

# Capítulo 15. Crecimiento y desarrollo de la planta de arroz en Chile

Mario Paredes C., Gabriel Donoso Ñ., Viviana Becerra V.

El crecimiento y el desarrollo de la planta de arroz están influenciados por factores genéticos (genotipo y variedad), ambientales y por la interacción del genotipo con el ambiente. Es así como la temperatura, el fotoperíodo, la radiación solar, precipitaciones, época de siembra, densidad de plantas, fertilización, manejo del agua, control de malezas, entre otros, influyen directamente sobre el crecimiento de la planta, controlando su velocidad y duración de crecimiento en los diferentes estados de desarrollo y, finalmente, en el rendimiento y calidad del producto cosechado.

El arroz posee una amplia adaptación a las condiciones de clima y suelo. El arroz crece desde el noreste de China (53° lat. N, pasando por el Ecuador hasta el sur de Chile (36° lat. S). Sin embargo, la mayor proporción del arroz crece en los trópicos, siendo la temperatura uno de los principales factores que determina su crecimiento. El arroz crece también en diferentes alturas, lo hace a nivel del mar en algunas localidades de la India y a 2.000 m s.n.m. en Nepal. Además, puede cultivarse en condiciones de secano, de riego y en presencia de 150 a 500 cm de agua (Yoshida, 1977).

Las dos subespecies de arroz asiático, *Oryza sativa indica* y *Oryza sativa japonica*, están distribuidas principalmente en las regiones del trópico y de clima templado, debido a su respuesta diferencial a la temperatura y fotoperíodo. El crecimiento de las variedades de arroz tipo *japonica* en las latitudes extremas del norte y en el sur, se debe de manera significativa, a su insensibilidad al fotoperíodo y al aumento de la tolerancia a las bajas temperaturas. Por ello, cuando las variedades tipo *japonica* se siembran en el trópico, se comportan como variedades muy precoces, floreciendo muy rápidamente y con muy poca producción de materia seca, lo que incide en un muy bajo rendimiento (Yoshida, 1977). Sin embargo, los tipos *indica* y *japonica* pueden cultivarse en latitudes intermedias. Es así como, en el sur-oeste de China, el arroz del tipo *indica* se cultiva en bajas latitudes, el tipo *japonica* en altas latitudes, y ambos tipos en regiones intermedias en latitud. En el arroz tipo *japonica* se pueden distinguir dos grupos de arroces: *japonica* tropical y *japonica* templado (Garris et al., 2005).

En Chile, el arroz cultivado pertenece al tipo *japonica* templado de grano largo ancho, a diferencia del arroz tipo *japonica* templado convencional que posee un grano corto y más o menos redondeado. Este cultivo se desarrolla en el extremo sur de la zona productora de arroz del mundo, entre la ciudad y provincia de Linares, Región del Maule, ubicada en la latitud 35°50'48" sur y longitud 71°35'35,1" oeste, y la comuna de San Nicolás, provincia de Punilla, Región de Ñuble, ubicada en la latitud 36°28'47,21" sur y longitud 72°13'41,63" oeste, y a una altura de 71 m s.n.m., y 151 m s.n.m., respectivamente. Ambas localidades presentan un clima mediterráneo (clasificación climática de Köppen: Csb). Por ello, la planta de arroz se debe adaptar a las condiciones específicas de fotoperíodo, bajas temperaturas, escasas precipitaciones y alta radiación que caracterizan a la región productora de arroz más austral del mundo.

En este capítulo se entregan los primeros resultados empíricos del crecimiento y desarrollo de la variedad 'Zafiro-INIA' obtenidos en la zona de San Carlos, los cuales se irán ajustando en el tiempo, a medida que haya una mayor disponibilidad de datos. Los resultados fueron obtenidos a través de un muestreo secuencial de plantas desde un ensayo de evaluación de cinco épocas de siembra, utilizando el sistema de siembra directa. La siembra de cada época fue realizada entre el 22 septiembre y el 18 de noviembre del 2015, con diferencias aproximadas a los 15 d entre ellas. El ensayo fue establecido en la localidad de San Carlos, provincia de Punilla, Región de Ñuble, ubicada a 36° 23' 8,09" latitud sur y a 72°1'6,96" longitud oeste y a una altitud de 141 m s.n.m.

Las evaluaciones relacionadas con el crecimiento de la planta que se tuvieron en cuenta fueron la altura de planta (cm), peso seco de tallos, macollas, hojas, panícula y granos ( $\text{g m}^{-2}$ ). También se consideraron los estados de desarrollo como el inicio de macolla, del primordio, excursión de la panoja y desarrollo de los granos. Al momento de la cosecha, se evaluó la altura (cm), esterilidad (%), rendimiento ( $\text{t ha}^{-1}$ ) y porcentaje de grano entero.

La evaluación de la época de siembra permite seleccionar las condiciones óptimas para el crecimiento y desarrollo de una variedad, lo que se ve reflejado, finalmente, en la producción y calidad del producto cosechado (San-oh et al., 2004; Khalifa, 2009). Es así como la época de siembra puede modificar el patrón de crecimiento de la planta, principalmente a través de dos aspectos: el estado de desarrollo, que se refiere al cambio cualitativo, y la producción de materia seca, que es un cambio cuantitativo que ocurre durante el crecimiento de la planta.

## I. Estados de desarrollo de la planta de arroz

La escala de desarrollo de la planta de arroz propuesta, se puede resumir en tres etapas, donde ocurren una serie de eventos (estados) sucesivos: emergencia, desarrollo vegetativo y desarrollo reproductivo (Counce et al., 2000).

**Temperatura (°C) promedio, acumulación de grados (°C) y radiación.** Con el objetivo de tener una visión más completa sobre las condiciones de crecimiento y desarrollo de la planta, se presentan a continuación los datos de temperatura, radiación y fotoperíodo ocurridos en la temporada de evaluación. Las precipitaciones durante el crecimiento del cultivo fueron mínimas y no tuvieron mayor incidencia en el suministro y uso del agua por parte de la planta, debido a que ésta permaneció inundada durante su crecimiento y desarrollo.

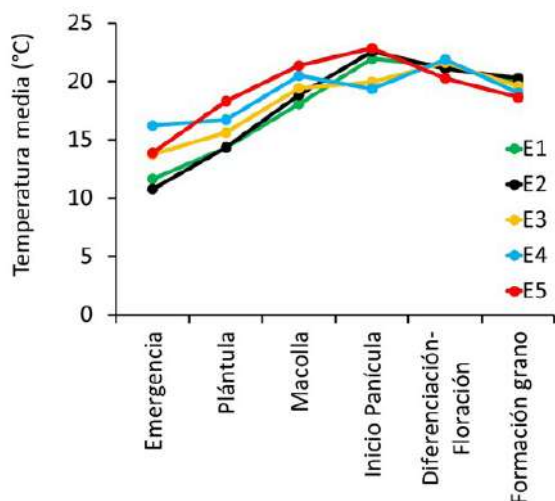
Para realizar la comparación entre las épocas de siembra, se alinearon las diferentes fases de desarrollo de la planta en un sólo punto, sin considerar la fecha calendario en que ocurrió cada evento fenológico.

**Temperatura (°C) promedio.** En primer lugar, se presentan las temperaturas medias que ocurrieron durante el desarrollo de la planta (Figura 1).

En general, se puede observar que las temperaturas medias aumentaron desde la emergencia de la plántula hasta el inicio de panícula (entre 19 y 23 °C), observándose una leve disminución en los estadios finales de desarrollo (entre 19 y 20 °C). Sin embargo, en cada época de siembra, las plantas estuvieron sometidas a diferentes temperaturas en el transcurso de su crecimiento y desarrollo. Por ejemplo, en emergencia entre 11 y 16 °C, macolla entre 18 y 21 °C, diferenciación de la panícula y floración 20 a 21 °C y formación del grano 19 a 20 °C (Figura 1). Es importante destacar que la última época de siembra, a pesar de haber tenido el mayor promedio de temperatura durante el período vegetativo, tuvo la menor temperatura promedio durante el período reproductivo, es decir, durante el desarrollo de la panícula, floración, llenado de grano y madurez de la planta (Figura 1), lo cual puede explicar, en parte, el menor rendimiento observado.

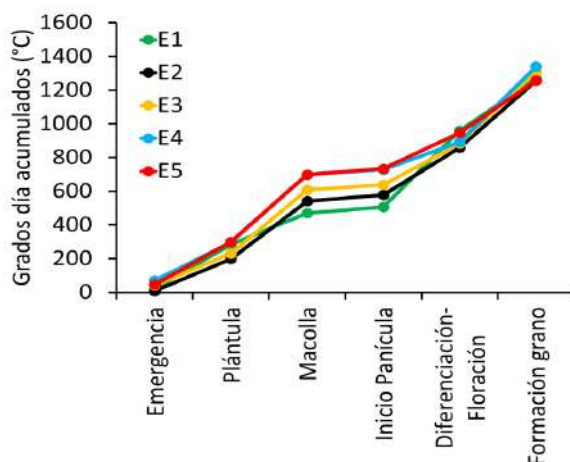
**Acumulación de los grados día (°C).** Corresponde a la suma de temperaturas mayores a 10 °C, considerada como la temperatura mínima para el crecimiento de la planta. La acumulación de los grados día se presenta en dos formas: como la suma de grados día desde la siembra a un estado de desarrollo específico, por ejemplo, siembra a macolla, siembra a floración, etc. para las diferentes épocas de siembra (Figura 2); y la segunda, como la acumulación de los grados día por estado de desarrollo, por ejemplo, macolla para las diferentes épocas de siembra (Figura 3).

**Desde siembra a un estado desarrollo específico.** La acumulación de grados día hasta el estado de plántula del arroz es muy similar en todas las épocas de siembra. Sin embargo, a partir de esta fase de desarrollo, las plantas empiezan a acumular grados día en forma diferente, dependiendo



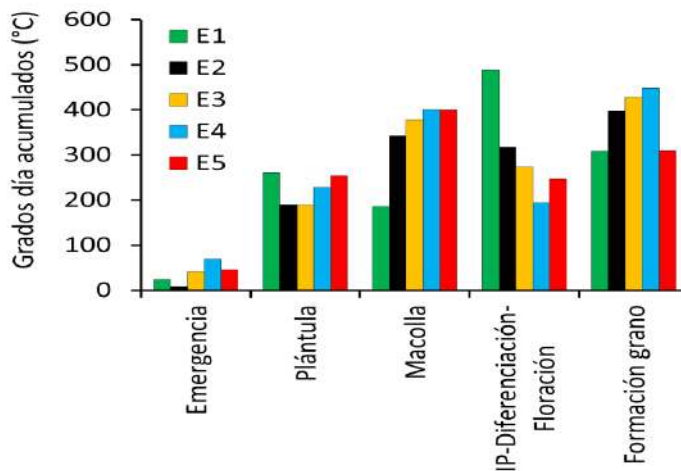
**Figura 1.** Temperatura (°C) promedio durante el crecimiento y desarrollo de la planta de arroz, variedad 'Zafiro-INIA', sembrada en diferentes épocas de siembra. San Carlos, Ñuble. Temporada 2015-2016.

de la época de siembra. Es así como las plantas de la primera época de siembra acumulan una menor cantidad de grados día comparada con las plantas sembradas en otras épocas, considerando el mismo estado de desarrollo. Por el contrario, las plantas sembradas en la última época acumulan la mayor cantidad de grados día. Es interesante hacer notar también que, durante el período comprendido entre la macolla y el inicio de panícula, se observa un estancamiento en la acumulación de grados, pero con tasas de acumulación diferente para cada una de las épocas de siembra. Así, las plantas sembradas en la primera época de siembra acumularon 471 grados día, mientras que las plantas de la última época acumularon 699 grados día. Posterior al inicio de la panícula, se reanuda la acumulación prácticamente lineal de grados día, llegando todas las plantas a la etapa final de la formación del grano, con una acumulación similar cercana a los 1.260 grados día (Figura 2).



**Figura 2.** Acumulación de grados día desde siembra a un estado específico de desarrollo de la planta de arroz, variedad 'Zafiro-INIA', sembrada en diferentes épocas de siembra. San Carlos, Ñuble. Temporada 2015-2016.

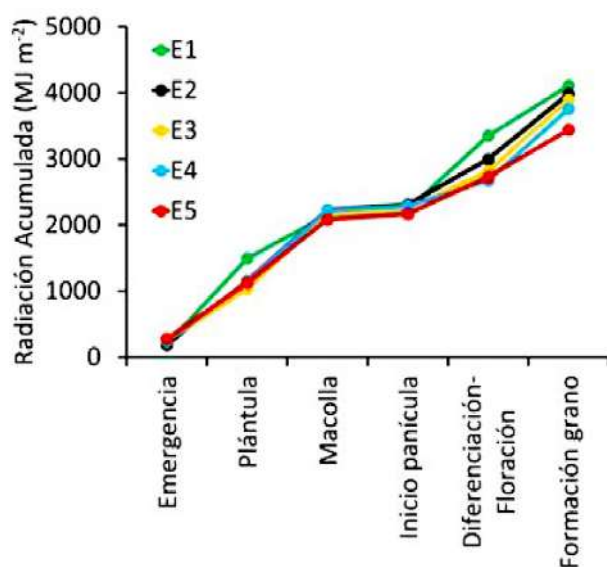
**Por estado de desarrollo.** Al comparar la acumulación de grados día por estado de desarrollo, se pueden observar diferencias asociadas a las épocas de siembra (Figura 3). Es así como en el estado de emergencia de las plantas, en todas las épocas de siembra se acumuló la menor cantidad de grados día, en comparación a los otros estados de desarrollo de las plantas de las otras épocas de siembra (Figura 3), aunque dentro de este estado de desarrollo se observaron también diferencias entre las épocas de siembra. Esta situación indica que, durante este período de desarrollo, se presentaron más con temperaturas menores a 10 °C, en comparación a los otros estados de desarrollo. En el caso del estado de plántula, la mayor acumulación de grados día ocurrió en la primera época de siembra, seguido de las últimas épocas. A macolla, la menor acumulación de grados día la recibieron las plantas sembradas en la primera época de siembra, la que aumentó a medida que se atrasaba la época de siembra. En el inicio de la panícula-diferenciación-floración, la mayor acumulación la obtuvo la primera época, la que fue disminuyendo en las épocas de siembras posteriores. Finalmente, en el llenado del grano, las mayores acumulaciones de grados día ocurrieron en la segunda, tercera y cuarta época de siembra, presentado una situación similar la primera y la cuarta época de siembra (Figura 3).



