

# Capítulo 5. Influencia del clima en el desarrollo de la planta de arroz en Chile: el cultivo de arroz más austral del mundo

Gabriel Donoso Ñ., Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Gonzalo Carracelas G.,  
Claudia Marchesi G.

Chile es el país más austral del mundo donde se cultiva el arroz (*Oryza sativa* L.). Las principales comunas arroceras son Villa Alegre (35°41'7,04" S; 71°40'58,55" O), San Javier, Linares, Longaví, Retiro (36°15'44,42" S; 71°38'42,14" O), Parral en la región del Maule, y Ñiquén (36°18'8,5" S; 71°38'42,14" O), San Carlos y San Nicolás (36°28'47,21" S; 72°13'41,63" O) en la región de Ñuble (Figura 1).

La planta de arroz es un cultivo de origen tropical y semitropical, por ello, normalmente requiere temperaturas de entre 20 y 35°C durante gran parte de su desarrollo (Yoshida, 1981). Sin embargo, el sector arrocerero de Chile está ubicado en una zona de clima mediterráneo a mediterráneo temperado (Novoa et al., 1989) o templado (Kottek et al., 2006), lo que implica que la planta debe soportar condiciones subóptimas de temperatura durante todo su crecimiento y desarrollo (Yoshida, 1981). De esta manera, las bajas temperaturas afectan los estados de germinación, plántula y reproductivo, causando pérdidas en los rendimientos en grano, lo cual se ve acentuado cuando se realizan siembras posteriores al mes de octubre (Donoso y Paredes, 2015).

Las precipitaciones son una importante restricción para este cultivo. En los últimos nueve años, la disponibilidad de agua para riego ha disminuido entre un 20 y un 40 %, debido a un evento climático denominado 'mega sequía' (Garreaud et al., 2019). Éste explica la merma considerable en la acumulación de nieve en la Cordillera de los Andes, y agua en los embalses, desde donde proviene más del 90 % del agua utilizada por los cultivos de arroz. Esta situación es similar a lo reportado en otros lugares del mundo (Tuong y Bouman, 2003, Bouman et al., 2007, CSIRO, 2008; Gaydon et al., 2010; Mekonnen y Hoekstra, 2016), obligando a los agricultores a reducir su superficie sembrada, con el fin de evitar la falta del recurso hídrico a final de temporada.

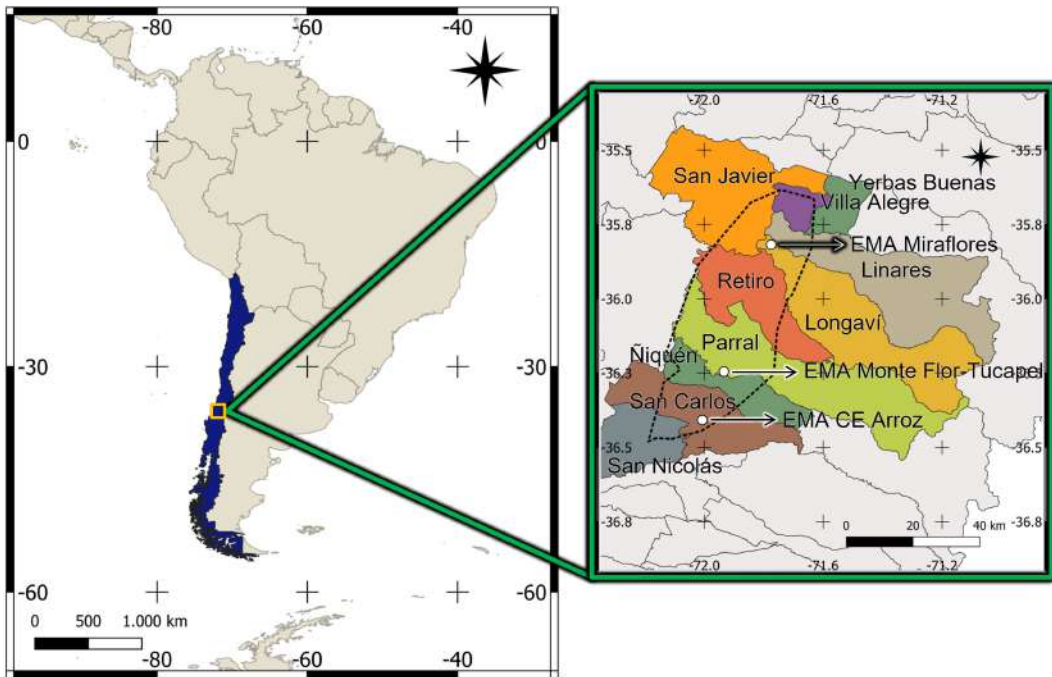
Por otro lado, la abundante radiación solar disponible en la zona arrocerera, cuyo máximo se registra durante la etapa reproductiva del cultivo, permite contar con altos potenciales de rendimiento. Otro factor importante a tener en cuenta es el fotoperíodo, donde las máximas horas de sol se logran en diciembre.

Debido a esta situación, es fundamental tener un conocimiento preciso de las condiciones climáticas del sector arrocerero. Por ello, en el periodo 2012-2014 se realizó un esfuerzo público-privado (INIA y empresas Tucapel S.A. y Carozzi, S.A.) para instalar tres estaciones meteorológicas automáticas (EMAs) que fueron incorporadas a la Red de Estaciones Meteorológicas del Ministerio de Agricultura y que controla el INIA, con acceso gratuito para consultar datos climáticos. Estas EMAs están ubicadas en San Carlos (CE Arroz), al sur de Parral (Monte Flor-Tucapel), y en Longaví (Miraflores) (Foto 1) (<https://agrometeorologia.cl>)



**Foto 1.** Estaciones meteorológicas automáticas instaladas en el área arrocerá: Miraflores en Longavi (35°49'3,64" S; 71°46'30,27" O), Monte Flor-Tucapel en Parral (36°14'41,68" S; 71°56'3,06" O) y en el Campo Experimental de Arroz de INIA, en San Carlos (36°24'30,15" S; 72°0'24,47" O). INIA-Tucapel S.A.-Carozzi S.A.

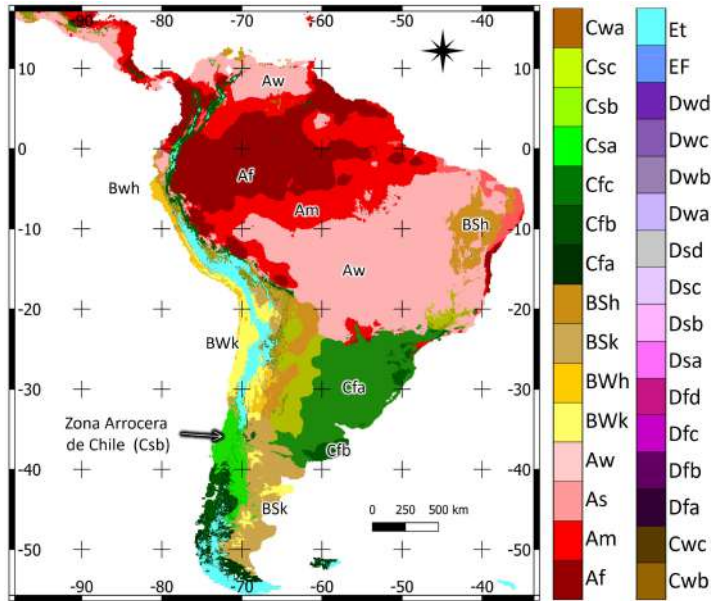
Parte importante de los análisis y conclusiones de este capítulo se basan en la información generada por estas estaciones meteorológicas. Posterior a la puesta en marcha de estas tres EMAs, se sumó una cuarta unidad proporcionada por la Empresa de Asistencia Técnica AgroParral, ubicada en la comuna de Parral y que es manejada por el Centro de Investigación y Transferencia en Riego y Agroclimatología (CITRA) de la Universidad de Talca.



**Figura 1.** Mapa del sector arrocerá. Enmarcado en verde se muestra una ampliación de la zona arrocerá de Chile. El polígono con perímetro color negro discontinuo, encierra las comunas en donde se cultiva el arroz en Chile y se destaca la ubicación de las tres EMAs INIA.

