

Sistemas de Producción de Trigo y Cebada: Decisiones de manejo en base a conceptos ecofisiológicos para optimizar el rendimiento, la calidad y el uso de los recursos

Susana Valle, Carolina Lizana y Daniel Calderini
(Editores)



PRÓLOGO

La producción de cultivos básicos para la alimentación mundial, como trigo y cebada enfrenta grandes desafíos relacionados con el aumento de la población mundial, la necesidad de una producción sustentable y el cambio climático global. La investigación, trabajo y enfoque multidisciplinario de las problemáticas a las que se enfrenta la producción de estos cultivos en el mundo, parece la única vía para intentar vencer las limitaciones en el aumento de sus rendimientos. Entender y discutir estas limitaciones bajo el prisma de investigaciones desarrolladas en diversos ambientes y sistemas de producción particulares, es un valioso aporte que CYTED a través del financiamiento de la red METRICE (Mejora de la eficiencia de uso de insumos y ajustes fenológico de los cultivos trigo y cebada) ha concretado. Esta publicación consta de 10 capítulos emanados de los trabajos presentados en el segundo taller de la red denominado “Sistemas de Producción de Trigo y Cebada: Decisiones de manejo en base a conceptos ecofisiológicos para optimizar el rendimiento, la calidad y el uso de los recursos”. Este taller fue realizado en la Universidad Austral de Chile, ubicada en Valdivia, Chile en Noviembre de 2011 y congregó a investigadores de todas las instituciones que participan en la red (Universidad de Buenos Aires, Argentina; INTA-Pergamino, Argentina; Universidad Federal Río Grande do Sul, Brasil; Universidad Austral de Chile, Chile; Universidad de Lleida, España; Universidad Autónoma del Estado de México, México y Universidad de la República, Uruguay) e investigadores invitados que realizaron importantes contribuciones al taller. De este modo se reunió una masa crítica de alto nivel que permitió enriquecer la discusión en temas trascendentales para la producción de trigo y cebada en el mundo. El objetivo de esta publicación es transmitir los alcances de este taller y contribuir a direccionar futuras investigaciones para aumentar la producción de trigo y cebada en diferentes regiones del mundo.

Índice

Prólogo	1
Capítulo 1 Introducción	6
Capítulo 2 Estabilidad del rendimiento de trigo y cebada en una zona mediterránea y uso de la fertilización nitrogenada para mitigar el estrés hídrico <i>Roxana Savin, C. Mariano Cossani, L. Gabriela Abeledo, Gustavo A. Slafer.</i>	8
Resumen Introducción Estabilidad del rendimiento de trigo y cebada en una zona mediterránea Experimentación en campos de agricultores Experimentación virtual a través del uso de modelos Experimentación en red alrededor de la cuenca del Mediterráneo Prueba piloto en campos de agricultores en Túnez Observaciones finales Referencias	
Capítulo 3 Manejo agronómico de trigo candeal en la zona mediterránea de Chile central <i>Paola Silva y Edmundo Acevedo</i>	22
Resumen Introducción Fertilización nitrogenada, EUN y SPAD en condición de riego Rotación de cultivos en secano Fecha de siembra y EUA en secano Observaciones finales Referencias	
Capítulo 4 ¿Qué cambios presentaron en los últimos años los sistemas de producción de trigo y cebada en Argentina? <i>L. Gabriela Abeledo, Daniel J. Miralles</i>	39
Resumen Introducción Metodología de análisis de la información Cambios en la superficie y producción de trigo y cebada ¿Son los rendimientos de cebada menores respecto de los de trigo? Eficiencia en el uso del agua (EUA) en trigo y cebada Observaciones finales Referencias	

Capítulo 5

La producción de trigo y cebada en los valles altos de México: Estado actual y perspectivas 55

Estrada-Campuzano Gaspar, Morales-Rosales Edgar Jesús. Martínez-Rueda Carlos Gustavo

Introducción

Condiciones agroecológicas de la región

Principales factores limitantes de la producción de trigo y cebada en los valles alto de México

Factores bióticos

Factores abióticos

Densidad de población

Manejo de la fertilización nitrogenada

Manejo del agua

Consideraciones finales

Bibliografía

Capítulo 6

Productividad de biomasa, captura de recursos y sustentabilidad de trigo y cebada en ambientes de alto potencial de rendimiento del sur de Chile 67

Daniel F. Calderini, Ricardo Riegel, Carolina Lizana.

Resumen

Introducción

Ambientes de alta productividad del sur de Chile. Caracterización edafo climática

El ciclo de los cultivos de trigo y cebada primaverales en condiciones de foperíodos inductivos

Producción de biomasa, partición de asimilados, rendimiento e indicadores de calidad

Captura de recursos: eficiencia de conversión de la radiación y utilización de los nutrientes

Posibles estrategias para mejorar la calidad del rendimiento y asegurar la sustentabilidad de los cultivos

Observaciones finales

Referencias

Capítulo 7

Restricciones edáficas para trigo y cebada en suelos volcánicos ácidos del Sur de Chile: Disponibilidad de P y Toxicidad por Al 84

Susana Valle, Patricio Sandaña y Dante Pinochet

Resumen

Introducción

Condiciones edafoclimáticas del centro sur de Chile

Captura y Eficiencia de Uso de Recursos bajo Restricciones Edáficas

Disponibilidad de P

Efecto de la disponibilidad de P en la fenología de trigo.

Respuestas de los componentes del rendimiento.
 Captura y uso de radiación bajo distintas disponibilidades de P.
 Eficiencia de uso de P

Toxicidad por Aluminio

Efecto de la Toxicidad por Al sobre la fenología del cultivo
 Generación del rendimiento y sus componentes bajo condiciones de toxicidad por Al
 Efecto del Al fitotóxico sobre el crecimiento radical, captura y uso de nutrientes

Observaciones finales

Referencias

Capítulo 8

Disponibilidad y aumento de la eficiencia de uso del nitrógeno en sistemas de producción de cereales de invierno en regiones subtropicales 105

Christian Bredemeier, Danielle Almeida, Alexandre Tonon Rosa, Clever Variani

Resumen

Introducción

El cultivo de trigo en la región sur de Brasil

Manejo de la fertilización nitrogenada en cereales de estación fría en sistemas de producción subtropicales

Variables de planta y suelo como criterios para definición de la necesidad de nitrógeno

Aumento de la eficiencia de uso del nitrógeno en sistemas de producción subtropicales

Evaluación de la reflectancia del dosel como herramienta auxiliar en el manejo del nitrógeno

Observaciones finales

Referencias

Capítulo 9

Determinantes genéticos del ciclo de cebada y los desafíos impuestos por la intensificación agrícola 124

Ariel Castro, Esteban Hoffman, Luis Viega

Resumen

La cebada en el sistema agrícola uruguayo

Disponibilidad de germoplasma

Factores genéticos que controlan la fenología

Perspectivas

Observaciones finales

Referencias

Capítulo 10

Sesiones de posters 134

Rendimiento potencial en trigo: Identificación de atributos ecofisiológicos

favorables en líneas doble haploide. *Guillermo A. García, Fernanda G. González, Gustavo A. Slafer y Daniel J. Miralles.*

Peso de gano en trigo: variabilidad y grado de limitación por fuente durante el llenado en cultivares adaptados al centro de Argentina. *Fernanda G. González, María L. Aldabe, Déborah P. Rondanini.*

Respuesta del coeficiente de fertilidad de la espiga en trigo a diferentes condiciones de cultivo. *Ignacio I. Terrile, Fernanda G. González.*

Fertilización nitrogenada y eficiencia en el uso del nitrógeno en cebada cervecera en el norte de la provincia de Buenos Aires: rendimiento y calidad. *Miguel Santangelo Luis Ventimiglia, Antonio Aguinaga, Fernanda G. González.*

Anegamiento en trigo y cebada y su efecto sobre el rendimiento y sus componentes. *Romina de San Celedonio, L. Gabriela Abeledo y Daniel J. Miralles.*

Cambios en la duración de las etapas pre-antesis en trigo en respuesta a la fertilización nitrogenada. *Esther Hernández-Rodríguez, Gaspar Estrada-Campuzano, Carlos G. Martínez-Rueda, Edgard J. Morales-Rosales.*

Producción de biomasa, radiación interceptada y eficiencia en el uso de la radiación en cultivares de trigo ante cambios en la fertilización nitrogenada. *Esther Hernández-Rodríguez, Gaspar Estrada-Campuzano, Carlos G. Martínez-Rueda, Edgard J. Morales-Rosales*

Estrategias de generación de rendimiento en líneas doble haploides de trigo seleccionadas para superar las 15 t ha⁻¹ de rendimiento. *Daniela Bustos, Ahmed Hasan y Daniel Calderini.*

Respuesta del rendimiento de trigo a la baja densidad de siembra: Compensaciones entre los componentes del rendimiento. *Daniela Bustos y Daniel Calderini.*

C6 Dinámica del agua y la materia seca de los granos de trigo y lupino en respuesta a reducciones de fuente en diferentes momentos durante el llenado de granos. *Claudia I. Harcha y Daniel F. Calderini.*

Optimización de dosis de enmienda calcárea y efectos sobre el rendimiento y calidad de grano de triticale invernal cv. Faraón-INIA en Andisoles de la Región de la Araucanía. *Ricardo Campillo, Claudio Jobet y Carlos Toro.*

Optimización de dosis de enmienda calcárea y efectos sobre el rendimiento y calidad de grano de trigo invernal cv. Maxwell-INIA en Andisoles de la Región de la Araucanía
Ricardo Campillo, Claudio Jobet y Carlos Toro

Calidad de granos de trigo afectada por el manejo de nitrógeno. *Christian*

Bredemeier, Danielle Almeida, Clever Variani, Alexandre T. Rosa, Júlia Perin, Jacqueline F. Schmitz.

INTRODUCCIÓN

La presente publicación es el resultado del taller “Sistemas de Producción de Trigo y Cebada: Decisiones de manejo en base a conceptos ecofisiológicos para optimizar el rendimiento, la calidad y el uso de los recursos”, realizado por la Red: “Mejorar la eficiencia en el uso de insumos y el ajuste fenológico en cultivos de trigo y cebada” (METRICE) (Red 110RT0394) financiada por el Programa CYTED (Área Agroalimentación) y coordinada por el Dr. Gustavo Slafer. Este taller fue realizado en la ciudad de Valdivia, Chile, bajo la modalidad de charlas expositivas y presentaciones en posters, lo cual permitió el intercambio y discusión entre investigadores de seis países (Argentina, Brasil, Chile, España, México y Uruguay) miembros de la red.