**Figura 3.** Acumulación de grados día en un estado específico de desarrollo de la planta, sembrada en diferentes épocas de siembra. San Carlos, Ñuble. Temporada 2015-2016.

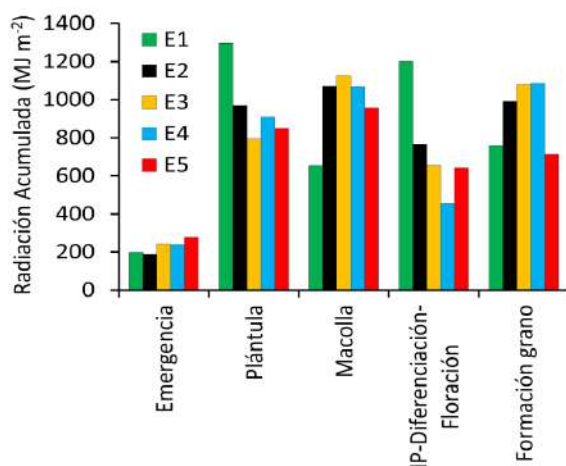
**Acumulación de la radiación solar.** Al igual que la acumulación de los grados día, la acumulación de la radiación solar se presenta en dos formas: la primera desde la siembra a la fase de un desarrollo específico (Figura 4), y la segunda en relación al estado desarrollo en sí mismo (Figura 5).

**Desde la siembra a la fase de desarrollo específica.** A la emergencia no se presentaron diferencias en la acumulación de radiación solar entre las épocas de siembra, a diferencia del estado de plántula donde la primera época tuvo una mayor acumulación de radiación. A macolla, la acumulación de la radiación fue similar en todas las épocas y estuvo levemente superior a los 2.000 MJ m<sup>-2</sup>, similar a lo ocurrido en el estado de inicio de la panícula (Figura 4). Al estado de la diferenciación de la panícula-floración, la acumulación de la radiación de las plantas sembradas en las diferentes épocas de siembra fue decreciente, situación similar a la ocurrida en la formación del grano; es decir, las plantas de las primeras épocas de siembra acumularon más radiación solar que las plantas sembradas en las últimas épocas (Figura 4).



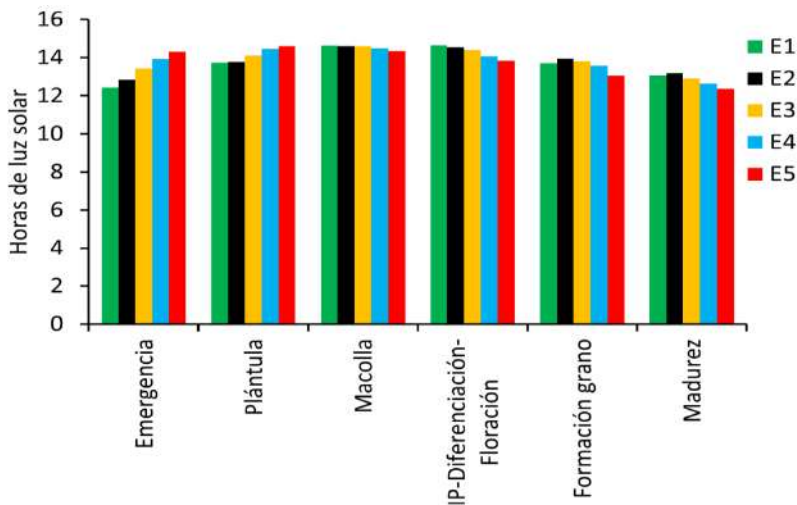
**Figura 4.** Acumulación de radiación solar ( $\text{MJ m}^{-2}$ ) desde siembra a un estado específico de desarrollo de una planta de arroz variedad 'Zafiro-INIA', sembrada en diferentes épocas de siembra. San Carlos, Ñuble. Temporada 2015-2016.

**En cada estado de desarrollo.** La acumulación de la radiación solar por cada estado desarrollo específico de la planta, presentó diferencias asociadas a la época de siembra (Figura 5). En el estado de emergencia se presentó una situación similar a la descrita anteriormente en la Figura 3. En el estado de plántula, la mayor acumulación se produjo en la primera época de siembra, entre 1.000 y 1.300  $\text{MJ m}^{-2}$ , la que decreció a valores entre 800 y 1.000  $\text{MJ m}^{-2}$ . En la macolla, la menor acumulación de radiación solar se produjo en la primera época (700  $\text{MJ m}^{-2}$ ), obteniéndose una acumulación de radiación solar similar en la segunda, tercera y cuarta época, con alrededor de 1.000  $\text{MJ m}^{-2}$  (Figura 5). En el inicio de la panícula-diferenciación, la acumulación de la radiación solar fue mayor en la primera época de siembra, la que fue decreciendo a medida que se atrasaba la época de siembra desde 1.200 a 640  $\text{MJ m}^{-2}$ . En la formación del grano la mayor acumulación se produjo en la segunda, tercera y cuarta época de siembra, alrededor de 1000  $\text{MJ m}^{-2}$ .



**Figura 5.** Acumulación de radiación solar ( $\text{MJ m}^{-2}$ ) en un estado específico de desarrollo de una planta de arroz variedad 'Zafiro-INIA', sembrada en diferentes épocas de siembra. San Carlos, Ñuble. Temporada 2015-2016.

**Fotoperíodo.** Las horas de luz solar a las que las plantas estuvieron expuestas durante su crecimiento y desarrollo se presentan en la Figura 6. En general, las horas de luz solar aumentan desde la emergencia de la plántula hasta la macolla, momento en que empieza a disminuir hasta la formación del grano y madurez. Durante el período vegetativo, las plantas de las primeras épocas de siembra estuvieron expuestas a un menor número de horas de luz que las plantas sembradas en las últimas épocas de siembra, observándose las mayores diferencias en el estado de emergencia y de plántula. En el estado de macolla, las horas luz fueron muy similares en las diferentes épocas de siembra. En la etapa reproductiva, la situación fue inversa; es decir, las plantas de las primeras épocas de siembra estuvieron expuestas a un mayor número de horas de luz en comparación a las plantas sembradas en las últimas épocas.



**Figura 6.** Horas de luz solar por estado de desarrollo de una planta de arroz variedad 'Zafiro-INIA', sembrada en diferentes épocas de siembra. San Carlos, Ñuble. Temporada 2015-2016.

### Antecedentes de efectos de las épocas de siembra realizadas en el país

Estudios realizados en Chile, señalan que la época óptima para la siembra del arroz está determinada, principalmente, por la temperatura. La planta de arroz necesita 10 °C para germinar, 20 a 22 °C para florecer, y 12 a 18 °C para madurar (Yoshida, 1977). Por lo tanto, los meses de septiembre, octubre y noviembre son meses que pueden presentar una temperatura adecuada para la siembra (Koller, 1958).

Durante los primeros intentos para producir arroz en el país, las siembras se empezaron a realizar después del 18 de septiembre. Sin embargo, con el correr de los años éstas se fueron atrasando hasta octubre, debido a las condiciones climáticas adversas y entrega tardía del agua a los agricultores (Sims, 1969; Sims y Alvarado, 1972). En este aspecto, debe considerarse que las primeras siembras se realizaron en la zona central del país, donde existen mayores temperaturas, por lo que con el correr de los años, se fueron desplazando hacia el sur, donde se presentan menores temperaturas.

Además de la temperatura, otros estudios han determinado que la época de siembra depende también de la variedad a sembrar. Es así como la recomendación para la siembra óptima de las variedades 'Diamante-INIA', 'Quella-INIA' y 'Oro' era octubre, mientras que para la variedad 'Ñiquén-INIA' se podía extender hasta noviembre, dada su mayor precocidad (Alvarado y Pino, 1980). Otro estudio señala que la mejor época para 'Diamante-INIA' y 'Buli-INIA' era octubre y la

primera quincena de noviembre, y que para la variedad 'Oro' era la primera quincena de noviembre (Alvarado y Hernaíz, 1995). Finalmente, otro estudio indica que la época de siembra óptima para 'Diamante-INIA' y 'Brillante-INIA' era entre finales de septiembre y todo octubre (Alvarado y Hernaíz, 2007). Últimamente, se recomienda sembrar las variedades 'Zafiro-INIA', 'Cuarzo-INIA' (Cordero et al., 2010a; 2010b; Donoso y Paredes, 2015), 'Platino-INIA' (Paredes et al., 2016) y 'Digua Cl' (Paredes et al., 2019), durante los primeros 20 de octubre (Donoso et al., 2018); mientras que en la siembra directa se recomienda sembrar entre el 20 de septiembre hasta el 15 de octubre (Henríquez et al., 2018).

Uno de los objetivos de los estudios de época de siembra es determinar un período que permita a la planta reducir los efectos negativos del clima, principalmente las altas y bajas temperaturas, y las lluvias tempranas de otoño y, de esta manera, aprovechar el efecto benéfico de estos factores climáticos en los procesos críticos del crecimiento y desarrollo de la planta (Donoso y Paredes, 2015). Para lograr este objetivo, es necesario una planificación y preparación adecuada de la siembra. Por ejemplo, en el caso de una siembra de arroz pre-germinado, se requiere realizar todas las labores de preparación de suelo y el llenado de los cuadros temprano (Alvarado y Hernaíz, 2007). Para siembra directa, en tanto, es fundamental, además de realizar las labores anteriores, mantener un sistema de drenaje adecuado del terreno que permita el ingreso de la maquinaria para efectuar la siembra (Henríquez et al., 2018).

## Estados de desarrollo fenológico de la planta

**Emergencia (S).** En la siembra, la primera etapa de este proceso se inicia cuando la semilla comienza a absorber agua y se expone a una temperatura adecuada (S0). Durante este período se activan todos los procesos fisiológicos que llevarán, finalmente, a la germinación de la semilla. Este proceso continúa con la emergencia del coleóptilo (S1) y de la radícula (S2), y termina con la emergencia del prófalo desde el coleóptilo (S3). El prófalo es la primera hoja que emerge, aunque se caracteriza por no poseer lámina ni collar (Counce et al., 2000).

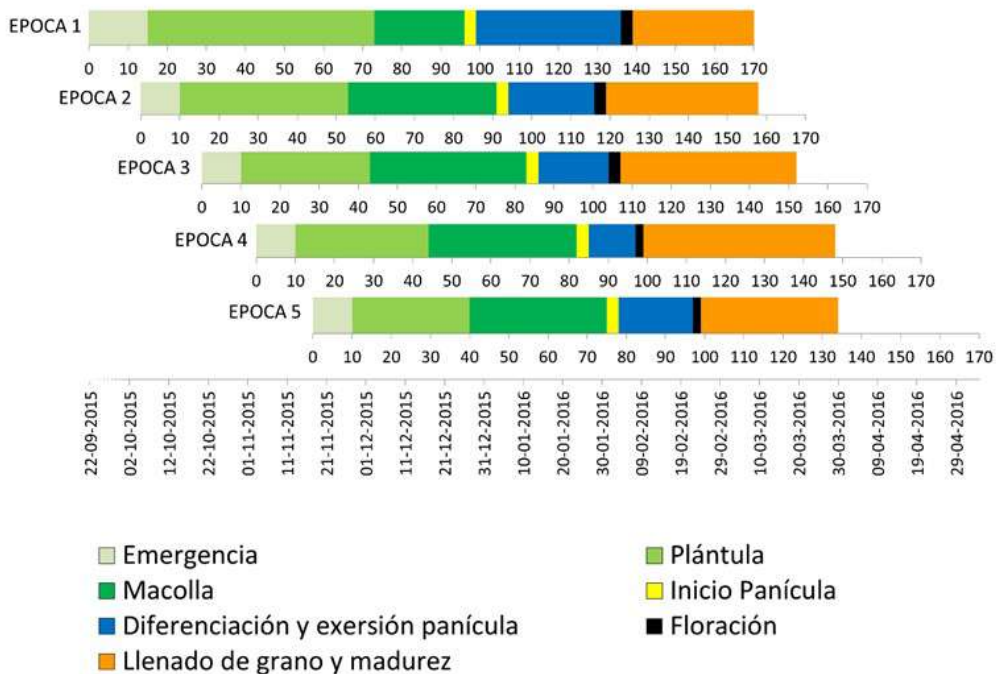
En la evaluación de plantas sembradas en diferentes épocas de siembra, el proceso de germinación hasta la emergencia de la plántula demoró alrededor de 15 d para la primera época de siembra y aproximadamente 10 d para las otras épocas de siembra (Figura 7).