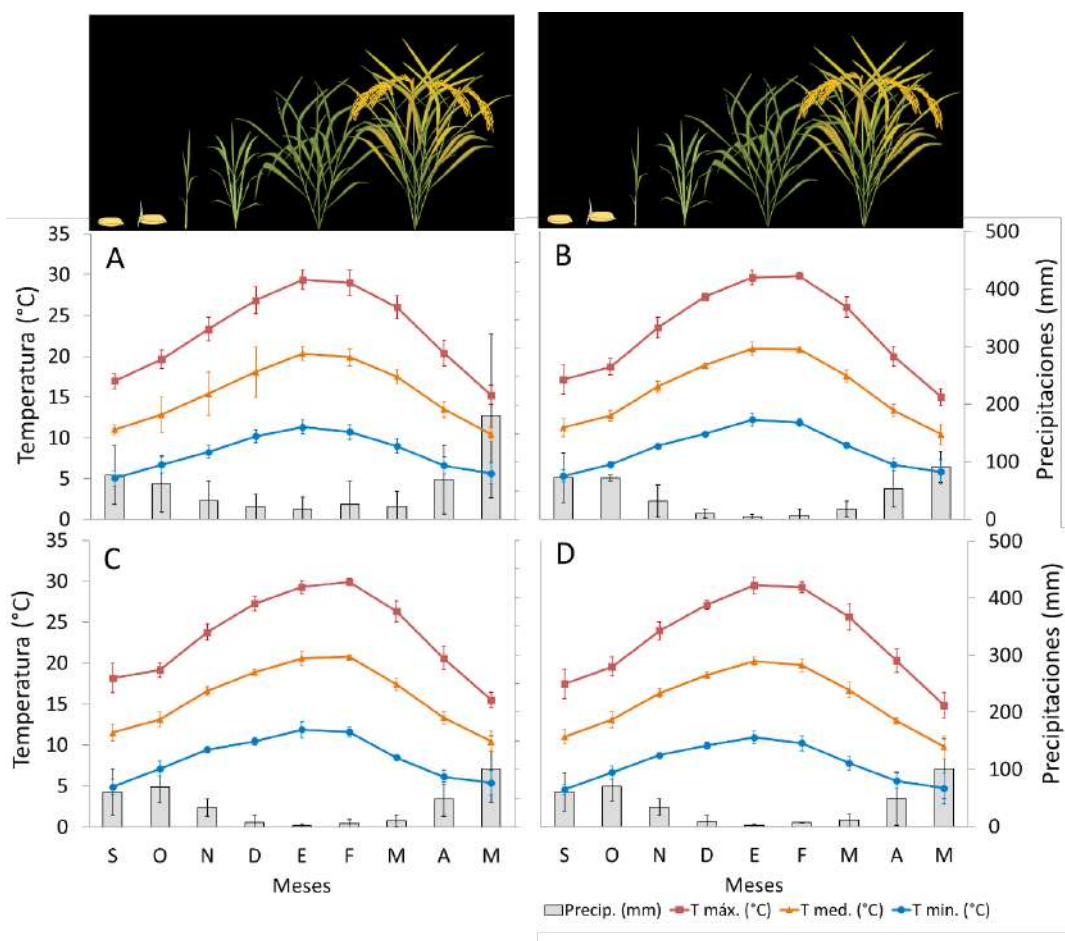
## Condiciones agroclimáticas del sector arrocero de Chile

El sector arrocero tiene un clima templado con veranos suaves, que según la clasificación climática de Köppen-Geiger, corresponde al grupo Csb (Kottek et al., 2006) (Figura 2).



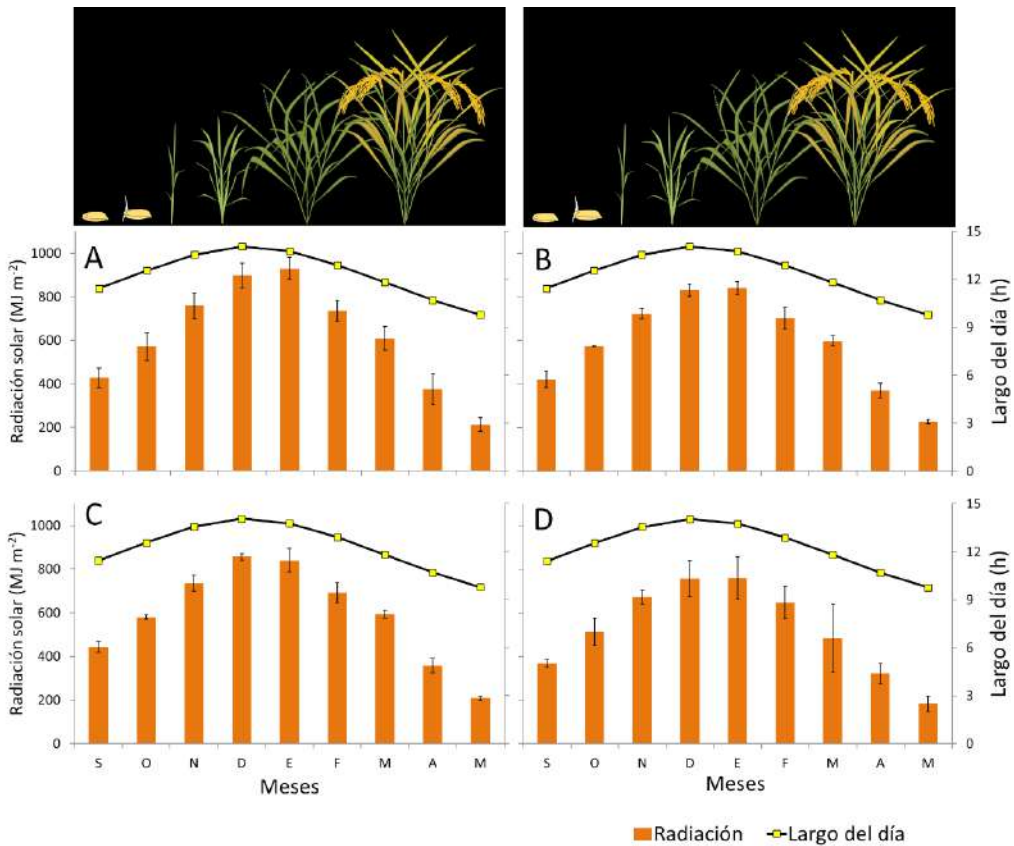
**Figura 2.** Clasificación climática de la zona arrocera de Chile. Clasificación de climas según Köppen-Geiger: **Clima A:** Tropical (Af: Ecuatorial; Am: Monzónico; As: Sabana (verano seco); Aw: Sabana (invierno seco)), **Clima B:** Seco (Árido y Semiárido)(BS: Estepario; BSh: Estepario cálido; BSk: Estepario frío; BW: Desértico; BWh: Desértico cálido; BWk: Desértico frío), **Clima C:** Templado/Mesotermal (Cf: Precipitaciones constantes(Cfa: Verano cálido; Cfb: Verano suave; Cfc: Verano frío); Cs: Verano seco (Csa: Verano cálido; Csb: Verano suave; Csc: Verano frío); Cw: Invierno seco (Cwa: Verano cálido; Cwb: Verano suave; Cwc: Verano frío)), **Clima D:** Templado frío/Continental/Microtermal (Df: Precipitaciones constantes (Dfa: Verano cálido; Dfb: Verano suave; Dfc: Verano frío; Dfd: Invierno muy frío); Ds: Verano seco (Dsa: Verano cálido; Dsb: Verano suave; Dsc: Verano frío; Dsd: Verano muy frío; Dw: Invierno seco; Dwa: Verano cálido; Dwb: Verano suave; Dwc: Verano frío; Dwd: Verano muy frío)), **Clima E:** Polar y de alta montaña (ET: Tundra; EF: Hielo; EB: Alta montaña) (Adaptado: Kottek et al., 2006).

Las condiciones climáticas asociadas, principalmente, a las bajas temperaturas presentes en la zona arrocera de Chile, afectan el crecimiento y el desarrollo de la planta de arroz (Donoso et al., 2015). Las bajas temperaturas se manifiestan durante la noche, siendo esta intermitencia de temperatura día-noche lo que también afectaría la planta de arroz. Estas condiciones climáticas están representadas gráficamente con los promedios de temperaturas mínimas, medias y máximas, precipitaciones mensuales, radiación solar mensual acumulada y largo del día, registradas en cuatro localidades representativas de la zona arrocera del país. Estas condiciones climáticas también definen las actividades agronómicas que se ejecutan en el cultivo. Es así como, durante septiembre, se realizan gran parte de las labores previas a la siembra, por lo que las condiciones climáticas, en especial las precipitaciones, afectan directamente esta actividad. Durante este período, las precipitaciones en promedio superan los 50 mm en todas las localidades (Figura 3).



**Figura 3.** Climograma de la zona arrocera de Chile entre siembra y cosecha del arroz. A) Climograma de Chillán (Estación meteorológica General Bernardo O'Higgins de la Dirección Meteorológica de Chile), B) Climograma de San Carlos (Estación meteorológica CE Arroz de INIA Chile), C) Climograma de Parral (Estación meteorológica Monte Flor-Tucapel de INIA Chile), D) Climograma de Linares (Estación meteorológica Miraflores y Santa Amada de INIA Chile). La información corresponde a datos correspondientes a 40 años en Chillán, cuatro años en San Carlos, en Parral y en Linares. En color rojo se muestran las temperaturas máximas, en color naranja se muestran las temperaturas medias y en azul las temperaturas mínimas. Las barras de color gris muestran las precipitaciones acumuladas mensuales. En todos los casos las barras de arroz corresponden a la desviación estándar. En la parte superior se muestra de manera referencial el desarrollo fenológico de la planta de arroz, desde siembra a cosecha.

