del Grano	Corto redondeado	Largo grueso	Corto redondeado, opaco

(Continúa)

Cuadro 1. (Continuación)

Características	Oro	Diamante-INIA	Ámbar-INIA
Peso 1000 granos (g)	33	33	27
Precocidad	Semi- precoz	Semi – tardía	Tardía
Tendedura	Moderadamente susceptible	Moderadamente resistente	Resistente
Desgrane	Resistente	Moderadamente resistente	Resistente
Manchado del grano	Moderadamente susceptible	Moderadamente resistente	Moderadamente resistente
Rendimiento industrial	Bueno	Bueno	Muy bueno

Fuente: Alvarado, 2007.

Fases de desarrollo del cultivo del arroz

Fase 1. Desde la germinación del cultivo hasta inicio de macollos (primeros treinta días luego de la siembra aproximadamente).

Fase 2. Desde inicio de macollos a inicio de panícula. El inicio de panícula es el momento en el cual la panícula se ha diferenciado. Comienza cuando el macollaje es máximo en la mayoría de los genotipos de arroz, sin embargo en los genotipos de ciclo corto (Ej. Harika-GS) puede ocurrir antes de que alcance el máximo número de macollos, aproximadamente a los 45 días desde la siembra y cuando se produce la elongación del entrenudo. El inicio de panícula se visualiza a través de la disección de tallos, siendo posible observar un cono blanco de 1 – 2 mm de longitud. La fecha en que ocurre este estado de desarrollo se define cuando aproximadamente un 50% de los macollos se encuentren en inicio de panícula.

Fase 3. Desde inicio de panícula hasta el 50% de la floración.

Fase 4. Corresponde al llenado de grano y va desde 50% de la floración hasta madurez fisiológica.

La fase 1 y la fase 3 son los períodos en los que el cultivo del arroz es susceptible a daño por bajas temperaturas, especialmente bajas temperaturas nocturnas (Yoshida, 1981).

Hipótesis

Hay diferencias genotípicas a la tolerancia a frío en las variedades de arroz cultivadas en Chile.

Objetivos

Objetivo general.

Evaluar la tolerancia al frío en crecimiento y rendimiento de cuatro variedades de arroz, sometidas a diferentes condiciones térmicas en distintas etapas de desarrollo.

Objetivos específicos.

Determinar el efecto de la temperatura del agua en diferentes estados fenológicos en relación al crecimiento de las cuatro variedades.

Determinar el efecto de la temperatura del agua en el rendimiento y en los componentes del rendimiento de las cuatro variedades de arroz.

MATERIALES Y MÉTODO

Materiales

Lugar del estudio

Este proyecto se realizó bajo condiciones semi-controladas, utilizando un sistema de piscinas similar al descrito por Farrell *et al.* (2004). El sistema fue implementado en la Estación Experimental Antumapu de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, Santiago, Chile.

La Estación Experimental se encuentra ubicada en 33° 34' 15,38''S y 70° 38' 00,42''O, a 623 m.s.n.m. El clima es templado mesotermal estenotermico mediterráneo semiárido. El régimen térmico se caracteriza por veranos calurosos y secos e inviernos fríos. La temperatura media durante el período de crecimiento del arroz (octubre a marzo) es de 16,6°C, con una media máxima de 25,4°C y media mínima de 9,5°C (Santibáñez y Uribe, 1990).

El suelo pertenece a la Serie Santiago (CIREN CORFO, 1996), es de origen aluvial, de textura superficial franco arcillosa, con 2,34% de materia orgánica y pH 8,24.

Material Vegetal

Semillas correspondientes a cuatro variedades de arroz cultivadas en Chile: Ámbar-INIA y Diamante-INIA, Oro y Harika-GS. Las variedades Diamante-INIA y Ámbar-INA fueron liberadas por el Programa de Mejoramiento Genético de Arroz de INIA (Instituto de Investigaciones Agropecuarias). La variedad Oro fue liberada por la Estación Experimental Huencuecho y Harika-GS corresponde a una línea desarrollada por profesionales de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Método

Tratamientos

Hubo 20 tratamientos, cuatro variedades de arroz sometidas a cinco condiciones térmicas, según las etapas de crecimiento y desarrollo del cultivo (Cuadro 2).

Cuadro 2. Tratamientos definidos por la combinación de cinco condiciones térmicas y cuatro variedades de arroz. AC= agua cálida; AF= agua fría; 5= lámina baja; 20= lámina alta; V= lámina variable. C1= AC5/ACV/AC20/AC20; C2= AF5/AC5/AC5/AC5; C3= AF5/ACV/AC20/AC20; C4= AC5/AC5/AF5/AC5; C5= AC5/ACV/AF20/AC20. V1= Harika-GS; V2= Oro; V3=Diamante-INIA; V4=Ámbar-INIA.

Tratamiento	Condición Térmica	Variedad	Fase	Tratamiento térmico	
				T°	Altura
1	C1	V1	1	AC	5
			2	AC	V
			3	AC	20
			4	AC	20
2	C1	V2	1	AC	5
			2	AC	V
			3	AC	20
			4	AC	20
3	C1	V3	1	AC	5
			2	AC	V
			3	AC	20
			4	AC	20
4	C1	V4	1	AC	5
			2	AC	V
			3	AC	20
			4	AC	20
5	C2	V1	1	AF	5
			2	AC	5
			3	AC	5
			4	AC	5
6	C2	V2	1	AF	5
			2	AC	5
			3	AC	5
			4	AC	5
7	C2	V3	1	AF	5
			2	AC	5
			3	AC	5
			4	AC	5
8	C2	V4	1	AF	5
			2	AC	5
			3	AC	5
			4	AC	5
9	C3	V1	1	AF	5
			2	AC	V
			3	AC	20
			4	AC	20

(Continúa)

Cuadro 2. (Continuación)

Tratamiento	Condición Térmica	Variedad	Fase	Tratamiento térmico	
				T°	Altura
10	C3	V2	1	AF	5
			2	AC	V
			3	AC	20
			4	AC	20
11	C3	V3	1	AF	5
			2	AC	V
			3	AC	20
			4	AC	20
12	C3	V4	1	AF	5
			2	AC	V
			3	AC	20
			4	AC	20
13	C4	V1	1	AC	5
			2	AC	5
			3	AF	5
			4	AC	5
14	C4	V2	1	AC	5
			2	AC	5
			3	AF	5
			4	AC	5
15	C4	V3	1	AC	5
			2	AC	5
			3	AF	5
			4	AC	5
16	C4	V4	1	AC	5
			2	AC	5
			3	AF	5
			4	AC	5
17	C5	V1	1	AC	5
			2	AC	V
			3	AF	20
			4	AC	20
18	C5	V2	1	AC	5
			2	AC	V
			3	AF	20
			4	AC	20
19	C5	V3	1	AC	5
			2	AC	V
			3	AF	20
			4	AC	20

(Continúa)

Cuadro 2. (Continuación)

Tratamiento	Condición Térmica	Variedad	Fase	Tratamiento térmico	
				T°	Altura
20	C5	V4	1	AC	5
			2	AC	V
			3	AF	20
			4	AC	20

Diseño Experimental

El diseño experimental fue de parcela dividida con dos repeticiones. La parcela principal correspondió al tratamiento térmico (5 niveles) y la subparcela correspondió a variedad (4 niveles), Ámbar-INIA, Diamante-INIA, Oro y Harika-GS. La unidad experimental fue definida por una superficie de $0,636 \text{ m}^2$, que corresponde a la cuarta parte de cada piscina.

Manejo del agua para las condiciones térmicas

Las condiciones térmicas se lograron a través de la combinación de altura y temperatura de la lámina de agua, lo que se obtuvo a través un sistema de riego y drenaje que incorporó el uso de válvulas y flotadores, diseñado para que el agua ingrese por el extremo superior de cada piscina hasta alcanzar la altura de lámina de agua requerida para cada tratamiento y drenes ubicados sobre el nivel del suelo que permitieron controlar la altura de la lámina de agua y dar salida al agua de cada piscina (Figura 1). Con este sistema fue posible hacer circular el agua del cultivo e impedir cambios pronunciados de temperatura del agua por efecto de la radiación solar y la temperatura ambiental.

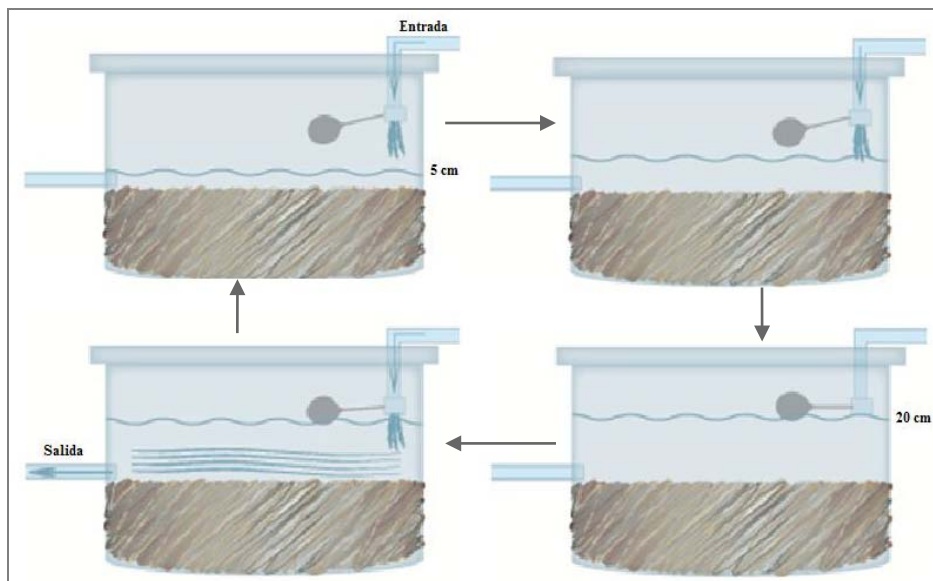


Figura 1. Representación del sistema de riego y drenaje utilizado para el logro de las diferentes condiciones térmicas.

Temperatura.

Agua fría (**AF**): Agua proveniente de un pozo con una temperatura aproximada de 14°C. La temperatura del agua se mantuvo a través de permanente circulación de agua en el arrozal.

Agua cálida (**AC**): Agua con una temperatura superior a 20°C en el día y superior a 12°C durante la noche, proveniente del mismo pozo pero en este caso sin circular, se calentó por efecto de la radiación solar y la temperatura ambiental. En este caso el agua sólo se perdió por evapotranspiración del cultivo.

Altura de lámina de agua. La lámina de agua se mantuvo dentro de un margen de ± 1 cm, utilizando un sistema de válvulas y flotadores.

Lámina baja (**5**): Altura de la lámina de agua a 5 cm respecto del suelo.

Lámina alta (**20**): Altura de la lámina de agua a 20 cm respecto del suelo.

Lámina variable (**V**): Altura de la lámina de agua según el crecimiento del cultivo. A la siembra alcanzó una altura mínima de 5 cm respecto al suelo y a inicio de panícula alcanzó una altura máxima de 20 cm.

Condiciones térmicas de agua

Las cuatro variedades de arroz fueron sometidas a las siguientes cinco condiciones térmicas:

1ª Condición: C1= AC5/ACV/AC20/AC20 (Figura 2a). Agua cálida con altura variable conforme fue creciendo la planta hasta alcanzar una lámina de agua de 20 cm a inicio panícula. Durante el ciclo de crecimiento y desarrollo del cultivo se establecieron condiciones favorables de temperatura de agua.

2ª Condición: C2= AF5/AC5/AC5/AC5 (Figura 2b). Agua fría ($<20^{\circ}\text{C}$) con lámina baja (5 cm) durante la fase 1. Luego, a partir de la fase 2 hasta la fase 4, agua cálida a la misma baja altura. Por lo tanto, con este tratamiento se espera ver si baja temperatura durante la fase 1 y/o baja temperatura del aire en la fase 3 son determinantes del crecimiento y/o del rendimiento del arroz.

3ª Condición: C3= AF5/ACV/AC20/AC20 (Figura 2c). Agua fría con lámina baja durante la fase 1 y a partir de la fase 2 se aplicó agua cálida con lámina de agua de altura variable hasta alcanzar 20 cm en la fase 3. Este es el manejo estándar que se da al arrozal en condiciones de campo.

4ª Condición: C4= AC5/AC5/AF5/AC5 (Figura 2d). Agua cálida con lámina baja durante las fases 1 y 2. Luego, agua fría con lámina baja durante la fase 3. Posteriormente, agua cálida con lámina baja durante la fase 4. Por lo tanto, con este tratamiento se espera ver si baja temperatura durante la fase 3 es determinante del crecimiento y/o del rendimiento del arroz.

5ª Condición: C5= AC5/ACV/AF20/AC20 (Figura 2e). Agua cálida con lámina variable durante las fases 1 y 2. Luego, agua fría con lámina alta (20 cm) durante la fase 3 y posteriormente agua cálida con lámina alta durante fase 4. Por lo tanto, con este tratamiento se espera ver si baja temperatura durante la fase 3 y una lámina de agua que proteja los puntos de crecimiento de hojas, macollas y panículas es determinante del crecimiento y/o del rendimiento del arroz.