Esta diferencia, en la velocidad de germinación y emergencia de las plántulas, estuvo relacionada, principalmente, con la temperatura observada durante las diferentes épocas de siembra, ya que la humedad no fue un factor limitante. Las semillas de arroz tienen un amplio rango de temperaturas entre las cuales pueden germinar (Yoshida, 1977), y su velocidad de germinación depende de la temperatura a la que las semillas están expuestas. Es así como a temperaturas entre 27 y 37 °C, la germinación de un 90 % a 97% de las semillas puede demorar alrededor de 2 d, a diferencia de semillas expuestas a temperaturas entre 5 y 10 °C, donde la germinación puede tomar 30 o más d (Yoshida, 1972). Semillas sembradas en la primera quincena de septiembre en la localidad de San Carlos, germinaron alrededor de 20 a 25 d después de la siembra (Gabriel Donoso, com. personal). Por otro lado, las bajas temperaturas que se observan en siembras muy tempranas, pueden producir el 'almidonamiento' de la semilla o pudrición del grano (Koller, 1958) y/o clorosis en el estado posterior, el desarrollo de las plántulas (Sánchez et al., 2014). Otros factores asociados con las bajas temperaturas, como nublados y vientos fuertes, pueden también reducir la germinación y emergencia de las plántulas, situación que puede ocurrir durante la segunda quincena de septiembre en algunas zonas arroceras del país (Sims y Alvarado, 1972).

**Desarrollo vegetativo (V).** Esta etapa está representada por diferentes estados que toman el nombre de las hojas presentes y que poseen collar en su tallo principal: primera hoja (V1), segunda hoja (V2), tercera hoja (V3) hasta Vn, donde (n) es la última hoja, es decir, la hoja bandera

(Counce et al., 2000), y que comprende el estado de plántula y de macolla hasta el inicio de la formación de la panícula.

Las primeras fases del estado vegetativo, plántula y macolla, presentaron un comportamiento diferente, dependiendo de la época de siembra del arroz. El estado vegetativo total se acortó a medida que se atrasó la época de siembra. Es así como en la primera y segunda época de siembra duró alrededor de 90-95 d, en la tercera y cuarta época alrededor de 80-85 d, y en la quinta época 75 d. El estado de plántula fue de 60 d en la primera época, la que se fue reduciendo a medida que se atrasaba la época de siembra, hasta llegar a 30 d en la última época de siembra. El período de macolla duró alrededor de 25-30 d en la primera época de siembra, el que fue aumentando a medida que se atrasaba la época de siembra, llegando a un máximo de 40 d en la tercera época, para luego comenzar a reducirse, llegando a los 35 d en la última época de siembra. El tiempo desde la siembra hasta macolla tomó alrededor de 75 d en la primera época; 55 d en la segunda; 45 d en la tercera y cuarta época, y alrededor de 40 d en la quinta época de siembra (Figura 7).



**Figura 7.** Duración (d) de los estados de desarrollo de la planta de arroz, variedad 'Zafiro-INIA', sembrada en diferentes épocas de siembra. San Carlos, Ñuble. Temporada 2015-2016.

En general, las siembras realizadas temprano favorecen un buen establecimiento de las plántulas y un mayor número de macollas (Khalifa, 2009). La duración de este período está controlada, principalmente, por la temperatura del aire y la disponibilidad de agua, debido a que, hasta la elongación del tallo, los puntos de crecimiento de las hojas, macollas y panículas están bajo la superficie del agua, pero las estructuras que están sobre el agua, se ven afectadas también por la temperatura del aire (Sharifi et al., 2018).

La presencia de temperaturas menores a 20 °C durante este período puede producir un retraso en el crecimiento de la planta y reducir su vigor (Yoshida, 1981; Ali et al., 2006), un bajo número de plántulas y macollas (Shimono et al., 2002), una muerte de plantas (Fujino et al., 2004; Baruah et al., 2009), una aceleración del crecimiento de las plantas y una reducción del período de siembra a floración, lo que significa un menor tiempo para la acumulación de reservas, lo que afecta el llenado de granos (Alvarado y Hernaiz, 2007; Sharifi et al., 2018) con las consiguientes pérdidas en el rendimiento (Roel et al., 2005). Las bajas temperaturas durante el estado vegetativo pueden



afectar también el grado de tolerancia al frío de las plantas, durante la etapa reproductiva (Matsumura et al., 2012). Es así como, altas temperaturas antes de la iniciación de la panícula, pueden contribuir a una mayor tolerancia al frío en la etapa reproductiva (Shimono et al., 2007; 2011). Las mayores diferencias determinadas en el ciclo del cultivo, pueden explicarse por las diferencias que ocurren en el período vegetativo.

Las plantas de arroz tienen diferentes requerimientos de radiación solar, dependiendo de su estado de desarrollo (Stansel et al., 1965; Yoshida y Parao, 1976). Una baja radiación durante el período vegetativo tiene un escaso efecto en el rendimiento y componentes de rendimiento (Yoshida y Parao 1976). Por otro lado, la disponibilidad del agua también puede afectar el desarrollo de la planta. Un déficit hídrico en el estado vegetativo puede reducir la altura de la planta, número de macollas y área foliar; sin embargo, este estrés se puede revertir si se proveen las condiciones hídricas necesarias para continuar el crecimiento y desarrollo de la planta. Dadas estas condiciones, es muy importante mantener un buen desarrollo de las plantas durante este período.

**Desarrollo reproductivo (R).** En el período reproductivo se pueden distinguir 10 fases de desarrollo basado en criterios morfológicos: inicio de la formación de la panícula (R0); diferenciación de la panícula (R1); formación del collar de la hoja bandera (R2); excursión de la panícula (R3); anthesis o floración (R4); expansión del largo y ancho del grano (R5); expansión del espesor del grano (R6); reducción de la humedad del grano (R7); maduración del grano (R8); y madurez de los granos en la panícula completa (R9). Las fases R0 a R3 corresponden al desarrollo de la panícula, las fases R4 a R8 al desarrollo individual de los granos en la panícula y R9 al desarrollo completo de la panícula (Counce et al., 2000).

El período reproductivo está afectado también por diferentes factores climáticos, como temperatura, radiación, fotoperíodo y disponibilidad de agua. Por lo tanto, diferentes épocas de siembra expondrán a las plantas a diferentes condiciones climáticas que afectarán diferentes características asociadas al desarrollo reproductivo de la planta, entre las que se encuentran inicio de la panícula, contenido de clorofila, índice de área foliar, desarrollo de la panícula y rendimiento en grano (Khalifa, 2009).

**Temperatura.** A medida que el punto de crecimiento de la panícula se ubica sobre la superficie del agua, alrededor de la meiosis, la temperatura del aire puede jugar un rol importante en el crecimiento y desarrollo de la panícula, llenado del grano, y madurez (Yoshida, 1981; Ellis y Hong, 1994; Roel et al., 2005; Martínez-Eixarch y Ellis, 2015). Las siembras tardías atrasan la fecha de floración (febrero), donde las temperaturas y la radiación comienzan a disminuir (Donoso et al., 2018), lo cual aumenta el riesgo de esterilidad floral, disminución del rendimiento (Sims, 1969; Alvarado y Pino, 1980; Alvarado y Hernaíz, 1995; 2007; Donoso y Paredes, 2015) y calidad del grano (Alvarado y Hernaíz, 2007). El agricultor que siembra tarde, puede perder más de 0,1 t ha<sup>-1</sup> por día de atraso en su siembra (Alvarado y Hernaíz, 2007).

En este período, las temperaturas medias inferiores a 20 °C pueden causar varios daños, tales como excursión incompleta de la panícula, degeneración del ápice de la panícula, atraso en la floración, esterilidad apical y madurez irregular de la planta. En este sentido, el período más sensible a las bajas temperaturas en la planta de arroz, es la microspora temprana que ocurre después de la meiosis (Farrel et al., 2006; Imin et al., 2006; Shimono et al., 2007), es decir, entre 7 y 14 d antes de la emergencia de la panícula, dependiendo de las variedades y de las condiciones climáticas (Julia y Dingkuhn, 2012; Martínez-Eixarch y Ellis, 2015). El segundo estado sensible a las bajas temperaturas es la anthesis (Yoshida et al., 1981; Matsui et al., 2001; Jagadish et al., 2007; Martínez-Eixarch y Ellis, 2015). En este aspecto, la esterilidad floral puede estar relacionada a problemas que se presentan en los mecanismos de respuesta de la antera, del polen y el estigma (Nakamura et al., 2000; Zeng et al., 2017) y que pueden afectar el tamaño y dehiscencia de la antera y una pobre germinación del polen en el estigma (Matsui et al., 2001; Prasad et al., 2006). Durante estos dos estados críticos, las bajas temperaturas, diurnas o nocturnas, la magnitud y la duración de estos eventos, pueden causar una alta esterilidad floral. Por otro lado, la presencia de altas tempera-

turas, mayores a 35 °C al estado de floración, pueden causar también diferentes grados de esterilidad (Satake y Yoshida 1978; Matsui et al., 2001; Jagadish et al., 2010). En este sentido, se considera que un 15 % de esterilidad podría ser considerado como un valor normal para el cultivo del arroz. Un mayor porcentaje de granos vanos puede ser un indicio de condiciones climáticas adversas durante la meiosis, floración, madurez del grano y/o producto de una mala nutrición de la planta (Gunawardena et al., 2003).

La temperatura del aire afecta también el periodo comprendido entre la antesis y la madurez, regulando la emisión de la panoja, velocidad y duración del llenado del grano. En general, altas temperatura aceleran la velocidad del llenado de grano, y reducen este período. Por otro lado, las bajas temperaturas pueden alargar el período de madurez, causar una madurez irregular de la planta y un menor peso de los granos. Las plantas expuestas a temperaturas extremas (bajas o altas), en el período posterior a la antesis, pueden ver afectado su rendimiento y la viabilidad del grano cosechado. Este último aspecto es muy importante en la producción de semillas, ya que la semilla cosechada tendrá un bajo porcentaje de germinación, lo que redundará en un pobre establecimiento del cultivo en la siguiente temporada, si es usada como semilla (Ellis y Hong, 1994; Ellis, 2011; Martínez-Eixarch y Ellis, 2015).

Además de la temperatura, la radiación afecta también el estado reproductivo. Es así como una alta radiación favorece la producción de un mayor número de panículas, el llenado de grano y el rendimiento (Yoshida y Parao, 1976; Zhang et al., 2009; Restrepo y Garcés, 2013; Zhu et al., 2016). En forma contraria, una baja radiación y una alta temperatura durante el estado reproductivo puede afectar negativamente la producción de asimilados, lo que incidirá en el tamaño de las panículas, llenado de grano y la capacidad productiva de la planta (Fageria, 2007; Sánchez-Reinoso et al., 2014).

La disponibilidad de agua es otro factor que puede afectar al estado reproductivo, donde el período más crítico es la floración, debido a que un estrés hídrico en esta etapa puede producir esterilidad y reducción del rendimiento.

**Área foliar y fotosíntesis.** El área foliar aumenta a medida que avanza el crecimiento de la planta, alcanzando su máximo valor alrededor de la emisión de la panoja y constituyéndose en la principal fuente de fotosíntesis. La acumulación de materia seca de hojas y tallos es importante para el desarrollo de la planta, ya que una parte de los carbohidratos almacenados en estas estructuras van a ser translocados al grano y a las raíces, durante el período de llenado del grano (Fu et al., 2011; Zhang et al., 2017a). En tanto, la cantidad de materia seca producida en este estado de desarrollo va a incidir en forma importante en el índice de cosecha de la planta.

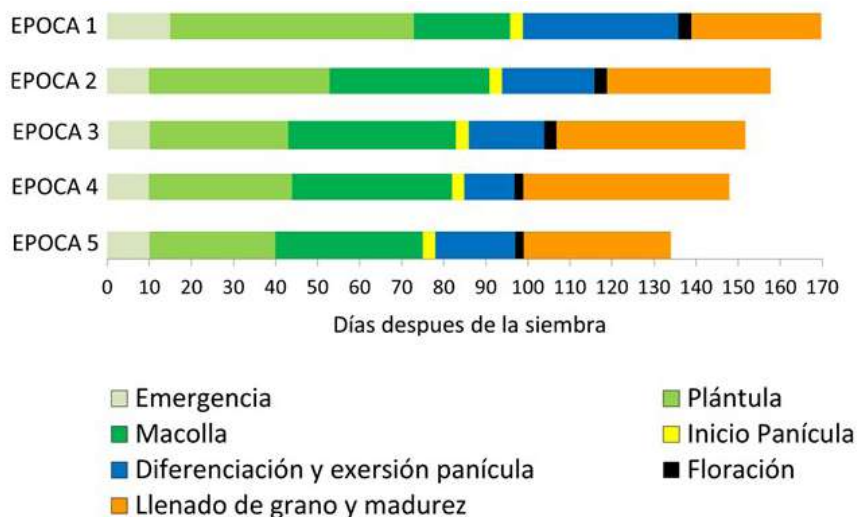
La fotosíntesis en la planta de arroz contribuye entre un 60 % y 90 % del peso final del grano (Yoshida, 1972; 1981), y la capacidad fotosintética de la planta aparece como un factor limitante en variedades de alto rendimiento (Makino, 2011). Existen varios esfuerzos tendientes a manipular la capacidad fotosintética (Long et al., 2006; Makino, 2011; Karki et al., 2013) y fotorespiratoria de la planta de arroz (Shen et al., 2019), con el objetivo de mejorar el rendimiento, incrementar la eficiencia del uso del agua y del nitrógeno, especialmente en ambientes cálidos y secos (Karki et al., 2013; Shen et al., 2019). En este sentido, se indica que el mejoramiento de la tasa fotosintética ha contribuido a aumentar el potencial de rendimiento de las nuevas variedades (Zhang y Kokubun, 2004; Hubbart et al., 2007).