Otros factores climáticos, como la radiación solar acumulada o el fotoperíodo, no son limitantes durante este periodo, ya que la radiación acumulada varía entre los 390 a 420 MJ m<sup>-2</sup>, y se presenta un largo del día de 11 h (Figura 4).



**Figura 4.** Radiación solar mensual acumulada y largo del día en el sector arrocero de Chile. A) Chillán (Estación meteorológica del Departamento de Recursos Hídricos de la Universidad de Concepción), B) San Carlos (Estación meteorológica CE Arroz de INIA Chile), C) Parral (Estación meteorológica Monte Flor-Tucapel de INIA Chile), D) Linares (Estación meteorológica Miraflores y Santa Amada de INIA Chile). La información corresponde a datos correspondientes a 18 años en Chillán, cuatro años en San Carlos y Parral y cinco años en Linares.

Otra actividad importante a considerar en esta época del año es la fecha de siembra, donde las temperaturas pueden afectar el proceso de germinación y emergencia de las plántulas, especialmente en casos de siembras tempranas realizadas a fines de septiembre (Castillo y Alvarado, 2002; Donoso et al., 2013), debido a que en esa época del año se suelen presentar temperaturas mínimas que pueden variar entre 4,5 y 6,4 °C y máximas entre 17,0 y 18,2 °C. Dada esta situación, el periodo óptimo para la siembra del arroz se encuentra entre el 1 y el 20 de octubre (Donoso y Paredes, 2015). Durante este mes las temperaturas se incrementan, llegando las mínimas del aire a 6,6 °C y las máximas a 19,6 °C. Sin embargo, a pesar de la presencia de estas temperaturas sub-óptimas para la emergencia de las plántulas, la planta de arroz se establece en esta zona producto de los altos niveles de tolerancia al frío que tienen las variedades chilenas en esta etapa de su desarrollo (Donoso et al, 2015). Durante el período de siembra, otro factor a considerar son las precipitaciones, que pueden atrasar la fecha de siembra en el caso del sistema de siembra directa, lo que finalmente retrasa la fenología. Con ello se expone a la planta a bajas temperaturas durante el período reproductivo, lo que afectará finalmente el rendimiento en grano de la planta. Por el contrario, en el caso de la siembra con arroz pregerminado, las precipitaciones no tienen un efecto negativo, pues esta actividad se puede realizar a pesar de las precipitaciones. La radiación solar y el fotoperíodo no son factores limitantes para las actividades agronómicas, ya que alcanzan niveles de 570 a 590 MJ m<sup>-2</sup> y un largo de día de 13 h.

En noviembre la planta de arroz se encuentra entre el estado de plántula e inicios de macolla. Durante esta etapa del desarrollo, las bajas temperaturas afectan la fenología del cultivo, alargando el periodo vegetativo. En condiciones habituales, las temperaturas mínimas durante este mes pueden variar entre 8,3 y 9,4 °C, y las máximas pueden alcanzar un promedio de hasta 24,8 °C. Las temperaturas diurnas permiten que las plantas comiencen el crecimiento y desarrollo de hojas y tallos. A contar de noviembre las precipitaciones disminuyen a menos de la mitad, por lo que el aporte de la lluvia es poco significativo para el desarrollo posterior de la planta. Respecto a la radiación solar acumulada en este periodo, ésta es cercana a los 720 a 770 MJ m<sup>-2</sup> y el largo del día alcanza las 14 h.

En diciembre, en tanto, la planta de arroz se encuentra en plena macolla y a fines de mes, dependiendo de la fecha de siembra, la planta debiera iniciar la formación del primordio floral, iniciándose la etapa reproductiva del cultivo. En esta etapa las bajas temperaturas pueden ser muy perjudiciales para el desarrollo del óvulo y la formación del polen (Liu et al., 2019). En promedio, las temperaturas mínimas son cercanas a 10 °C y las máximas a 27 °C. Por esta razón, en el periodo inicial de la etapa reproductiva se recomienda mantener la planta bajo inundación, con el fin de utilizar el agua como amortiguador de la temperatura del aire y reduciendo las grandes fluctuaciones de la temperatura del aire. En este punto es importante considerar que las diferencias entre las temperaturas máximas y mínimas pueden ser de 20 °C o más.

Debido a esta situación es importante tener un control del manejo del agua, pues si el agricultor ingresa constantemente agua fría a los cuadros en periodos de bajas temperaturas del aire, se podría afectar el desarrollo del primordio floral (Ortega, 2007; Ortega et al., 2011). Durante este período, las precipitaciones pueden variar entre 8 mm y 22 mm, lo cual no constituye un aporte significativo al riego del cultivo.

Respecto a la radiación solar acumulada, en este periodo es cercana a los 830 y 897 MJ m<sup>-2</sup> y el largo del día alcanza las 14,5 h. En diciembre se logra el valor máximo de radiación solar y largo del día. A partir de este momento, el largo del día comienza a decrecer hasta llegar a las 12,3 h en marzo. En el caso de la radiación, el valor se mantiene alto hasta enero, alcanzado un valor cercano a los 840 y 870 MJ m<sup>-2</sup>, iniciándose un decrecimiento hasta llegar a valores entre 590 y 610 MJ m<sup>-2</sup> en marzo.

Durante enero se expresa la etapa reproductiva, incluyendo la etapa de desarrollo más sensible que es la microsporogénesis (Nishiyama, 1995). Idealmente, la floración debiera ocurrir a mediados de enero, con lo que se evita, en gran medida, la exposición a bajas temperaturas durante la fecundación y el llenado de grano. En promedio, las temperaturas mínimas durante la noche son cercanas a 11 °C, en tanto que las máximas durante el día pueden llegar hasta 30 °C. Si bien las temperaturas mínimas son sub-óptimas para el cultivo del arroz, éste se desarrolla sin dificultades gracias a las temperaturas que se alcanzan en el día.

En el caso que ocurran eventos de bajas temperaturas durante esta etapa del desarrollo, se puede generar esterilidad floral, lo que implica disminuciones importantes en el rendimiento, pudiendo superar el 50 %. Temperaturas medias menores a 20 °C afectan el desarrollo y la viabilidad del grano de polen, generando esterilidad floral (Alvarado, 1999; Ortega, 2007; Ortega et al., 2011; Fuentealba-Sandoval et al., 2014). En todo caso esta situación no es tan común, lo que se refleja en las temperaturas medias de enero que son cercanas a los 20 °C. Respecto a la radiación solar acumulada en este periodo, ésta es cercana a los 840 y 870 MJ m<sup>-2</sup> con un largo de día de 14,3 h.

La floración ocurre entre fines de enero y la primera semana de febrero, completándose de esta manera la etapa reproductiva de la planta de arroz, y dando inicio a la siguiente fase, el llenado del grano. Durante la etapa reproductiva, tanto las altas como las bajas temperaturas pueden tener un efecto negativo en la fecundación. Temperaturas inferiores a 10 °C y superiores a 39 °C afectan la germinación del polen y el alargamiento del tubo polínico, afectando el proceso de

fecundación (Coast et al., 2015). Por otro lado, temperaturas de 16 °C afectan negativamente la formación del polen (hipertrofia del tapete, lóculos atrofiados, granos malformados, retraso en la antesis), disminuyendo su viabilidad y, por consecuencia, generando una baja en los rendimientos en grano. En estos parámetros se observó una diferencia entre las variedades chilenas, siendo 'Zafiro-INIA' más tolerante al frío que 'Diamante-INIA' (Fuentealba-Sandoval et al., 2014).

En general, en febrero se presentan temperaturas similares a enero, con promedios de mínimas cercanas a 11 °C y máximas entre 29 °C y 30 °C. Respecto a la radiación solar acumulada en este periodo, ésta es cercana a los 690 y 730 MJ m<sup>-2</sup>, con un largo de día de 13,3 h.

En marzo la planta de arroz termina el proceso de maduración para dar inicio a la cosecha. Durante este proceso las precipitaciones pueden afectar negativamente la cosecha, impidiendo la entrada de las máquinas cosechadoras que no poseen rueda oruga e incrementando el porcentaje de humedad del grano y, por ende, disminuyendo su calidad industrial. En general, las precipitaciones registradas durante este período varían entre 11 y 17 mm, pudiendo incrementarse hasta tres veces durante abril. Por ello, es recomendable cosechar lo más temprano posible. Respecto a la radiación solar acumulada en este periodo, es cercana a los 590 y 610 MJ m<sup>-2</sup>, con un largo de día de 12,3 h.