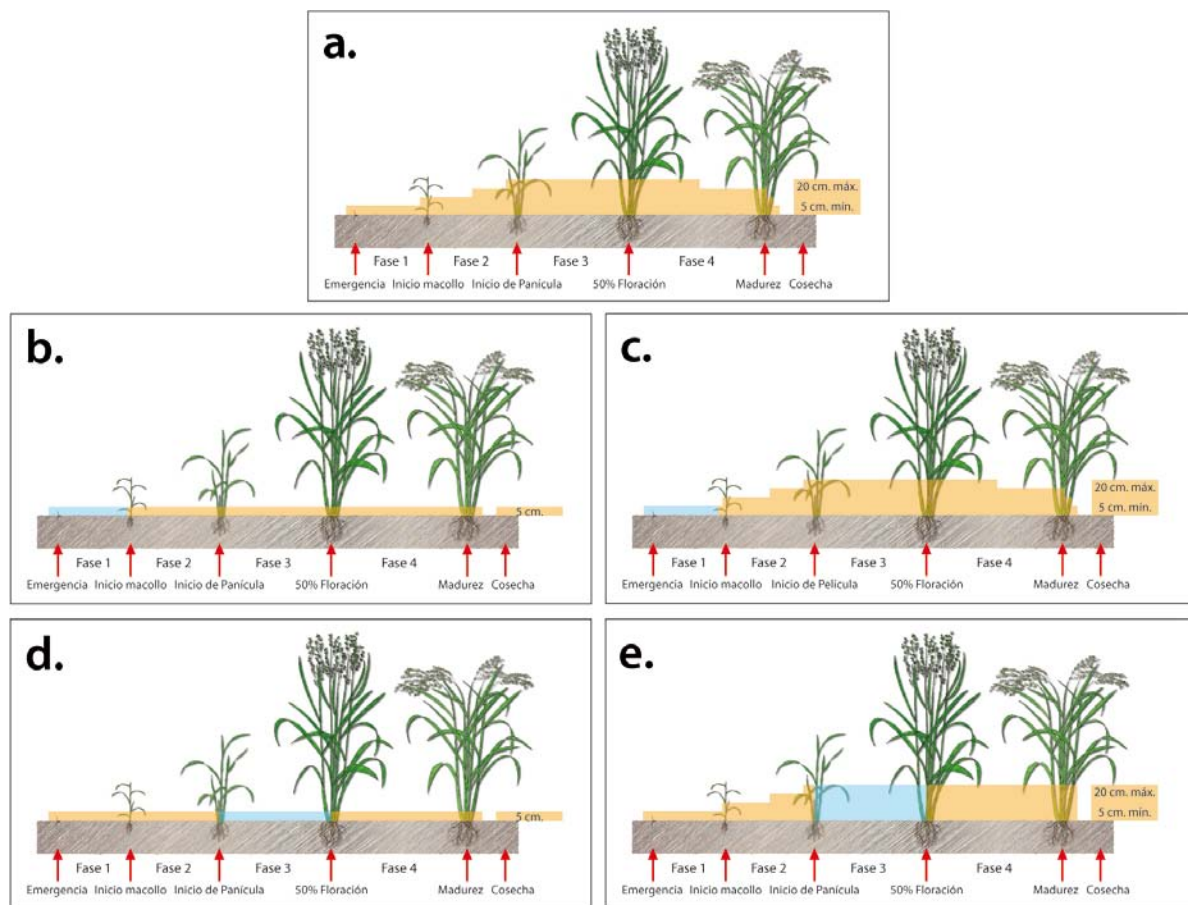


Figura 2. Condiciones térmicas aplicadas sobre cuatro variedades de arroz (Harika-GS, Oro, Diamante-INIA y Ámbar-INIA). **a.** Condición térmica 1 (C1= AC5/ACV/AC20/AC20) **b.** Condición térmica 2 (C2= AF5/AC5/AC5/AC5) **c.** Condición térmica 3 (C3= AF5/ACV/AC20/AC20) **d.** Condición térmica 4 (C4= AC5/AC5/AF5/AC5) **e.** Condición térmica 5 (C5= AC5/ACV/AF20/AC20).

Procedimiento

Se utilizaron diez piscinas de fibra de vidrio de 1.8 m de diámetro y 50 cm de alto, con 0,636 m³ de suelo de textura superficial franco arcillosa, el cual fue homogeneizado y tamizado a 10 mm y luego fumigado con Bromuro de Metilo para un control eficiente de malezas, plagas y enfermedades del suelo.

La siembra se realizó el día 17 de Octubre del 2008, dos días antes y de acuerdo a los resultados del análisis de suelo y un rendimiento esperado de 80 qq/ha, se fertilizó con 68 unidades/ha de N en forma de urea (50% de la dosis), 61 unidades/ha de P₂O₅ en forma de superfosfato triple y 60 unidades/ha de K₂O en forma de cloruro de potasio (Matus *et al.*, 2001). El nitrógeno restante (68 unidades/ha de N) se aplicó durante la etapa de macolla también en forma de urea. Al momento de la siembra se procedió a inundar el suelo en las piscinas. Para proporcionar el agua a las piscinas de utilizaron tuberías de PVC, y además válvulas y flotadores para irrigación y drenaje.

Luego de la inundación, y una vez que el suelo fue removido y homogenizado, se sembró al voleo sembrando cada variedad en la cuarta parte de cada piscina. La dosis de semilla fue de 140 kg/ha, corregidos de acuerdo al porcentaje de germinación de cada variedad. La semilla fue previamente desinfectada y mojada en una solución de agua y Cloro al 1% durante 24 horas. Luego se sacó de la solución y se mantuvo en invernadero (incubación) hasta germinación para luego sembrarla.

A partir de los 40 días después de la siembra, se inició la inspección para detectar el inicio de panícula (Figura 3). Se disectaron tallos principales que se observaron bajo lupa (IRRI, 1975) utilizando una hoja afilada que seccionó el tallo longitudinalmente a lo largo de su centro, desde la base de la planta (donde se unen el tallo y la raíz) hasta el extremo distal del mismo.



Figura 3. Inicio de panícula. Se reconoce visualmente cuando la panícula tiene entre 1 a 2 mm de longitud, al inspeccionar y disectar tallos principales.

La temperatura del agua fue medida con termistores cada una hora, los que estaban ubicados en la zona media de la lámina de agua con respecto a las diferentes alturas de la misma (5 a 20 cm). Los datos fueron extraídos semanalmente. La temperatura del aire fue medida y registrada regularmente por la estación meteorológica ubicada en el Centro Experimental La Platina – INIA. Se utilizó el registro de temperatura del aire entre octubre a marzo, período en que las variedades cumplen su ciclo de desarrollo.

Para fines de manejo se consideró el momento de inicio de panícula de la variedad más temprana hasta la floración de la variedad más tardía. Cumplido este período se procedió a limitar progresivamente el aporte de agua a las piscinas. Finalmente cuando la variedad más tardía alcanzó la etapa de grano pastoso se suspendió definitivamente la entrada de agua al arrozal.

La precocidad de cada genotipo se evaluó con el número de días desde la siembra a antesis (cuando al menos un 50% de las panículas mostraron anteras visibles) para cada uno de los tratamientos.

La cosecha de los genotipos fue realizada en base al % de humedad de los granos. Se cosechó con un 20% de humedad, ya que es el porcentaje que se obtiene el mejor rendimiento industrial (Cordero¹). El % de humedad de los granos fue medido sucesivamente cada dos días una vez que los genotipos de arroz alcanzaron la madurez dura del grano. Se cosecharon dos panículas de cada subparcela. Luego se seleccionaron y pesaron 15 granos húmedos ubicados en la zona media de la panícula, a continuación se llevaron a estufa a 70°C durante 48 horas y se pesaron nuevamente.

Variables

Rendimiento. Para determinar el efecto de la temperatura del agua cada unidad experimental (variedad) fue cosechada en su totalidad a ras de suelo y se obtuvo un manojito. De dicho manojito se sacaron y pesaron 50 tallos con panícula (FS), en seguida se llevaron a estufa a 70°C hasta peso constante y se pesaron nuevamente (DS). Después de sacar los 50 tallos se procedió a pesar el manojito (FB). Luego el manojito se trilló, se limpiaron los granos y se pesaron (TG). Luego se seleccionaron y pesaron 250 granos húmedos (WG), en seguida se llevaron a una estufa a 70°C hasta peso constante y se pesaron nuevamente (DG) (Figura 4). A través de la misma metodología se calculó, además, la biomasa (kg/ha) y el índice de cosecha (IC) del cultivo (Apéndice I).

¹ Karla Cordero L., Ingeniero Agrónomo Mg.Cs., Mejoramiento Genético de Arroz, INIA Quilamapu, 2008 (Comunicación personal).

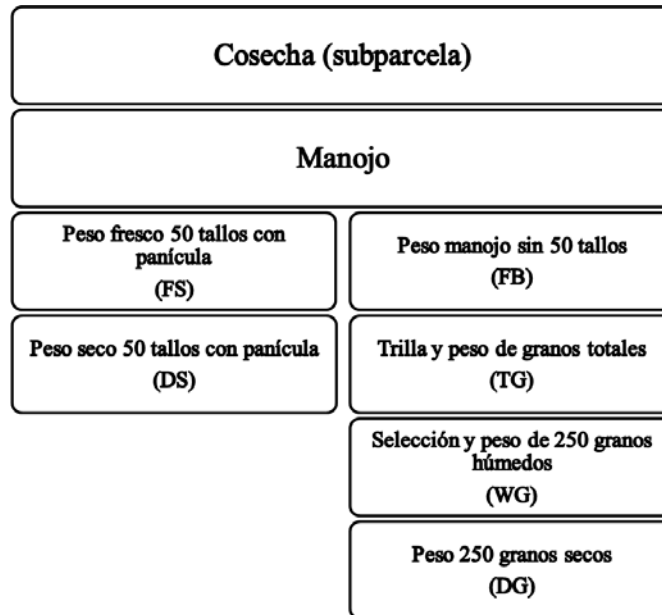


Figura 4. Metodología utilizada para calcular el rendimiento y los componentes del rendimiento.

Las relaciones empleadas para el cálculo de las variables mencionadas son las siguientes:

$$\text{Rendimiento (kg} \cdot \text{ha}^{-1}) = \left[\frac{(DG/WG)TG [(FB + FS)/FB]}{0.636\text{m}^2} \right] \times 10$$

$$\text{Biomasa (kg} \cdot \text{ha}^{-1}) = \left[\frac{(DS/FS)(FB + FS)}{0.636\text{m}^2} \right] \times 10$$

$$\text{IC} = \text{Rendimiento} / \text{Biomasa}$$

Peso de granos (PMG). Se calculó a través del peso de una muestra de 250 granos secos a estufa (DG).

Número de granos por metro cuadrado (NGM). Se calculó a través de la relación entre el rendimiento y el peso seco de los granos.

Porcentaje de granos vanos (PGV) o esterilidad floral. Para la determinación del PGV, a cosecha se realizó en cada subparcela un conteo y pesaje del número de granos totales y vanos en 10 panículas elegidas de manera aleatoria, de modo de evaluar pérdidas de rendimiento por esterilidad floral expresada en % granos vanos de acuerdo a la siguiente

relación (Apéndice II):

$$\text{PGV (\%)} = \frac{\text{Peso granos vanos}}{\text{Peso granos totales}}$$

Altura de plantas. Se determinó en inicio de macolla (IM), inicio de panícula (IP) y a cosecha. Se midió la altura del tallo principal, desde la base de la planta (donde se une el tallo y la raíz) hasta el extremo distal del tallo en IM e IP. A cosecha se midió la altura hasta el extremo distal de la panícula.

Crecimiento. Para determinar el efecto de la temperatura del agua se cosecharon plantas para análisis de crecimiento en tres oportunidades durante el ciclo de vida del cultivo (inicio de macolla (IM), inicio de panícula (IP) y maduración del grano (M)) (Hunt *et al.* 2002). Se calculó la tasa de crecimiento relativo [$\text{TCR} = (1/W)(dW/dt)$] y la tasa de asimilación neta [$\text{TAN} = (1/L_A)(dW/dt)$], donde t es el tiempo, W el peso seco total por planta y L_A es el área foliar total por planta, a partir de 4 muestras de cada subparcela. El área foliar se determinó con un medidor de área foliar portátil (LI-3000C, LI-COR, Lincoln, NE, USA) en combinación con el cinturón transportador transparente (LI-3050, LI-COR, Lincoln, NE, USA) (Apéndice III). Además se obtuvo el peso seco de la planta (parte aérea y raíces por separado) secando las muestras a 70°C durante 48 horas en estufa de secado (Apéndice IV).

Análisis estadístico

Para el análisis de datos se utilizó la estadística descriptiva de todas las variables, análisis de normalidad y homogeneidad de varianzas. Posteriormente se realizaron análisis de varianza de acuerdo al diseño, y para la diferencia de medias se empleó la prueba de LSD Fisher a un nivel de $P \leq 0,05$, utilizando el programa estadístico Infostat.

RESULTADOS

El Cuadro 3 presenta el tiempo en días que transcurrió desde la siembra hasta antesis. No hubo interacción entre condición térmica x variedad para los días a floración, sin embargo, hubo efectos independientes de las variedades. Los resultados indican que Harika-GS fue el genotipo más precoz, no obstante, a cosecha hubo una tendencia diferente de los genotipos. Los genotipos de madurez precoz fueron Harika-GS y Oro, por el contrario, Ámbar-INIA y Diamante-INIA fueron las variedades más tardías a cosecha.

Cuadro 3. Días a floración de las variedades en las diferentes condiciones térmicas. DDS= días después de la siembra. C1= AC5/ACV/AC20/AC20; C2= AF5/AC5/AC5/AC5; C3= AF5/ACV/AC20/AC20; C4= AC5/AC5/AF5/AC5; C5= AC5/ACV/AF20/AC20.

Condición térmica del agua	Días a Floración (DDS)				
	Harika-GS	Oro	Diamante-INIA	Ámbar-INIA	Media gral.
C1	90	93	95	95	93
C2	91	94	99	97	95
C3	90	94	96	94	94
C4	91	92	94	89	91
C5	90	94	93	99	94
Media gral.	90 A ¹	93 AB	95 B	95 B	

¹Medias con letras mayúsculas diferentes en sentido horizontal indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre variedades, según prueba LSD Fisher.

Temperatura del agua y ambiente

Para evaluar la tolerancia a frío de las variedades de arroz se determino aplicar agua fría en las fases de desarrollo 1 y 3. La condición térmica 2 (C2= AF5/AC5/AC5/AC5) y 3 (C3= AF5/ACV/AC20/AC20) incluyó agua fría durante la fase 1. Asimismo, la condición térmica 4 (C4= AC5/AC5/AF5/AC5) y 5 (C5= AC5/ACV/AF20/AC20) incluyó agua fría durante la fase 3.

El registro de temperatura del agua y ambiente para las diferentes fases de desarrollo del cultivo se presenta en el Cuadro 4. Los tratamientos en que se aplicó agua fría tuvieron entre 18°C y 19°C en la fase 1 y fase 3 respectivamente, siendo la temperatura levemente mayor en aquellos en que la altura de la lámina de agua era baja (5 cm). Asimismo, los valores medios de temperatura ambiente para la fase 1 y 3 fluctuaron entre 17°C y 21°C, respectivamente.

Cuadro 4. Temperaturas medias (°C) semanales durante las fases de desarrollo 1, 2, 3, 4 y temperaturas medias (°C) correspondientes a cada fase de desarrollo para cada condición térmica de agua y ambiente. F1= desde la germinación del cultivo hasta inicio de macollos; F2= desde inicio de macollos a inicio de panícula; F3= desde inicio de panícula hasta el 50% de la floración; F4= desde el 50% de la floración hasta la madurez fisiológica. C1= AC5/ACV/AC20/AC20; C2= AF5/AC5/AC5/AC5; C3= AF5/ACV/AC20/AC20; C4= AC5/AC5/AF5/AC5; C5= AC5/ACV/AF20/AC20.