Los primeros 9 capítulos del libro corresponden a presentaciones orales de los investigadores principales de cada institución participante: Universidad de Buenos Aires, Argentina; INTA-Pergamino, Argentina; Universidad Federal Río Grande do Sul, Brasil; Universidad Austral de Chile, Chile; Universidad de Lleida, España; Universidad Autónoma del Estado de México, México y Universidad de la República, Uruguay. En estos capítulos se abordan las bases ecofisiológicas, aspectos de manejo y mejoramiento genético para optimizar el rendimiento, calidad y uso de los recursos en diferentes ambientes de producción de trigo y cebada, basados en las principales investigaciones de cada grupo participante. El capítulo 10 corresponde a las presentaciones de la reunión en formato de posters, que a través de la discusión de trabajos de investigación en desarrollo, abordaron aspectos más específicos de los sistemas de producción de trigo y cebada.

De las sesiones orales las dos primeras hicieron referencia a las principales limitaciones y aspectos de manejo en sistemas de producción en ambientes mediterráneos (capítulos 2 y 3), las siguientes analizaron la evolución y proyección de los sistemas de producción de trigo y cebada en Argentina (capítulo 4) y los Valles altos de México (capítulo 5). Los capítulos 6 y 7 analizaron la producción de trigo y cebada en ambientes de alto potencial de rendimiento como el sur de Chile y las restricciones edáficas (disponibilidad de P y toxicidad por Al) en suelos volcánicos de esta región respectivamente. El capítulo 8 discute la disponibilidad y eficiencia de uso de N en ambientes subtropicales mientras que el capítulo 9 analiza los determinantes genéticos de la fenología de cebada y los desafíos que le impone la intensificación agrícola en Uruguay.

El capítulo 10 presenta avances en investigaciones que comprenden aspectos genéticos y ecofisiológicos de la generación del rendimiento y calidad de trigo y cebada, así como la discusión de limitaciones hídricas y nutricionales en los diversos sistemas de producción abordados en este taller.

La diversidad de aspectos de la fisiología, genética y manejo analizados en el taller de la red METRICE, bajo una amplia gama de ambientes y situaciones, además de los enfoques particulares de cada grupo de investigación, hacen de esta publicación una herramienta valiosa para lectores pertenecientes a diversas áreas del conocimiento, interesados en explorar los desafíos impuestos para la producción actual y futura de estos cultivos.

Estabilidad del rendimiento de trigo y cebada en una zona mediterránea y uso de la fertilización nitrogenada para mitigar el estrés hídrico

Roxana Savin¹, C. Mariano Cossani², L. Gabriela Abeledo³, Gustavo A. Slafer^{1,4}

¹Departamento de Producción Vegetal y Ciencias Forestales y CRA (Centro de Investigación Agroalimentario), Universidad de Lleida, Av. Rovira Roure 191, 25198, Lleida, Spain. ²Global Wheat Program, International Maize and Wheat Improvement Centre (CIMMYT), Apdo. Postal 6-641, 06600 México DF, México. ³Departamento de Producción Vegetal, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Av. San Martín 4453, C1417DSE, Buenos Aires, Argentina. ⁴ICREA (Institución Catalana de Investigación y Estudios Avanzados)

Resumen

Aunque la mayor parte de la producción mundial de trigo y cebada no se realiza en condiciones mediterráneas, estos cereales son el centro de la producción de granos en dicha región. Las condiciones de cultivo de secano en zonas mediterráneas se caracterizan por ambientes de bajos rendimientos con una gran oscilación interanual. Disminuir dicha variabilidad es un objetivo natural para los agricultores de estas regiones. Una alternativa posible es ajustar la fertilización nitrogenada para mejorar la captura y/o la eficiencia de uso del agua disponible. España es el mayor productor de trigo y cebada en condiciones mediterráneas de secano dentro de los países que forman parte de la Red METRICE, y presenta una alta variabilidad interanual de rendimientos. Análisis de la variabilidad de rendimientos de trigo y cebada en diferentes regiones de Cataluña indican que la estabilidad es menor en la provincia de Lleida que en las provincias del litoral, probablemente debido a una mayor continentalidad del clima. La mayor variabilidad interanual esta generada por años de muy bajos rendimientos.

Dentro de Lleida, la comarca del Urgell es una de las más características para la producción de cereales (trigo o cebada) de secano. En experimentos a campo realizados en condiciones de secano en la comarca del Urgell, se ha encontrado similar grado de variabilidad interanual que los mostrados como media de los agricultores de la comarca. Dichos experimentos, corroboraron que la fertilización nitrogenada puede potencialmente ser una herramienta para disminuir la pérdida de rendimientos en años de condiciones adversas, aunque lamentablemente solo uno de los experimentos realizados resultó con rendimientos muy bajos (c. 1 Mg ha⁻¹) y en este caso, no hubo una respuesta del rendimiento al nitrógeno. Usando modelos de simulación resulta claro que si la disponibilidad de nitrógeno en el suelo es reducida (e.g. 50 kgN ha⁻¹) los rendimientos alcanzables fueron en promedio mucho menores (1,8 Mg ha⁻¹) que en condiciones en las que el nitrógeno no representaba limitaciones para el crecimiento del cultivo (2,8 Mg ha⁻¹), aunque no había mejoras en los rendimientos de los peores años (*i.e.* con rendimientos \leq 1,5-2 Mg ha⁻¹). Sin embargo, esto podría deberse a supuestos del propio modelo. Por el contrario, en una red de experimentos con trigo y cebada en condiciones de secano en diferentes áreas de la cuenca del Mediterráneo (Marruecos, Jordania, Italia y España) se han obtenido respuestas razonablemente consistentes a la fertilización aún en ambientes de muy bajos rendimientos debido a un marcado estrés hídrico. Finalmente, en una experiencia piloto en 20 campos reales de agricultores de dos regiones diferentes de Túnez, se registraron varios casos de rendimientos muy bajos y en la mayoría de los casos las respuestas a la fertilización fueron positivas, particularmente si se considera la respuesta conjunta de los granos y de la paja (que en la región Mediterránea, tanto europea como del N de África y del O de Asia, tiene valor de mercado).

Introducción

Aunque la mayor parte de la producción mundial de trigo y cebada no se realiza en condiciones mediterráneas, ya que estas representan una pequeña proporción de la superficie arable mundial (Fig. 1), estos cereales son el centro de la producción de granos en esta región. La agricultura de secano constituye una de las actividades agrícolas más importantes dentro de la cuenca mediterránea siendo la producción de cereales invierno-primaverales uno de los principales usos de la tierra. En dicha región, los cultivos de trigo y cebada enfrentan generalmente situaciones de estrés hídrico y térmico. Las condiciones ambientales adversas son determinadas tanto por una errática distribución y cantidad de las lluvias anuales, como también por períodos de altas temperaturas que coinciden con las etapas más avanzadas del cultivo afectando el rendimiento final en grano (Loss y Siddique 1994).

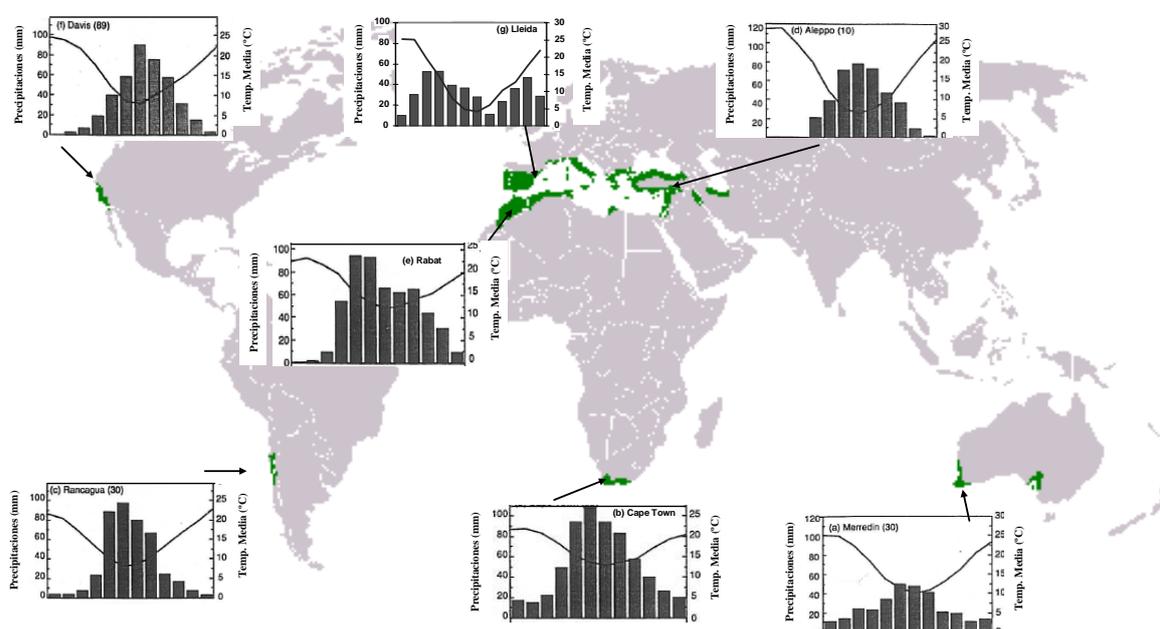


Figura 1. Áreas de cultivo de cereales en condiciones mediterráneas con indicación de los patrones de distribución de precipitaciones y temperaturas medias (ordenadas de enero a diciembre para hemisferio sur y de julio a junio en hemisferio norte) para ciertas localidades dentro de estas regiones. Tomada de Cossani (2010), que fuera adaptada de Loss y Siddique (1994).