Los carbohidratos no estructurales que se almacenan temporalmente en los tallos y la lámina de la hoja alcanzan su máxima concentración alrededor de la emisión de la panícula, los que empiezan a movilizarse durante el llenado del grano (Yoshida, 1981). El aporte de los carbohidratos no estructurales al grano puede fluctuar entre 24 % y 27 % (Cock y Yoshida, 1972). Sin embargo, la cantidad de carbohidratos translocados desde hojas y tallos, va a depender del contenido de nitrógeno (Pan et al., 2011; Wu et al., 2018), la radiación (Okawa et al., 2003), la temperatura (Shi et al., 2013; Xiong et al., 2015) y el agua disponible para la planta (Yang et al., 2001; Hayashi et al., 2013; He et al., 2014). En este sentido, hay que considerar que una parte importante de los carbo-

hidratos almacenados en el grano proviene de la fotosíntesis de las tres hojas apicales (Yoshida, 1981; Abou-Khalifa et al., 2008; Rahman et al., 2013). En este proceso, es importante considerar también que las hojas de la planta de arroz permanecen verdes durante una parte importante del período de madurez, a diferencia de la panoja que adquiere un color amarillento a inicios de este período, lo que indica que las hojas son fotosintéticamente activas (Wang et al., 2015). Por otro lado, la acumulación de nitrógeno en las hojas superiores después de la antesis es importante para mantener el estado verde de las hojas (Murchie et al., 2002; Yamamoto et al., 2017); por lo tanto, una pobre acumulación de nitrógeno en éstas o una alta translocación de nitrógeno desde las hojas después de la antesis, puede acelerar la senescencia temprana de las hojas, debilitando su capacidad fotosintética, lo que puede resultar en una menor cantidad de asimilados para el llenado del grano (Buchanan-Wollaston, 1997). Además de la translocación de carbohidratos, durante esta etapa, se observa también una movilización de minerales hacia los granos desde diferentes órganos de la planta (Wang et al., 2018).

Bajo las condiciones evaluadas, el período total de duración de la etapa reproductiva se redujo a medida que se atrasaba la época de siembra, siendo de 70 a 75 d en la época 1; de 65 a 70 d en la época 2 y 3; de 65 en la época 4; y de alrededor de 55 d en la quinta época (Figura 8).

El inicio de la panícula es un proceso complejo de determinar y su duración se fijó en 3 a 4 d. La diferenciación de la panícula ocurre al interior de la hoja y el estado se llama comúnmente 'bota', debido a la forma abultada que toma el centro de este segmento de planta. La excursión de la panícula se refiere a la aparición de la panícula fuera de la vaina de la hoja bandera que la envuelve. El tiempo que tomó la diferenciación y la excursión de la panícula se redujo a medida que se atrasó la época de siembra, teniendo una duración de 40 d en la primera época de siembra y de 20 d en la última época de siembra. El período de floración se estima que ocurrió entre 2 y 3 d, dependiendo de la época de siembra. Finalmente, el período que incluyó el desarrollo y la madurez del grano fue más corto en la primera época de siembra, aumentó en las épocas de siembra 2, 3 y 4, y se redujo nuevamente en la época 5 (Figura 8).



**Figura 8.** Comparación de los estados de desarrollo de la planta de arroz, variedad 'Zafiro-INIA', sembrada en diferentes épocas. San Carlos, Ñuble. Temporada 2015-2016.

En resumen, una variedad que se siembra en la época recomendada, tiene el potencial de poder lograr un mayor rendimiento, en comparación con una variedad sembrada muy temprano o más tarde, ya que las condiciones climáticas pueden ser adversas en el período de siembra, durante el crecimiento y desarrollo de planta, como también en la cosecha. Bajas temperaturas en la siembra, pueden alargar el período de emergencia de la planta. Así mismo, puede afectar la etapa reproductiva de la planta, desarrollo del óvulo, polen y los procesos de polinización y fecundación, lo que puede producir aborto floral y/o un mal desarrollo del grano. Altas temperaturas, en este mismo estado, pueden afectar negativamente el estado reproductivo, el desarrollo del grano y la calidad del grano, pudiendo generarse un mayor porcentaje de panza blanca.

## II. Descripción del crecimiento y desarrollo de la planta

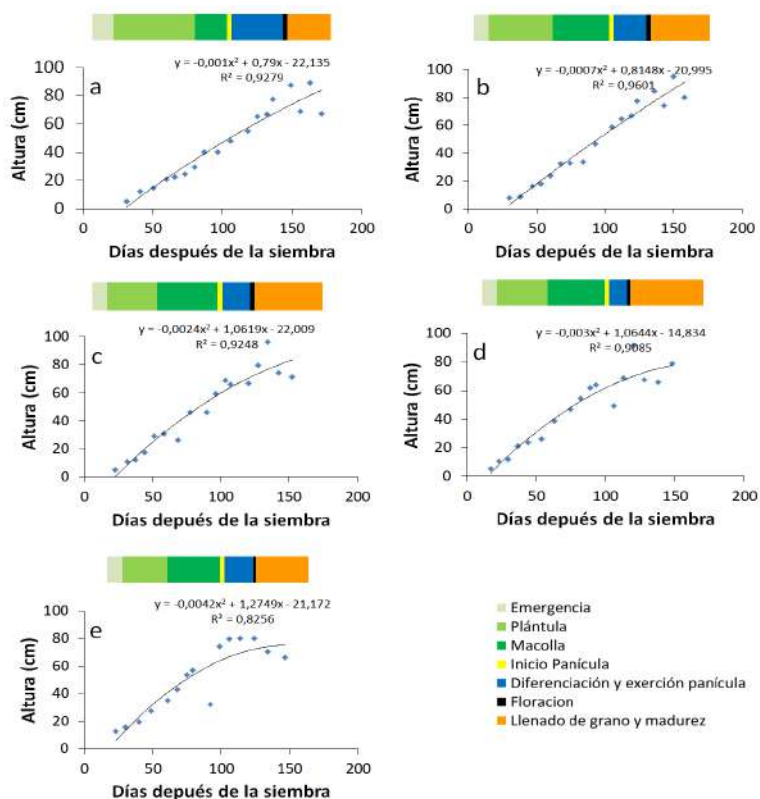
Para describir el crecimiento y desarrollo de la planta se analizan dos características: el incremento de la planta en altura (cm) y la acumulación de la materia seca ( $\text{g m}^{-2}$ ).

### A. Crecimiento

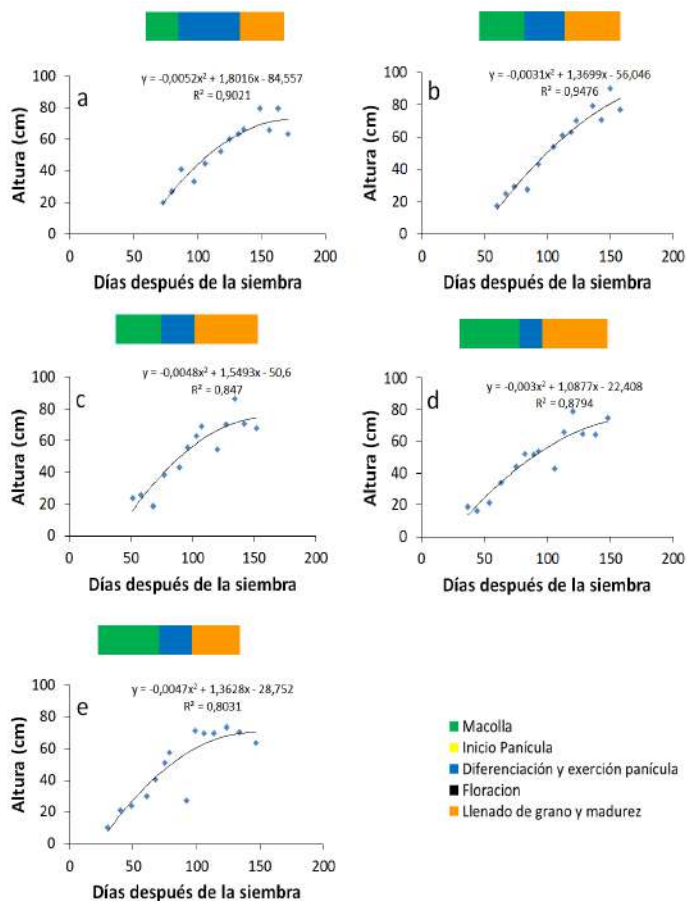
El incremento de la altura de la planta (cm) siguió el desarrollo de una curva sigmoidea, típica del crecimiento de las plantas. La evaluación de la altura de las plantas se separó en sus dos componentes: tallo principal y tallos secundarios, representados por la macolla 1, macolla 2 y macolla 3.

**Altura del tallo principal.** La evolución del tallo principal de la variedad 'Zafiro-INIA' señaló que la altura máxima del tallo principal se obtuvo en la segunda y tercera época de siembra, con 95 y 96 cm, respectivamente (Figura 9b y 9c), reduciéndose a 80 cm en la quinta época de siembra (Figura 9e). El análisis individual de cada época señaló que, en la primera época de siembra, la altura máxima se observó alrededor de 140 d después de la siembra (DDS), y alcanzó 87 cm (Figura 9a); en la época 2 esta altura se logró en una fecha similar, pero alcanzó 95 cm (Figura 9b); en la época 3 se obtuvo a los 134 DDS, con 96 cm; altura similar a la época 2 (Figura 9c); en la época 4 la mayor altura fue de 92 cm a los 120 DDS (Figura 9d); y finalmente, en la época 5 la máxima altura se obtuvo a los 120 DDS, con 80 cm (Figura 9e). Estos resultados permiten señalar que la mayor altura de la planta se logró en las siembras realizadas en octubre (2ª y 3ª época). Este crecimiento en altura se fue reduciendo en las épocas de siembra posteriores. Por otro lado, el máximo de altura de la planta se obtuvo en un menor tiempo de siembra a cosecha, (140, 134, 120, 120 DDS), a medida que se atrasaba la época de siembra (Figura 9a-9e). En todas las épocas de siembra, la máxima altura de la planta se obtuvo durante los primeros estados de maduración, antes de que la panoja se doblara.

**Altura de las macollas.** La altura de la macolla 1 tuvo un comportamiento similar al tallo principal, en el sentido que las plantas lograron su mayor altura en las épocas 2 y 3, con 90 y 87 cm, respectivamente (Figura 10b y 10c). Por otro lado, en la época 5 las plantas de la macolla 1 obtuvieron la menor altura, 74 cm (Figura 10d). En el análisis de cada época de siembra, la máxima altura (80 cm) en la época 1, se logró a los 163 DDS (Figura 10a); en la época 2, los 90 cm se obtuvieron a los 150 DDS (Figura 10b); en la época 3, a los 134 DDS (Figura 10c); y en la época 4 y 5 alrededor a los 122 DDS (Figura 10 d y 10e).



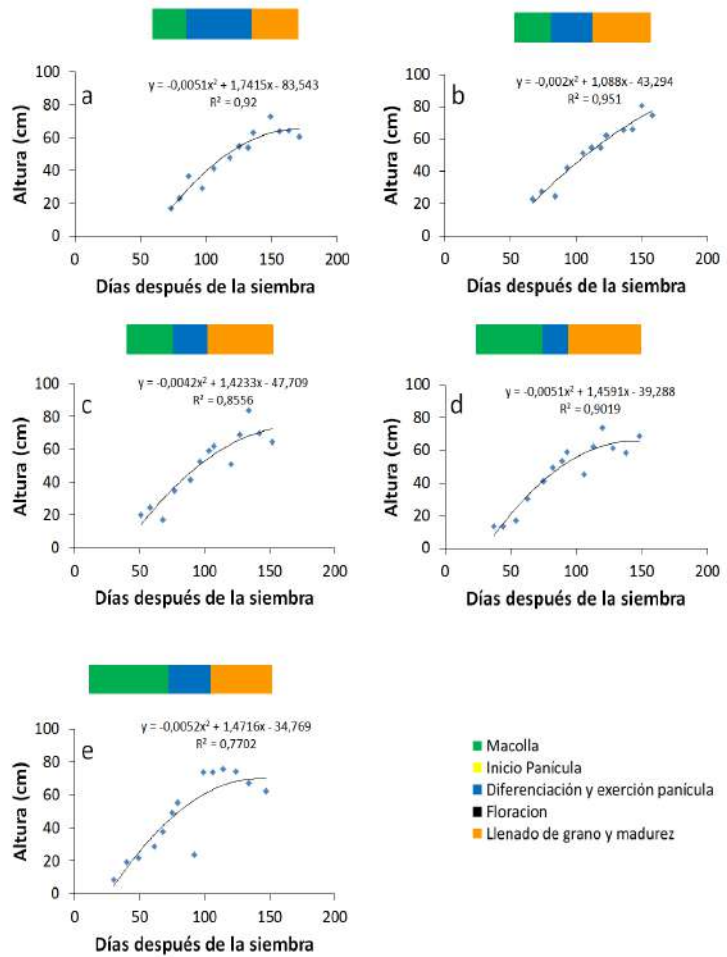
**Figura 9.** Altura (cm) del tallo principal de la planta de arroz variedad 'Zafiro-INIA', evaluada en ensayos con diferentes épocas de siembra: a) primera, b) segunda, c) tercera, d) cuarta y e) quinta época de siembra. San Carlos, Ñuble. Temporada 2015-2016.



**Figura 10.** Altura (cm) de la macolla N° 1 de la planta de arroz, evaluada en ensayos con diferentes épocas de siembra con la variedad 'Zafiro-INIA': a) primera, b) segunda, c) tercera, d) cuarta y e) quinta época de siembra. San Carlos, Ñuble. Temporada 2015-2016.