Semana	Fase	Temperatura media					
		°C					
		C1	C2	C3	C4	C5	Ambiente
1	F1	21,0	18,5	19,5	20,6	20,3	16,2
2	F1	19,0	17,0	17,4	19,1	18,5	16,3
3	F1	20,6	18,2	17,7	21,2	20,5	16,3
4	F1	21,7	17,4	17,4	21,1	22,3	16,4
5	F1	22,8	19,2	19,3	22,2	23,4	19,0
Media		21,0	18,1	18,3	20,8	21,0	17,0
6	F2	23,4	22,8	22,9	22,7	24,5	18,7
7	F2	23,3	23,1	22,5	23,4	23,7	18,5
8	F2	22,2	23,4	21,9	23,0	22,5	18,0
9	F2	22,8	23,3	23,2	23,6	23,4	19,6
10	F2	21,6	22,7	22,5	22,4	21,5	18,8
11	F2	22,3	24,8	24,8	24,1	23,2	19,3
12	F2	23,4	25,1	25,4	25,0	24,9	21,2
Media		22,7	23,6	23,3	23,4	23,4	19,2
13	F3	22,5	24,7	24,1	20,2	20,4	20,9
14	F3	21,8	23,8	23,6	18,9	19,5	21,0
15	F3	21,3	23,3	23,0	19,2	18,6	20,7
16	F3	20,8	22,0	21,9	20,0	18,6	21,3
17	F3	19,9	21,3	21,2	18,2	17,8	19,2
Media		21,3	23,0	22,8	19,3	19,0	20,6
18	F4	20,7	22,8	22,1	23,0	20,1	21,2
19	F4	21,3	22,2	21,9	22,0	20,3	19,3
20	F4	20,6	21,0	21,1	21,5	19,8	19,7
21	F4	20,0	20,5	20,5	20,8	20,0	s/d
22	F4	21,4	21,9	21,9	22,6	21,1	s/d
23	F4	19,5	21,1	21,1	21,2	19,7	s/d
Media		20,6	21,6	21,4	21,8	20,2	20,1

Determinación del efecto de la temperatura del agua sobre el rendimiento, biomasa e índice de cosecha

Rendimiento

No hubo interacción entre variedad y condición térmica para rendimiento, sin embargo, hubo efectos independientes de la condición térmica del agua y de la variedad (Cuadro 5). La condición térmica 3 (C3= AF5/ACV/AC20/AC20) tuvo el mayor rendimiento de grano en las cuatro variedades y no fue significativamente diferente de la condición térmica 1 (C1= AC5/ACV/AC20/AC20), en cambio, hubo diferencias estadísticamente significativas con la condición térmica 4 (C4= AC5/AC5/AF5/AC5) y la condición térmica 5 (C5= AC5/ACV/AF20/AC20), las que tuvieron menores rendimientos, señalando a la fase 3 como la más sensible a baja temperatura. En cuanto al efecto de variedad, Oro y Harika-GS tuvieron el mayor rendimiento.

Cuadro 5. Efecto de la temperatura del agua sobre el rendimiento en cuatro variedades de arroz (Harika-GS, Oro, Diamante-INIA y Ámbar-INIA). C1= AC5/ACV/AC20/AC20; C2= AF5/AC5/AC5/AC5; C3= AF5/ACV/AC20/AC20; C4= AC5/AC5/AF5/AC5; C5= AC5/ACV/AF20/AC20.

Condición térmica del agua	Rendimiento (kg·ha ⁻¹)				
	Harika-GS	Oro	Diamante-INIA	Ámbar-INIA	Media gral.
C1	9770,5	11117,2	10003,6	7650,4	9635,4 bc ¹
C2	9435,7	8770,4	6235,3	6709,8	7787,8 ab
C3	12760,0	10756,8	8200,8	7892,7	9902,6 c
C4	6739,2	10224,3	5549,5	5205,9	6929,7 a
C5	11474,6	10633,6	4269,6	3546,2	7481,0 a
Media gral.	10036,0 B ²	10300,5 B	6851,8 A	6201,0 A	
Condición térmica (C)	**				
Variedad (V)	***				
Interacción (C × V)	n.s.				
Coefficiente de variación	2,64%				

p<0,01; *p<0,001; n.s.: no significativo. ¹Medias con letras minúsculas diferentes en sentido vertical indican diferencias significativas (p≤0,05) entre condiciones térmicas, según prueba LSD Fisher. ²Medias con letras mayúsculas diferentes en sentido horizontal indican diferencias significativas (p≤0,05) entre variedades, según prueba LSD Fisher.

Aunque no se encontró interacción entre condición térmica x variedad se observó una tendencia diferente en la respuesta de las variedades con respecto a la condición térmica de agua (Figura 5).

Hubo pérdidas en el rendimiento de diversa magnitud cuando los genotipos fueron sometidos a baja temperatura de agua durante las etapas vegetativa y reproductiva. Durante el período vegetativo, los genotipos disminuyeron el rendimiento de grano de acuerdo a la altura de la lámina de agua aplicada, es decir, cuanto menor fue la altura de la lámina de agua hubo menor rendimiento (C2= AF5/AC5/AC5/AC5). Las pérdidas de rendimiento cuantificadas para la condición térmica 2 (C2) con respecto a la condición térmica definida como control (C3= AF5/ACV/AC20/AC20) fue de 21,4%. Sin embargo, durante la etapa reproductiva, las pérdidas de rendimiento de grano fluctuaron entre 30% y 24,5% en las condiciones térmicas 4 (C4= AC5/AC5/AF5/AC5) y 5 (C5= AC5/ACV/AF20/AC20), respectivamente con respecto a la condición térmica 3.

Los resultados muestran (Cuadro 5) que la ocurrencia de agua fría en la etapa reproductiva no afectó el rendimiento de la variedad Oro, en cambio, Diamante-INIA y Ámbar-INIA tuvieron menores rendimientos mientras menor fue la temperatura de agua. El genotipo Harika-GS mostró un comportamiento distinto al resto de los genotipos, específicamente cuando fue sometido a agua fría a baja altura durante la etapa reproductiva (C4= AC5/AC5/AF5/AC5), pues bajo esta condición disminuyó significativamente el rendimiento (50%) con respecto a una lámina de agua alta (C5= AC5/ACV/AF20/AC20) a similar temperatura.

La Figura 5 muestra la estabilidad del rendimiento de las variedades en relación a la temperatura del agua. Los genotipos Oro y Harika fueron relativamente insensibles teniendo un alto grado de estabilidad ante cambios de la temperatura del agua. Por otra parte, las variedades Ámbar-INIA y Diamante-INIA tuvieron una baja estabilidad con respecto a la temperatura del agua, es decir, en la medida que disminuyó la temperatura del agua durante la etapa reproductiva estas variedades disminuyeron el rendimiento, por lo que no son recomendables cuando hay condiciones de agua fría (<20°C).

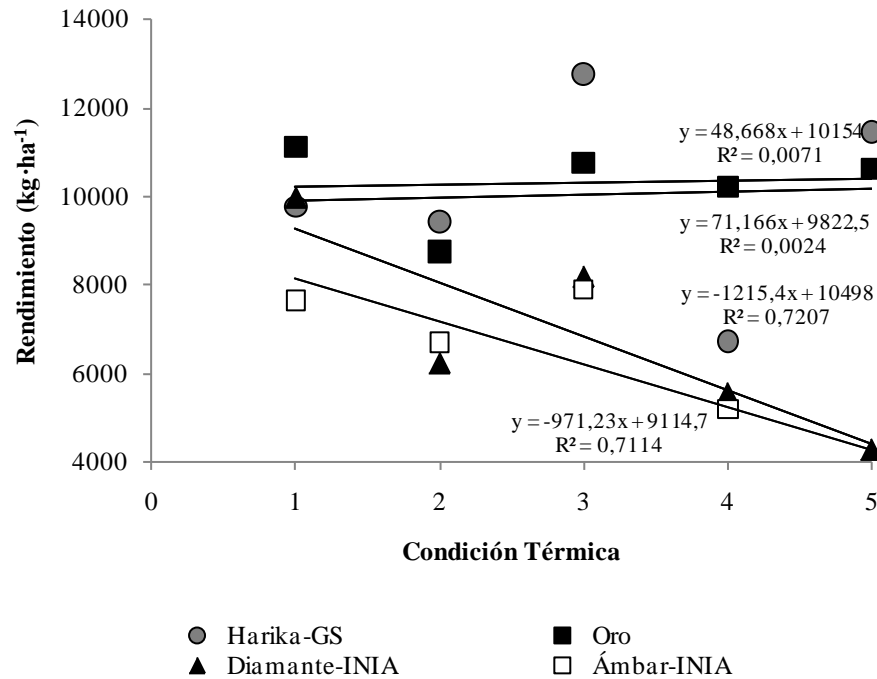


Figura 5. Índice de estabilidad de cuatro variedades de arroz (Harika-GS, Oro, Diamante-INIA y Ámbar-INIA) según distintas condiciones térmicas de agua aplicadas en diferentes estados fenológicos. C1= AC5/ACV/AC20/AC20; C2= AF5/AC5/AC5/AC5; C3= AF5/ACV/AC20/AC20; C4= AC5/AC5/AF5/AC5; C5= AC5/ACV/AF20/AC20.

Biomasa

Los resultados muestran que la interacción variedad x condición térmica no fue significativa para biomasa (Cuadro 6). La biomasa obtenida en la condición térmica 1 (C1= AC5/ACV/AC20/AC20) y 5 (C5= AC5/ACV/AF20/AC20) fue mayor que en los otros tratamientos térmicos, mostrando que la biomasa se ve afectada por frío en el período vegetativo. La variedad Ámbar-INIA tuvo menor biomasa con respecto a las otras variedades.

Cuadro 6. Efecto de la temperatura del agua sobre la biomasa en cuatro variedades de arroz (Harika-GS, Oro, Diamante-INIA y Ámbar-INIA). C1= AC5/ACV/AC20/AC20; C2= AF5/AC5/AC5/AC5; C3= AF5/ACV/AC20/AC20; C4= AC5/AC5/AF5/AC5; C5= AC5/ACV/AF20/AC20.

Condición térmica del agua	Biomasa (kg·ha ⁻¹)				Media gral.	
	Harika-GS	Oro	Diamante-INIA	Ámbar-INIA		
C1	25422	27165	28442	20732	25440	b ¹
C2	21455	23198	18068	18874	20399	a
C3	26322	23781	20104	16091	21574	a
C4	22806	26603	21612	18942	22491	ab
C5	25946	28800	28565	19364	25669	b
Media gral.	24390 B ²	25909 B	23358 B	18801 A		
Condición térmica (C)	+					
Variedad (V)	***					
Interacción (C × V)	n.s.					
Coefficiente de variación	42,3%					

+p <0,1; ***p<0,001; n.s.: no significativo. ¹Medias unidas a letras minúsculas diferentes en sentido vertical indican diferencias significativas (p≤0,05) entre condiciones térmicas, según prueba LSD Fisher. ²Medias unidas a letras mayúsculas diferentes en sentido horizontal indican diferencias significativas (p≤0,05) entre variedades, según prueba LSD Fisher.

Índice de Cosecha

El efecto de las condiciones térmicas sobre el comportamiento de las variedades mostró interacción para el índice de cosecha, (p≤0,01) (Figura 6). El ranking del índice de cosecha entre variedades cambió de acuerdo a la condición térmica. Esta interacción explicó un 28,1% de la suma de cuadrados (Apéndice V).

Las diferencias observadas entre los tratamientos para el índice de cosecha fueron de 0,18 a 0,49%, para la variedad Ámbar-INIA, 0,15 a 0,41 para Diamante-INIA, 0,30 a 0,48 para Harika-GS, y de 0,37 a 0,44 para la variedad Oro (Cuadro 7).

Cuadro 7. Efecto de la temperatura del agua sobre el índice de cosecha en cuatro variedades de arroz (Harika-GS, Oro, Diamante-INIA y Ámbar-INIA). C1= AC5/ACV/AC20/AC20; C2= AF5/AC5/AC5/AC5; C3= AF5/ACV/AC20/AC20; C4= AC5/AC5/AF5/AC5; C5= AC5/ACV/AF20/AC20.

Condición térmica del agua	Índice de Cosecha				
	Harika-GS	Oro	Diamante-INIA	Ámbar-INIA	Media gral.
C1	0,39 de ¹	0,41 de	0,35 cd	0,36 cd	0,38
C2	0,44 ef	0,38 de	0,34 cd	0,35 cd	0,38
C3	0,48 f	0,44 ef	0,41 de	0,49 f	0,46
C4	0,30 bc	0,38 de	0,26 b	0,27 b	0,30
C5	0,44 ef	0,37 d	0,15 a	0,18 a	0,29
Media gral.	0,41	0,40	0,30	0,33	
Condición térmica (C)	**				
Variedad (V)	***				
Interacción (C × V)	***				
Coeficiente de variación	8,63%				

p<0,01; *p<0,001. ¹Medias unidas a letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas (p≤0,05) entre condiciones térmicas y variedades, según prueba LSD Fisher.

La Figura 6 muestra además una diferencia significativa en el índice de cosecha de los genotipos para la temperatura del agua de la condición térmica 5 (C5= AC5/ACV/AF20/AC20). Los genotipos Harika-GS y Oro no vieron afectado su índice de cosecha en condición de agua fría (<20°C) ni en una lámina de agua alta durante la etapa reproductiva, en cambio, los genotipos Diamante-INIA y Ámbar-INIA bajaron abruptamente el índice de cosecha bajo esta condición. Sin embargo, los resultados mostraron que Harika-GS fue el genotipo más tolerante a una condición de agua fría (19°C) durante la etapa reproductiva, excepto cuando la altura de la lámina de agua fue de 5 cm, caso en que disminuyó significativamente el índice de cosecha.

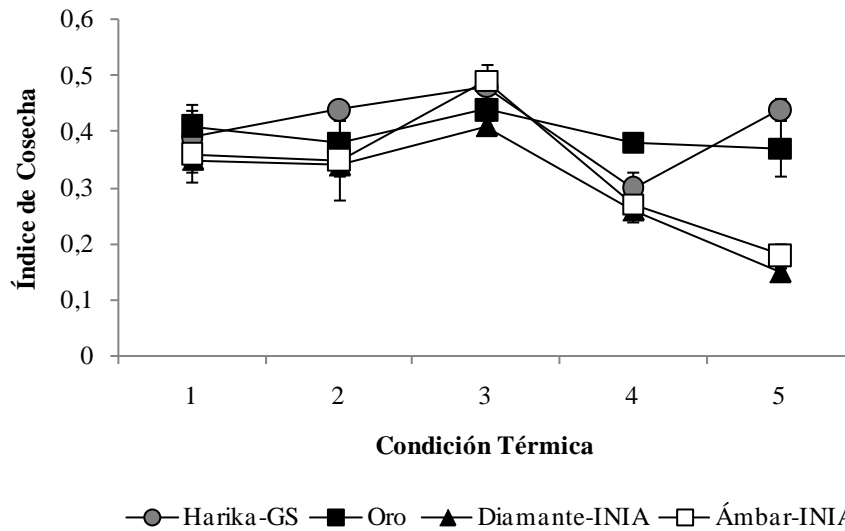


Figura 6. Efecto de la temperatura del agua sobre el índice de cosecha en cuatro variedades de arroz (Harika-GS, Oro, Diamante-INIA y Ámbar-INIA). C1= AC5/ACV/AC20/AC20; C2= AF5/AC5/AC5/AC5; C3= AF5/ACV/AC20/AC20; C4= AC5/AC5/AF5/AC5; C5= AC5/ACV/AF20/AC20. Las barras señalan el error estándar de las medias.