Para aprovechar al máximo las condiciones climáticas mencionadas en esta descripción y el potencial de rendimiento de las variedades de arroz utilizadas en Chile, es importante realizar todas las prácticas de manejo en los tiempos recomendados para este cultivo.

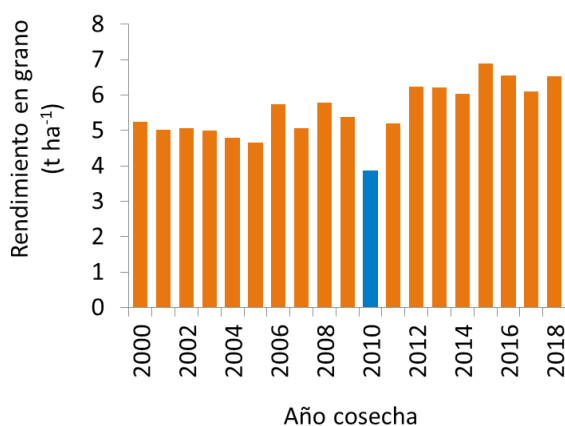
## Efectos del frío en el cultivo del arroz

En Chile, las bajas temperaturas nocturnas son una de las principales limitaciones climáticas para el desarrollo del cultivo del arroz. Sin embargo, las variedades comerciales desarrolladas por INIA tienen altos niveles de tolerancia a las bajas temperaturas, lo que les permite desarrollar sus etapas fenológicas en forma normal, salvo casos excepcionales (Donoso et al., 2014; Donoso y Paredes, 2015). En general, las bajas temperaturas pueden generar retrasos en la germinación y emergencia de las plántulas, pérdida de población de plantas, retrasos en el desarrollo de las etapas fenológicas de la planta, y esterilidad floral (Baruah et al., 2009; Grohs et al., 2016; Shakiba et al., 2017).

La etapa más sensible al frío es la etapa reproductiva, en donde temperaturas medias menores a 20 °C perjudican el desarrollo y la viabilidad del grano de polen, generando esterilidad floral y reducciones importantes en el rendimiento del cultivo que pueden llegar a más de un 60 % en el rendimiento en grano (Alvarado, 1999). Una vez ocurrido el daño por frío, éste se puede expresar visiblemente desde el segundo hasta el quinto día posterior al estrés (Satake y Hayase, 1970). Ocurre principalmente en las anteras y en el estado de microsporogénesis (Nishiyama, 1995), generando polen defectuoso y estéril (Williams y Angus, 1994; Fuentealba-Sandoval et al., 2014).

Resultados de las temporadas 1989-1990 y 1997-1998 (Alvarado, 1999) muestran que las bajas temperaturas (medias menores a 17 °C) produjeron un incremento del periodo de siembra a floración de 91 a 129 d en la variedad 'Diamante-INIA' y de 89 a 126 d en la variedad 'Oro', con una esterilidad floral de hasta 65 % en la variedad 'Diamante-INIA' y 39 % en la variedad 'Oro'. Para disminuir los daños producidos por las bajas temperaturas, resulta recomendable la siembra temprana y la mantención de la lámina de agua, debido a su efecto amortiguador de la temperatura del aire a partir de la etapa reproductiva.

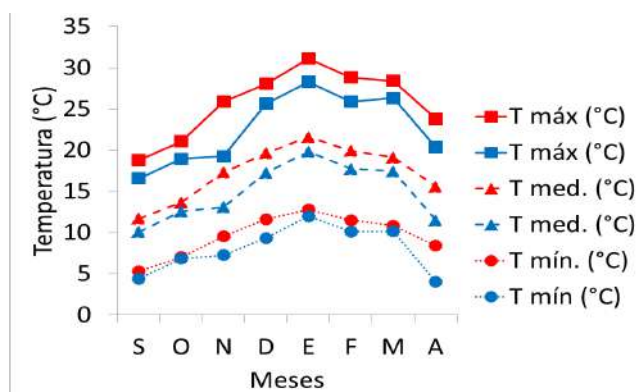
Para ilustrar de mejor manera los efectos de las bajas temperaturas en condiciones de campo, se muestran los resultados obtenidos en la temporada 2009-2010, considerada como una de las temporadas más frías de las últimas décadas. En ese periodo se observaron reducciones de los rendimientos en grano a nivel nacional de un 30 %, comparado con el promedio de rendimientos de nueve temporadas anteriores y ocho temporadas posteriores (Figura 5).



Fuente: INE, 2020.

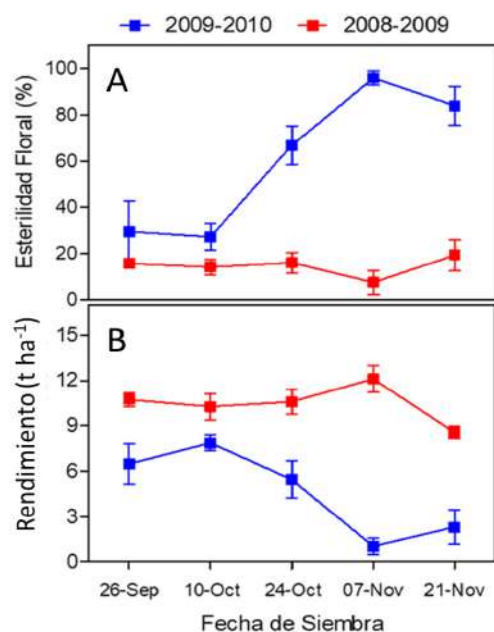
**Figura 5.** Rendimientos nacionales de arroz en grano paddy durante los últimos 18 años. En color azul, se destaca el rendimiento promedio nacional obtenido durante la temporada de bajas temperaturas, 2009-2010.

Al comparar la temporada de bajas temperaturas promedio con una temporada considerada como normal para el cultivo del arroz, se observa una diferencia de hasta 2 °C en las temperaturas mínimas, de 4 °C en la temperatura media y casi de 7 °C en la temperatura máxima (Figura 6). Estas diferencias ocurrieron, principalmente, entre noviembre y febrero, y determinaron un atraso en la fenología de la planta. Como consecuencia de ello, se produjo una mayor exposición del estado reproductivo a bajas temperaturas, lo que indujo una importante esterilidad floral (vanazón) (Figura 7).



**Figura 6.** Temperaturas en temporadas 2008-2009 (año normal) y 2009-2010 (año frío). En color rojo se representan las temperaturas de la temporada 2008-2009. En color azul las temperaturas de 2009-2010. Estación meteorológica del Departamento de Recursos Hídricos de la Universidad de Concepción, Chillán, Chile.





**Figura 7.** Efecto de la época de siembra y bajas temperaturas en la esterilidad floral y rendimiento en el arroz. A) Evaluación de la esterilidad floral, B) Evaluación del rendimiento en grano. En color rojo se representa la temporada 2008-2009 y en color azul la temporada 2009-2010. Las barras corresponden al error estándar de tres repeticiones. Línea azul, corresponde al año frío y línea roja corresponde al año normal (Adaptado: Donoso et al., 2015).

Al comparar diferentes fechas (épocas) de siembra realizadas en la temporada de bajas temperaturas y en una temporada normal, se pudo observar que el período de siembra a floración se incrementó en 19 d en promedio en la temporada fría (Donoso et al., 2015). Además, se apreció un incremento en la esterilidad floral cercano al 90 % en las fechas más tardías y una reducción en el rendimiento del grano de 7 t ha<sup>-1</sup>, llegando a rendimientos cercanos a 3 t ha<sup>-1</sup>. Cabe resaltar que, en siembras realizadas a partir del 24 de octubre, los rendimientos fueron un 20 % inferiores a la siembra más temprana ocurrida el 10 de octubre y un 50 % inferiores a la de un año normal.

### Relaciones entre características agronómicas y parámetros climáticos

Con el objetivo de conocer la incidencia del clima en el desarrollo productivo de la planta de arroz, se realizó un estudio de las correlaciones entre las características agronómicas como el rendimiento en grano, esterilidad floral y la floración, en cuatro temporadas, y cinco fechas de siembra en la localidad de San Carlos, con índices agroclimáticos como:

Grados día acumulados (GDA) (°C) entre la siembra y la floración (GDA siembra-floración), entre la siembra y el inicio de panícula (GDA siembra-inicio panícula), y entre el inicio de panícula y la floración (GDA inicio panícula-floración), utilizando la siguiente fórmula (McMaster y Wilhelm, 1997):

$$GDA = \sum_{i=1}^n \left( \frac{TM_i + Tm_i}{2} \right) - T_{base}$$

Donde TM<sub>i</sub> corresponde a la temperatura máxima del día i, donde i corresponde al día 1, 2, 3,..... hasta el día n, estudiado; Tm<sub>i</sub> a la temperatura mínima del día i, donde i corresponde al día 1, 2, 3,..... hasta el día n, estudiado y T<sub>base</sub> a la temperatura base para el cultivo del arroz (10 °C).