La máxima altura de la macolla 2 fue inferior a la obtenida en la macolla 1, en todas las épocas de siembra. Sin embargo, el máximo de altura se obtuvo también en las épocas de siembra 2 y 3, con valores de 81 y 84 cm, respectivamente (Figura 11 b y c). Estas alturas se obtuvieron alrededor del mismo tiempo que la macolla 1. Los valores de altura de la macolla 2, en las épocas 1, 4 y 5, fueron similares y variaron entre 73 y 75 cm (Figura 11 a, d y e), valores que se obtuvieron más temprano que los de la macolla 1.

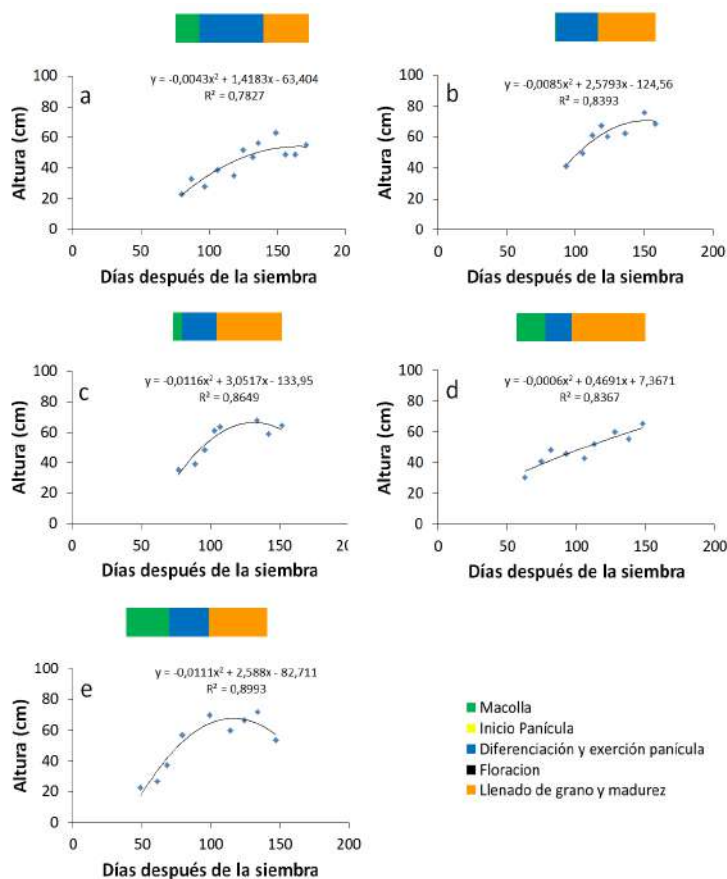
**Figura 11.** Altura (cm) de la macolla N° 2 de la planta de arroz variedad 'Zafiro-INIA', evaluada en ensayos con diferentes épocas de siembra: a) primera, b) segunda, c) tercera, d) cuarta y e) quinta época de siembra. San Carlos, Ñuble. Temporada 2015-2016.



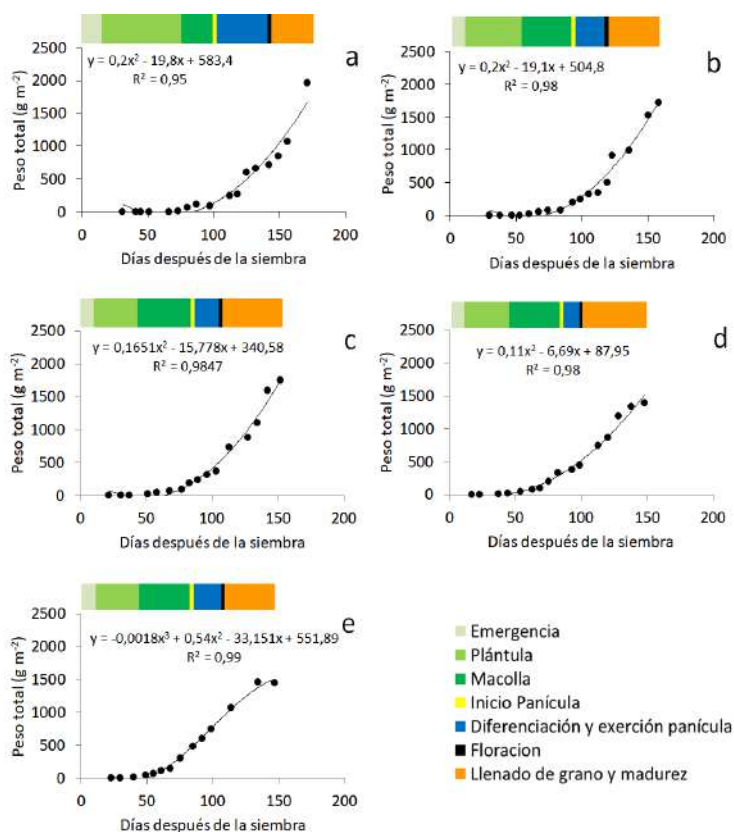
En el caso de la macolla 3, las alturas máximas de las plantas fueron inferiores a la macolla 2 en todas las épocas de siembra. En varios casos se lograron en una fecha similar a las fechas obtenidas en la macolla 2, lo que indica que la velocidad de crecimiento fue mayor, aunque lograron una menor altura (Figura 12 a, b, c, d, e).

## B. Acumulación de materia seca total

**Tallo principal.** La producción de materia seca en la planta de arroz es lenta durante los primeros 30 a 40 DDS, ya que logra acumular un bajo porcentaje del total de la materia seca producida por la planta (Figura 13 a, b, c, d, e). Con posterioridad a este período, la producción de materia seca es muy rápida y adquiere, prácticamente, un crecimiento lineal. En este período de mayor acumulación de materia seca, se inicia la producción de las macollas y el crecimiento de otras estructuras de la planta. En este caso, la máxima acumulación de materia seca se logra al final del llenado del grano (Figura 13 a, b, c, d, e).



**Figura 12.** Altura (cm) de la macolla N° 3 de la planta de arroz variedad 'Zafiro-INIA', evaluada en ensayos con diferentes épocas de siembra: a) primera, b) segunda, c) tercera, d) cuarta y e) quinta época de siembra. San Carlos, Ñuble. Temporada 2015-2016.



**Figura 13.** Acumulación de materia seca ( $g\ m^{-2}$ ) de plantas de arroz variedad 'Zafiro-INIA', evaluadas en ensayos con diferentes épocas de siembra: a) primera, b) segunda, c) tercera, d) cuarta y e) quinta época de siembra. San Carlos, Ñuble. Temporada 2015-2016.

La cantidad de materia seca que es capaz de acumular la planta de arroz depende de factores genéticos (variedad), ambientales (clima y manejo agronómico) y de la interacción de estos factores. En este caso, la acumulación de materia seca de la variedad 'Zafiro-INIA' está influenciada directamente por la época de siembra y las condiciones ambientales asociadas a ellas. Es así como, las diferentes épocas de siembra presentan diferentes curvas de acumulación de materia seca, siendo superior la acumulación de materia seca en siembras tempranas (Figura 13 b, c) en comparación con épocas más tardías (Figura 13 d, e). Sin embargo, el patrón general de acumulación de la materia seca es similar en todas las épocas de siembra, es decir, una menor acumulación en los primeros estados de desarrollo y una rápida acumulación posterior, observándose diferencias en la velocidad de acumulación de la materia seca en los diferentes estados de desarrollo de la planta. En las siembras tempranas la velocidad de acumulación de materia seca es menor, ya que la planta posee un mayor número de desde siembra a cosecha (Figura 13 a), en comparación a una planta sembrada en una época tardía, donde el tiempo de siembra a cosecha es menor (Figura 13 d, e). Esto se ve reflejado, finalmente, en el rendimiento y en el índice de cosecha.

### Hojas ( $\text{g m}^{-2}$ )

Cuando emerge la planta, emerge el prófalo, la primera hoja que no tiene lámina, considerada como hoja cero, la cual muere alrededor del octavo o décimo día. Hasta ese momento, el desarrollo de la plántula depende de las reservas de la semilla. A partir de la emergencia de las primeras hojas verdaderas, la plántula comienza a fotosintetizar sus propios requerimientos energéticos y a absorber nutrientes de suelo, empezando su crecimiento independiente. Las hojas verdaderas se nombran como primera, segunda, etc. El orden de aparición, y el número de hojas completamente desarrolladas, son indicadores del estado de desarrollo de la planta.

Cuando la planta tiene cuatro hojas, se inicia el período de la macolla que puede durar entre 45 y 50 d, comenzando posteriormente el período de crecimiento más rápido de la planta (Figura 14). Este período y la velocidad de crecimiento de las hojas están relacionados, en este caso, con las condiciones asociadas a la época de siembra, siendo mayor en las primeras épocas de siembra comparadas con las últimas épocas (Figura 14).

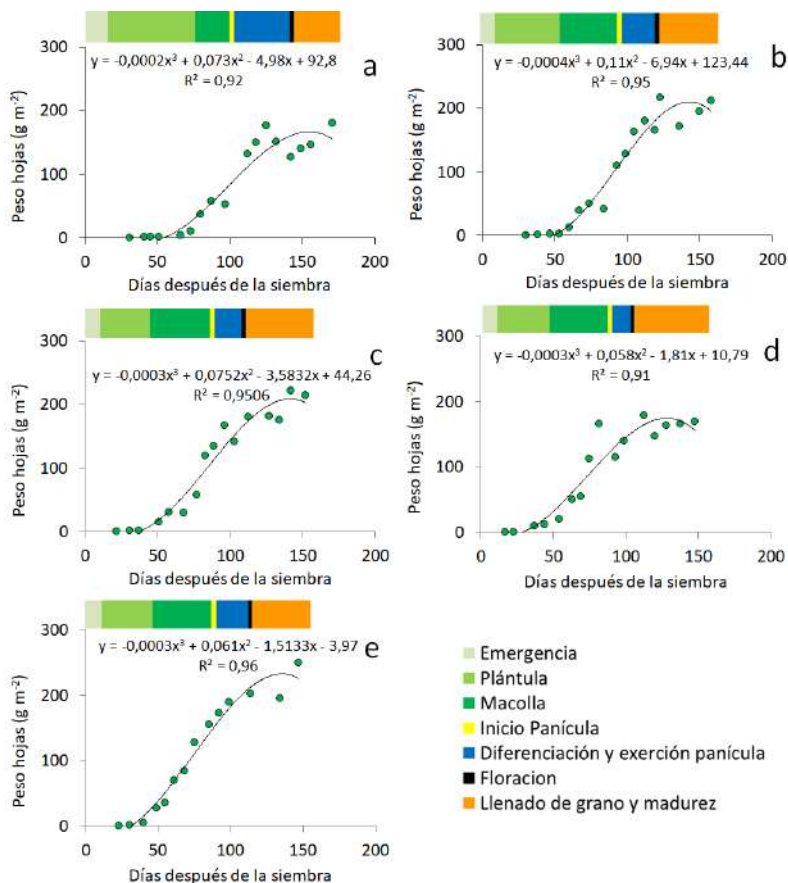
No todas las hojas que nacen y se desarrollan llegan hasta el final del ciclo de desarrollo de la planta, algunas de ellas mueren mientras otras se desarrollan. A floración y madurez, el número de hojas activas fue bajo y pudiendo variar entre cinco a seis hojas y dos a tres hojas, respectivamente. La acumulación de materia seca de las hojas en cada macolla fue diferente, siendo mayor en la macolla N° 1 comparada con la macolla N° 3. La cantidad de hojas que produce una planta de arroz por área de superficie (índice de área foliar) a floración está relacionada, hasta cierto nivel, directamente con el rendimiento del grano, ya que afecta la cantidad de carbohidratos disponibles en la planta para el desarrollo y llenado de los granos.

El aumento del índice de área foliar incrementa la producción de material seco, aunque esta relación tiene un límite donde, el sombreado de las hojas reduce la tasa promedio de fotosíntesis por superficie. Sin embargo, como la producción de material seco es un balance entre fotosíntesis y respiración, la tasa del crecimiento del cultivo aumenta con el incremento del índice de área foliar.

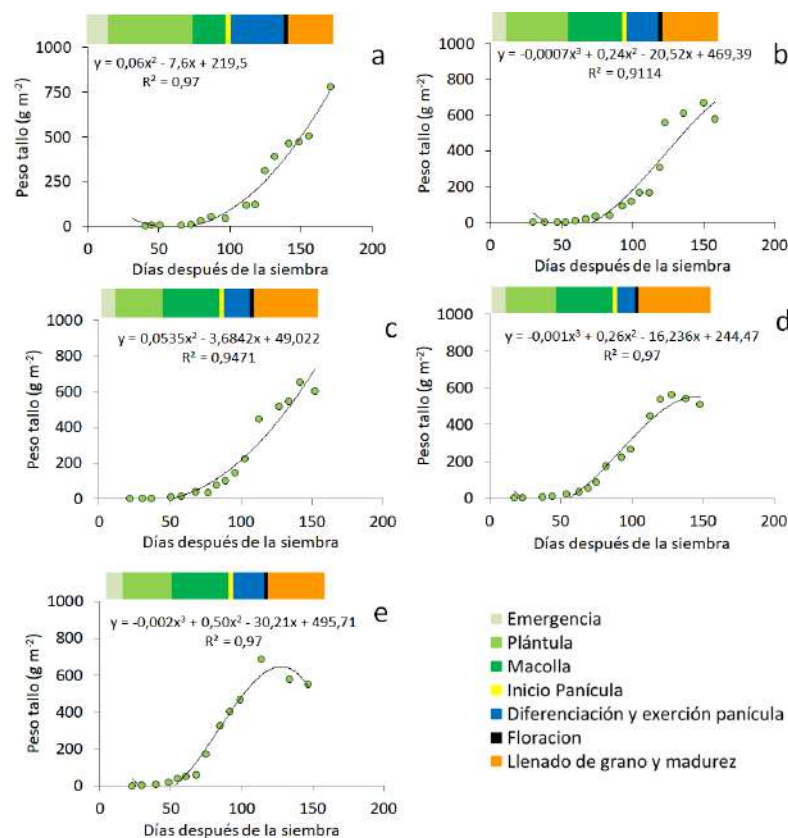
### Tallos ( $\text{g m}^{-2}$ )

Durante los primeros estados de desarrollo de la planta, se presenta una sincronización entre la aparición de cada macolla, con la emergencia de las hojas en el tallo principal. Por ejemplo, la aparición de la cuarta hoja en el tallo principal coincide con la aparición de la primera hoja en la primera macolla y así sucesivamente.