Determinación del efecto de la temperatura del agua sobre los componentes del rendimiento

Peso de granos (PMG)

No hubo interacción variedad x condición térmica para peso de granos (PMG). El Cuadro 8 muestra que las condiciones térmicas 1 (C1= AC5/ACV/AC20/AC20), 3 (C3=AF5/ACV/AC20/AC20) y 4 (C4= AC5/AC5/AF5/AC5) alcanzaron el mayor peso de grano y la variedad Diamante-INIA y el genotipo Harika-GS. La variedad Ámbar-INIA tuvo el menor peso entre las cuatro variedades.

Cuadro 8. Efecto de la temperatura del agua sobre el peso de 1000 granos en cuatro variedades de arroz (Harika-GS, Oro, Diamante-INIA y Ámbar-INIA). C1= AC5/ACV/AC20/AC20; C2= AF5/AC5/AC5/AC5; C3= AF5/ACV/AC20/AC20; C4= AC5/AC5/AF5/AC5; C5= AC5/ACV/AF20/AC20.

Condición térmica del agua	Peso 1000 Granos (g)				Media gral.	
	Harika-GS	Oro	Diamante-INIA	Ámbar-INIA		
C1	30,1	28,4	30,1	25,4	28,5	b ¹
C2	30,1	27,8	29,3	23,6	27,7	a
C3	31,6	29,3	31,7	23,3	29,0	b
C4	30,4	29,1	30,6	23,7	28,5	b
C5	31,3	27,8	28,8	21,7	27,4	a
Media gral.	30,7 C ²	28,5 B	30,1 C	23,5 A		
Condición térmica (C)		**				
Variedad (V)		***				
Interacción (C × V)		n.s.				
Coefficiente de variación		3,69%				

p<0,01; *p<0,001; n.s.: no significativo. ¹Medias unidas a letras minúsculas diferentes en sentido vertical indican diferencias significativas (p≤0,05) entre condiciones térmicas, según prueba LSD Fisher. ²Medias unidas a letras mayúsculas diferentes en sentido horizontal indican diferencias significativas (p≤0,05) entre variedades, según prueba LSD Fisher.

Granos por metro cuadrado (NGM)

No hubo interacción entre condición térmica y variedades para el número de granos por metro cuadrado (NGM). Los resultados revelaron que la variedad Oro y el genotipo Harika-GS mostraron el mayor NGM (Cuadro 9).

Cuadro 9. Efecto de la temperatura del agua sobre el número de granos por metro cuadrado en cuatro variedades de arroz (Harika-GS, Oro, Diamante-INIA y Ámbar-INIA). C1= AC5/ACV/AC20/AC20; C2= AF5/AC5/AC5/AC5; C3= AF5/ACV/AC20/AC20; C4= AC5/AC5/AF5/AC5; C5= AC5/ACV/AF20/AC20.

Condición térmica del agua	Número de granos por metro cuadrado				
	Harika-GS	Oro	Diamante-INIA	Ámbar-INIA	Media gral.
C1	32421	39057	33205	30827	33877
C2	31366	31528	21271	28375	28135
C3	40431	37113	25898	33855	34324
C4	22138	35084	18172	21934	24332
C5	36666	38456	14815	16304	26560
Media gral.	32604 BC ¹	36248 C	22672 A	26259 AB	
Condición térmica (C)	n.s.				
Variedad (V)	**				
Interacción (C × V)	n.s.				
Coefficiente de variación	28,2%				

**p<0,01; n.s.: no significativo. ¹Medias unidas a letras mayúsculas diferentes en sentido horizontal indican diferencias significativas (p≤0,05) entre variedades, según prueba LSD Fisher.

Porcentaje de granos vanos (PGV)

Hubo interacción entre variedad y condición térmica para porcentaje de granos vanos (PGV), (p≤0,01) (cuadro 10 y figura 7). El ranking del PGV de las variedades cambió en las diferentes condiciones térmicas. El efecto de la interacción condición térmica × variedad explicó un 35,5% de la suma de cuadrados (Apéndice VI).

Las diferencias observadas entre los tratamientos para el PGV fueron de 2,8% a 40,6%, para la variedad Ámbar-INIA, 3% a 30,6% para Diamante-INIA, 2,5% a 22,2% para Harika-GS, y de 1,6% a 3,2% para la variedad Oro (Cuadro 10).

Cuadro 10. Efecto de la temperatura del agua sobre el porcentaje de granos vanos en cuatro variedades de arroz (Harika-GS, Oro, Diamante-INIA y Ámbar-INIA). C1= AC5/ACV/AC20/AC20; C2= AF5/AC5/AC5/AC5; C3= AF5/ACV/AC20/AC20; C4= AC5/AC5/AF5/AC5; C5= AC5/ACV/AF20/AC20.

Condición térmica del agua	Porcentaje de granos vanos (%)					Media gral.
	Harika-GS	Oro	Diamante-INIA	Ámbar-INIA		
C1	5,1 bcd ¹	1,6 a	3,0 ab	4,1 abcd		3,4
C2	2,5 ab	2,9 ab	3,0 ab	11,0 de		4,8
C3	2,6 ab	2,9 ab	3,7 abc	2,8 ab		3,0
C4	22,2 ef	3,2 ab	10,0 cde	24,6 ef		15,0
C5	2,8 ab	2,7 ab	30,6 f	46,6 f		20,7
Media gral.	7,0	2,7	10,0	17,8		
Condición térmica (C)	***					
Variedad (V)	***					
Interacción (C × V)	***					
Coefficiente de variación	15,17%					

*** $p < 0,001$. ¹Medias unidas a letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre condiciones térmicas y variedades, según prueba LSD Fisher.

La Figura 7 muestra la interacción entre variedad y % PGV. Los resultados revelan que Diamante-INIA, Harika-GS y Ámbar-INIA mostraron un alto porcentaje de granos vanos en una condición de agua fría durante el período reproductivo, pero la magnitud de respuesta fue distinta de acuerdo a la altura de agua a la que fueron sometidos. El genotipo Harika-GS se vio menos afectado por la baja temperatura cuando la lámina de agua fue de 20 cm en el período reproductivo. Por otra parte, la variedad Oro mostró tolerancia a la baja temperatura del agua en las fases de desarrollo 1 y 3, etapa vegetativa temprana y etapa reproductiva respectivamente, es decir, la variedad Oro no afectó su PGV por temperatura de agua. Por el contrario, las variedades Ámbar-INIA y Diamante-INIA afectaron significativamente el PGV por efecto de la temperatura de agua.

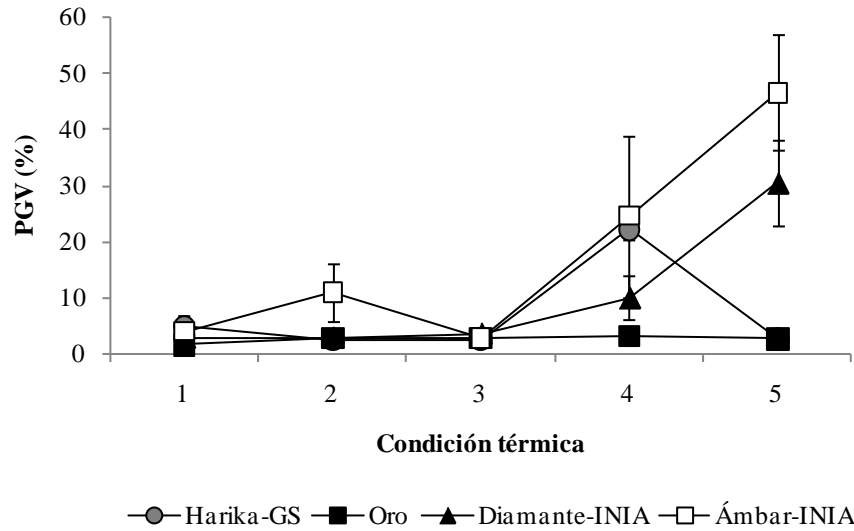


Figura 7. Efecto de la temperatura del agua sobre el porcentaje de granos vanos (PGV) en cuatro variedades de arroz (Harika-GS, Oro, Diamante-INIA y Ámbar-INIA). C1= AC5/ACV/AC20/AC20; C2= AF5/AC5/AC5/AC5; C3= AF5/ACV/AC20/AC20; C4= AC5/AC5/AF5/AC5; C5= AC5/ACV/AF20/AC20. Las barras señalan el error estándar de las medias.

Para determinar el grado de asociación del PGV con el rendimiento se realizó un análisis de correlación (Figura 8). El rendimiento mostró tener una relación bimodal con respecto a PGV, cayendo bruscamente entre 0 y 5 PGV para luego caer lentamente en la medida que PGV aumentó.

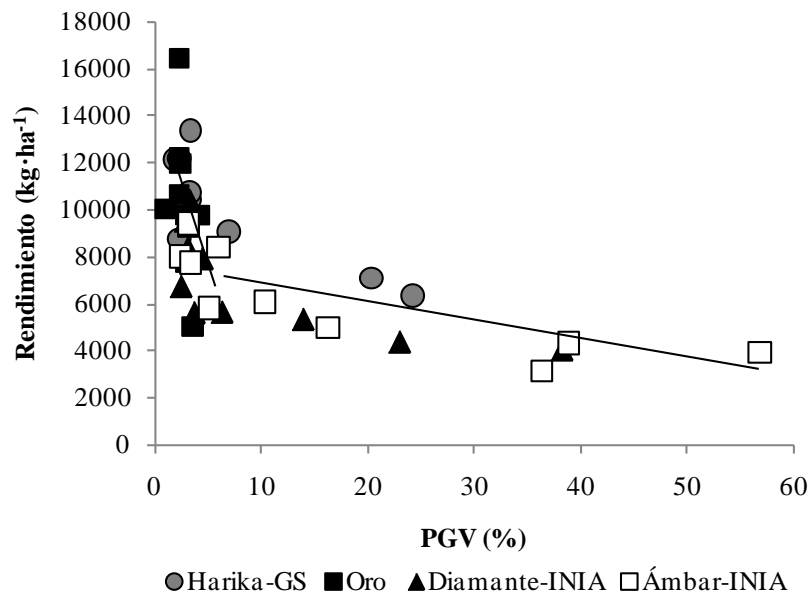


Figura 8. Relación entre el rendimiento ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) y el porcentaje de granos vanos (PGV).

La Figura 9 muestra además el grado de asociación del PGV con el número de granos por metro cuadrado (NGM). Asimismo, el NGM mostró tener una relación bimodal con respecto a PGV, cayendo bruscamente entre 0 y 7 PGV para luego caer lentamente en la medida que PGV aumentó.

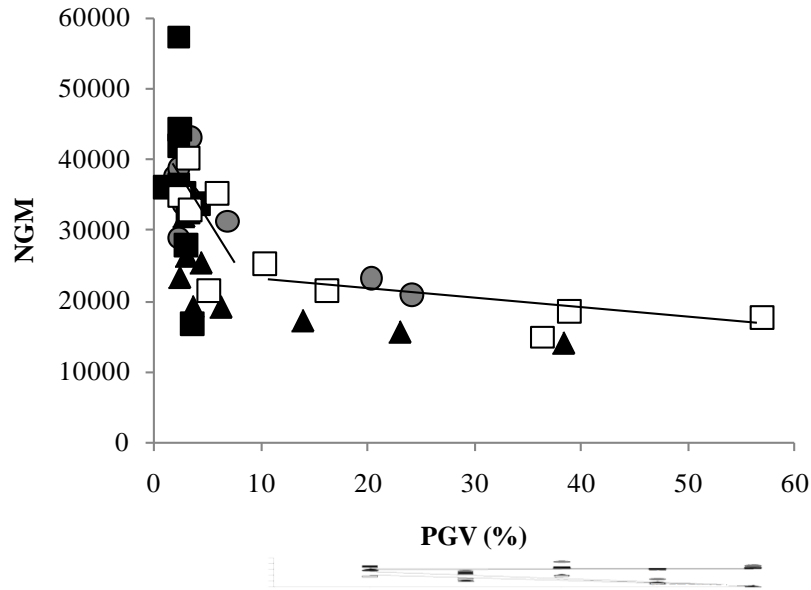


Figura 9. Relación entre el número de granos por metro cuadrado (NGM) y el porcentaje de granos vanos (PGV).

Determinación del efecto de la temperatura del agua sobre la altura de la planta

El Cuadro 12 muestra los valores medios de altura de plantas obtenidos de cada condición térmica y para cada variedad en tres oportunidades durante el ciclo de vida de las plantas: inicio de macolla (IM), inicio de panícula (IP) y maduración del grano (M).

Cuadro 12. Efecto de la temperatura del agua sobre la altura de plantas en cuatro variedades de arroz (Harika-GS, Oro, Diamante-INIA y Ámbar-INIA). C1= AC5/ACV/AC20/AC20; C2= AF5/AC5/AC5/AC5; C3= AF5/ACV/AC20/AC20; C4= AC5/AC5/AF5/AC5; C5= AC5/ACV/AF20/AC20. IM= inicio de macolla; IP= inicio de panícula; M= maduración del grano; DMS= diferencia mínima significativa.

Condición térmica del agua	Altura de plantas (cm)														
	Harika-GS			Oro			Diamante-INIA			Ámbar-INIA			Media gral.		
	IM	IP	M	IM	IP	M	IM	IP	M	IM	IP	M	IM	IP	M
C1	11,0	37,1	78,1	9,1	26,4	90,7	9,9	28,2	84,1	8,8	18,5	55,7	9,7	27,6	77,1
C2	8,3	25,1	78,0	6,8	18,9	77,9	5,8	21,2	66,6	5,9	15,7	50,7	6,7	20,2	68,3
C3	8,2	28,8	79,2	4,9	20,4	82,6	6,2	23,7	72,6	6,6	19,0	55,4	6,5	23,0	72,4
C4	8,9	28,4	68,4	9,2	22,6	78,6	9,9	24,9	70,8	8,0	16,7	46,2	9,0	23,1	66,0
C5	9,0	36,4	84,1	9,9	28,7	93,0	9,9	28,9	76,4	8,9	21,6	56,3	9,4	28,9	77,5
Media gral.	9,1	31,2	77,5	8,0	23,4	84,6	8,3	25,4	74,1	7,6	18,3	52,9			
DMS				IM	IP	M									
Condición térmica (C)				4,7	8,8	5,4									
Variedad (V)				0,7	4,9	4,5									
Interacción (C × V)				1,7	10,9	10									
Coefficiente de variación (%)				9,2	24,3	6,36									

Hubo interacción variedad x condición térmica para altura de planta a inicio de macolla, ($p \leq 0,05$) (Figura 10). El efecto de la interacción Condición térmica × Variedad explicó un 17,5% de la suma de cuadrados (Apéndice VII).