De este modo, las condiciones de cultivo de secano mediterráneas se caracterizan por ambientes de bajos rendimientos pero también con una gran oscilación de los mismos, ya que la variabilidad interanual, sobretodo en precipitaciones, es muy grande (Loss y Siddique, 1994; Acevedo et al., 1999). Poder disminuir este grado de variabilidad a través de reducir las pérdidas de rendimientos en años con estreses más severos es un objetivo natural de todo agricultor. Como el estrés hídrico es la más conspicua de las adversidades abióticas en las regiones mediterráneas, incrementar el riego efectivamente solucionaría el problema. Sin embargo, actualmente aumentar de modo considerable el uso del agua para la producción de cultivos de cereales no es una opción disponible en la mayoría de los casos (y probablemente menos aún lo será en el futuro). Por ello, resulta deseable identificar estrategias de manejo alternativas que permitan aumentar la captura del agua que podría estar disponible naturalmente en el perfil de suelo y/o incrementar la eficiencia en el uso del agua que el cultivo evapotranspira.

Por otro lado, el uso de la tierra en condiciones mediterráneas también se encuentra fuertemente influenciado por las condiciones ambientales (precipitaciones y temperaturas). La mayor concentración de cultivos en regiones de ambientes mediterráneos se observa precisamente en la cuenca del Mar Mediterráneo (Fig. 1). Dentro de la región del sur de Europa, las zonas más secas (precipitaciones menores a 250 mm anuales) se destinan a sistemas agrícolas simples basados en el monocultivo de cebada mientras que a medida que las precipitaciones aumentan el monocultivo de cebada es parcialmente reemplazado por sistemas agrícolas más complejos y mixtos en los cuales la cebada tiende a ser reemplazada por el trigo duro o harinero (según la importancia de cada uno de estos en la región específica) y los cuales se rotan con otros cultivos como legumbres (Lopez-Bellido 1992; Anderson et al. 2002). Por ejemplo, en Cataluña la superficie relativa de cebada con respecto a la totalidad de cereales disminuye desde casi un 100% cuando las precipitaciones durante la estación de crecimiento son relativamente bajas, hasta un 20% cuando las precipitaciones son mayores (Cossani et al., 2007; Fig. 2) siendo reemplazada por trigo en la mayoría de los casos.

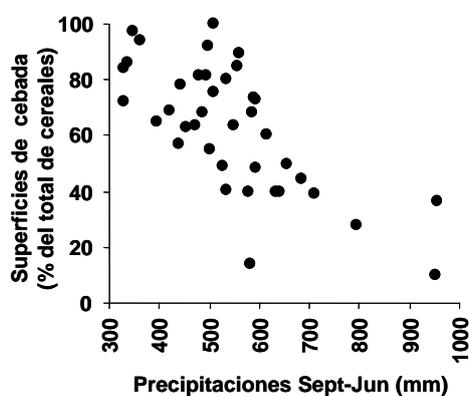


Figura 2. Superficie cultivada con cebada como porcentaje del total de la superficie cultivada con cereales en Cataluña. Datos del DAR (Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca, Alimentació i Medi Natural). Datos de los años 2000/2003.

De modo similar, la agricultura de secano en el margen sur del Mar Mediterráneo y oeste de Asia también se caracteriza por un uso de la tierra donde se realiza virtualmente monocultivo de cebada en las condiciones de menores niveles de rendimiento y trigo en condiciones de menores intensidades de estrés (Ryan et al., 2008).

Sin embargo, no parece haber una base empírica sólida derivada de experimentación comparativa de trigo y cebada en la que se demuestre que la cebada tiene mejor comportamiento que el trigo en ambientes de muy bajos rendimientos y *vice-versa* en forma consistente (Fig. 3). En ensayos comparativos entre trigo y cebada, el rendimiento de ambos cultivos tendió a ser semejante tanto en condiciones de baja como de alta productividad (Fig. 3b). De este modo, el patrón de uso de la tierra, y en particular el monocultivo de cebada en ambientes adversos no mejoraría de modo inequívoco la productividad de esos campos (Cossani et al., 2007), tendiendo incluso a disminuir el grado de diversificación de la producción y aumentando por consiguiente la incertidumbre del sistema.

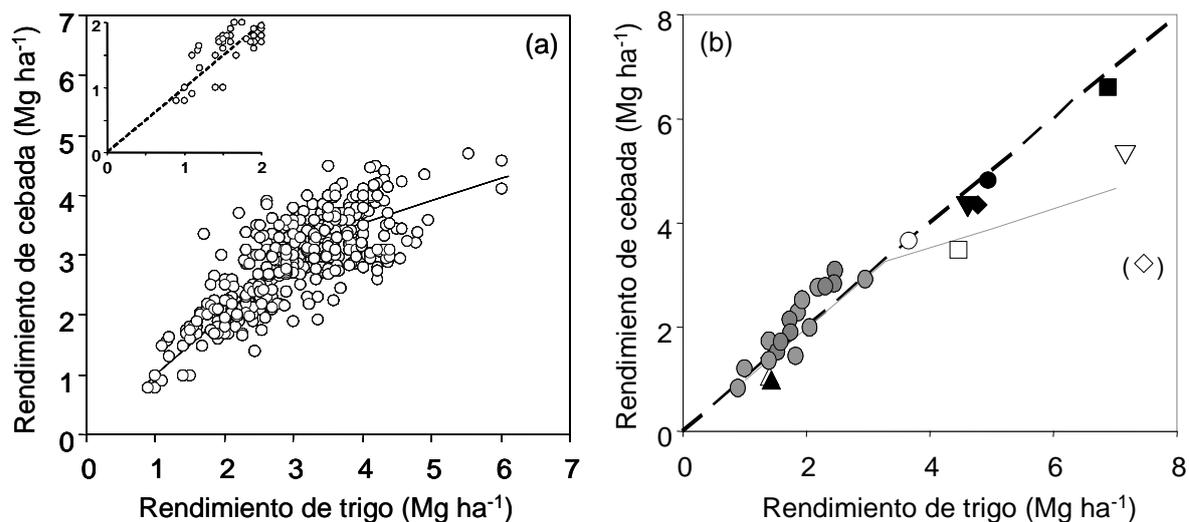


Figura 3. Relaciones entre el rendimiento de cebada y el de trigo. El panel (a) muestra los datos correspondientes a 41 comarcas de Cataluña para el periodo 1992–2004, y en el interior del panel hay un detalle de los valores correspondientes a los ambientes de menores rendimientos ($\leq 2 \text{ Mg ha}^{-1}$). El panel (b) muestra datos experimentales, aunque reproduciendo el ajuste bi-lineal de los datos comarcales, correspondientes a ensayos realizados en Cataluña en dos años consecutivos y distintas combinaciones de manejo de N y agua, junto con datos tomados de experimentos en Australia (símbolos grises; Simpson y Siddique, 1994).

Una alternativa posible para enfrentar las adversidades climáticas y que podría utilizarse tanto en trigo como en cebada, pero a la que tienen aversión muchos agricultores de la cuenca del Mediterráneo –en particular donde no hay subsidios a la producción agrícola–, es mejorar el manejo de la fertilización nitrogenada de modo tal que en los años de bajos rendimientos por estrés hídrico, la magnitud de la penalidad impuesta por el estrés se pueda disminuir por mejoras en la captura y/o en la eficiencia de uso del agua disponible. Evidencias experimentales realizadas en Australia sugieren que aun en ambientes de muy bajos rendimientos los cereales pueden responder a la fertilización mejorando los rendimientos en condiciones de estreses más o menos severos (Angus, 2001; Passioura, 2002).

En este capítulo, describiremos la variabilidad de rendimientos de trigo y cebada y discutiremos la posibilidad de obtener respuestas positivas del rendimiento a la fertilización en años de bajos rendimientos para ambos cultivos.

Estabilidad del rendimiento de trigo y cebada en una zona mediterránea

España es el mayor productor de trigo y cebada en condiciones mediterráneas de secano dentro de los países que forman parte de la Red METRICE, y no resulta sorprendente que la variabilidad interanual de rendimientos en España sea mayor que la de los otros países que forman parte de la Red (Fig. 4), sin considerar el caso de Brasil para el que no se han encontrado datos publicados. Las tendencias del rendimiento de trigo a lo largo del siglo 20 fueron similares en Argentina, Chile, México, Uruguay y España. La variabilidad de rendimientos tendió a aumentar en la última parte del siglo en concordancia con el aumento de los rendimientos. Este aumento fue más notorio en España que en los otros ambientes de producción (notar la diferencia de escala).

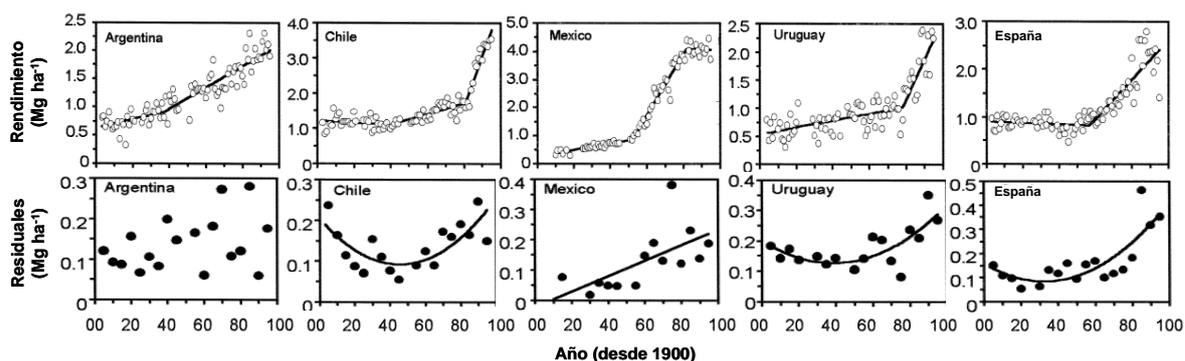


Figura 4. Tendencias a lo largo del siglo 20 en rendimiento y variabilidad del rendimiento de trigo para Argentina, Chile, México, Uruguay y España. En los paneles superiores (tendencias del rendimiento) los datos corresponden a cada año individual y las tendencias fueron establecidas a través de ajustes lineales, bilineales o tri-lineales (el de mejor ajuste). La variabilidad en rendimiento fue estimada a partir de los residuales de los ajustes del rendimiento a lo largo del tiempo, promediados para intervalos de 5 años. Tomado de Calderini y Slafer (1998).