**Figura 14.** Acumulación de materia seca de hojas ( $\text{g m}^{-2}$ ) en plantas de arroz variedad 'Zafiro-INIA', evaluadas en ensayos con diferentes épocas de siembra: a) primera, b) segunda, c) tercera, d) cuarta y e) quinta época de siembra. San Carlos, Ñuble. Temporada 2015-2016.



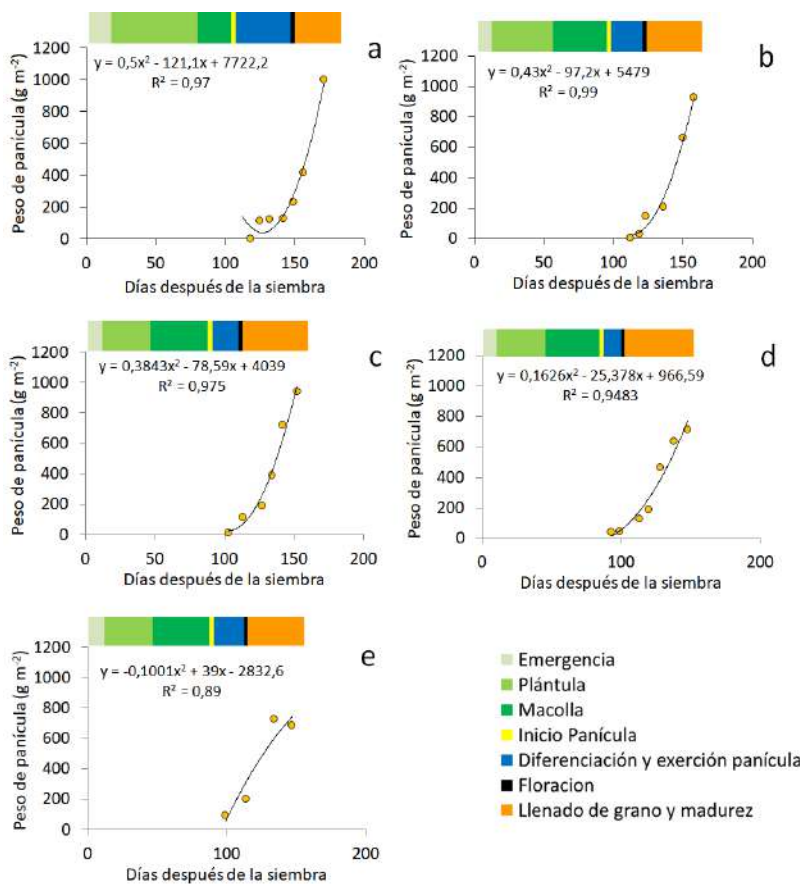
**Figura 15.** Acumulación de materia seca de tallos ( $\text{g m}^{-2}$ ) en plantas de arroz variedad 'Zafiro-INIA', evaluadas en ensayos con diferentes épocas de siembra: a) primera, b) segunda, c) tercera, d) cuarta y e) quinta época de siembra. San Carlos, Ñuble. Temporada 2015-2016.

La acumulación de la materia seca de los tallos comienza a aumentar rápidamente, cuando el tallo principal comienza a elongarse (Figura 15), lo que coincide con el inicio del desarrollo de la panícula y cuatro entre nudos debajo de ella. La máxima acumulación de materia seca de los tallos ocurre posterior a la floración.

El número de macollas producido en la planta fueron tres, independiente de la época de siembra. Sin embargo, la acumulación de la materia seca del tallo principal fue mayor que la de las macollas y dentro de las macollas. La primera tuvo la mayor acumulación de materia seca comparada con la segunda y tercera macolla.

### Panoja o panícula ( $\text{g m}^{-2}$ )

La acumulación de la materia seca de la panícula incluye el raquis, las ramas que nacen del raquis y los granos. El inicio de la acumulación de la materia seca de la panícula es considerado desde cuando está dentro de la vaina de la hoja bandera, hasta la madurez del grano (Figura 16).

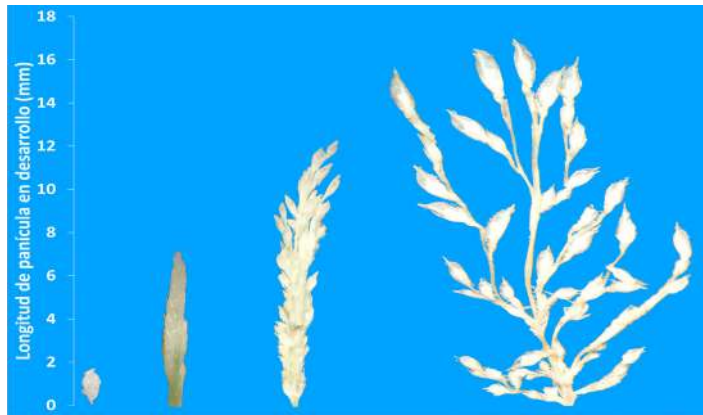


**Figura 16.** Acumulación de materia seca de panículas ( $\text{g m}^{-2}$ ) en plantas de arroz variedad 'Zafiro-INIA', evaluadas en ensayos con diferentes épocas de siembra: a) primera, b) segunda, c) tercera, d) cuarta y e) quinta época de siembra. San Carlos, Ñuble. Temporada 2015-2016.

El proceso de llenado del grano, considerado como el número de necesario para que éste alcance su peso máximo, presenta una curva de crecimiento sigmoidea, con un inicio lento, una fase prácticamente lineal y un término lento hacia el final del proceso. Dentro de este proceso, la fase lineal o efectiva es la que más influye sobre el rendimiento final del cultivo y puede variar entre las variedades, localidades y temperaturas (Figura 16).

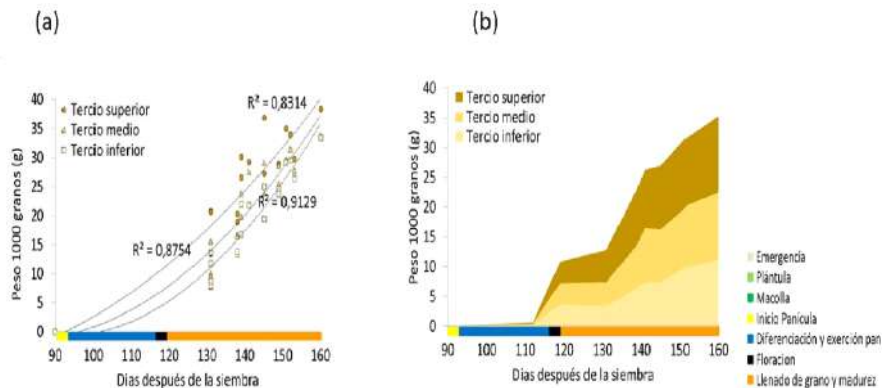
El desarrollo de la panícula comprende varios estados que incluye: a) la diferenciación del meristema en el punto de crecimiento que inicia el desarrollo del primordio de la panícula (diferenciación nudo-cuello), y marca el final de la etapa vegetativa y el inicio de la reproductiva.

En este estado el primordio no es visible, pero en aproximadamente 10-11 d aparece como un punto de crecimiento de 0,5 a 1,5 mm de longitud, lo que da por concluido el proceso de diferenciación del meristema; b) este proceso continúa con la diferenciación de la panícula, o sea, de los primordios de las ramas secundarias en el raquis, dando inicio al desarrollo de las espiguillas y donde se determina el número potencial de granos por espiguilla (Figura 17). La diferenciación de la panícula comienza cuando ésta alcanza alrededor de 5 cm de longitud. Cualquier estrés que sufra la planta en este estado, afectará negativamente el rendimiento. Por lo tanto, el desarrollo de la panícula se extiende desde su diferenciación hasta su aparición de la vaina de la hoja bandera. El desarrollo de la panícula dentro de la vaina, produce el embuchamiento; c) la salida de la panícula de la vaina de la hoja bandera, marca el inicio de la floración. Se expresa visiblemente con la exposición de las anteras fuera de las espiguillas, una vez ocurrido el proceso de autofecundación.



**Figura 17.** Crecimiento y desarrollo inicial de la panícula dentro de la parte inferior del tallo.

La antesis de la flor ocurre primero en el tercio superior de la panoja, seguido por el segmento medio y finalmente por el inferior. Para evaluar este proceso, se procedió a dividir la panoja en tres tercios y a cuantificar cada segmento por separado. La acumulación de la materia seca indica que los granos del tercio superior de la panoja son más pesados que los de los dos tercios inferiores (Figura 18 a, b). El llenado del grano pasa por varios estados, lechoso, harinoso y finalmente grano maduro. Debido al aumento de peso y a que la planta alcanza su máxima acumulación de materia seca, la panícula se dobla, las ramas de la panoja se separan, y las espiguillas cuelgan debido al peso de los granos.

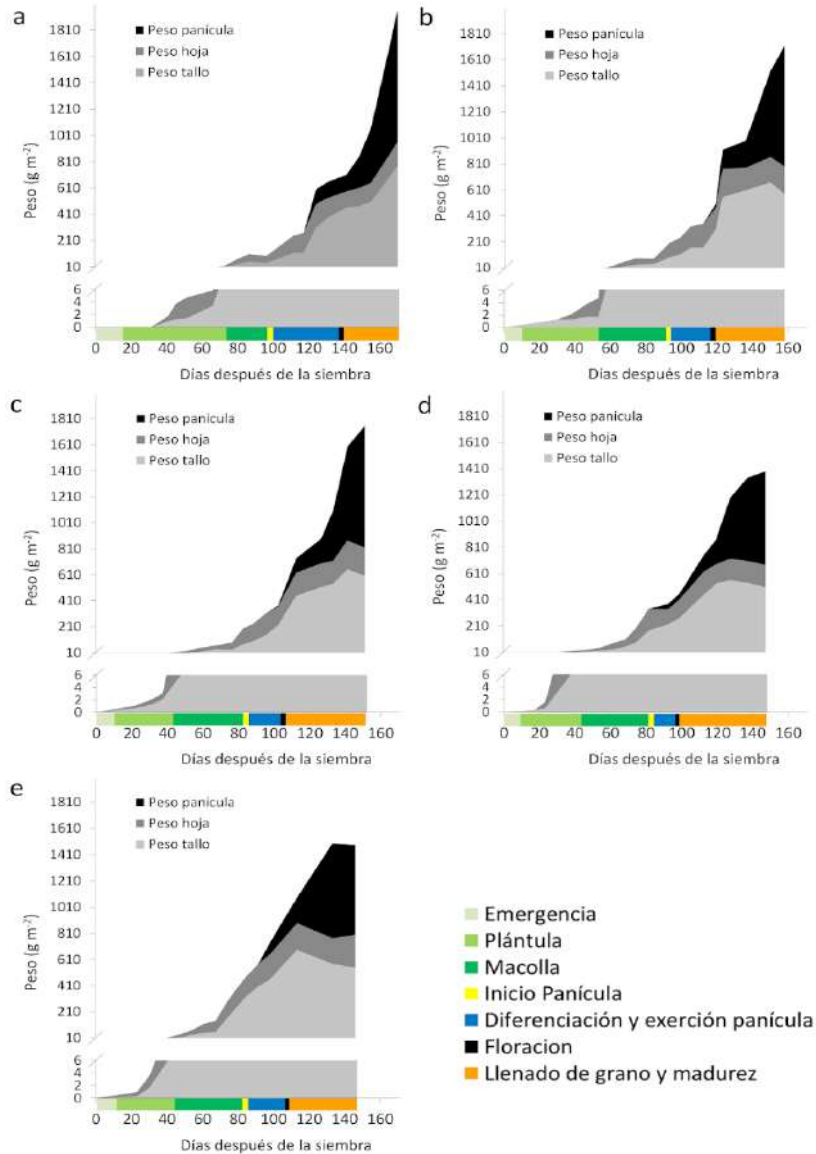


**Figura 18.** (a) Peso de 1.000 granos (g) de arroz. (b) distribución de pesos ubicados en el tercio superior, medio e inferior de la panoja, variedad 'Zafiro-INIA'. San Carlos, Ñuble. Temporada 2015-2016.

## Distribución de la materia seca de la planta en sus diferentes estructuras

La distribución de la producción de materia seca total de la planta la puede representar el índice de cosecha (IC). El índice de cosecha representa la proporción de la producción de grano, en relación a la materia seca total producida, excluyendo la raíz (Donald y Hamblin, 1976; Hay, 1995; Jun, 1997; Sinclair, 1998).