La Figura 10 muestra la interacción variedad × condición térmica a inicio de macolla. Los genotipos disminuyeron el crecimiento cuando fueron sometidos a baja temperatura del agua hasta inicio de macolla. El genotipo Harika-GS afecto en menor grado su crecimiento con respecto al de los otros genotipos.

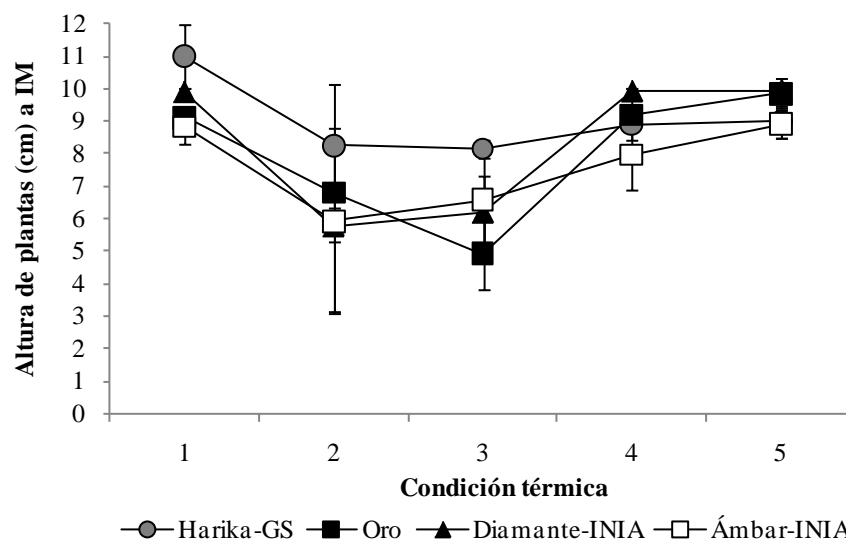


Figura 10. Efecto de la temperatura del agua sobre la altura de plantas hasta inicio de macolla (IM) en cuatro variedades de arroz (Harika-GS, Oro, Diamante-INIA y Ámbar-INIA). C1= AC5/ACV/AC20/AC20; C2= AF5/AC5/AC5/AC5; C3= AF5/ACV/AC20/AC20; C4= AC5/AC5/AF5/AC5; C5= AC5/ACV/AF20/AC20. Las barras señalan el error estándar de las medias.

Los resultados muestran diferencias altamente significativas para la altura de las variedades. Harika-GS tuvo la mayor altura a IP, en cambio, la variedad Ámbar-INIA tuvo la menor. La mayor altura de los genotipos ocurrió en las condiciones 1 (C1= AC5/ACV/AC20/AC20) y 5 (C5= AC5/ACV/AF20/AC20).

A madurez (M), tampoco hubo interacción variedad x condición térmica para la altura de plantas. Oro fue la variedad que mostró la mayor altura (0,85 m). Asimismo, la variedad Ámbar-INIA fue la variedad que tuvo menor altura de plantas (0,53 m). Las condiciones térmicas 1 (C1= AC5/ACV/AC20/AC20), 3 (C3= AF5/ACV/AC20/AC20) y 5 (C5= AC5/ACV/AF20/AC20) tuvieron la mayor altura a cosecha.

Determinación del efecto de la temperatura del agua sobre el crecimiento de los genotipos de arroz

A partir de los datos de área foliar y peso seco obtenidos en tres oportunidades durante el ciclo de la planta, se calculó la tasa de crecimiento relativo (TCR, $\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$) y la tasa de asimilación neta (TAN, $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) en dos períodos de importancia durante el ciclo de vida del cultivo (Hunt *et al.*, 2002). El primer período (P1) corresponde al comprendido desde inicio de macolla hasta inicio de panícula, y el segundo período (P2) abarca desde inicio de panícula hasta el estado de maduración del grano.

Tasa de Crecimiento Relativo (TCR)

El Cuadro 14 da los valores medios de la tasa de crecimiento relativo (TCR) obtenidos de cada condición térmica y variedad para dos períodos de importancia durante el ciclo de vida de la planta. En general, la TCR tendió a disminuir en la medida que las plantas fueron cumpliendo el ciclo de desarrollo. El primer período (P1), alcanzó una mayor TCR con respecto al segundo período (P2). No hubo efecto de las condiciones térmicas sobre el comportamiento de las variedades para TCR en el primer período de crecimiento (P1). Los resultados revelaron que la condición térmica de agua 1 (C1= AC5/ACV/AC20/AC20) tuvo menor TCR que las condiciones 2 (C2= AF5/AC5/AC5/AC5) y 3 (AF5/ACV/AC20/AC20) que tuvieron mayores tasas de crecimiento.

Cuadro 14. Efecto de la temperatura del agua sobre la tasa de crecimiento relativo en cuatro variedades de arroz (Harika-GS, Oro, Diamante-INIA y Ámbar-INIA). C1= AC5/ACV/AC20/AC20; C2= AF5/AC5/AC5/AC5; C3= AF5/ACV/AC20/AC20; C4= AC5/AC5/AF5/AC5; C5= AC5/ACV/AF20/AC20. P1= Período 1, desde inicio de macolla hasta inicio de panícula. P2= Período 2, desde inicio de panícula hasta la maduración. DMS= diferencia mínima significativa.

Condición térmica del agua	Tasa de Crecimiento Relativo (g·g ⁻¹ ·d ⁻¹)									
	Harika-GS		Oro		Diamante- INIA		Ámbar- INIA		Media gral.	
	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2
C1	0,037	0,016	0,039	0,028	0,044	0,018	0,032	0,022	0,038	0,021
C2	0,084	0,015	0,086	0,019	0,092	0,015	0,089	0,008	0,088	0,014
C3	0,082	0,013	0,090	0,016	0,075	0,015	0,075	0,012	0,081	0,014
C4	0,050	0,019	0,075	0,010	0,059	0,013	0,062	0,014	0,062	0,014
C5	0,059	0,006	0,068	0,015	0,029	0,015	0,049	0,013	0,051	0,012
Media gral.	0,062	0,014	0,072	0,018	0,060	0,015	0,061	0,014		
DMS				P1	P2					
Condición térmica (C)				0,029	0,001					
Variedad (V)				0,009	0,002					
Interacción (C × V)				0,021	0,005					
Coefficiente de variación (%)				15,25	16,42					

Hubo interacción variedad × condición térmica para TCR registrada durante el segundo período de crecimiento (P2), comprendido desde inicio de panícula hasta la maduración del grano, ($p \leq 0,05$). El efecto de la interacción condición térmica × variedad explicó un 44,98% de la suma de cuadrados (Apéndice VIII) y se presenta en la Figura 11.

Los genotipos Oro y Ámbar-INIA modificaron su respuesta fenotípica (cambian de

ranking) en las distintas condiciones térmicas, pues ambos disminuyeron la TCR tras la exposición al agua fría. Por otra parte, Diamante-INIA fue relativamente insensible a los cambios de temperatura de agua.

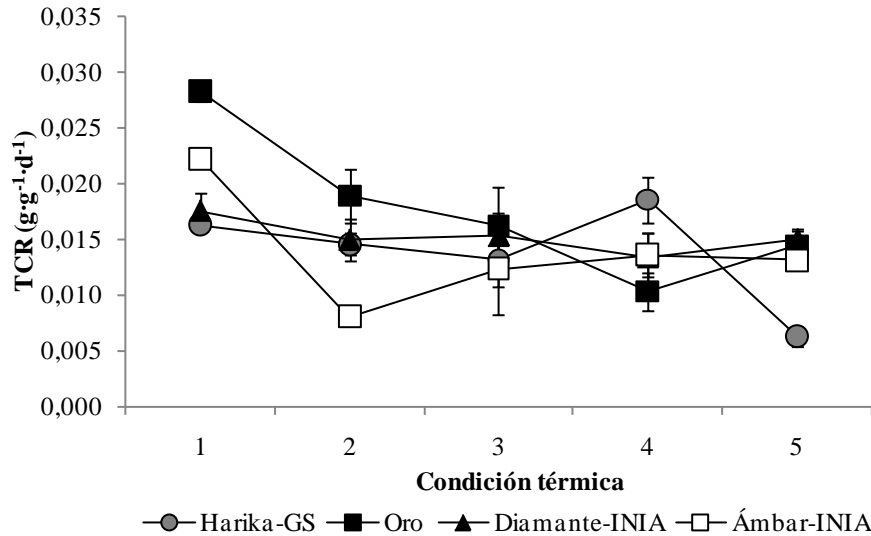


Figura 11. Efecto de la temperatura del agua sobre la tasa de crecimiento relativo (TCR) desde inicio de panícula en cuatro variedades de arroz (Harika-GS, Oro, Diamante-INIA y Ámbar-INIA). C1= AC5/ACV/AC20/AC20; C2= AF5/AC5/AC5/AC5; C3= AF5/ACV/AC20/AC20; C4= AC5/AC5/AF5/AC5; C5= AC5/ACV/AF20/AC20. Las barras señalan el error estándar de las medias.

Tasa de Asimilación Neta (TAN)

El Cuadro 15 muestra los valores medios de la tasa de asimilación neta (TAN) para cada tratamiento en dos períodos durante el ciclo de vida de la planta. La TAN disminuyó conforme avanzó el crecimiento, es decir, el primer período de crecimiento (P1) mostró una mayor TAN con respecto al segundo período (P2). Hubo interacción condición térmica \times variedad que explicó un 18% de la suma de cuadrados (Apéndice IX).

Cuadro 15. Efecto de la temperatura del agua sobre la tasa de asimilación neta en cuatro variedades de arroz (Harika-GS, Oro, Diamante-INIA y Ámbar-INIA). C1= AC5/ACV/AC20/AC20; C2= AF5/AC5/AC5/AC5; C3= AF5/ACV/AC20/AC20; C4= AC5/AC5/AF5/AC5; C5= AC5/ACV/AF20/AC20. P1= Período 1, desde inicio de macolla hasta inicio de panícula. P2= Período 2, desde inicio de panícula hasta la maduración. DMS= diferencia mínima significativa.

Condición térmica del agua	Tasa de Asimilación Neta (g·m ⁻² ·d ⁻¹)									
	Harika-GS		Oro		Diamante-INIA		Ámbar-INIA		Media gral.	
	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2
C1	2,94	6,17	3,23	8,78	3,89	5,87	3,19	8,13	3,31	7,24
C2	8,68	4,50	7,77	5,87	9,87	5,03	9,31	2,26	8,91	4,42
C3	7,58	4,50	9,38	5,68	7,53	5,84	7,20	4,31	7,92	5,08
C4	4,46	5,78	7,43	3,23	7,71	4,68	8,10	6,07	6,93	4,94
C5	4,25	1,76	6,26	4,80	1,53	2,42	4,57	3,56	4,15	3,13
Media gral.	5,58	4,54	6,81	5,67	6,10	4,77	6,47	4,86		
DMS					P1	P2				
Condición térmica (C)					3,22	1,58				
Variedad (V)					1,01	1,41				
Interacción (C × V)					2,25	3,16				
Coefficiente de variación (%)					16,58	29,21				

La Figura 12 muestra la interacción condición térmica × variedad para TAN en P1. En la condición térmica 5 (C5= AC5/ACV/AF20/AC20) la variedad Oro obtuvo la mayor TAN, en cambio, Diamante-INIA disminuyó significativamente su actividad fotosintética. No obstante, no es posible atribuir estas diferencias al efecto de la baja temperatura de agua durante el período mencionado.

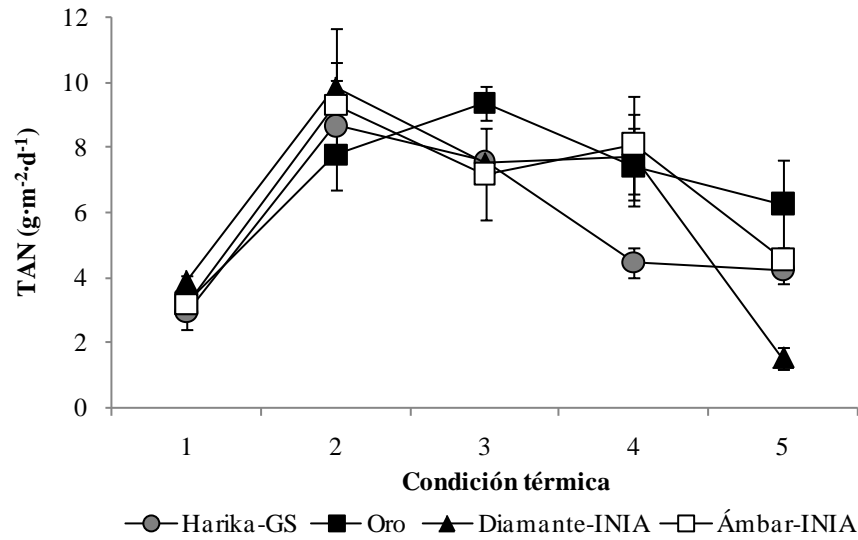


Figura 12. Efecto de la temperatura del agua sobre la tasa de asimilación neta (TAN) hasta inicio de panícula en cuatro variedades de arroz (Harika-GS, Oro, Diamante-INIA y Ámbar-INIA). C1= AC5/ACV/AC20/AC20; C2= AF5/AC5/AC5/AC5; C3= AF5/ACV/AC20/AC20; C4= AC5/AC5/AF5/AC5; C5= AC5/ACV/AF20/AC20. Las barras señalan el error estándar de las medias.

No hubo interacción condición térmica \times variedad sobre la TAN para el segundo período de crecimiento (P2). Los resultados muestran que la condición térmica de agua 1 (C1= AC5/ACV/AC20/AC20) tuvo la mayor TAN, en contraste con la condición térmica de agua 5 (C5= AC5/ACV/AF20/AC20) que tuvo la menor tasa. Las condiciones térmicas de agua 2 (C2= AF5/AC5/AC5/AC5), 3 (C3= AF5/ACV/AC20/AC20) y 4 (C4= AC5/AC5/AF5/AC5) fueron estadísticamente iguales.

DISCUSIÓN

Es común usar agua fría para determinar la respuesta de los diferentes genotipos de arroz a la baja temperatura en diferentes etapas de crecimiento (IRRI, 1979), observándose que el efecto de la temperatura del agua es diferente de acuerdo al estado fenológico del arroz (IRRI, 1976). La temperatura media óptima para la maduración de las variedades japónicas es de 20°C a 22°C (Aimi *et al.*, 1959; Matsushima *et al.*, 1957; Matsushima y Tsunoda, 1958). Temperaturas bajas, menores a 20°C, provocan la aparición de distintas alteraciones en el cultivo (Sthapit *et al.*, 1996), como crecimiento anormal o daños en las distintas partes de la planta, lo que depende del estado de desarrollo del arroz y la duración e intensidad del período de frío (Shibata, 1979; Tinarelli, 1989; Sthapit *et al.*, 1996).