Grados frío acumulados (GFA) (°C) entre la siembra y la floración (GFA siembra-floración), entre la siembra y el inicio de panícula (GFA siembra-inicio panícula), y entre el inicio de panícula y la floración (GFA inicio panícula-floración), utilizando la siguiente fórmula:

$$GFA = \sum_{i=1}^n T_{base} - T_{mi} < 10 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Donde  $T_{base}$  es la temperatura base para el cultivo del arroz (10 °C) y  $T_{mi}$  corresponde a la temperatura mínima menor a 10 °C del día  $i$ , donde  $i$  corresponde al día 1, 2, 3,..... hasta el día  $n$ , estudiado.

Radiación acumulada (RA) ( $\text{MJ m}^{-2}$ ) entre la siembra y la floración (RA siembra-floración), entre la siembra y el inicio de panícula (RA siembra-inicio panícula), y entre el inicio de panícula y la floración (RA inicio panícula-floración).

Temperatura crítica acumulada (TCA) entre el inicio de panícula y la floración (TCA inicio panícula-floración), utilizando la siguiente fórmula:

$$TCA = \sum_{i=1}^n T_{mi} > 10 \text{ } ^\circ\text{C} - T_{base}$$

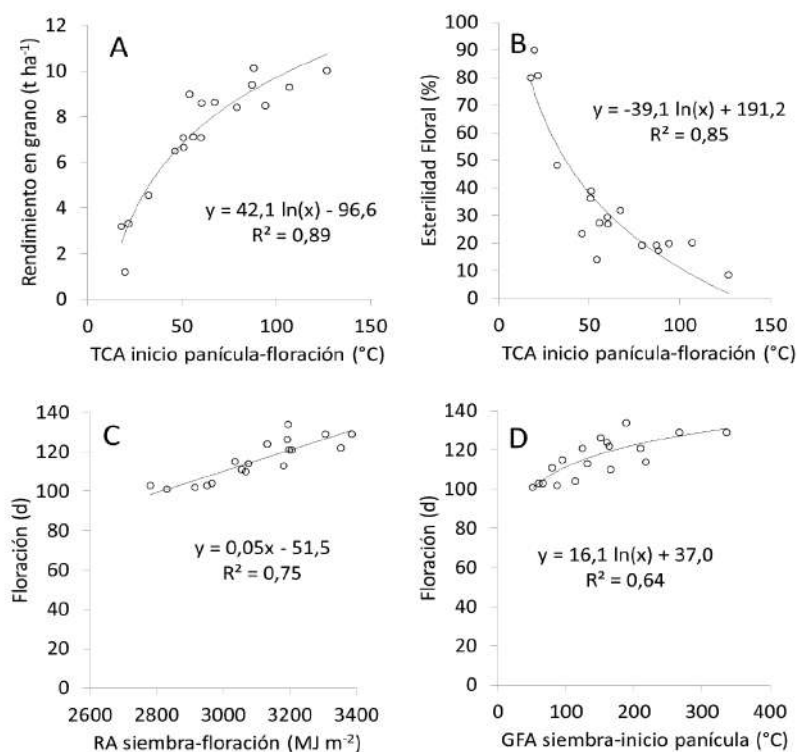
Donde  $T_{base}$  es la temperatura base para el cultivo del arroz (10°C) y  $T_{mi}$  corresponde a la temperatura mínima mayor a 10 °C del día  $i$ , donde  $i$  corresponde al día 1, 2, 3,..... hasta el día  $n$ , estudiado.

El rendimiento en grano se correlacionó significativamente con la variable climática TCA inicio panícula-floración ( $r = 0,87$ ,  $p < 0,01$ ;  $R^2 = 0,89$ ) (Cuadro 2; Figura 8A). Con ello se entiende que el rendimiento en grano depende de las temperaturas mínimas que ocurren entre el inicio de la formación de la panícula hasta la floración. Es importante mencionar que la variable es consistente en las diferentes temporadas y se describe por primera vez, considerando las condiciones climáticas de Chile.

La esterilidad floral presentó una alta correlación negativa con el rendimiento en grano ( $r=0,95$ ;  $p<0,01$ ) (Cuadro 2). Esto es habitual debido a que el rendimiento depende, en gran medida, de la proporción de granos llenos presentes en la panícula. También se observó una significativa correlación entre la esterilidad floral y TCA inicio de panícula-floración (Figura 8B) ( $r= 0,81$ ;  $p<0,01$ ;  $R^2= 0,85$ ). Con ello se comprueba que la esterilidad floral depende de la acumulación de las temperaturas mínimas sobre 10 °C, lográndose determinar que valores de TCA, entre inicio de panícula y floración mayores a 80 °C, podrían evitar una esterilidad floral mayor a 20 %.

El desarrollo fenológico de la variedad 'Zafiro-INIA', en las diferentes fechas de siembra, mostró una correlación positiva y significativa ( $r= 0,87$ ;  $p<0,01$ ), entre RA desde siembra a floración y los días a floración (Figura 8C), con un coeficiente de determinación,  $R^2= 0,75$  (Cuadro 2). La correlación positiva entre los días a floración y RA en ese periodo, se explica debido a que las bajas temperaturas de octubre y noviembre, disminuyen el crecimiento y desarrollo de las plantas de arroz sembradas en fechas de siembra temprana, induciendo un aumento en los días a floración y, por ende, una mayor exposición a la radiación solar entre siembra y floración.

Por otro lado, siembras tardías, expuestas a temperaturas mayores desde la siembra, desarrollan todos sus procesos de forma más acelerada, lo que implica una menor exposición a la radiación solar entre siembra y floración. Lo anterior se explica al analizar la correlación entre los días de siembra a floración y GFA siembra-inicio panícula, donde se observa una correlación positiva que implica que la mayor acumulación de temperaturas mínimas menores a 10 °C induce un incremento en los días a floración ( $r^2=0,64$ ; Figura 8D). La correlación de las temperaturas bajo la Temperatura crítica y la floración fue positiva y altamente significativa ( $r=0,76$ ;  $p<0,01$ ; Cuadro 2).



**Figura 8.** Correlaciones entre variables climáticas y agronómicas en cuatro temporadas del cultivo de arroz. La línea corresponde a la ecuación que explica la variación observada en los datos, y que está expresada en el coeficiente de determinación  $R^2$ . A) corresponde a la correlación entre el rendimiento en grano y TCA entre inicio de panícula y floración, B) corresponde a la correlación entre la esterilidad floral y TCA entre inicio de panícula y floración, C) corresponde a la correlación entre los días a floración y RA entre siembra y floración, D) corresponde a la correlación entre los días a floración y GFA entre siembra e inicio de panícula. TCA = Temperatura crítica acumulada (°C). RA= Radiación acumulada (MJ m<sup>-2</sup>). GFA= Grados frío acumulados (°C).

**Cuadro 2.** Matriz de coeficientes de correlación de Pearson (r) entre variables climáticas y variables agronómicas del cultivo del arroz en Chile, en cuatro temporadas.

	Rendimiento (t ha <sup>-1</sup> )	Esterilidad Floral (%)	Días a Floración (d)	GDA siembra-floración (°C)	GDA siembra -inicio panícula (°C)	GDA inicio panícula-floración (°C)	RA siembra-floración (MJ m <sup>-2</sup> )	RA siembra-inicio panícula (MJ m <sup>-2</sup> )	RA inicio panícula-floración (MJ m <sup>-2</sup> )	GFA siembra-floración (°C)	GFA siembra-inicio panícula (°C)	GFA inicio panícula-floración (°C)	TCA inicio panícula-floración (°C)
Rendimiento (t ha <sup>-1</sup> )	1												
Esterilidad Floral (%)	-0,95 **	1											
Días a Floración (d)	0,44	-0,34	1										
GDA siembra-floración (°C)	0,20	-0,34	-0,36	1									
GDA siembra -inicio panícula (°C)	-0,41	0,34	-0,62 **	0,47 *	1								
GDA inicio panícula-floración (°C)	0,62 **	-0,65 **	0,39	0,30	-0,70 **	1							
RA siembra-floración (MJ m <sup>-2</sup> )	0,10	0,01	0,87 **	-0,45	-0,51 *	0,19	1						
RA siembra-inicio panícula (MJ m <sup>-2</sup> )	-0,45	0,54 *	0,12	-0,35	0,51 *	-0,83 **	0,30	1					
RA inicio panícula-floración (MJ m <sup>-2</sup> )	0,51 *	-0,52 *	0,45	0,05	-0,82 **	0,93 **	0,35	-0,79 **	1				
GFA siembra-floración (°C)	0,16	-0,10	0,70 **	-0,49 *	-0,80 **	0,47 *	0,78 **	-0,12	0,62 **	1			
GFA siembra-inicio panícula (°C)	0,22	-0,15	0,76 **	-0,47 *	-0,78 **	0,46	0,80 **	-0,07	0,59 *	0,99 **	1		
GFA inicio panícula-floración (°C)	-0,30	0,27	-0,06	-0,30	-0,51 *	0,30	0,22	-0,39	0,53 *	0,53 *	0,42	1	
TCA inicio panícula-floración (°C)	0,87 **	-0,81 **	0,65 **	0,09	-0,49 *	0,62 **	0,24	-0,34	0,49 *	0,21	0,28	-0,39	1