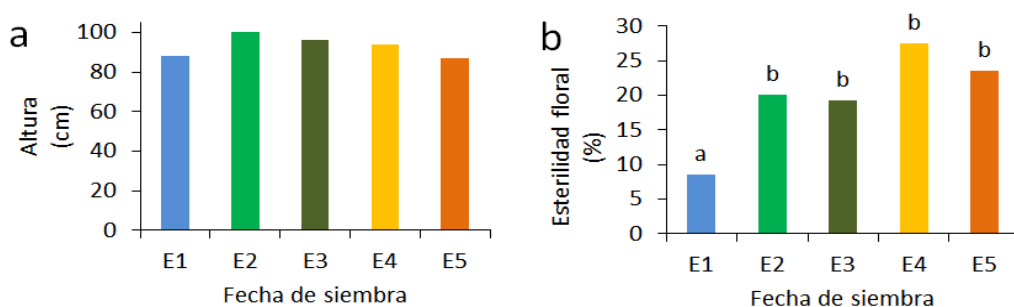
El IC de cada época de siembra muestra un valor cercano al 50 %, lo que indica que la mitad de la producción de materia seca que produjo la planta está representada por el grano y la otra mitad está distribuida en hojas y tallos. La distribución gráfica de la producción de materia seca en las plantas, señala una diferente acumulación de materia seca de los tallos, hojas y panojas a través de los estados de desarrollo. Es así como, el peso seco del tallo fue el principal componente en el estado vegetativo y las panojas lo fueron en el estado reproductivo (Figura 19).



**Figura 19.** Distribución de la acumulación de materia seca de tallos, hojas y panoja de la planta de arroz variedad 'Zafiro-INIA' (g m<sup>-2</sup>), evaluada en ensayos con diferentes épocas de siembra: a) primera, b) segunda, c) tercera, d) cuarta y e) quinta época de siembra. San Carlos, Ñuble. Temporada 2015-2016.

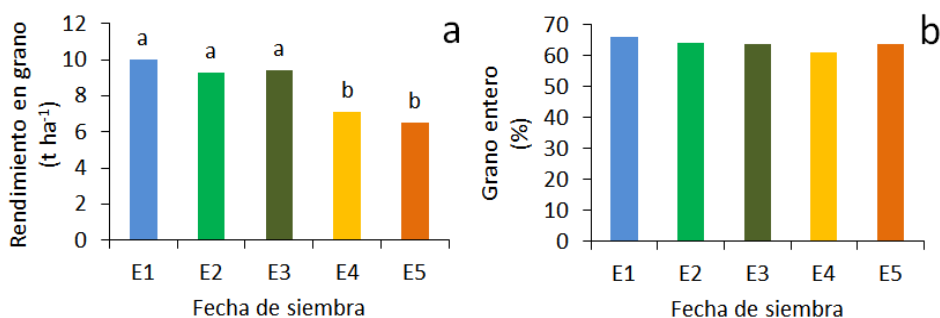
## Características agronómicas de importancia comercial

La altura final de la planta en las cinco épocas de siembra no presentó diferencias significativas (Figura 20 a). La esterilidad floral fue significativamente menor en la primera época de siembra que la observada en todas las otras épocas (Figura 20 b).



**Figura 20.** (a) altura de la planta (cm) a cosecha. (b) esterilidad floral (%) en diferentes épocas de siembra. Variedad 'Zafiro-INIA'. San Carlos, Ñuble. Temporada 2015-2016.

El rendimiento en grano paddy fue significativamente superior en las tres primeras épocas de siembra, comparada con las dos últimas (Figura 21 a). Mientras que, en el rendimiento industrial, el porcentaje de grano entero no presentó diferencias significativas entre las épocas de siembra (Figura 21 b).

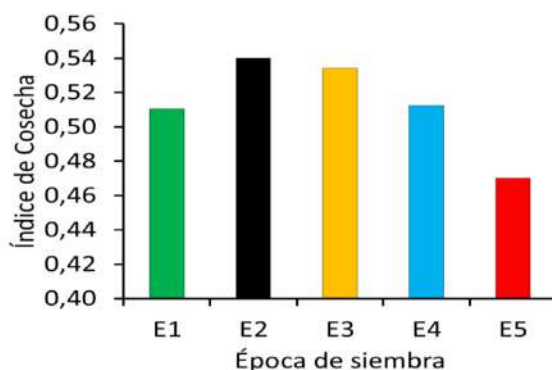


**Figura 21.** (a) rendimiento en grano paddy ( $t\ ha^{-1}$ ). (b) porcentaje de grano entero (%) en diferentes épocas de siembra. Variedad 'Zafiro-INIA'. San Carlos, Ñuble. Temporada 2015-2016.

El rendimiento promedio del grano paddy a nivel nacional oscila en torno a las  $6,5\ t\ ha^{-1}$ , por lo cual el rendimiento es de  $40,6\ kg\ ha^{-1}\ d^{-1}$ , considerando 160 d de siembra a cosecha, o  $43,3\ kg\ ha^{-1}$  con 150 d de siembra a cosecha, lo cual es inversamente proporcional a la duración del período de crecimiento de la planta. Ahora, si consideramos, el rendimiento experimental de  $10\ t\ ha^{-1}$ , el rendimiento puede variar entre  $62,5$  y  $66,7\ kg\ ha^{-1}\ d^{-1}$ , dependiendo del período de siembra a cosecha, y en el caso del rendimiento potencial de  $12\ t\ ha^{-1}$ , el rendimiento estaría entre  $75$  y  $80\ kg\ ha^{-1}\ d^{-1}$ . Por ello, es importante considerar que existe un margen para poder aumentar el rendimiento nacional, si se considera que algunos agricultores han alcanzado rendimientos de  $10$  o  $12\ t\ ha^{-1}$  en superficies de un par de hectáreas (Parada y Paredes, 2014).

El índice de cosecha es una característica que ha sido considerada en los programas de mejoramiento de arroz como una vía para aumentar el rendimiento, ya que representa la integración de varios procesos que incluyen la formación del número de panículas por área, el número de espiguillas por panícula, el porcentaje de granos llenos y el peso de los 1.000 granos maduros (Terao et al., 2010). El IC es una característica compleja y difícil de mejorar, debido a su naturaleza poligénica (Jun, 1997; Sabouri et al., 1999; Mao et al., 2003; Zhang et al., 2017b), a las condiciones ambientales (Yoshida, 1981; Prasad et al., 2006) y al manejo agronómico (Yang y Zhang, 2010).

Por otro lado, varios estudios han determinado correlaciones negativas entre el IC y la altura de plantas (Marri et al., 2005; Sabouri et al., 1999; Li et al., 2012), emisión de panoja, peso de la planta y largo de la panícula (Li et al., 2012), y correlaciones positivas entre el IC y el número de granos por panícula, porcentaje de espiguillas fértiles, peso de los granos y rendimiento por planta (Marri et al., 2005) y el peso del grano por panícula (Li et al., 2012). El IC en el experimento varió entre un 47 %, obtenido en la última época de siembra, y un 53 % a 54 % obtenido en la segunda y tercera época de siembra. La primera y cuarta época obtuvieron un IC de un 51 % (Figura 22).



**Figura 22.** Índice de cosecha en cultivo de arroz variedad 'Zafiro-INIA', determinado en ensayos con diferentes épocas de siembra (E1 a E5). San Carlos, Ñuble. Temporada 2015-2016.

**Modelos de simulación.** En las últimas décadas se han desarrollado varios modelos de simulación que integran variables climáticas y productivas, con el objetivo de predecir el crecimiento, desarrollo y productividad del cultivo bajo diferentes condiciones (Bouman et al., 1996). Entre estos modelos están CERES-RICE (Tsuji et al., 1994), RiceGrow (Tang et al., 2009; Artacho et al., 2011; Zhang et al., 2015; Li et al., 2017).

## Conclusiones

Por primera vez, durante la temporada 2015-2016 se evaluó el crecimiento y desarrollo de plantas de la variedad 'Zafiro-INIA' sembradas en cinco fechas de siembra, en la localidad de San Carlos. Ello significó evaluar un genotipo con un manejo agronómico estándar, los efectos de la temperatura, radiación y acumulación de los grados día ( $^{\circ}\text{C}$ ) sobre la duración de los ciclos vegetativo y reproductivo de la planta, y describir el crecimiento y desarrollo de ella para dos características: la altura (cm) y la acumulación de la materia seca ( $\text{g m}^{-2}$ ). Además, se pudo evaluar el índice de cosecha, esterilidad y su rendimiento productivo e industrial.

Las primeras fases del estado vegetativo, plántula y macolla, presentaron un comportamiento diferente, dependiendo de la época de siembra del arroz. Pero en general, el estado vegetativo total se acortó a medida que se atrasó la época de siembra.

La variedad que se siembra en la época recomendada, tiene el potencial de lograr un mayor rendimiento, en comparación con una variedad sembrada muy temprano o más tarde, debido a que las condiciones climáticas pueden ser adversas en el inicio, durante o al final del crecimiento y desarrollo de la planta. Bajas temperaturas en la siembra, pueden alargar el período de emergencia de la planta, y afectar la etapa reproductiva de la planta, reduciendo el rendimiento. Altas temperaturas al estado reproductivo, afectan el desarrollo del grano y la calidad.

Por otro lado, en términos agronómicos y productivos, la altura de la planta no fue afectada significativamente, en cambio, el nivel de esterilidad de la panícula sí se afectó significativamente en la primera fecha de siembra. Los cambios sobre el IC no fueron significativos. El rendimiento en grano paddy fue significativamente superior en las tres primeras épocas de siembra, comparado con las dos últimas épocas. El rendimiento industrial, medido como porcentaje de grano entero, no presentó diferencias significativas entre las épocas de siembra.

## Referencias

- Abou-Khalifa, A., Misra, A., El-Azeem, A., et al. 2008. Effect of leaf cutting on physiological traits and yield of two rice cultivars. *Afr. J. Plant Sci.* 2:147-150.
- Ali, M., Naylor, R., Matthews, S. 2006. Distinguishing the effects of genotype and seed physiological age on low temperature tolerance rice (*Oryza sativa* L.). *Exp. Agric.* 42:337-349.
- Alvarado, R., Hernaíz, S. 1995. Manual de producción de arroz. Programa de Reconversión de suelos arroceras. Serie Quilamapu N° 62. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.
- Alvarado, R., Hernaíz, S. 2007. Antecedentes generales sobre el arroz en Chile. p.7-20. En Alvarado, R (ed.). Arroz Manejo Tecnológico Boletín N°162. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.
- Alvarado, R., Pino, A. 1980. Efecto de la época de siembra sobre el rendimiento de cuatro variedades de arroz. *Inv. Prog. Agrop. Quilamapu* 3:7-11
- Artacho, P., Meza, F., Alcalde, J. 2011. Evaluation of Oryza2000 growth model under nitrogen-limited conditions in an irrigated Mediterranean environment. *Chil. J. Agric. Res.* 71:23-33.
- Baruah, A., Ishigo-Oka, N., Adachi, M., et al. 2009. Cold tolerance at the early growth stage and cultivated rice. *Euphytica* 165:459-470.
- Buchanan-Wollaston, V. 1997. The molecular biology of leaf senescence. *J. Exp. Bot.* 48:181-199.
- Cock, J., Yoshida, S. 1972. Accumulation of <sup>14</sup>C-labelled carbohydrate before flowering and subsequent redistribution and respiration in the rice plant. *Proc. Crop Sci. Soc. Jpn.* 41:226-234.
- Cordero, K., Hernaíz, S., Saavedra, F., et al. 2010a. Zafiro-INIA, nueva variedad de arroz para el mercado chileno. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Santiago, Chile.
- Cordero, K., Hernaíz, S., Saavedra, F., et al. 2010b. Cuarzo-INIA, variedad de alto rendimiento de campo y calidad industrial. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Santiago, Chile.
- Counce, P., Keisling, T., Mitchell, A. 2000. A uniform, objective, and adaptive system for expressing rice development. *Crop Sci.* 40:436-443.
- Donald, C., Hamblin, J. 1976. The biological yield and harvest index of cereals as agronomic and plant breeding criteria. *Adv. Agron.* 28:361-405.
- Donoso, G., Paredes, M., Becerra, V. 2013. Study of pollen development in rice under controlled conditions. VIII Reunión anual de la Sociedad de Biología Vegetal, Pucón.
- Donoso, G., Paredes, M. 2015. Efecto de las bajas temperaturas en el cultivo del arroz. p. 18-21. En Paredes, M., Becerra, V. (eds.) Producción de arroz: Buenas prácticas agrícolas (BPA). Boletín N° 306. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.