Determinación del efecto de la temperatura del agua sobre el rendimiento, biomasa e índice de cosecha

Rendimiento

En este estudio la interacción condición térmica x variedad en rendimiento no fue significativa, lo que indica que el rendimiento de las cuatro variedades estudiadas respondió de igual forma a los tratamientos de baja temperatura. Sin embargo, se observó una tendencia diferente en la respuesta de las variedades con respecto a la condición térmica de agua.

Estudios realizados por Shimono *et al.* (2002) revelaron que el rendimiento es afectado por la temperatura del agua durante todas las etapas de crecimiento, pero la magnitud de la pérdida de rendimiento varió considerablemente de acuerdo a la etapa fenológica (Roel *et al.*, 2005). Actualmente, los cultivares en uso en Chile, Diamante-INIA, Oro y Ámbar-INIA son considerados materiales tolerantes al frío en la etapa de germinación, sin embargo, en años fríos durante el período reproductivo, pueden presentar pérdidas significativas de rendimiento, lo que los hace muy poco estables en términos de rendimiento (Aresti, 2008). Las variedades Ámbar-INIA y Diamante-INIA mostraron una baja estabilidad con respecto a la temperatura del agua durante el período reproductivo (Figura 7). Ensayos realizados por Alvarado y Hernaíz (2005) durante seis temporadas muestran que en cuatro de ellas no hubo diferencias significativas en el rendimiento de las variedades. Sin embargo, se han registrado claras diferencias en rendimiento asociadas a diferencias en esterilidad floral durante años fríos entre ambas variedades (Aresti, 2008).

Los resultados muestran que no hubo efecto de las variedades en rendimiento a baja temperaturas, cuando fueron sometidas a una condición de agua fría durante etapas tempranas del período vegetativo (fase 1). Bajo esta condición las pérdidas de rendimiento

fueron estimadas en 21,4%. De igual forma, Shimono *et al.* (2002) informó pérdidas de rendimiento del orden de un 20% cuando genotipos de arroz fueron sometidos a agua fría (19,3°C) en la etapa vegetativa. Sin embargo, hubo una disminución relevante y de diversa magnitud del rendimiento de grano cuando los genotipos fueron sometidos a agua fría durante el período reproductivo (fase 3). Las pérdidas de rendimiento para las cuatro variedades fueron del orden de 24,5% a 30%. Shimono *et al.* (2002) observaron una disminución significativa en el rendimiento (58%) tras la aplicación de agua a una temperatura promedio de 19,3°C sobre diversos cultivares de arroz durante el período reproductivo. Por otra parte, estudios realizados en Chile durante la temporada 2004 – 2005, revelaron que las bajas temperaturas durante la etapa de formación de polen y floración causaron pérdidas de rendimiento en varias localidades, con una pérdida media estimada de 30% (Ortega, 2006, Farrell *et al.*, 2001).

El genotipo Harika-GS fue susceptible a baja temperatura del agua durante el período reproductivo, especialmente cuando la altura de la lámina de agua fue baja (5 cm), mostrando una disminución importante del rendimiento de grano (50%). Los resultados revelaron que el genotipo se vio afectado más por la altura de la lámina de agua que por la temperatura del agua. Diferentes estudios señalan que cuando la temperatura del aire es suficientemente baja como para dañar el cultivo de arroz en inicio de panícula o a inicio de bota, una lámina de agua de 15-20 cm es una manera eficaz de proteger la formación de la panícula e incrementar la tasa de llenado de grano (Nishiyama *et al.*, 1969; Tinarelli, 1989; Fukai and Basnayake, 2001), con ello se puede generar un aumento de hasta 7°C en la temperatura de la panícula en una noche fría (Williams y Angus, 1994). Incluso, una lámina de agua de 20 cm durante la etapa reproductiva puede incrementar el rendimiento de grano en un 10% y 14% comparado con arroz cultivado en aguas menos profundas (Lee, 2001).

Biomasa

No hubo interacción condición térmica x variedad para biomasa por lo que las cuatro variedades respondieron de la misma forma a la temperatura de agua de las condiciones térmicas. Sin embargo, el estudio mostró diferencias significativas para la biomasa aérea total de las variedades. La variedad Ámbar-INIA tuvo menor biomasa con respecto al resto de los genotipos. Es posible que esta diferencia esté asociada a la menor altura de planta, pues corresponde a una variedad del tipo semienana.

Índice de Cosecha

Hubo diferencias en la respuesta de los genotipos a la baja temperatura del agua durante el período reproductivo para el índice de cosecha. Sin embargo, no hubo la misma respuesta cuando los genotipos fueron sometidos a estrés durante etapas tempranas del período vegetativo, por lo que la interacción variedad × condición térmica fue significativa para este parámetro.

Igualmente, el estudio mostró que la baja temperatura del agua genera una disminución del índice de cosecha, pero los efectos varían entre genotipos. Hubo efecto de la temperatura del agua sobre el comportamiento de las variedades Ámbar-INIA y Diamante-INIA, pues disminuyeron significativamente el índice de cosecha tras la aplicación de agua fría (19°C) con una altura de 20 cm durante la etapa reproductiva. Por el contrario, no hubo efecto de la baja temperatura sobre el índice de cosecha de los genotipos Oro y Harika-GS. Estudios realizados por Farrell et al. (2001) muestran que bajas temperaturas reducen el índice de cosecha en diversa magnitud según la tolerancia de los genotipos a las bajas temperaturas. Satake (1969) estimó que las temperaturas críticas para cultivares de arroz tolerantes son del orden de 15° a 17°C y de 17° a 19°C para cultivares susceptibles. La temperatura del agua (19°C) a la que fueron sometidas las variedades Ámbar-INIA y Diamante-INIA fue suficiente para afectar su índice de cosecha.

Por otra parte, diferentes autores señalan que el efecto de la temperatura del agua es determinado por la temperatura y la altura de la lámina de agua aplicada (Nishiyama et al., 1969). Otros autores además, señalan que los efectos de las bajas temperaturas sobre los genotipos de arroz varían de acuerdo a la variedad, el estado fisiológico de la planta y el tiempo de exposición a la baja temperatura (Yoshida, 1981; Nishiyama, 1985). Los genotipos con tolerancia a la baja temperatura (Oro y Harika-GS) manifestaron una mejor respuesta al agua fría cuando la altura de la lámina fue alta (20 cm) durante el período reproductivo. Por el contrario, los genotipos susceptibles (Ámbar-INIA y Diamante-INIA) tuvieron un mayor índice de cosecha cuando la lámina de agua fue baja (5 cm). Este comportamiento se explica pues la lámina de agua solo ejerció un efecto tampón hasta que los puntos de crecimiento de los genotipos superaron los 5 cm de altura. Ante esta condición, las variedades de madurez tardía (Ámbar-INIA y Diamante-INIA) estuvieron protegidas por la lámina de agua cuando hubo temperaturas críticas, por el contrario, los genotipos de madurez temprana (Oro y Harika-GS) fueron sometidos a la baja temperatura del aire durante el período reproductivo (bajas temperaturas nocturnas), lo que generó una disminución en la tasa de llenado de grano, y por consiguiente en el índice de cosecha. Sin embargo, cuando Ámbar-INIA y Diamante-INIA fueron sometidas a una lámina de agua alta (20 cm) durante el mismo período disminuyeron considerablemente el índice de cosecha, pues el tiempo de exposición al agua fría de la panícula en formación para las variedades mencionadas fue mayor considerando el menor crecimiento y desarrollo de plantas con respecto al resto de los genotipos. Por tanto, sí la temperatura de agua es lo suficientemente baja, las variedades con un ciclo de vida más largo incrementan el tiempo de exposición en que son sometidas a los efectos de las bajas temperaturas durante las etapas sensibles a daños.

Determinación del efecto de la temperatura del agua sobre los componentes del rendimiento

Peso de granos (PMG)

El peso de los mil granos se determina durante el período de llenado de granos y cuando la translocación de almidón es normal el grano alcanza su máximo desarrollo. Para que esto ocurra se requieren condiciones favorables durante los últimos 45 días antes de la cosecha (CIAT, 1986). Sin embargo, los resultados mostraron que el peso de los granos fue ligeramente menor a los valores publicados por Alvarado (2007) para las variedades cultivadas en Chile. Pese a lo indicado, no hubo efecto de las bajas temperaturas sobre el peso de los granos, de modo que otros factores determinaron su peso. No obstante, se han mencionado ligeras reducciones sobre el peso de los granos por efecto de la aplicación de agua fría sobre plantas de arroz durante el período reproductivo (Shimono *et al.*, 2002), pero rara vez las condiciones se hacen limitantes e influyen en el rendimiento de grano (Yoshida, 1981).

Granos por metro cuadrado (NGM)

No hubo respuesta de los genotipos a las condiciones térmicas sobre el número de granos por metro cuadrado (NGM). No obstante, estudios señalan que el NGM está fuertemente influenciado por la temperatura durante el período reproductivo (Yoshida, 1981). En experimentos de campo realizados por el IRRI (1986) se ha determinado que la variación en el rendimiento de grano se puede atribuir a la variación en el número de granos por metro cuadrado en un 60,2%, pero en algunas zonas productoras y bajo ciertas condiciones climáticas, como las que ocurren en Chile, el porcentaje de granos llenos puede ser más limitante para el rendimiento que el NGM.

Porcentaje de granos vanos (PGV)

El porcentaje de granos vanos (PGV) es un indicador del grado de esterilidad floral a causa de bajas temperaturas. De modo que es posible asociar el PGV con el grado de esterilidad obtenido a causa del frío al que fueron sometidos los genotipos en las etapas susceptibles.

La respuesta de los genotipos a las bajas temperaturas durante el período reproductivo fue altamente significativa para el PGV, es decir, hay diferencias genotípicas a la tolerancia a bajas temperaturas para el PGV. De igual forma, se han reportado diferencias genotípicas a la tolerancia a bajas temperaturas para inducir esterilidad durante el período reproductivo (Sasaki and Wada, 1973; Board and Peterson, 1980; Matsuo *et al.*, 1995; Farrell *et al.*, 2006).

Se observaron diferencias en la magnitud de respuesta de los genotipos de acuerdo a la altura de la lámina aplicada, especialmente durante en el período reproductivo. Existe un efecto genotípico a los 5 cm de altura de la lámina de agua, ya que los genotipos Harika y Ámbar tuvieron mayor grado de esterilidad, mientras que Oro y Diamante permanecieron en rangos relativamente estables y normales. En Chile se consideran valores normales del orden de 10% a 12% de esterilidad floral (Alvarado, 2007). También hubo un efecto genotípico a los 20 cm de altura de lámina de agua, pues los genotipos Ámbar-INIA y Diamante-INIA tuvieron un alto grado de esterilidad, incluso superior al obtenido con menor altura de agua, por el contrario, los genotipos Harika y Oro se mantuvieron estables bajo dicha condición.

El genotipo Harika-GS mostró grandes diferencias en la respuesta a la baja temperatura de acuerdo a la altura de lámina de agua aplicada, pues manifestó una alta producción de granos vanos cuando fue sometido a agua fría a baja altura (5 cm). Esto significa que la esterilidad para este genotipo varió con la altura de la lámina de agua, y ésta fue significativamente menor a los 20 cm de altura que a los 5 cm. Es posible que la panícula durante su formación estuviera protegida de las bajas temperaturas bajo la lámina de agua (20 cm) resultando en una disminución significativa de la esterilidad (Sakai, 1949). Estudios realizados por Board *et al.* (1980) señalan que el aumento del nivel de agua (15 – 20 cm) pone a la panícula en formación más cerca de la línea de agua donde la temperatura es más cálida durante la etapa de formación del polen. Por ello, el mayor nivel de agua es utilizado en zonas climáticas donde la temperatura del aire es baja para el desarrollo de la panícula (Satake *et al.*, 1988), específicamente bajas temperaturas nocturnas, tal como ocurre en las zonas arroceras de Chile. Además, hay evidencia que las bajas temperaturas nocturnas que ocurren durante el período reproductivo, son consideradas más críticas para inducir esterilidad que las temperaturas diurnas (Satake, 1976).

Hubo diferencias en la respuesta de los genotipos Ámbar-INIA y Diamante-INIA, en relación a publicaciones realizadas por Alvarado y Hernaíz (2005). Éstos autores informaron que Ámbar-INIA y Diamante-INIA son cultivares tolerantes al frío, sin embargo, los resultados de este estudio indican que existe un alto grado de susceptibilidad a las bajas temperaturas para las variedades mencionadas. Se consideran temperaturas críticas para inducir esterilidad aquellas comprendidas entre 17°C – 19°C en cultivares susceptibles (Satake, 1969), valores de temperatura de agua similares a las que fueron sometidas las variedades en este estudio y suficiente para inducir esterilidad floral por sobre una media de un 50% (Farrel *et al.*, 2006). La diferencia en la magnitud de respuesta con respecto a otros estudios puede deberse a la variabilidad de la temperatura de agua que existe dentro de los cuadros de arroz en el campo (Roel *et al.*, 2005), lo que lleva a resultados que no representan la realidad. Además, es posible que en Chile la temperatura de agua a la que fueron sometidos los genotipos de arroz en el campo no fueran suficientemente bajas para demostrar la susceptibilidad de las variedades en cuestión.

Se ha informado que Ámbar-INIA tiene menor grado de esterilidad floral que Diamante-INIA en condiciones de campo, asociado a que el cultivar posee menor altura y

probablemente la panícula en formación se encuentra protegida bajo el agua (Alvarado y Hernaíz, 2005). Sin embargo, este estudio reveló que Ámbar-INIA fue el genotipo más susceptible a condiciones de bajas temperaturas para inducir esterilidad durante el período reproductivo. No obstante, es posible que esta diferencia se deba a que la lámina de agua aplicada durante el período reproductivo fue muy fría, aún cuando la altura de la lámina de agua fue la adecuada (Tinarelli, 1989; Aresti, 2008). Gunawardena *et al.* (2003) recientemente señalaron que la temperatura de la panícula y de las raíces son factores importantes que determinan el grado de esterilidad floral. Además, es importante mencionar que Ámbar-INIA corresponde a un cultivar de madurez tardía, lo que generó un mayor tiempo de exposición al agua fría de la panícula en formación y las raíces con respecto al resto de los genotipos, determinando una alta producción de granos vanos, traducido finalmente en un alto porcentaje de esterilidad. Se ha señalado que el tiempo de exposición a baja temperatura del agua es más importante que su magnitud (Roel *et al.*, 2005) y el efecto es significativamente mayor si la exposición ocurre durante el período reproductivo, pues éste corresponde al momento en que las plantas de arroz son más sensibles a bajas temperaturas (Lee, 2001). Asimismo, Diamante-INIA si bien también es un cultivar de madurez tardía, fenotípicamente posee un mayor crecimiento en altura, lo que disminuyó los efectos de la baja temperatura del agua. Sin embargo, este estudio manifestó que no existe tolerancia a una condición de baja temperatura del agua para las variedades Ámbar-INIA y Diamante-INIA.