Un análisis de los rendimientos de trigo y cebada en diferentes regiones de Cataluña muestra que la variabilidad es mayor en la provincia de Lleida (donde se concentra la actividad agrícola extensiva de Cataluña) que en las provincias del litoral (Girona, Barcelona y Tarragona, de N a S; Fig. 5), probablemente debido a la mayor continentalidad del clima. La mayor variabilidad interanual es generada por la presencia de años de muy bajos rendimientos en dicha provincia (los rendimientos mínimos logrados son menores en Lleida que en Tarragona, Girona o Barcelona), ya que los niveles de producción en los años de elevados rendimientos son relativamente similares en las 4 provincias (Fig. 5).

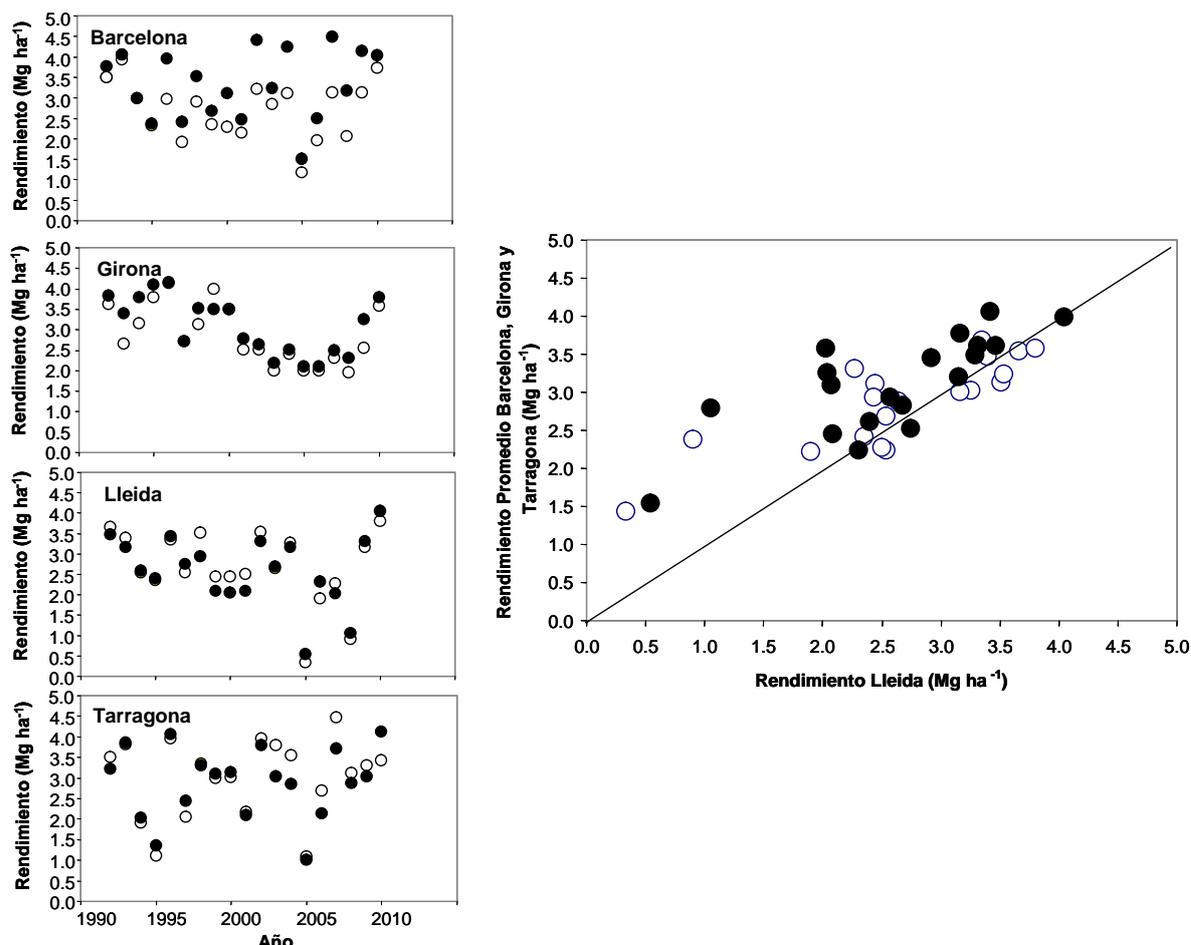


Figura 5. Rendimientos de cebada (símbolos abiertos) y trigo (símbolos cerrados) para el período 1992-2010 en cada una de las provincias de Cataluña (Girona, Barcelona, Tarragona en el litoral, y Lleida en una condición mas continental). En el panel de la derecha están los rendimientos de Lleida comparados con los promedios de las tres provincias del litoral (la línea es la relación 1:1). Datos del DAR (Departament d’Agricultura, Ramaderia, Pesca, Alimentació i Medi Natural).

A su vez, estos datos confirman que la variabilidad del rendimiento de trigo no es mayor que la de cebada (lo que sería esperable si el supuesto de mejor comportamiento de cebada que trigo en ambientes de muy bajos rendimientos se cumpliera consistentemente), tal como fue indicado en la introducción del presente capítulo (y en las referencias allí indicadas).

Dentro de la provincia de Lleida, la comarca del Urgell es una de las más características para la producción de cereales (trigo o cebada) de secano. Por esta razón, muchos de los experimentos para estudiar la productividad, y sus bases funcionales, de dichos cereales tanto en respuestas al manejo (e.g. Acreche y Slafer, 2006; Cartelle et al., 2006; Marti et al., 2007; Cossani et al., 2009) como debida a factores genéticos (e.g. Pedro et al., 2011) se han hecho en esta comarca (en general en la localidad de Agramunt). A su vez, dicha comarca presenta rendimientos medios comarcales similares a los observados en la provincia de Lleida, siendo representativa de las condiciones productivas de la misma (Fig. 6) lo que incrementa la extrapolabilidad de nuestros resultados experimentales a un rango de condiciones de la región más amplio que el explorado genuinamente.

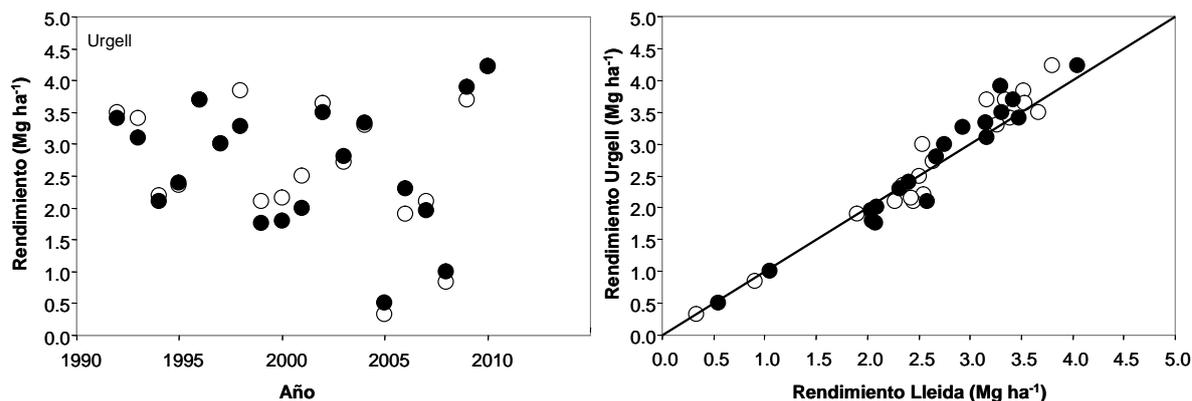


Figura 6. Rendimientos de cebada (símbolos abiertos) y trigo (símbolos cerrados) para el período 1992-2010 en la comarca de Urgell (panel izquierdo), una de las más características de la provincia de Lleida para la producción de cereales, y relación entre los rendimientos de esta comarca y los provinciales (panel derecho, la línea es la relación 1:1). Datos del DAR (Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca, Alimentació i Medi Natural).

Para estimar en casos concretos, más que en promedios comarcales/provinciales, los niveles de inestabilidad de rendimientos y para determinar si la fertilización nitrogenada podía ser una herramienta para la mitigación de las pérdidas de rendimiento que se originaban principalmente por estreses hídricos se realizaron: (a) experimentos conducidos en campos de agricultores en la comarca de Urgell, (b) análisis probabilísticos con modelos de simulación, (c) experimentación a campo por medio de una red en diferentes partes de la cuenca del Mediterráneo, y finalmente (d) una prueba piloto con agricultores en dos regiones agrícolas de Túnez.

Experimentación en campos de agricultores

Se realizaron 4 experimentos en fecha de siembra normal para la región, conducidos en campos de agricultores. Las combinaciones de disponibilidad hídrica, nitrogenada y cultivos evaluados se encuentran detalladas en la Tabla 1.

Tabla 1. Detalle de las combinaciones de especies, dosis de fertilización nitrogenada y condiciones hídricas de los experimentos realizados.

Exp.	Especies	Fecha de siembra	Primer nudo detectable (DC 3.1)	Fecha Antesis (DC 6.5)	Fecha Cosecha (DC 9.0)	Dosis de N aplicadas (kg N ha ⁻¹)	Condición hídrica	Contenido inicial agua (mm)	Contenido inicial N-NO ₃ (kg N ha ⁻¹)	Volumen de riego (mm)	Precipitaciones (Siembra - Cosecha) (mm)
I	Cebada Trigo Harinero	21-Nov-03	13 Abr 04	11 May 04 31 May 04	21 Junio 04 12 Julio 04	0-40-80-120-160 y 200	Secano	288	94	0	284 304
II	Cebada Trigo Harinero	16-Nov-04	12 Abr 05	03 May 05 10 May 05	20 Junio 05 20s 28r Junio 05	0 y 200	Secano y riego	83	34	222 222	159 160s ; 168r
III	Cebada Trigo Duro Trigo Harinero	28-Nov-05	11 Abr 06 17 Abr 06	03 May 06 09 May 06 16 May 06	06 Junio 06 13s-20r Junio 06 13s-20r Junio 06	0-50-100 y 150	Secano y riego	240	115	76 95 95	92 92s ; 95r 92s ; 95r
IV	Cebada Trigo Duro Trigo Harinero	06-Nov-06	26 Mar 07	30 Abr 07 07 May 07 15 May 07	18 Junio 07 25 Junio 07 25 Junio 07	0-75 y 150	Secano y riego	201	150	318 336 336	331 332 332

Las letras r y s, significan, riego y secano, respectivamente.