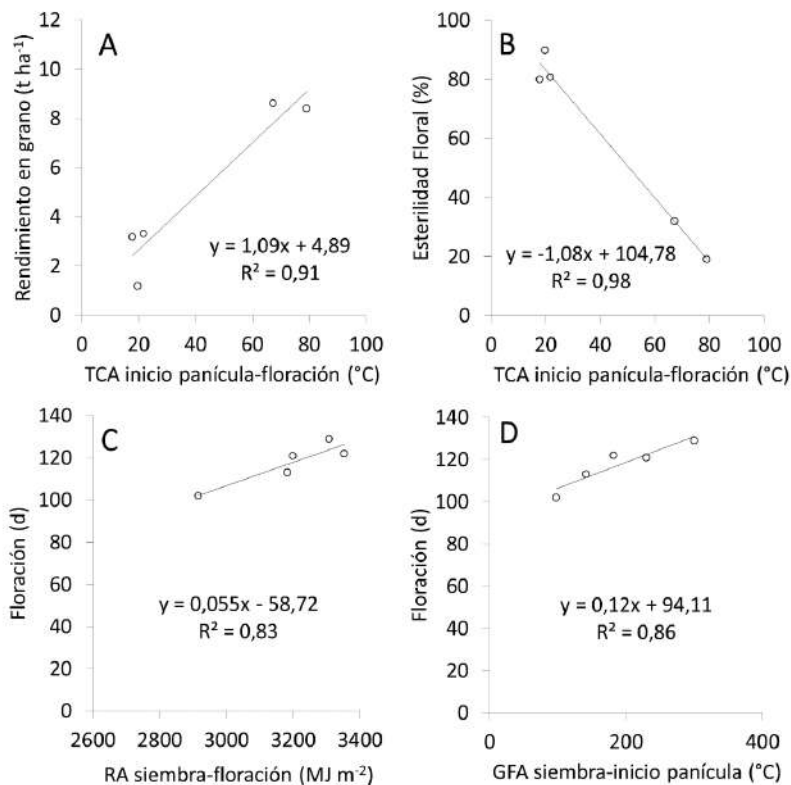
Significancia del coeficiente de correlación de Pearson (r= $p < 0,05$ ; \*\* $p < 0,01$ ).

## Análisis del efecto de la temperatura en los parámetros del cultivo del arroz en una temporada fría (2009-2010)

El mismo análisis anterior, se realizó en una de las temporadas más frías que ha afectado al cultivo de arroz en Chile (2009-2010), donde se encontró una serie de correlaciones de alto valor agronómico que permite comprender el rol de la radiación solar y la temperatura bajo estas condiciones (Cuadro 3).

Se observó una correlación positiva significativa entre el rendimiento en grano y la variable climática TCA a inicio de panícula-floración ( $r=0,95$ ,  $p<0,05$ ;  $R^2=0,91$ ) (Cuadro 3; Figura 9A). Ello permite comprender que el rendimiento en grano es dependiente de temperaturas mínimas que ocurren entre el inicio de la formación de la panícula hasta la floración.

La esterilidad floral se correlacionó negativamente con el rendimiento en grano ( $r=0,98$ ;  $p<0,01$ ) (Cuadro 3). Esto es debido a que el rendimiento en grano depende de la proporción de esterilidad floral. También se correlacionó negativamente la esterilidad floral y TCA inicio de panícula-floración ( $r=0,99$ ,  $p<0,01$ ;  $R^2=0,98$ ) (Cuadro 3; Figura 9B). Ello permite comprender la dependencia de la acumulación de las temperaturas mínimas superiores a  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  sobre la esterilidad floral, lográndose determinar que valores de TCA entre el inicio de panícula y floración, mayores a  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , podrían evitar una esterilidad floral superior a  $20\%$ .



**Figura 9.** Correlaciones entre variables climáticas y agronómicas en temporada 2009-2010. La línea corresponde a la ecuación que explica la variación observada en los datos y que está expresada en el coeficiente de determinación  $R^2$ . A) corresponde a la correlación entre el rendimiento en grano y TCA entre inicio de panícula y floración, B) corresponde a la correlación entre la esterilidad floral y TCA entre inicio de panícula y floración, C) corresponde a la correlación entre los días a floración y RA entre siembra y floración, D) corresponde a la correlación entre los días a floración y GFA entre siembra e inicio de panícula. TCA = Temperatura crítica acumulada. RA = Radiación acumulada ( $\text{MJ m}^{-2}$ ). GFA = Grados frío acumulados ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Se determinó una correlación positiva y significativa entre RA siembra-floración y los días a floración ( $r=0,91$ ,  $p<0,05$ ;  $R^2=0,83$ ) (Cuadro 3; Figura 9C). El incremento de los días a floración con mayor RA siembra-floración es debido a que bajas temperaturas de octubre y noviembre, inducen un atraso en la fenología y, por ello, una mayor exposición a la radiación solar entre siembra y floración. Por otro lado, siembras tardías, no expuestas a estas temperaturas, desarrollan su fenología de forma más acelerada, lo que implica una menor exposición a la radiación solar entre siembra y floración. Lo anterior se comprende al analizar la correlación entre los días de siembra a floración y GFA siembra-inicio de panícula, donde se observa una correlación positiva que implica que la mayor acumulación de temperaturas mínimas menores a 10 °C induce un incremento en los días a floración ( $r^2=0,86$ ; Figura 9D). Esta correlación fue positiva y significativa ( $r=0,94$ ,  $p<0,05$ ; Cuadro 3).

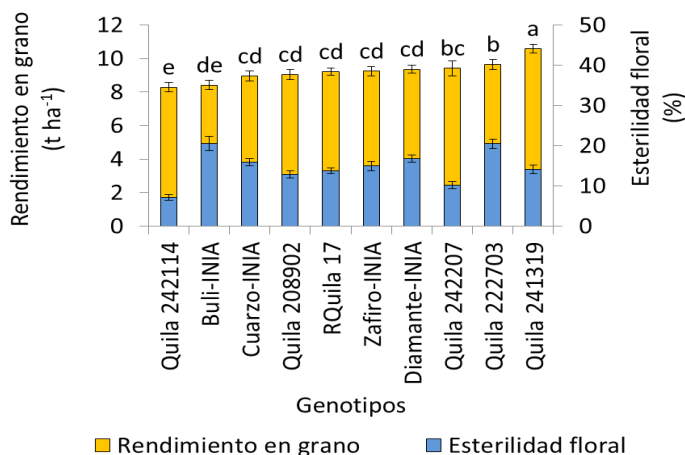
**Cuadro 3.** Matriz de coeficientes de correlación de Pearson (r) entre variables climáticas y variables agronómicas del cultivo del arroz en Chile, en temporada 2009-2010.

	Rendimiento (t ha <sup>-1</sup> )	Esterilidad Floral (%)	Días a Floración (d)	GDA siembra-floración (°C)	GDA siembra -inicio panícula (°C)	GDA inicio panícula-floración (°C)	RA siembra-floración (MJ m <sup>-2</sup> )	RA siembra-inicio panícula (MJ m <sup>-2</sup> )	RA inicio panícula-floración (MJ m <sup>-2</sup> )	GFA siembra-floración (°C)	GFA siembra-inicio panícula (°C)	GFA inicio panícula-floración (°C)	TCA inicio panícula-floración (°C)
Rendimiento (t ha <sup>-1</sup> )	1												
Esterilidad Floral (%)	-0,98 **	1											
Días a Floración (d)	0,63	-0,70	1										
GDA siembra-floración (°C)	-0,94 *	0,98 **	-0,57	1									
GDA siembra -inicio panícula (°C)	-0,93 *	0,98 **	-0,67	0,96 *	1								
GDA inicio panícula-floración (°C)	0,90 *	-0,95 *	0,71	-0,91 *	-0,99 **	1							
RA siembra-floración (MJ m <sup>-2</sup> )	0,27	-0,35	0,91 *	-0,19	-0,31	0,37	1						
RA siembra-inicio panícula (MJ m <sup>-2</sup> )	-0,81	0,83	-0,32	0,87	0,91 *	-0,90 *	0,07	1					
RA inicio panícula-floración (MJ m <sup>-2</sup> )	0,87	-0,93 *	0,75	-0,88 *	-0,97 **	1,00 **	0,44	-0,86	1				
GFA siembra-floración (°C)	0,83	-0,90 *	0,93 *	-0,82	-0,89 *	0,90 *	0,70	-0,62	0,92 *	1			
GFA siembra-inicio panícula (°C)	0,82	-0,90 *	0,94 *	-0,82	-0,88	0,88 *	0,71	-0,60	0,90 *	1,00 **	1		
GFA inicio panícula-floración (°C)	0,86	-0,93 *	0,85	-0,86	-0,95 *	0,97 **	0,58	-0,76	0,98 **	0,98 **	0,97 **	1	
TCA inicio panícula-floración (°C)	0,95 *	-0,99 **	0,67	-0,99 *	-0,97 **	0,93 *	0,32	-0,82	0,90 *	0,89 *	0,89 *	0,91 *	1

Significancia de coeficiente de correlación de Pearson: \* $p<0,05$ ; \*\* $p<0,01$ .