- Donoso, G., Paredes, M., Becerra, V. 2018. Época de siembra de la variedad Digua Cl. p.26-28. En Becerra, V., Paredes, M., Donoso, G. (eds.). Arroz sustentable: Sistema de producción de arroz Clearfield. Boletín N° 397. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.
- Ellis, R. 2011. Rice seed quality development and temperature during late development and maturation. *Seed Sci. Res.* 21:95-101.
- Ellis, R., Hong, T. 1994. Desiccation tolerance and potential longevity of development seeds of rice (*Oryza sativa* L.). *Ann. Bot.* 73:501-506.
- Fageria, N. 2007. Yield physiology of rice. *J. Plant Nutr.* 30:843-879.
- Farrel, T., Fox, K., Williams, R., et al. 2006. Minimizing cold damage during reproductive development among rice genotypes. II. Genotypic variation and flowering traits related to cold tolerant screening. *Aust. J. Agric. Res.* 57:89-100.
- Fu, J., Huang, Z., Wang, J., et al. 2011. Pre-anthesis non-structural carbohydrate reserve in the stem enhances the sink strength of inferior spikelets during grain filling of rice. *Field Crops Res.* 123:170-182.
- Fujino, K., Sekiguchi, H., Sato, T., et al. 2004. Mapping of quantitative trait loci controlling low-temperature germinability in rice (*Oryza sativa* L.) *Theor. Appl. Genet.* 108:794-799.
- Garris, A., Tai, T., Coburn, J., et al. 2005. Genetic structure and diversity in *Oryza sativa* L. *Genetics* 169:1631-1638.
- Gunawardena, T., Fukai, S., Blamey, F. 2003. Low temperature induced spikelet sterility in rice. I: Nitrogen fertilization and sensitive reproductive period. *Aust. J. Agric. Res.* 54:937-946.
- Hay, R. 1995. Harvest index: a review of its use in plant breeding and crop physiology. *Annu. Appl. Biol.* 126:197-216.
- Hayashi, M. Hayashi, T., Kuno, C., et al. 2013. Enhanced nitrogen uptake and photosynthesis of rice grown with deep and permanent irrigation method: possible mechanism for chalky grain reduction. *Plant Prod. Sci.* 16:309-316.
- He, H., Yang, R., Jia, B., et al. 2014. Rice photosynthetic productivity and PSII photochemistry under nonflooded irrigation. *Sci. World J.* 2014: 839658.
- Henríquez, R., Henríquez, G., Sepúlveda, D., et al. 2018. Siembra. p. 52-58. En Manual de manejos bajo el sistema de siembra directa con taipas de arroz en Chile. Serie estudios para la innovación FIA. Fundación para la Innovación Agraria (FIA), Santiago, Chile.
- Hubbart, S., Peng, S., Horton, P., et al. 2007. Trends in leaf photosynthesis in historical rice varieties developed in the Philippines since 1996. *J. Exp. Bot.* 58:3429-3438.
- Imin, N., Kerim, T., Weinman, J., et al. 2006. Low temperature at the young microspore stage induces protein changes in rice anthers. *Mol. Cell Proteomics* 5:274-292.
- Jagadish, S., Craufurd, P., Wheeler, T. 2007. High temperature stress and spikelet fertility in rice (*Oryza sativa* L.). *J. Exp. Bot.* 58:1627-1635.
- Jagadish, S., Muthurajan, R., Wheeler, T., et al. 2010. Physiological and proteomic approaches to address heat tolerance during anthesis in rice (*Oryza sativa* L.). *J. Exp. Bot.* 61:143-156.
- Julia, C., Dingkuhn, M. 2012. Variation in time of day of anthesis in rice in different climatic environments. *Eur. J. Agron.* 43:166-174.
- Jun, F. 1997. Formation of harvest index in rice and its improvement. *Crop Res.* 2:1-3.
- Karki, S., Rizal, G., Quick, W. 2013. Improvement of photosynthesis in rice (*Oryza sativa* L.) by inserting the C4 pathway. *Rice* 6:28.
- Khalifa, A. 2009. Physiological evaluation of some hybrid rice varieties under different sowing dates. *Aust. J. Crop Sci.* 3:178-183.



- Koller, E. 1958. El cultivo del arroz en la provincia de Ñuble y su terminología. p. 87-103. Boletín de Filología. Instituto de Filología de la Universidad de Chile. Tomo IX, 1956-1957. Edit. Universitaria, S.A., Santiago, Chile.
- Li, T., Angeles, O., Marcaida, M., et al. 2017. From ORYZA2000 to ORYZA (v3): An improved simulation model for rice in drought and nitrogen-deficient environments. *Agric. For. Meteorol.* 237:246–256.
- Li, X., Yan, W., Agrama, H., et al. 2012. Unraveling the complex trait of harvest index with association mapping in rice (*Oryza sativa* L.) *PLoS ONE* 7(1):e29350.
- Long, S., Zhu, X., Naidu, S., et al. 2006. Can improvement in photosynthesis increase crop yield? *Plant Cell Environ.* 29:315-330.
- Makino, A. 2011. Photosynthesis, grain yield, and nitrogen utilization in rice and wheat. *Plant Physiol.* 155:125-129.
- Mao, B., Cai, W., Zhang, Z., et al. 2003. Characterization of QTLs for harvest index and source-sink characters in a DH population of rice (*Oryza sativa* L.). *Acta Genet. Sin.* 30:1118-1126.
- Marri, P., Sarla, N., Reddy, L., et al. 2005. Identification and mapping of yield and yield related QTLs from an Indian accession of *Oryza rufipogon*. *BMC Genet* 13:33-39.
- Martínez-Eixarch, M., Ellis, R. 2015. Temporal sensitivities of rice seed development from spikelet fertility to viable mature seed to extreme-temperature. *Crop Sci.* 55:354-364.
- Matsui, T., Omasa, K., Horie, T. 2001. The difference in sterility due to high temperature during flowering period among *japonica*-rice varieties. *Plant Prod. Sci.* 4:90-93.
- Matsumura, H., Zuzuki, K., Shimono, H. 2012. Water temperature during vegetative growth affect cold tolerance at booting stage of rice under controlled environment conditions. *J. Agric. Meteorol.* 68:159-164.
- Murchie, E., Yang, J., Hubbart, S., et al. 2002. Are there the association between grain-filling rate and photosynthesis in the flag leaves of field grown rice? *J. Exp. Bot.* 53:2217-2224.
- Nakamura, T., Chiba, M., Koike, S., et al. 2000. Number of pollen grains in rice cultivars with different cool-weather resistance at the young microspore stage. *Plant Prod. Sci.* 3:299-305.
- Okawa, S., Makino, A., Mae, T. 2003. Effect of irradiance on the partitioning of assimilated carbon during the early phase of grain filling in rice. *Ann. Bot.* 92:357-364.
- Pan, J., Cui, K., Wei, D., et al. 2011. Relationships of non-structural carbohydrates accumulation and translocation with yield formation in rice recombinant inbred lines under two nitrogen levels. *Physiol. Plant.* 141:321-331.
- Parada, J., Paredes, M. 2014. Agricultores arroceros obtienen rendimiento récord en Chile en Concurso Nacional de Producción. *Tierra Adentro* (Ed. Especial) 106:21-23.
- Paredes, M., Becerra, V., Donoso, G., et al. 2016. Platino-INIA, variedad de alto rendimiento en grano y calidad industrial. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Santiago, Chile.
- Paredes, M., Becerra, V., Donoso, G., et al. 2019. Digua CI, primera variedad de arroz Clearfield para Chile. p. 18-25. En Becerra, V., Paredes, M., Donoso, G. (eds.) *Arroz sustentable: Sistema de producción de arroz Clearfield*. Boletín N° 397. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.
- Prasad, P., Boote, K., Allen, L., et al. 2006. Species, ecotype and cultivars differences in spikelet fertility and harvest index of rice in response to high temperature stress. *Field Crop Res.* 95:398-411.
- Rahman, Md., Haque, M., Sikdar, B., et al. 2013. Correlation analysis of flag leaf with yield in several rice cultivars. *J. Life Earth Sci.* 8:49-54.

- Restrepo, H., Garces, G. 2013. Evaluation of low light intensity at three phenological stages in the agronomic and physiological responses of two rice (*Oryza sativa* L.) cultivars. *Agron. Colombiana* 31:55-60.
- Roel, A., Mutters, R., Eckert, J., et al. 2005. Effect of low water temperature on rice yield in California. *Agron. J.* 97:943-948.
- Sabouri, H., Sabouri, A., Reza, D. 1999. Genetic dissection of biomass production, harvest index and panicle characteristics in *indica-indica* crosses of Iranian rice (*Oryza sativa* L.) cultivars. *Aust. J. Crop Sci.* 3:155-166.
- Sánchez, B., Rasmussen, A., Porter, J. 2014. Temperatures and the growth and development of maize and rice: a review. *Global Change Biol.* 20:408-417.
- Sánchez-Reinoso, A., Garcés-Varón, G., Restrepo-Díaz, H. 2014. Biochemical and physiological characterization of three rice cultivars under different daytime temperature conditions. *Chil. J. Agric. Res.* 74:373-379.
- San-oh, Y., Mano, Y., Ookawa, T., et al. 2004. Comparison of dry matter production and associated characteristics between direct-sown and transplanted rice plants in a submerged paddy field and relationships to planting pattern. *Field Crops Res.* 87:43-58.
- Satake, T., Yoshida, S. 1978. High temperature-induced sterility in *indica* rice at flowering. *Jpn. J. Crop Sci.* 47. 6-17.
- Sharifi, H., Hijmans, R., Hill, J., et al. 2018. Water and air temperature impact on rice (*Oryza sativa*) phenology. *Paddy Water Environ.* 16:467-476.
- Shen, B-R., Wang, L-M., Lin, X-L., et al. 2019. Engineering a new chloroplastic photorespiratory bypass to increase photosynthetic efficiency and productivity in rice. *Mol. Plant* 12:199-214.
- Shi, W., Muthurajan, R., Rahman, H., et al. 2013. Source-sink dynamics and proteomic reprogramming under elevated night temperature and their impact on rice yield and grain quality. *New Phytol.* 203:825-837.
- Shimono, H., Hasegawa, T., 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., Ishii, A., Kanda, E., et al. 2011. Genotypic variation in rice cold tolerance responses during reproductive growth as a function of water temperature during vegetative growth. *Crop Sci.* 51:290-297.
- Shimono, H., Okada, M., Kanda, E., et al. 2007. Low temperature-induced sterility in rice: evidence for the effects of temperature before panicle initiation. *Field Crops Res.* 101:221-231.
- Sims, G. 1969. El cultivo del arroz. *El Campesino (Chile)* 100:43-71.
- Sims, G., Alvarado, R. 1972. Preparación del suelo y siembra. p. 32-50. En *Manual de arroz*. Servicio y Ganadero, Central de Divulgación Técnica. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Estación Experimental Quilamapu, Chillán, Chile.
- Sinclair, T. 1998. Historical changes in harvest index and crop nitrogen accumulation. *Crop Sci.* 38:638-643.
- Stansel, J., Bollich, C., Thysell, J., et al. 1965. The influence of light intensity and nitrogen fertility on rice yield and components of yield. *Rice J.* 68:34-35.
- Tang, L., Zhu, Y., Hannaway, D., et al. 2009. RiceGrow: a rice growth and productivity model. *NJAS Wageningen J. Life Sci.* 57:83-92.
- Terao, T., Nagata, K., Morino, K., et al. 2010. A gene controlling the number of primary rachis branches also controls the vascular bundle formation and hence is responsible to increase the harvest index and grain yield in rice. *Theor. Appl. Genet.* 120:875-893.
- Tsuji, G., Uehara, G., Balas, G. 1994. DSSAT versión 3, vol. 1-3. University of Hawaii, Hawaii.

- Wang, L., Lu, Q., Wen, X., et al. 2015. Enhanced sucrose loading improves rice yield by increasing grain size. *Plant Physiol.* 169:2848-2862.
- Wang, Z., Zhang, F., Xiao, F., et al. 2018. Contribution of mineral nutrients from source to sink organs in rice under different nitrogen fertilization. *Plant Growth Regul.* 86:159-167.
- Wu, H., Xiang, J., Zhang, Y., et al. 2018. Effects of post-anthesis nitrogen uptake and translocation on photosynthetic production and rice yield. *Sci. Rep.* 8:12891.
- Xiong, D., Yu, T., Ling, X., et al. 2015. Sufficient leaf transpiration and non-structural carbohydrates are beneficial for high-temperature tolerance in three rice (*Oryza sativa*) cultivars and two nitrogen treatments. *Funct. Plant Biol.* 42:347-356.
- Yamamoto, T., Zuzuki, T., Zuzuki, K., et al. 2017. Characterization of a genomic region that maintain chlorophyll and nitrogen contents during ripening in a high-yielding stay green rice cultivars. *Field Crops Res.* 206:54-64.
- Yang, J., Zhang, J. 2010. Crop management techniques to enhance harvest index in rice. *J. Exp. Bot.* 61:3177-3189.
- Yang, J., Zhang, J., Wang, Z., et al. 2001. Remobilization of carbon reserves in response to water deficit during grain filling of rice. *Field Crops Res.* 71:47-55.
- Yoshida, S. 1972. Physiological aspects of grain yield. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 23:437-464.
- Yoshida, S. 1977. Rice. p. 57-87. In: Alvin, P de T., Kozolowski, T (eds.) *Ecophysiology of tropical crops*. Academic Press, New York, USA.
- Yoshida, S. 1981. Climatic environment and its influence. p.65-110. In *Fundamentals of rice crop science*. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines.
- Yoshida, S., Parao, F. 1976. Climatic influence on yield and yield components of lowland rice in the tropics. p. 471-494. In *Climate and rice*. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Philippines.
- Zeng, Y., Zhang, Y., Xiang, J., et al. 2017. Effects of low temperature stress on spikelet-related parameters during anthesis in *indica-japonica* hybrid rice. *Front. Plant Sci.* 8:1350.
- Zhang, J., Feng, L., Zou, H., et al. 2015. Using *Oryza2000* to model cold rice yield response to climate change in the Heilongjiang province, China. *Crop J.* 3:317-327.
- Zhang, S., He, X., Zhao, J., et al. 2017b. Identification and validation of a novel major QTL for harvest index in rice (*Oryza sativa* L.) *Rice* 10:44.
- Zhang, W., Kokubun, M. 2004. Historical changes in grain yield and photosynthetic rate of rice cultivars released in the 20<sup>th</sup> century in Tohoku region. *Plant Prod. Sci.* 7:36-44.
- Zhang, J., Li, G., Huang, Q., et al. 2017a. Effects of culm carbohydrate partitioning on basal stem strength in a high-yielding rice population. *Crop J.* 5:478-487.
- Zhang, Y., Tang, Q., Zou, Y. 2009. Yield potential and radiation use efficiency of "super" hybrid rice grown under subtropical conditions. *Field Crops Res.* 96:37-47.
- Zhu, G., Peng, S., Huang, J., et al. 2016. Genetic improvement in rice yield and concomitant increases in radiation-and nitrogen-use efficiency in middle reaches of Yangtze river. *Sci. Rep.* 6:21049.