En todos los ensayos se utilizó un único cultivar de cebada (Sunrise) y de trigo harinero (Soissons) y/o duro (Claudio). Esta manifiesta debilidad de la aproximación experimental (que resultaba inevitable si se pretendían hacer varios tratamientos ambientales -agua x nitrógeno- y muchas determinaciones) fue al menos parcialmente

compensada por haberse elegido cultivares que (i) eran bien representativos de cada especie según las preferencias de los agricultores de la región (representan genuinamente la elección más frecuente en la realidad del momento en que estos experimentos se condujeron en el caso de cebada y trigo harinero; el trigo duro se mejora y experimenta en Cataluña pero no se cultiva ampliamente de modo comercial por la falta de subsidios específicos), (ii) habían mostrado consistentemente en los últimos años un comportamiento agronómico excelente en redes comparativas de rendimiento (naturalmente i y ii no son independientes), (iii) son usados frecuentemente como testigos o checks por breeders en dichas redes de rendimientos.

Los resultados de estos experimentos evidenciaron niveles de variabilidad interanual similares a los mostrados como media de los agricultores de la comarca (Fig. 7, panel izquierdo).

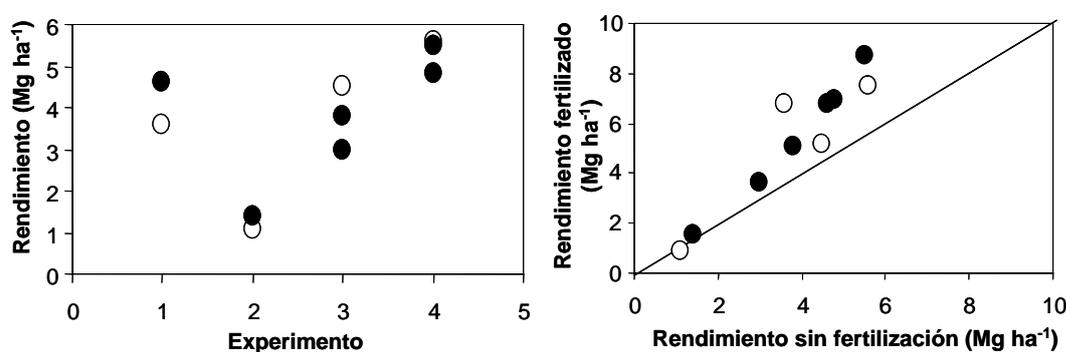


Figura 7. Rendimientos de cebada (símbolos abiertos) y trigos (símbolos cerrados) en cada uno de los 4 experimentos conducidos en campos de agricultores en la comarca de Urgell en condiciones de secano y sin fertilización (panel izquierdo); y rendimientos fertilizados relacionados con los no fertilizados en secano (para el rendimiento fertilizado se consideró la dosis donde la respuesta fue mayor) (panel derecho). Datos adaptados de Cossani et al. (2009).

Asimismo, en estos experimentos se ha evidenciado que los rendimientos de trigo y cebada fueron similares en los rangos ambientales experimentados, de acuerdo con lo que se evidenciaba en los análisis comarcales y en contraposición con el supuesto de que la cebada tendría consistentemente mayor rendimiento en ambientes de muy bajos rendimientos. Debido a las frecuentes altas temperaturas que ocurren en condiciones mediterráneas, sería esperable que el peso de los granos fuera el componente del rendimiento que hiciera variar la magnitud de respuesta del rendimiento al estrés (por ser éste característicamente terminal). Sin embargo, en un análisis detallado no hemos encontrado evidencias de que la estabilidad del peso final de los granos de cebada fuese mayor que la de trigo harinero (Cossani et al., 2011a).

En estos experimentos, también se ha corroborado que la fertilización nitrogenada puede potencialmente ser una herramienta para disminuir la pérdida de rendimientos en años de bajos rendimientos (Fig. 7, panel derecho), aunque no en el experimento donde el estrés fue extremadamente severo (datos de parcelas experimentales cosechadas a mano del orden de 1,0-1,5 Mg ha⁻¹, y datos comarcales de ese año menores a 0,5 Mg ha⁻¹), en el que el rendimiento de la condición sin fertilizar fue semejante al del cultivo fertilizado (Fig. 7, panel derecho). En todos los demás casos, efectivamente el rendimiento del cultivo fertilizado fue mayor que el no fertilizado, bajo condiciones de secano, tanto en trigo como en cebada (Fig. 7, panel derecho). Es

decir que no hubo ninguna condición en la cual la fertilización con nitrógeno haya generado un efecto negativo sobre el rendimiento, ni siquiera en aquellos ambientes de baja productividad.

Experimentación virtual a través del uso de modelos

Con la finalidad de analizar la variabilidad interanual y en qué medida la fertilización en seco podían reducir las pérdidas de rendimiento (con relación a los rendimientos potenciales) se calibró y validó el modelo de simulación CERES-Wheat para los cultivares y condiciones de la comarca de Urgell. Se utilizó una serie climática real de 17 años. Nuevamente se corroboró un rango importante de variación interanual, con rendimientos que fluctuaron entre prácticamente cero hasta algo más de 7 Mg ha^{-1} , si no había limitaciones severas de nitrógeno (Fig. 8). En forma semejante a lo observado experimentalmente a campo, pareció apreciable que cuando el estrés era extremadamente severo (rendimientos simulados menores $1,0-1,5 \text{ Mg ha}^{-1}$) la fertilización no reducía el nivel de pérdidas generado por el estrés hídrico; pero en niveles de rendimientos algo mayores, aunque aun bajo fuerte estrés hídrico, la respuesta a la fertilización parecía evidente (Fig. 8).

Así, resultaba claro que si la disponibilidad de nitrógeno en el suelo era reducida (e.g. 50 kg N ha^{-1}) los rendimientos alcanzables eran en promedio mucho menores ($1,8 \text{ Mg ha}^{-1}$) que en condiciones en las que el nitrógeno no representaba limitaciones al crecimiento del cultivo ($2,8 \text{ Mg ha}^{-1}$; Fig. 8). De forma tal que aumentos en la disponibilidad de nitrógeno de 50 a 100 kg N ha^{-1} incrementaron significativamente la productividad total para el conjunto de años analizados (Fig. 8).

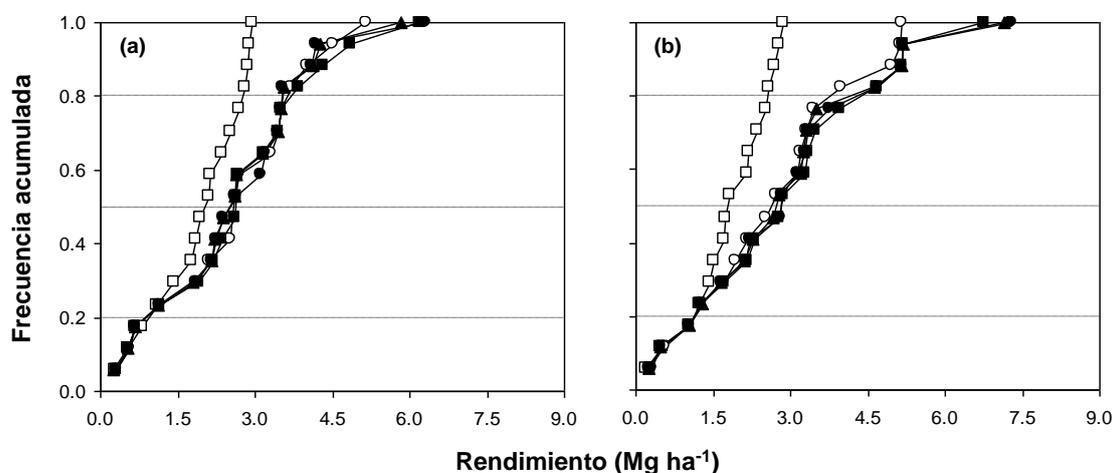


Figura 8. Frecuencia acumulada de rendimientos obtenibles de trigo en los cultivares Anza (panel izquierdo) y Soissons (panel derecho) simulados con CERES-Wheat en la comarca de Urgell en condiciones de seco y con niveles variables de disponibilidad de nitrógeno (desde solo 50 kg N ha^{-1} , cuadrados abiertos; 100 kg N ha^{-1} círculos abiertos; hasta niveles de $200-250 \text{ kg N ha}^{-1}$, símbolos cerrados). Tomado de Abeledo et al. (2008).

Del análisis completo con el conjunto de dosis consideradas, resultó que en el promedio de los años la diferencia entre el rendimiento potencial y el rendimiento alcanzable se minimizaba cuando el cultivo tenía disponible al menos c. 100 kg N ha^{-1} (Fig. 9); en los años con estrés menos severo (y por ende menor diferencia entre rendimientos real y potencial) la disponibilidad que minimizaba la diferencia era algo mayor ($150-200 \text{ kg N ha}^{-1}$, dependiendo del cultivar) y en los años de estrés muy

severo, la diferencia de rendimientos era máxima y 50 kg N ha⁻¹ fueron suficientes para tan pobre crecimiento del cultivo. Adicionalmente, se observa que independientemente de la situación ambiental (*i.e.* años promedio, los tres años con la menor o mayor diferencia entre el rendimiento potencial y el rendimiento alcanzable), incrementos en la disponibilidad de nitrógeno tendieron a reducir la variabilidad del rendimiento dentro de cada condición ambiental de años malos, medios o buenos (*i.e.* cuanto mayor la disponibilidad de nitrógeno, menor tendió a ser el error estándar absoluto de cada punto).