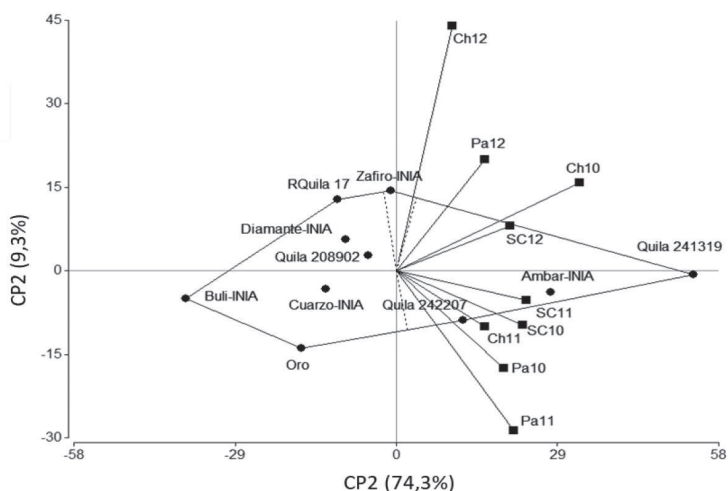
## Análisis de la interacción genotipo por ambiente

En Chile, el cultivo del arroz se desarrolla en dos regiones administrativas, Región del Maule (Linares-Parral) y Región de Ñuble (Ñiquén-San Nicolás), que poseen diferentes órdenes de suelos (Inceptisols, Alfisols y Vertisols) (Hirzel et al., 2011) y algunas diferencias climáticas. Por ello, es necesario estudiar el comportamiento de las variedades recomendadas en estos ambientes, para conocer si éstas poseen una adaptación general o específica a estas localidades, y en base a esos resultados, realizar las recomendaciones pertinentes. Uno de los análisis que permite comprender este problema es la interacción genotipo por ambiente, con el cual se puede evaluar la estabilidad de los genotipos de arroz (Colombari et al., 2013). Dentro de ese análisis se pueden utilizar diferentes herramientas estadísticas, como el biplot GGE, que muestra el comportamiento de los diferentes genotipos (variedades y/o líneas experimentales) en los disímiles ambientes (localidades) evaluados y su interacción. Con ello, se pueden identificar genotipos con gran potencial de rendimiento y estabilidad en los diferentes mega-ambientes (Samonte et al., 2005; Karimizadeh et al., 2013). Para realizar este estudio se evaluaron 10 genotipos (variedades y líneas experimentales) en tres localidades (Chillán, San Carlos y Parral) durante tres temporadas (Donoso et al., 2016). Los resultados del estudio indicaron que los rendimientos obtenidos variaron entre los 8,3 y 10,0 t ha<sup>-1</sup> (Figura 10) y la esterilidad floral en promedio fluctuó entre 7 % y 20 %.

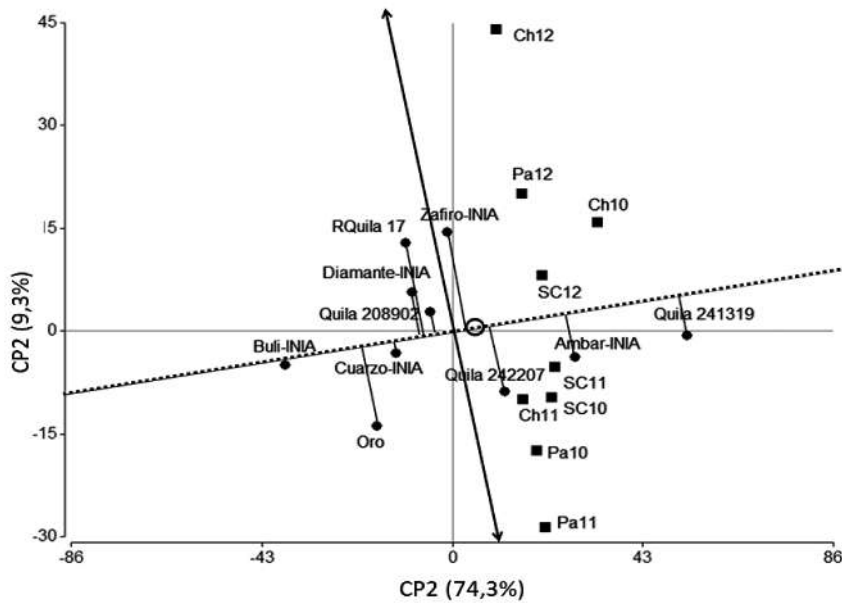


**Figura 10.** Rendimiento y esterilidad floral de los genotipos evaluados. Las barras de error corresponden al error estándar de tres repeticiones. Letras diferentes corresponden a diferencias significativas en el rendimiento en grano (LSD Fisher  $P < 0,05$ ).

El análisis de la interacción genotipo por ambiente logró demostrar que solamente había un mega ambiente en donde destacó la línea experimental Quila 241319 (Figura 11). La distancia entre la ubicación de genotipo en el biplot y la media de rendimiento entre ambientes (línea punteada), representa la estabilidad de este genotipo (Figura 12). Este análisis permitió también diferenciar a la línea experimental Quila 241319 del resto de los genotipos, y posibilitó el lanzamiento de este genotipo como la primera variedad de arroz de grano medio, apta para sushi y risotto, llamada 'Platino-INIA' (Paredes et al., 2016).



**Figura 11.** Biplot GGE del rendimiento en grano de genotipos de arroz. Los cuadrados negros indican los nueve ambientes y los círculos negros, corresponden a los genotipos evaluados. La línea punteada corresponde a la división de los mega-ambientes. Ch10, Ch11 y Ch12 corresponden a la localidad de Chillán en las temporadas 2010-2011, 2011-2012 y 2012-2013, respectivamente. SC10, SC11 y SC12, corresponden a la localidad de San Carlos, en las temporadas 2010-2011, 2011-2012 y 2012-2013, respectivamente. Pa10, Pa11 y Pa12, corresponden a la localidad de Parral en las temporadas 2010-2011, 2011-2012 y 2012-2013, respectivamente.



Fuente: Donoso et al., 2016.

**Figura 12.** Biplot GGE para análisis de la estabilidad del rendimiento de los genotipos evaluados. El círculo central, corresponde a la media de todos los ambientes y la línea punteada corresponde a la media de rendimiento entre los ambientes. Los cuadrados negros indican los nueve ambientes y los círculos negros corresponden a los genotipos evaluados. Ch10, Ch11 y Ch 12 corresponden a la localidad de Chillán en las temporadas 2010-2011, 2011-2012 y 2012-2013, respectivamente. SC10, SC11 y SC12, corresponden a la localidad de San Carlos, en las temporadas 2010-2011, 2011-2012 y 2012-2013, respectivamente. Pa10, Pa11 y Pa12, corresponden a la localidad de Parral en las temporadas 2010-2011, 2011-2012 y 2012-2013, respectivamente.

## Recomendaciones para evitar el daño por bajas temperaturas en el cultivo del arroz

Una de las medidas más adecuadas para reducir los efectos de las bajas temperaturas es sembrar temprano, durante octubre (Figura 13). De esta manera, la planta de arroz puede crecer y desarrollarse en condiciones de temperatura y radiación favorables, lo que finalmente se ve reflejado en el rendimiento en grano paddy. Además, la siembra temprana permite obtener una mejor calidad industrial del grano. Siembras realizadas en octubre logran mejor calidad industrial que siembras realizadas en noviembre, lo que puede significar pérdidas cercanas a un 64 % de grano entero por hectárea, por presencia de mayor cantidad de grano verde y manchado (Alvarado y Hernaíz 2007). Además, se ha registrado, en algunos casos, un mayor porcentaje de panza blanca, debido a las altas temperaturas y al menor período de llenado del grano en siembras tardías.