Es conocido que la baja temperatura del aire y/o del agua (<20°C) desde inicio de panícula causa severas disminuciones en el rendimiento de grano debido al aumento de la esterilidad de las espiguillas (IRRI, 1979). De igual forma, este estudio señaló que existe una relación negativa entre el grado de esterilidad y el rendimiento de grano obtenido a cosecha. En Chile se ha demostrado que la probabilidad de observar pérdidas de rendimiento por esterilidad floral es particularmente alta en las condiciones de clima en que se cultiva arroz, pues las temperaturas son consideradas extremas para el cultivo (Aresti, 2008). Es preciso identificar y conocer las diversas variedades de arroz, con sus características fisiológicas y su comportamiento frente a las condiciones climáticas de la región, ya que se puede presentar tolerancia en algunos genotipos en condiciones de bajas temperaturas (Kim *et al.*, 2008). Este estudio reveló que la variedad Oro presenta un comportamiento relativamente estable a condiciones críticas de temperatura de agua, por lo que puede ser considerada tolerante a las condiciones de bajas temperaturas que hay en el país.

Determinación del efecto de la temperatura del agua sobre la altura de la planta

La baja temperatura del agua afectó significativamente el crecimiento en altura de las plantas hasta el inicio de panícula, pues los puntos de crecimiento de los cuatro genotipos estudiados estuvieron bajo el agua durante el período mencionado. Cuando los genotipos fueron expuestos a agua fría durante el período reproductivo el efecto de la baja temperatura del agua sobre el crecimiento en altura de las plantas disminuyó

significativamente, pues la temperatura del aire controló el crecimiento de las panículas y el llenado de los granos (Tsunoda y Matsushima 1962, Matsushima *et al.*, 1964b).

Harika-GS fue el genotipo que menos afectó su crecimiento en altura durante el período comprendido entre la emergencia de las plantas e inicio de macolla, y además el más estable con respecto al resto de los genotipos, en cuanto a los efectos de la baja temperatura del agua sobre el crecimiento en altura de las plantas.

Determinación del efecto de la temperatura del agua sobre el crecimiento de los genotipos de arroz

La respuesta de los genotipos a los cambios de temperatura de agua sobre la tasa de crecimiento relativo (TCR) fue diferente durante el período comprendido desde inicio de panícula hasta la maduración (P2). Estadísticamente las diferencias fueron relevantes bajo la condición térmica 1 (C1= AC5/ACV/AC20/AC20) y 2 (C2= AF5/AC5/AC5/AC5), y ante esta última condición de agua, los genotipos Ámbar-INIA y Oro manifestaron una disminución en la TCR. No obstante, la condición térmica 2 tuvo el mismo efecto térmico que la condición térmica 3 (C3= AF5/ACV/AC20/AC20) durante la fase vegetativa temprana, y esta última no presentó diferencias en la respuesta en el período analizado (P2), por lo que no es posible atribuir las diferencias registradas a los efectos de la baja temperatura del agua. La respuesta al agua fría no fue distinta a la de aquellos genotipos que fueron relativamente insensibles a los cambios de temperatura del agua. Los cambios de temperatura tienen un impacto inmediato en la TCR a través de cambios en la tasa de asimilación neta (TAN) (Forward, 1960; Berry and Björkman, 1980; Atkin *et al.*, 2006), y este índice no manifestó cambios relevantes en el ranking de los genotipos para las diferentes condiciones térmicas. Por tanto, los índices fisiológicos (TCR y TAN) indican que no hay diferencias genotípicas sobre el crecimiento de las plantas de arroz a las bajas temperaturas.

CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados de la presente investigación es posible concluir lo siguiente:

En Chile no hay suficiente evidencia científica que respalde acerca de los efectos a las bajas temperaturas sobre el rendimiento de las variedades de arroz actualmente cultivadas. En este estudio la interacción condición térmica x variedad en rendimiento no fue significativa. Sin embargo, se observó una tendencia diferente en la respuesta de las variedades con respecto a la condición térmica de agua. Las variedades Ámbar-INIA y Diamante-INIA mostraron una baja estabilidad de rendimiento con respecto a la temperatura del agua por lo que fueron susceptibles a baja temperatura.

Los índices fisiológicos (TCR y TAN) indican que no hay diferencias genotípicas a los efectos de las bajas temperaturas sobre el crecimiento de las plantas de arroz.

El efecto de las bajas temperaturas sobre los genotipos de arroz varía de acuerdo a la etapa de crecimiento y desarrollo. El período reproductivo (fase 3) se evidencia como la etapa más susceptible a daños por baja temperatura.

Hay diferencias genotípicas a la tolerancia a bajas temperaturas para inducir esterilidad durante el período reproductivo sobre el material genético estudiado. El PGV es el componente que afecta la capacidad de rendimiento de las variedades susceptibles a los efectos de las bajas temperaturas.

La variedad Oro presenta un comportamiento relativamente estable a condiciones críticas de temperatura de agua, por lo que puede ser considerada tolerante a las condiciones de bajas temperaturas que se presentan en el país.

BIBLIOGRAFÍA

AIMI, R., SAWAMURA H. and KONNO S. 1959. Physiological studies on the mechanism of ripening of crop plants. The effect of the temperature upon the behaviour of carbohydrates and some related enzymes during the ripening of rice plant. (In Japanese, with English abstract.) *Jpn. J. Crop. Sci.* 27:405–407.

ALVARADO, R., 1999. Influence of air temperature on rice population length of period from sowing to flowering and spikelet sterility. Póster. In: 2nd Temperate Rice Conference, Sacramento, California, USA. 13-17 June. University of California, Davis, California, USA.

ALVARADO, R. 2007. Arroz. Manejo tecnológico, Chillán, Chile, INIA, Boletín INIA N° 162. 180 p.

ALVARADO, R. y CASTILLO, D. 2002. Caracterización de germoplasma de arroz para tolerancia a frío en la etapa de germinación. *Agricultura Técnica (Chile)* 62(4):596-605.

ALVARADO, R. y HERNAÍZ S. 2005. Ámbar-INIA, nuevo cultivar de arroz de grano corto y muy bajo contenido de amilasa. *Agricultura Técnica (Chile)* 65(1):101-104.

ALVARADO, R. y CORDERO, K. 2007. El arroz empieza a cambiar. Con una mirada puesta en la exportación. INIA Tierra Adentro (74 mayo/junio). p. 16 – 18. Disponible en <http://www.inia.cl/medios/quilamapu/pdf/tadentro/TA74MJA207.pdf> Visitado el 8 de Octubre del 2008.

ARESTI, M. 2008. Diseño y evaluación de un sistema de análisis de imágenes para la determinación de granos de polen viables en el cultivo de arroz. Memoria para optar al Título de Ingeniero Comercial, Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Industrias. Santiago, Chile. 87p.

ATKIN, O.K., SCHEURWATER, I. and PONS, T.L. 2006. High thermal acclimation potential of both photosynthesis and respiration in two lowland *Plantago* species in contrast to an alpine congeneric. *Global Change Biology*, 12(3):500-515.

BERRY, J.A. and BJÖRKMAN O. 1980. Photosynthetic response and adaptation to temperature in higher plants. *Annual Review of Plant Physiology* 31:491–543.

BOARD, J. E. and PETERSON, M. L. 1980. Management decisions can reduce blanking in rice. *California Agriculture* 34(11):5-7.

BOARD, J. E., PETERSON, M. L. and NG, E. 1980. Floret sterility in rice in a cool environment. *Agronomy Journal* 72(3):483-487.

CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 1986. Componentes del rendimiento en arroz; Guía de Estudio. Contenido Científico: International Rice Research Institute. Traducción y adaptación: Oscar Arregocés. Cali, Colombia. CIAT. 19 p.

CIREN – CORFO. 1996. Estudio Agrológico Región Metropolitana. Descripción de suelos, materiales y símbolos. Centro de Información de Recursos Naturales, CORFO. Región Metropolitana, Chile. Publicación N° 115. Tomos 1 y 2. 464 p.

CORDERO, L. K. 2008. Arroz glutinoso: Una alternativa para la exportación de arroz chileno. Informativo agropecuario Bioleche - INIA Quilamapu. 168:18-20. Disponible en <http://www.inia.cl/link.cgi/Quilamapu/Documentos/Articulos/bioleche/2008/2913>. Visitado el 3 de septiembre del 2008.

FARRELL, T.C., FOX, K.M., WILLIAMS, R.L., FUKAI, S., REINKE, R.F. and LEWIN, L.G. 2001. Temperature constraints to rice production Australia and Laos: a shared problem. *In*: Fukai, S., Basnayake, J. (Eds.), Proceedings of an International Workshop/ACIAR Proceedings No. 101 Australia Centre for International Agricultural Research on Increased Lowland Rice Production in the Mekong Region, Vientiane, Laos, 30 October–2 November 2000, Canberra, ACT, Australia.

FARRELL, T. C., FOX K.M., WILLIAMS R. and FUKAI S. 2004. Australia: new screening method for cold tolerance during the reproductive stage in rice. *In*: T. Fischer, New Directions for a Diverse Planet: Proceedings for the 4th International Crop Science Congress. 4th International Crop Science Congress, Brisbane, Convention Centre, (1-5). 26 September - 1 October 2004.

FARRELL T.C., FOX K.M., WILLIAMS R.L. and FUKAI S. 2006. Genotypic variation for cold tolerance during reproductive development in rice: screening with cold air and cold water. *Field Crops Research* 98:178-194.

FORWARD, D.F. 1960. Effect of temperature on respiration. *In*: Ruhland, W. ed. *Encyclopedia of plant physiology*. Springer-Verlag 12:234–258.

FUKAI, S. and BASNAYAKE, J. (ed.) 2001. Increased lowland rice production in the Mekong region. Proceedings of an International Workshop, Vientiane, Laos 30 Oct-2 Nov, 2000. ACIAR Proceedings N° 101:179-190.

GUNAWARDENA, T.A., FUKAI, S. and BLAMEY, F.P.C. 2003. Low temperature induced spikelet sterility in rice. II. Effects of panicle and root temperature on spikelet sterility. *Australian Journal of Agricultural Research* 54(10):947-956.

HUNT, R., CAUSTON D. R., SHIPLEY B. and ASKEW, A. P. 2002. Technical Note. A modern tool for classical plant growth analysis. *Annals of Botany*. 90:485-488.

IRRI (International Rice Research Institute). 1975. *El Cultivo de Arroz. Manual de Producción*. Editorial México, Escuela de Agricultura, Universidad de Filipinas, Limusa, México. 426 p.

IRRI (International Rice Research Institute). 1976. *Climate and Rice*. Los Baños, Laguna, Philippines. 565p.

IRRI (International Rice Research Institute). 1979. *Annual report for 1978*. Los Baños, Laguna, Philippines. 468p.

IRRI (International Rice Research Institute). 1983. *Final report of the Seventh International Rice Cold Tolerance Nursery*. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Laguna, Philippines. 34 p.

IRRI (International Rice Research Institute). 1986. *Annual report for 1985*. Los Baños, Laguna, Philippines. 555p.

KIM, J., JIN, C., JIN, H., GOU, X., SHIN, Y., LEE, J., YEA, J. and HONG, S. 2008. Compared pollen sterility of different rice cultivars in low temperature condition. *Abstracts, Journal of Biotechnology* 136S:S217-S231.

LEE, MH. 2001. Low temperature tolerance in rice: the Korean experience, pp. 109-117, In: Fukai, S. and Basnayake, J. (ed.) *Increased lowland rice production in the Mekong Region*. Proceedings of an International Workshop, Vientiane, Laos, 30 October - 2 November 2000.

MATSUO, T., KUMAZAWA, K., ISHII, R., ISHIHARA, K. and HIRATA, H. 1995. *Science of the rice plant*, vol. 2. Physiology, Food and Agriculture Policy Research Center, Tokyo, Japan, 1246 p.

MATSUSHIMA, S., MANAKA K. and TSUNODA, K. 1957. Analysis of developmental factors determining yield and yield prediction and culture improvement of lowland rice. XXXIV. On the mechanism of ripening (5). On the mechanism of ripening (6). *Proc. Crop. Sci. Soc. Jpn.* 25:203-206.

MATSUSHIMA, S. and TSUNODA, K. 1958. Analysis of developmental factors determining yield and its application to yield prediction and culture improvement of lowland rice. XLV. Effects of temperature and its daily range in different growth stages upon the growth, grain yield and its constitutional factors. *Proc. Crop Sci. SOC. Jpn.* 26:243-244.

MATSUSHIMA, S., TANAKA, T. and HOSHINO, T. 1964a. Analysis of yield-determining process and its application to yield-prediction and culture improvement of lowland rice. LXX. Combined effect of air temperature and water temperature at different stages of growth on the grain yield and its components of lowland rice. *Roc. Crop Sci. SOC. Jpn.* 33:53-58.

MATSUSHIMA, S., TANAKA, T. and HOSHINO, T. 1964b. Analysis of yield-determining process and its application to yield prediction and culture improvement of lowland rice. LXXI. Combined effect of air temperature and water temperature at different stages of growth on the growth and morphological characteristics of rice plants. *Proc. Crop Sci. Soc. Jpn.* 33:135-140.

MATSUSHIMA, S. 1970. *Crop science in rice*. Fuji Publ. Co., Ltd. (ed.) Tokyo. 379 p.

MATUS, F., PINOCHET, D. y RODRÍGUEZ, J. 2001. *Fertilización de los Cultivos*. LOM Ediciones. Santiago, Chile. 117 p.

NISHIYAMA, I., ITO, N., HAYASE, H. y SATAKE, T. 1969. Protecting effect of temperature and depth of irrigation water from sterility caused by cooling treatment at the meiotic stage of rice plants. *Proc. Crop. Sci. Soc. Jpn.* 38:554-555.

NISHIYAMA, I. 1985. *Physiology of Cool Weather Damage to the Rice Plant*. Sapporo, Japan, Hokkaido University Press.

ODEPA (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, Chile). [On-line]. Mercado del arroz: Situación mundial y nacional. Disponible en <http://www.odepa.cl/odepaweb/servicios-informacion/Mercados/jun-10.pdf>. Visitado el 10 de agosto de 2010. *Mercados Agropecuarios* 215:17-23.