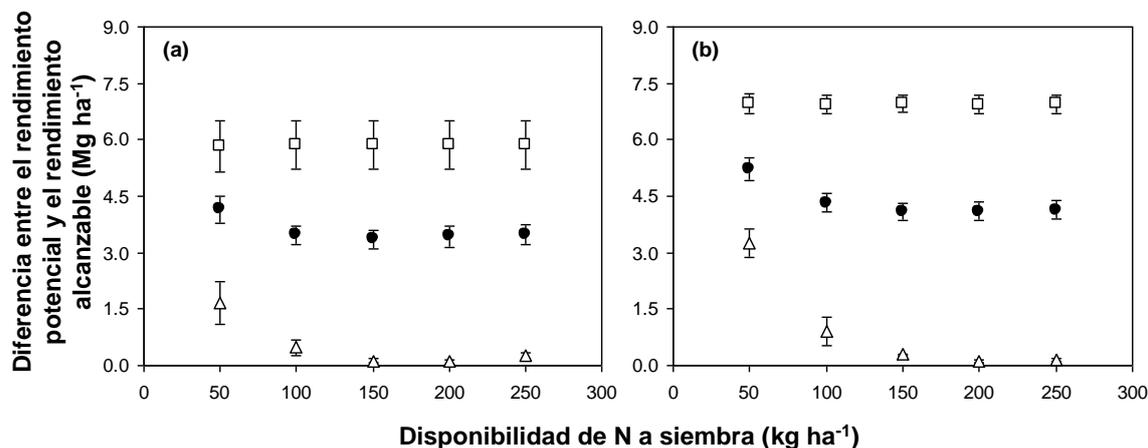


Figura 9. Relación entre la diferencia de rendimientos potencial y obtenible de trigo en los cultivares Anza (panel izquierdo) y Soissons (panel derecho) y la disponibilidad de nitrógeno, para el promedio de los años simulados (círculos cerrados) y para los tres años con mayor (cuadrados abiertos) y menor (triángulos abiertos) diferencia de rendimientos. Tomado de Abeledo et al. (2008).

Experimentación en red alrededor de la cuenca del Mediterráneo

Para estimar en qué medida otras regiones de la cuenca del Mediterráneo mostraban similitudes o diferencias con los resultados mostrados para la comarca del Urgell en Cataluña, hemos tomado datos de una red de 16 experimentos con trigo y cebada en condiciones de secano realizados en diferentes áreas de la cuenca del Mediterráneo (Marruecos, Jordania, Italia y España).

Se han obtenido respuestas consistentes a la fertilización aún en ambientes de muy bajos rendimientos (Fig. 10), e incluso numerosos casos de cultivos expuestos a un estrés extremo (rendimientos menores a 1,5 Mg ha⁻¹) también respondieron positivamente a la dosis "ideal" de nitrógeno (Fig. 10). En los ambientes de baja productividad (menores a 1,5 Mg ha⁻¹) el rendimiento del cultivo fertilizado fue igual o superior al del cultivo sin fertilizar (sin que en ninguna condición por efecto de la fertilización se haya producido una merma en el rendimiento final alcanzado). En promedio, el rendimiento se incrementó más de un 25% en respuesta a la fertilización y la respuesta fue muy similar en ambos cereales (Fig. 10). Naturalmente hubo una tendencia a aumentar la magnitud de la respuesta a la fertilización cuando el rango de rendimientos del no-fertilizado aumentaba (*i.e.* tenía menor restricción hídrica).

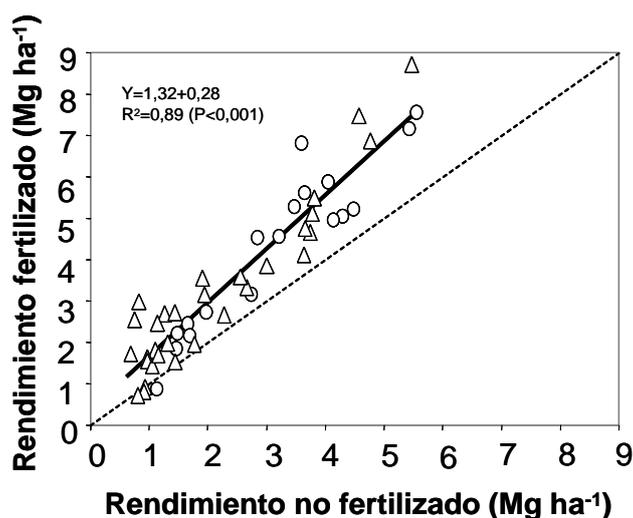


Figura 10. Relación entre rendimientos fertilizados y no fertilizados en secano (para el rendimiento fertilizado se tomó la dosis donde la respuesta fue mayor) en trigo (triángulos) y cebada (círculos). La línea punteada indica la relación 1:1. Tomado de Savin et al. (en revisión).

Prueba piloto en campos de agricultores en Túnez

Finalmente, con la intención de alcanzar los máximos niveles de extrapolabilidad de los resultados experimentales, hicimos una experiencia piloto en 20 campos de agricultores de dos regiones diferentes de Túnez (una de rendimientos relativamente bajos y la otra de rendimientos más moderados).

Los rendimientos en los cultivos sin fertilización nitrogenada fueron muy bajos (1,0 a 2,5 Mg ha⁻¹) o bajos (2,0-3,5 Mg ha⁻¹; Fig. 11a). A pesar de ello, en la mayoría de los casos las respuestas a la fertilización fueron positivas (Fig. 11a), observándose aumentos en rendimiento en grano y en cantidades de paja producida. Particularmente el efecto positivo del nitrógeno fue más evidente cuando se considera la respuesta conjunta de los granos y de la paja (que en la región Mediterránea, tanto europea como del N de África y del O de Asia, tiene valor de mercado). Esto último se puede observar en la Figura 11b donde se compara el rendimiento total (Rendimiento Total = Rendimiento en grano + Rendimiento de la paja x Precio de la paja/Precio del grano) en condiciones fertilizadas *versus* el rendimiento total sin fertilizar.

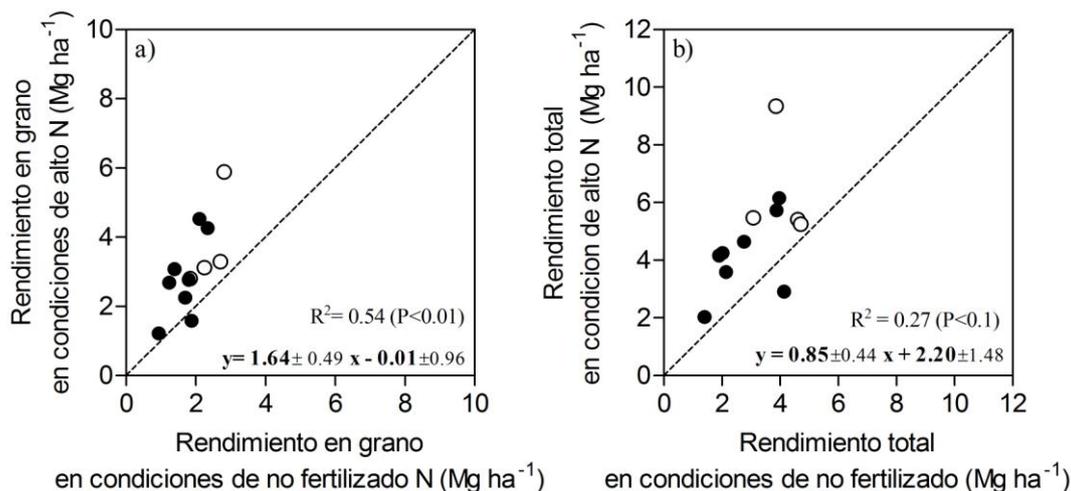


Figura 11. Relación entre rendimientos (a) y biomasa total a madurez (b) de trigo fertilizados y no fertilizados en seco en campos de agricultores de dos zonas de Túnez (símbolos cerrados y abiertos). La línea punteada indica la relación 1:1. Tomado de Cossani et al. (2011b).

Observaciones finales

El rendimiento alcanzable de trigo y cebada en promedio de los 19 años analizados en el NE de España fue $2,9 \pm 0,8 \text{ Mg ha}^{-1}$. Esto coincide con los datos obtenidos en ensayos experimentales y de simulaciones. Por otro lado, la estabilidad de los rendimientos es muy baja, principalmente debido a la variabilidad en las precipitaciones. En general las variaciones son similares en trigo y en cebada, indicando que no hay diferencias entre dichas especies.

En condiciones de seco, es probable esperar un resultado positivo en respuesta a la fertilización con nitrógeno (y bajo ninguna condición se observó una respuesta negativa de la fertilización nitrogenada sobre el rendimiento final alcanzado de forma tal que para la sumatoria de años considerados la ganancia total de rendimiento fue sensiblemente superior en los cultivos fertilizados que en los no fertilizados). Probablemente esta respuesta positiva del rendimiento a aumentos en la disponibilidad de nitrógeno se deba a que los cultivos fertilizados son capaces de explorar el perfil a mayor profundidad y extraer más agua, o a que son capaces de utilizar el agua transpirada de manera más eficiente. Sin tener en cuenta la naturaleza de la respuesta, el resultado final es que el trigo y la cebada fertilizada producen mayor cantidad de granos consistentemente aún en las condiciones de rendimiento bajo, y estos granos adicionales pueden llenarse normalmente, ya que no presentan una competencia fuerte en comparación con los tratamientos sin fertilizar.

Es importante también destacar que en todos los casos analizados (experimentos a campo, en redes, simulaciones, y pruebas con agricultores) la disponibilidad de nitrógeno fue aumentada principalmente mediante fertilizaciones durante las etapas de ahijamiento o comienzo de encañado de los cultivos (Cossani et al. 2007; 2009; 2011; Abeledo et al. 2008). De esta manera, el nitrógeno queda disponible para los cultivos en las etapas de mayor demanda, favoreciendo la producción de biomasa bajo condiciones de bajas temperaturas y permitiendo obtener altas tasas de crecimiento. Dichas condiciones favorecen la generación y supervivencia de estructuras reproductivas (flores) que determinaran el rendimiento (Ferrante et al. 2010). Asimismo, es sabido que el efecto de la fertilización nitrogenada sobre el rendimiento, se debe en parte a que la mayor disponibilidad de nitrógeno permite aumentar la

captura del agua precipitada durante el ciclo de crecimiento del cultivo y la eficiencia en el uso del agua tanto en trigo como en cebada (French y Schultz, 1984a; b; Passioura et al. 2002; Albrizio et al. 2010, Cossani et al. 2011b).