Según lo observado en una de las temporadas más frías para el cultivo del arroz, se recomienda la realización de siembras hasta el 20 de octubre. Con posterioridad a esa fecha, es probable un fuerte descenso en los rendimientos en años de características similares a la temporada 2009-2010. Además, es importante mencionar que, en caso de año normal, tampoco es recomendable la realización de siembras posteriores al 10 de noviembre, donde el riesgo de pérdidas de rendimiento puede ser muy importante, alrededor de  $0,1 \text{ t ha}^{-1}$  de arroz por día de retraso (Alvarado y Hernaíz, 2007). Esto se debe a que siembras tardías (después del 10 de noviembre) favorecen el atraso de la floración de la planta hasta febrero-marzo, cuando las temperaturas y radiación solar no son óptimas para el desarrollo del cultivo.



**Figura 13.** Fecha de siembra recomendada para el cultivo del arroz en Chile. En color verde se representan las fechas óptimas, en amarillo las fechas con riesgo, y en rojo las fechas de alto riesgo de reducción de rendimiento en grano.

### Consideraciones finales

Chile es el país arrocero más austral del mundo, con el desafío de producir arroz en condiciones de frío. La instalación de estaciones meteorológicas automáticas de referencia en toda la región arrocera de Chile, ha permitido cuantificar las relaciones y los efectos del clima en el cultivo de arroz a nivel local. Asociado a lo anterior, se muestra que la fecha óptima de siembra (inicios de octubre) y el manejo del riego (lámina de agua), especialmente en la etapa reproductiva del arroz, son fundamentales para mitigar los efectos nocivos del clima para este cultivo.

Finalmente, la relación entre el clima y el crecimiento y desarrollo del arroz en Chile, descrita en este capítulo, es en respuesta a las continuas necesidades del rubro. Además, representa una guía para futuros estudios, que busquen mejorar la sustentabilidad de este cultivo en el país.

### Referencias

- Alvarado, R. 1999. Influence of air temperature on rice population, length of period from sowing to flowering and spikelet sterility. p. 63-68. In Hill, J.E., and Hardy, B. (ed.) Proceedings of the Second Temperate Rice Conference, Sacramento, California, USA.
- Alvarado, R., Hernaíz, S. 2007. Variedades, siembra, semilla certificada, dosis de semilla y época de siembra. p. 21-38. En Alvarado, R. (ed.) Arroz Manejo Tecnológico. Boletín INIA N°162. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.
- Baruah, A.R., Ishigo-Oka, N., Adachi, M., et al. 2009. Cold tolerance at the early growth stage in wild and cultivated rice. *Euphytica* 165:459-470.
- Bouman, B.A.M., Lampayan, R.M., Tuong, T.P. 2007. Water Management in Irrigated Rice: coping with water scarcity. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines.
- Castillo, D., Alvarado, J. 2002. Caracterización de germoplasma de arroz para tolerancia a frío en la etapa de germinación. *Agríc. Téc. (Chile)* 62:596-605.
- Coast, O., Murdoch, A.J., Ellis, R.H., et al. 2015. Resilience of rice (*Oryza* spp.) pollen germination and tube growth to temperature stress. *Plant Cell Environ.* 39:26-37.
- Colombari, F., de Resende, M.D.V., de Morais, O.P., et al. 2013. Upland rice breeding in Brazil: a simultaneous genotypic evaluation of stability, adaptability and grain yield. *Euphytica* 192:117-129.



- CSIRO. 2008. Water availability in the Murray-Darling Basin. A report to the Australian Government from the CSIRO Murray-Darling Basin Sustainable Yields Project, Australia.
- Donoso, G., Cabas P., Paredes M., et al. 2015. Cold tolerance evaluation of temperate rice (*Oryza sativa* L. ssp. *japonica*) genotypes at the seedling stage. *Gayana Bot.* 72:1-13.
- Donoso, G., Leyton, M., Paredes, M., et al. 2014. Relative expression of genes related with cold tolerance in temperate rice at seedling stage. *Afr. J. Biotechnol.* 13:2506-2512.
- Donoso, G., Paredes, A. 2015. Efecto de las bajas temperaturas en el cultivo del arroz. p. 18-21. En Paredes, M., Becerra, V. (eds.) Manual de producción de arroz: Buenas prácticas agrícolas (BPA). Boletín INIA N°306. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.
- Donoso, G., Paredes, M., Arbiza, O., et al. 2013. Cold tolerance evaluation of Chilean rice (*Oryza sativa* L.) genotypes at germination stage. *Chil. J. Agric. Res.* 73:3-8.
- Donoso, G., Paredes, M., Becerra, V., et al. 2016. GGE biplot analysis of multi-environment yield trials of rice produced in a temperate climate. *Chil. J. Agric. Res.* 72:152-157.
- Fuentealba-Sandoval, V., Finot, V., Wilckens, R., et al. 2014. Efectos de la disminución de temperatura sobre el desarrollo de la pared de la antera y el grano de polen en *Oryza sativa* L. *Gayana Bot.* 71:199-215.
- Garreaud, R., Boisier, J., Montecinos, A., et al. 2019. The central Chile mega drought (2010-2018): A climate dynamics perspective. *Int. J. Climatol.* 40:421-439.
- Gaydon, D.S., Beecher, H.G., Reinke, R., et al. 2010. Rice. p. 67-83. In Stokes, C.J., Howden, S.M. (eds.) Adapting Australian agriculture to climate change (Chapter 5). CSIRO Publishing, Clayton, Australia.
- Grohs, M., Marchesan, E., Roso, R., et al. 2016. Attenuation of low-temperature stress in rice seedlings. *Pesq. Agropec. Trop.* 46:197-205.
- Hirzel, J., Pedreros, A., Cordero, K. 2011. Effect of nitrogen rates and split nitrogen fertilization on grain yield and its components in flooded rice. *Chil. J. Agric. Res.* 71:437-444.
- INE. 2020. Estimación de superficie, producción y rendimiento. Instituto Nacional de Estadística (INE), Santiago, Chile.
- Karimizadeh, R., Mohammadi, M., Sabaghni, N., et al. 2013. GGE biplot analysis of yield stability in multi-environment trials of lentil genotypes under rainfed condition. *Not. Sci. Biol.* 5:256-262.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., et al. 2006: World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol. Z.* 15:259-263.
- Liu, B., Mo, W.J., Zhang, D., et al. 2019. Cold influences male reproductive development in plants: a hazard to fertility, but a window for evolution. *Plant Cell Physiol.* 60:7-18.
- McMaster G.S., Wilhelm, W.W. 1997. Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agric. For. Meteorol.* 87:291-300.
- Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y. 2016. Sustainability: Four billion people facing severe water scarcity. *Sci. Adv.* 2:e1500323.
- Nishiyama, I. 1995. Science of the rice plant. p. 769-793. In Matsuo, T., Kumazawa, K., Ishii, R., et al. (eds.) Food and Agriculture Policy Research Center, Tokio, Japan.
- Novoa, R., Villaseca, S., del Canto, P., et al. 1989. Mapa agroclimático de Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Santiago, Chile.
- Ortega, R. 2007. Analysis of factors affecting spikelet sterility in flooded rice under field conditions in Chile. *Arch. Agron. Soil Sci.* 53:183-192.
- Ortega, R., Aresti, M., Pereira, I. 2011. Implementation and evaluation of an image analysis system for determining viability of pollen grains in temperate rice. *Chil. J. Agric. Res.* 71:16-22.

- Paredes, M., Becerra, V., Donoso, G., et al. 2016. Platino-INIA. Nueva variedad de arroz grano medio. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación INIA Quilamapu. [www.semillas.inia.cl](http://www.semillas.inia.cl).
- Samonte, S.O.P.B., Wilson, L.T., McClung, A.M., et al. 2005. Targeting cultivars onto rice growing environments using AMMI and SREG GGE biplot analysis. *Crop Sci.* 45:2414-2424.
- Satake, T., Hayase, H. 1970. Male sterility caused by cooling treatment at the young microspore stage in rice plants: V. Estimations of pollen developmental stage and the most sensitive stage to coolness. *Jpn. J. Crop Sci.* 39:468-473.
- Shakiba, E., Edwards, J.D., Jodari, F., et al. 2017. Genetic architecture of cold tolerance in rice (*Oryza sativa*) determined through high resolution genome-wide analysis. *PLoS ONE* 12:e0172133.
- Tuong, T.P., Bouman B.A.M. 2003. Rice production in water scarce environments. p. 53-67. In: Kijne, J.W., Barker, R., Molden, D. (eds.) *Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement*. CABI Publishing, Wallingford, UK.
- Williams, R.L., Angus, J.F. 1994. Deep floodwater protects high nitrogen rice crops from low temperature damage. *Aust. J. Exp. Agric.* 34:927-932.
- Yoshida, S. 1981. Climatic environment and its influence. p. 65-110. In: *Fundamentals of rice crop science*. International Rice Research Institute (IRRI), Manila, Philippines.