ORTEGA, R. 2006. Analysis of factors affecting spikelet sterility in flooded rice under field conditions in Chile. *Archives of Agronomy and Soild Science.* 53(2):183-192.

ORTEGA, R. 2007. Concurso nacional de proyectos FONDECYT. Concurso regular 2007. Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica. Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDECYT). Chile. p.12-14.

ROEL, A., MUTTERS, R.G., ECKERT, J.W. and PLANT, R.E. 2005. Effect of Low Water Temperature on Rice Yield in California. *Agronomy Journal* 97:943-948.

SAKAI, K. 1949. Effect of deep irrigation water recovering yields decreased Ey unseasonable cool weather during meiotic stage of rice plants [in Japanese]. *Agric. Hortic.* 24:405-408.

SANTIBÁÑEZ, F. y URIBE, J.M. 1990. Atlas Agroclimático de Chile: Regiones Quinta y Metropolitana. Laboratorio de Agroclimatología, Departamento de Ingeniería y Suelos, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agropecuarias. MINAGRI, Fondo de Investigación Agropecuaria, CORFO. 65 p.

SANTIBÁÑEZ, F. y URIBE, J.M. 1993. Atlas Agroclimático de Chile: Regiones Sexta, Séptima, Octava y Novena. Laboratorio de Agroclimatología, Departamento de Ingeniería y Suelos, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agropecuarias. MINAGRI, Fondo de Investigación Agropecuaria, CORFO. 99 p.

SASAKI, K. and WADA, S. 1973. Varietal difference in cold tolerance at different stages of panicle development in rice. *Hoku-No (Japan)*. 40(8):7-14.

SATAKE, T. 1969. Research on cool injury of paddy rice plant in Japan. *Jpn. Agric. Res. Q.* 4:5-10.

SATAKE, T. 1976. Determination of the most sensitive stage to sterile-type cold injury in rice plant. *Research Bulletin of the Hokkaido National Agricultural Experiment Station*, 113:1-43.

SATAKE, T., LEE, S.Y., KOIKE, S. and KARIYA, K. 1988. Male sterility caused by cooling treatment at the young microspore stage in rice plants. XXVIII. Prevention of cool injury with the newly devised water management practices—effects of the temperature and depth of water before the critical stage. *Jpn. J. Crop Sci.* 57:234-241.

SHIBATA, M. 1979. Progress in breeding cold-tolerant rice in Japan. *In Report of a Rice Cold Tolerant Workshop, Suweon, Korea. 1978. International Rice Research Institute, Los Baños, Laguna, Filipinas.* p. 21-24.

SHIMONO, H., HASEGAWA, T., and IWAMA, K. 2002. Response of growth and grain yield in paddy rice to cool water at different growth stages. *Field Crops Res.* 73:67-79.

SHIMONO, H., HASEGAWA, T., MORIYAMA, M., FUJIMORA, S. and NAGATA, T. 2005. Modelling spikelet sterility induced by low temperature in rice. *Agron. J.* 97:1523-1536.

STHAPIT, B., JOSHI, K., WILSON, J. and WITCOMBE, J. 1996. Inheritance of chlorophyll fluorescence in rice under chilling conditions. *In: Actes du seminaire riziculture d'altitude, Antananarivo, Madagascar. 19 mars - 5 avril 1996. Colloques. Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement-Cultures Annuelles, Montpellier, France.* p. 135-142.

TSUNODA, K. and MATSUSHIMA, S. 1962. Analysis of yield-determining process and its application to yield prediction and culture improvement of lowland rice. LXII. Effects of irrigation water temperature under different water depths on the growth, grain yield and yield components of rice. Proc. Crop Sci. Soc. Jpn. 31:19-22.

TINARELLI, A. 1989. El arroz. Versión española de R.M. Carreres O. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España. 575 p.

WILLIAMS, R.L. and ANGUS, J.F. 1994. Deep floodwater protects high-nitrogen rice crops from low-temperature damage. Australian Journal of Experimental Agriculture, 34:927-932.

YOSHIDA, S. 1981. Fundamentals of rice crop science. International Rice Research Institute, Los Baños, Laguna, Filipinas. 269 p.

APÉNDICES

Apéndice I. Parámetros utilizados para el cálculo del rendimiento, biomasa, índice de cosecha y componentes del rendimiento. C1= AC5/ACV/AC20/AC20; C2= AF5/AC5/AC5/AC5; C3= AF5/ACV/AC20/AC20; C4= AC5/AC5/AF5/AC5; C5= AC5/ACV/AF20/AC20. V1= Harika-GS; V2= Oro; V3=Diamante-INIA; V4=Ámbar-INIA. FB= Peso manojo sin 50 tallos; FS= Peso fresco 50 tallos con panícula; DS=Peso seco 50 tallos con panícula; TG= Peso de granos totales; WG= peso 250 granos húmedos; DG= peso 250 granos secos.

Tratamiento	Condición térmica	Variedad	FB	FS	DS	(g)			
						TG	WG	DG	
1	C1	V1	3385,0	435,2	182,4	692,3	9,5	7,5	
2	C1	V2	3717,5	567,7	229,3	714,1	8,3	7,1	
3	C1	V3	3345,0	522,5	243,6	643,2	8,8	7,5	
4	C1	V4	2590,0	335,5	152,0	540,8	8,0	6,3	
5	C2	V1	2802,5	355,1	152,8	681,1	9,6	7,5	
6	C2	V2	2660,0	493,2	230,8	550,9	8,1	7,0	
7	C2	V3	2055,0	428,6	197,8	382,1	8,5	7,3	
8	C2	V4	2070,0	312,1	157,1	461,4	7,4	5,9	
9	C3	V1	3440,0	462,0	198,0	890,4	9,8	7,9	
10	C3	V2	3077,5	737,2	289,1	663,0	8,6	7,3	
11	C3	V3	2430,0	555,2	237,6	495,1	9,2	7,9	
12	C3	V4	1790,0	339,5	163,2	512,6	7,1	5,8	
13	C4	V1	2832,5	353,7	161,0	487,7	9,8	7,6	
14	C4	V2	3132,5	544,8	250,7	651,9	8,6	7,3	
15	C4	V3	2307,5	440,0	219,0	346,3	8,9	7,6	
16	C4	V4	2085,0	274,1	140,0	358,3	7,3	5,9	
17	C5	V1	4117,5	526,5	186,8	822,1	9,9	7,8	
18	C5	V2	4042,5	628,1	246,5	674,7	8,0	6,9	
19	C5	V3	3855,0	487,4	203,6	278,3	8,3	7,2	
20	C5	V4	2407,5	298,7	136,1	246,4	6,7	5,4	

Apéndice II. Peso del número de granos totales y vanos de 10 panículas elegidas de manera aleatoria utilizado para el cálculo del porcentaje de granos vanos (PGV). C1= AC5/ACV/AC20/AC20; C2= AF5/AC5/AC5/AC5; C3= AF5/ACV/AC20/AC20; C4= AC5/AC5/AF5/AC5; C5= AC5/ACV/AF20/AC20. V1= Harika-GS; V2= Oro; V3=Diamante-INIA; V4=Ámbar-INIA.

Tratamiento	Condición térmica	Variedad	Peso de Granos (g)		PGV (%)
			Vanos	Totales	
1	C1	V1	1,04	21,23	5,1
2	C1	V2	0,59	35,04	1,6
3	C1	V3	0,78	26,40	3,0
4	C1	V4	0,60	15,52	4,1
5	C2	V1	0,58	23,18	2,5
6	C2	V2	0,70	24,76	2,8
7	C2	V3	0,46	15,33	3,0
8	C2	V4	1,20	12,64	11,0
9	C3	V1	0,70	26,46	2,6
10	C3	V2	0,88	30,94	2,9
11	C3	V3	0,89	24,31	3,7
12	C3	V4	0,58	20,67	2,8
13	C4	V1	2,34	10,58	22,2
14	C4	V2	0,77	23,98	3,2
15	C4	V3	1,63	16,38	10,0
16	C4	V4	1,92	9,88	24,6
17	C5	V1	0,68	25,13	2,8
18	C5	V2	0,77	28,15	2,7
19	C5	V3	2,72	9,34	30,6
20	C5	V4	2,46	5,37	46,6

Apéndice III. Área Foliar. Parámetro utilizado para análisis de crecimiento y cálculo de la tasa de asimilación neta (TAN) en tres oportunidades durante el ciclo de vida de las variedades. C1= AC5/ACV/AC20/AC20; C2= AF5/AC5/AC5/AC5; C3= AF5/ACV/AC20/AC20; C4= AC5/AC5/AF5/AC5; C5= AC5/ACV/AF20/AC20. V1= Harika-GS; V2= Oro; V3=Diamante-INIA; V4=Ámbar-INIA. IM= inicio de macolla; IP= inicio de panícula; M= maduración del grano.

Tratamiento	Condición térmica	Variedad	Área Foliar (mm ²)		
			IM	IP	M
1	C1	V1	1.654	11.240	4.649
2	C1	V2	1.087	11.642	9.229
3	C1	V3	1.031	12.923	6.159
4	C1	V4	620	6.169	4.806
5	C2	V1	341	11.568	6.044
6	C2	V2	321	15.426	9.601
7	C2	V3	229	9.682	5.084
8	C2	V4	194	8.962	3.891
9	C3	V1	456	18.995	5.464
10	C3	V2	275	12.481	7.420
11	C3	V3	467	10.497	5.765
12	C3	V4	440	11.007	3.848
13	C4	V1	781	10.424	7.398
14	C4	V2	711	18.136	7.065
15	C4	V3	892	9.961	7.401
16	C4	V4	509	6.845	4.802
17	C5	V1	1.255	23.028	4.837
18	C5	V2	1.883	19.786	8.187
19	C5	V3	1.015	19.003	9.048
20	C5	V4	814	11.099	5.872

Apéndice IV. Materia Seca. Parámetro utilizado para análisis de crecimiento y cálculo de la tasa de crecimiento relativo (TCR) y la tasa de asimilación neta (TAN) en tres oportunidades durante el ciclo de vida de las variedades. C1= AC5/ACV/AC20/AC20; C2= AF5/AC5/AC5/AC5; C3= AF5/ACV/AC20/AC20; C4= AC5/AC5/AF5/AC5; C5= AC5/ACV/AF20/AC20. V1= Harika-GS; V2= Oro; V3=Diamante-INIA; V4=Ámbar-INIA. IM= inicio de macolla; IP= inicio de panícula; M= maduración del grano.

Tratamiento	Condición térmica	Variedad	Materia seca de plantas (mg)								
			Raíz			Hojas			Tallo		Granos
			IM	IP	M	IM	IP	M	IP	M	M
1	C1	V1	30	115	180	162	581	501	645	1510	1884
2	C1	V2	36	170	387	129	513	821	582	2079	2905
3	C1	V3	37	121	181	134	672	669	708	1928	2164
4	C1	V4	27	86	278	104	304	491	343	1046	1549
5	C2	V1	9	394	378	47	597	602	516	1094	1790
6	C2	V2	12	461	420	42	619	980	553	2079	2869
7	C2	V3	7	286	313	28	596	546	517	1580	1317
8	C2	V4	7	255	722	27	510	349	484	1333	1554
9	C3	V1	14	496	333	67	860	696	807	1365	2979
10	C3	V2	9	290	225	37	783	697	496	1792	2790
11	C3	V3	13	344	182	52	569	592	624	1669	1899
12	C3	V4	14	276	208	50	563	410	511	1010	1561
13	C4	V1	26	103	293	107	603	761	621	2286	1470
14	C4	V2	24	430	382	86	988	648	1115	1514	2242
15	C4	V3	40	404	696	102	735	659	696	1914	1425
16	C4	V4	22	262	302	68	488	489	656	1654	1209
17	C5	V1	28	205	257	129	1075	487	1131	1066	1861
18	C5	V2	53	295	310	110	1455	917	501	1961	2590
19	C5	V3	35	309	231	140	192	676	918	2298	864
20	C5	V4	45	207	395	92	542	514	621	1751	696

Apéndice V. Distribución de la suma de cuadrados (% SC) para rendimiento, biomasa e índice de cosecha para un diseño de parcelas divididas.

Fuentes de Variación	% SC					
	Rendimiento		Biomasa		Índice de Cosecha	
Condición térmica (C)	22,4	**	30,6	+	46,9	**
Variedad (V)	49,4	***	50,5	***	25,0	***
Interacción (C × V)	28,2	n.s.	18,9	n.s.	28,1	***

+p<0,1; *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001; ns: no significativo.

Apéndice VI. Distribución de la suma de cuadrados (% SC) para PMG, NGM y PGV para un diseño de parcelas divididas. PMG= Peso de mil granos; NGM=Número de granos por metro cuadrado; PGV= porcentaje de granos vanos.

Fuente de Variación	% SC					
	PMG		NGM		PGV	
Condición térmica (C)	3,8	**	26,7	n.s.	36,8	***
Variedad (V)	91	***	47	**	27,7	***
Interacción (C × V)	5,2	n.s.	26,3	n.s.	35,5	***

*p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001; ns: no significativo.

Apéndice VII. Distribución de la suma de cuadrados (% SC) para la altura de plantas en tres oportunidades durante el ciclo de vida de los genotipos para un diseño de parcelas divididas.

Fuente de variación	% SC					
	Altura de las plantas					
	Inicio de macolla		Inicio de panícula		Maduración	
Condición térmica (C)	72,2	ns	31,8	**	12,6	**
Variedad (V)	10,2	**	63,7	***	83,0	***
Interacción (C × V)	17,5	*	4,5	ns	4,4	ns

*p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001; ns: no significativo

Apéndice VIII. Distribución de la suma de cuadrados (% SC) para la tasa de crecimiento relativo para un diseño de parcelas divididas. P1= Período 1, desde inicio de macolla hasta inicio de panícula. P2= Período 2, desde inicio de panícula hasta la maduración.

Fuentes de Variación	% SC			
	Tasa de Crecimiento Relativo			
		P1		P2
Condición térmica (C)	82,1	*	43,83	***
Variedad (V)	5,33	n.s.	11,19	*
Interacción (C × V)	12,57	n.s.	44,98	***

*p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001; ns: no significativo.

Apéndice IX. Distribución de la suma de cuadrados (% SC) para la tasa de asimilación neta para un diseño de parcelas divididas. P1= Período 1, desde inicio de macolla hasta inicio de panícula. P2= Período 2, desde inicio de panícula hasta la maduración.

Fuentes de Variación	% SC			
	Tasa de Asimilación Neta			
		P1		P2
Condición térmica (C)	78,4	*	58,1	*
Variedad (V)	3,5	n.s.	6,0	n.s.
Interacción (C × V)	18,0	*	35,9	n.s.

* p<0,05; n.s.: no significativo. P1: Período 1, desde inicio de macolla hasta inicio de panícula. P2: Período 2, desde inicio de panícula hasta la maduración.