Referencias

- Abeledo, L.G., Savin, R., Slafer, G.A., 2008. Wheat productivity in the Mediterranean Ebro Valley: analyzing the gap between attainable and potential yield with a simulation model. *Eur. J. Agron.* 28, 541-550.
- Acevedo, H.E., Silva, P.C., Silva, H.R., Solar, B.R., 1999. Wheat production under Mediterranean environments. En *Wheat: Ecology and Physiology of Yield Determination*, 503 (Eds E. H. Satorre and G. A. Slafer). New York: Haworth Press, Inc.
- Acreche, M.M., Slafer, G.A., 2006. Grain weight response to increases in number of grains in wheat in a Mediterranean area. *Field Crops Res.* 98, 52-59.
- Albrizio, R., Todorovic, M., Maticb, T., Stellacci, A.M., 2010. Comparing the interactive effects of water and nitrogen on durum wheat and barley grown in a Mediterranean environment. *Field Crops Res.* 115, 179-190.
- Anderson, W.K., Impiglia, A., 2002. *Management of dryland wheat*, in *Wheat: Improvement and Production. Plant Production and Protection Series B.C.* Curtis, S. Rajaram; H. Gómez-Macpherson, Editors. FAO: Rome. p. 567.
- Angus, J. F., 2001. Nitrogen supply and demand in Australian agriculture *Australian J. Exp. Agric.* 41, 277-288.
- Calderini, D.F., Slafer, G.A.; 1998. Changes in yield and yield stability in wheat during the 20th century. *Fields Crops Res.* 57, 335-347.
- Cartelle, J., Pedró, A., Savin, R., Slafer, G.A., 2006. Grain weight responses to post-anthesis spikelet trimming in an old and a modern wheat under Mediterranean conditions. *Europ. J. Agron.* 25, 365-371.
- Cossani, C.M., 2010. Grain yield and resource use efficiency of bread wheat, barley and durum wheat under Mediterranean environments. Tesis doctoral. Universidad de Lleida.
- Cossani, C.M., Savin, R., Slafer, G.A., 2007. Contrasting performance of barley and wheat in a wide range of conditions in Mediterranean Catalonia (Spain). *Ann. App. Biol.* 151, 167-173.
- Cossani, C.M., Slafer, G.A., Savin, R., 2009. Yield and biomass in wheat and barley under a range of conditions in a Mediterranean site. *Field Crops Res.* 112, 205-213.
- Cossani, C.M., Slafer, G.A., Savin, R., 2011a. Do barley and wheat (bread and durum) differ in grain weight stability through seasons and water-nitrogen treatments in a Mediterranean location? *Field Crops Res.* 121, 240-247.
- Cossani, C.M., Thabet, C., Mellouli, H.J., Slafer, G.A., 2011b. Improving wheat yields through N fertilization in Mediterranean Tunisia. *Exp. Agric.* 47, 459-475.
- Ferrante, A., Savin, R., Slafer, G.A., 2010. Floret development of durum wheat in response to nitrogen availability. *J. Exp. Bot.* 61, 4351-4359.
- French R.J., Schultz J.E., 1984a. Water use efficiency of wheat in a Mediterranean-type environment. I. The relation between yield, water use and climate. *Austr. J. Agr. Res.* 35, 743-764.
- French R.J., Schultz J.E., 1984b. Water use efficiency of wheat in a Mediterranean-type environment. II. Some limitations to efficiency. *Austr. J. Agr. Res.* 35, 765-775
- López-Bellido, L., 1992. Mediterranean cropping systems in Ecosystems of the World, C.J. Pearson., Editor. Elsevier: Netherlands. p. 311-356.

- Loss, S.P., Siddique, K.H.M., 1994. Morphological and physiological traits associated with wheat yield increases in Mediterranean environments. *Adv. Agron.* 52, 229-275.
- Marti, J., Bort, J., Slafer, G.A., Araus, J.L., 2007. Can wheat yield be assessed by early measurements of Normalized Difference Vegetation Index? *Ann. App. Biol.* 150, 253-257.
- Passioura, J. B., 2002. Environmental biology and crop improvement. *Funct. Plant Biol.* 29, 537-546.
- Pedro, A., Savin, R., Habash, D.Z., Slafer, G.A., 2011. Physiological attributes associated with yield and stability in selected lines of a durum wheat population. *Euphytica* 180, 195-208.
- Ryan, J., Singh, M., Pala, M., 2008. Long-term cereal-based rotation trials in the mediterranean region: implications for cropping sustainability. *Adv. Agron.* 97, 273-319.
- Simpson P.G., Siddique, K.H.M., 1994. Soil type influences relative yield of barley and wheat in a Mediterranean-type environment. *J. Agron. Crop Sci.* 172, 147-160.

MANEJO AGRONÓMICO DE TRIGO CANDEAL EN ZONA MEDITERRÁNEA DE CHILE CENTRAL

Paola Silva y Edmundo Acevedo. Laboratorio de Relación Suelo-Agua-Planta, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. Santa Rosa 11315, Santiago, Chile. psilva@uchile.cl.

Resumen

La producción de trigo candeal en Chile se concentra en zonas de riego con alto rendimiento (5.200 kg ha⁻¹ promedio) y bajo contenido proteico en grano (10,4% promedio), a pesar del alto nivel de fertilización nitrogenada usado (210-250 kg N ha⁻¹) por lo que se debe mejorar la eficiencia del uso del nitrógeno (EUN). En cultivos de secano, el problema central es mejorar la eficiencia del uso del agua (EUA). Se realizaron experimentos de fertilización nitrogenada bajo condiciones de riego y rotaciones con leguminosas en secano en Antumapu (33°40' LS, 70°38' LO) para determinar la EUN y poner a punto metodologías de ayuda para la toma de decisiones sobre el manejo de N, en particular el uso de SPAD. También se realizaron experimentos de fecha de siembra en condiciones de secano, en Cauquenes (35°55' LS, 72°19' LO) y Yungay (37°07' LS, 72°00' LO) durante 3 años para mejorar la EUA. Dos variedades (Llaretta y Corcolén INIA) dominan las siembras de trigo candeal en Chile, las que con manejo agronómico adecuado lograron alto rendimiento y alta proteína. El mayor rendimiento se logró en riego con parcialización de N entre siembra y primer nudo con un promedio de 8.411 kg ha⁻¹ y 11,3 % de proteína. La EUN fluctuó entre 50,2 y 20,5 Kg grano Kg N⁻¹. Se validó el uso del SPAD como una herramienta para la toma de decisiones de una segunda dosis de nitrógeno en primer nudo para aumentar rendimiento ($R^2=0,92$ $p \leq 0,001$) y de una tercera dosis en embuche para aumentar el contenido de proteína ($R^2=0,83$ $p \leq 0,001$). En secano las rotaciones de cultivo se evidenciaron como una forma para aumentar el contenido de proteína en el grano, no así el rendimiento. En el secano de Antumapu y Cauquenes desde fines de mayo se evidencia 4 a 7% de pérdida de rendimiento por cada semana de retraso en la siembra. En Yungay a partir de septiembre la pérdida en rendimiento fue de 14% por semana de retraso.

Introducción

El trigo duro o candeal (*Triticum turgidum sp durum*) se destina principalmente a la producción de pastas, couscous y burghul. Aproximadamente el 10% de la producción de trigo en el mundo corresponde a trigo duro. Mas del 60% de la producción mundial de trigo duro se localiza en zonas de clima mediterráneo (Morancho, 2000).

El clima mediterráneo se caracteriza por tener lluvias concentradas en invierno con primaveras y veranos secos, por lo que en estos medioambientes el cultivo en secano está sometido a sequía terminal (Acevedo et al., 1999). En este clima el régimen de lluvia es uno de los factores limitantes básicos para la producción de cultivos, ya que cerca del 70% de la lluvia anual se concentra durante los meses de invierno, con solo 15% en primavera y alrededor de 2% en verano. Aunque en estos medioambientes los rendimientos son bajos se logra un grano de alta calidad (Acevedo y Silva, 2007). Chile es el único país de América del Sur que tiene clima mediterráneo y por lo tanto puede producir trigo candeal de alta calidad. El área con clima mediterráneo se ubica entre los paralelos 30° y 38° de latitud Sur, correspondiendo a la zona de Chile Central.

La producción de trigo candeal en Chile se ha concentrado en esta zona. Sin embargo, el mayor porcentaje del cultivo se ha hecho bajo condiciones de riego obteniendo alto rendimiento (5.200 kg ha^{-1} promedio) y bajo contenido proteico en grano (10,4% promedio), a pesar del alto nivel de fertilización nitrogenada usado ($210\text{-}250 \text{ kg N ha}^{-1}$). Zonas como California utilizan dosis de fertilización nitrogenada similar a las chilenas, sin embargo logran 12,5% de proteína en grano con 7.000 Kg ha^{-1} de rendimiento (Fundación Chile, 2008). Por tal motivo, el aumento de la eficiencia del uso del nitrógeno (EUN) cobra gran importancia. Este aumento en EUN se puede lograr a través de dosis, parcializaciones y calibración de manejos sitio específico que permitan una mejor gestión del N. En este último caso destacan herramientas como el SPAD clorofilometro y las tablas de color de hoja (LCC). Ambas herramientas tiene entre sus principales ventajas la facilidad y rapidez de utilización, sin causar daño en las hojas (Singh *et al.*, 2002; Arregui *et al.*, 2006).

En zonas de secano de clima mediterráneo el aumento de productividad y rentabilidad de la agricultura depende de una mayor eficiencia en el uso de la precipitación (Peterson *et al.*, 1996), por lo que es característico que bajo condiciones mediterráneas la variabilidad de las precipitaciones, dentro de la estación de crecimiento, contribuya a diferencia en los rendimientos (Cantero-Martínez *et al.*, 2007). Destaca la importancia en el rendimiento de una adecuada disponibilidad de agua en el período reproductivo, particularmente desde el comienzo del crecimiento de la espiga a 10 días después de antesis, para lograr altos rendimientos de grano (Acevedo *et al.*, 2002). Un déficit de agua post antesis resulta en senescencia temprana, mayor movilidad de asimilados almacenados preantesis para grano y posiblemente granos “chupados” en cereales (Zhang *et al.*, 2008).

En Chile existe un escaso desarrollo de la agronomía para condiciones de secano y considerando que se usa baja cantidad de insumos, la eficiencia en su uso por los cultivos tiene mayor importancia. En este sentido el uso de rotaciones de cultivos puede disminuir la necesidad de fertilizante nitrogenado, como también mejorar aspectos sanitarios (López-Bellido *et al.*, 1998; López-Bellido *et al.*, 2003; Kirkegaard *et al.*, 2008). La eficiencia en el uso del agua (EUA) es clave para mantener la producción agrícola en secanos de clima Mediterráneo (Cantero-Martínez *et al.*, 2007), por lo tanto manejos que disminuyan la evaporación directa de agua del suelo y en consecuencia aumenten la disponibilidad de agua para ser transpirada por el cultivo son de interés, como fecha de siembra temprana (Oweis *et al.*, 2000; Bassu *et al.*, 2009) y cambio en el arreglo espacial de las plantas (Soltani y Galeshi, 2002; Kruk y Satorre, 2003). Este trabajo muestra resultados experimentales en trigo candeal que aumentan EUN y EUA en Chile central.

Fertilización nitrogenada, EUN y SPAD en condición de riego

El rendimiento y la calidad de trigo candeal no solo están determinados por el genotipo, sino que dependen fuertemente del medio ambiente y del manejo agronómico (Autran *et al.*, 1993, Nachit *et al.*, 1993, Kling *et al.*, 2000, Souza *et al.*, 2004; Amri *et al.*, 2000; Miyay y Anderson, 2003).

La fertilización nitrogenada puede aumentar el rendimiento, el porcentaje de proteína o ambos. El porcentaje de proteína responde diferencialmente ante la aplicación de fertilizante nitrogenado (Figura 1). Ante un bajo nivel de nitrógeno en el suelo, la fertilización hasta la fase de primer nudo aumenta el rendimiento y la proteína total en el grano, pero la respuesta en aumento de almidón es usualmente mayor, por lo que el resultado es aumento del rendimiento y el porcentaje de proteína en el grano disminuye. Posteriormente hay una fase en que la aplicación de nitrógeno tiene un

efecto reducido en el rendimiento, aumentando el impacto sobre la proteína acumulada. El efecto neto del N en esta segunda fase es un pequeño aumento en rendimiento, comparado con un gran efecto sobre el porcentaje de proteína del grano. Cuando se aplica una alta dosis de N, la fertilización adicional no afecta el rendimiento sino que sube el contenido de proteína hasta llegar a un “plató”.

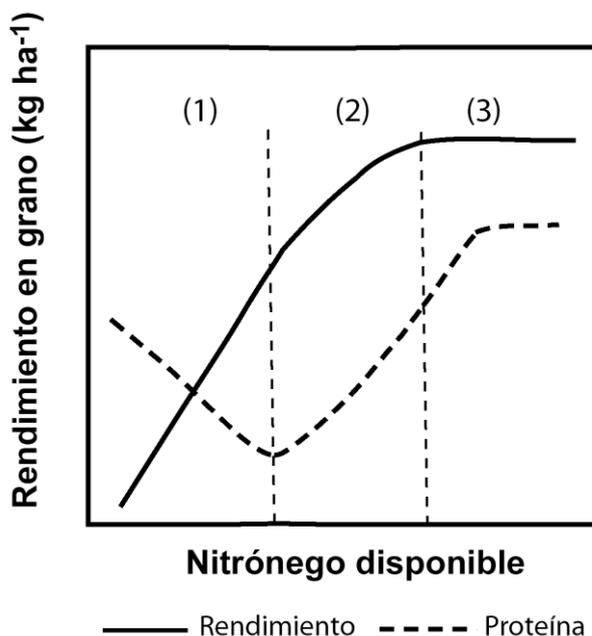


Figura 1. Diagrama de la respuesta de rendimiento y el porcentaje de proteína según nitrógeno disponible (Stone y Savin, 1999). La línea sólida señala la respuesta en rendimiento y la línea punteada la respuesta en porcentaje de proteína.

El nitrógeno aplicado en dos o tres parcializaciones permite disminuir la lixiviación y disminuye la contaminación del agua. Además, permite a la planta tener nitrógeno disponible durante más tiempo. La mayor respuesta del rendimiento a la fertilización nitrogenada en trigo ocurre cuando ésta se aplica justo previo al inicio de la elongación de tallo (Zadoks 30). Aplicaciones posteriores a Zadoks 32 reducen la respuesta en rendimiento, de tal forma que aplicaciones en Zadoks 70 no provocan cambios en el rendimiento, pero aumentan el contenido de proteína en el grano (Mossedaq and Smith, 1994; Ortiz-Monasterio, 2002). En la práctica, los agricultores pueden aumentar el contenido de proteína del grano aplicando nitrógeno al trigo hasta el momento en que la cariósida esté en estado lechoso (Gooding y Davies, 1992).

En Chile dominan dos variedades de trigo candeal, Llaretta INIA y Corcolén INIA, estudios en manejo agronómico, basados en dosis y parcializaciones de nitrógeno a la siembra, primer nudo (Zadoks 31) y embuche (Zadoks 49), han demostrado que se puede lograr en estas variedades alto rendimiento y alta proteína (Figura 2).

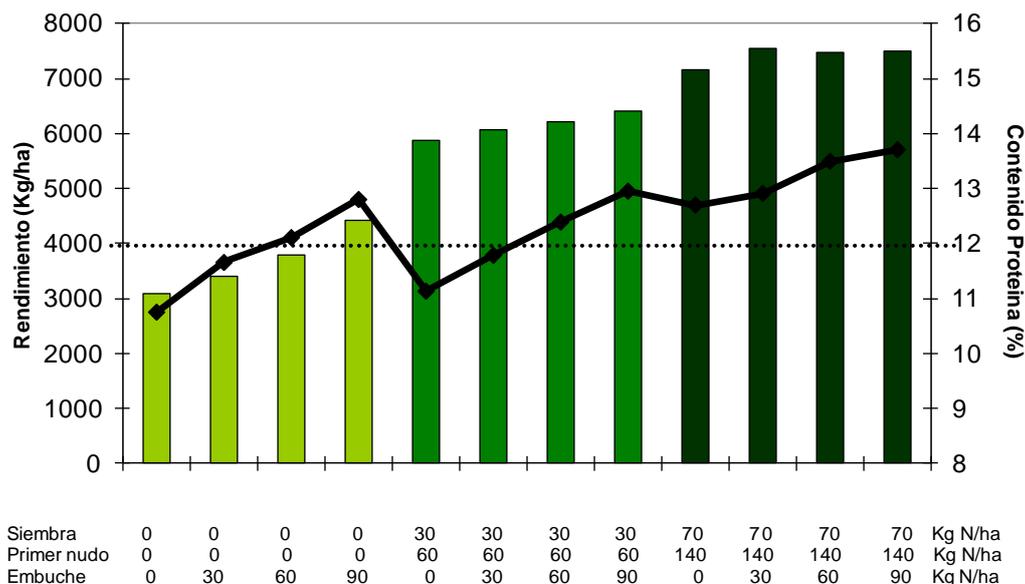


Figura 2. Alto rendimiento y alto contenido de proteína en variedades chilenas de trigo candeal. Efecto de la aplicación de nitrógeno en siembra, primer nudo y embuche sobre el rendimiento y contenido de proteína de trigo candeal. Las barras indican el rendimiento y la línea sólida el contenido de proteína.

Otro experimento de dosis y parcialización de nitrógeno hecho con las variedades de trigo candeal Llaretta INIA y Corcolén INIA en la zona central mostraron aumento de la biomasa y rendimiento con la dosis de nitrógeno y no se observó diferencias entre las distintas parcializaciones (Cuadro 1) alcanzando un máximo rendimiento de 8.411 kg ha⁻¹ con 180 Kg N ha⁻¹ parcializado un tercio a la siembra y dos tercios a primer nudo (Zadoks 31). Entre los tratamientos en que la dosis de 180 kg de nitrógeno se parcializó al momento de la siembra y primer nudo, el contenido de proteína del grano aumento con la aplicación más alta de N a primer nudo, alcanzando un máximo de 11,8 % de proteína cuando los 180 Kg de nitrógeno fueron aplicados a primer nudo (Zadocks 31). El tratamiento con aplicación de N en embuche (Zadoks 49) tuvo el contenido de proteína más alto (12,6%). El mayor IC ocurrió cuando no se aplicó nitrógeno o cuando la aplicación fue nula a la siembra.

Cuadro 1. Medias de ambas variedades por tratamiento para biomasa, rendimiento y proteína. Temporada 2010- 2011. Los diferentes números en la columna tratamiento indican, primero, dosis de nitrógeno a la siembra; segundo, dosis de nitrógeno a primer nudo y tercero, dosis de nitrógeno a embuche.

Tratamiento	Biomasa (kg ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	IC	Proteína (%)
0-0-0	9.538 c	3.493 c	0,37 a	10,1 d
60-0-0	20.241 b	6.505 b	0,32 c	10,1 d
120-0-0	23.839 ab	7.861 ab	0,33 bc	10,4 d
180-0-0	24.163 ab	8.091 a	0,34 abc	11,2 bc
120-60-0	24.314 ab	8.394 a	0,35 abc	11,1 c
60-120-0	23.330 ab	8.411 a	0,36 ab	11,3 bc
0-180-0	21.866 ab	7.982 a	0,37 a	11,8 b
80-120-40	24.990 a	8.407 a	0,34 abc	12,6 a

Letras diferentes muestran diferencias significativas (p<0,05).

La eficiencia en el uso de nitrógeno (EUN) o producción de grano por unidad de nitrógeno aplicado (Novoa y Loomis, 1981) puede ser dividida en eficiencia de absorción (EA) y eficiencia fisiológica (EF), donde la primera se define como la habilidad de la planta en extraer nitrógeno desde el suelo y la segunda como la habilidad con que el nitrógeno absorbido es utilizado en producir grano respectivamente (Moll *et al.*, 1982).

El valor más alto de EUN (50,2%) se logró en el tratamiento de 60 Kg N ha⁻¹ aplicado a la siembra. Los datos muestran la tendencia de disminución de EUN a medida que aumenta la dosis de nitrógeno. No hubo diferencias significativas entre los tratamientos en que se parcializó el nitrógeno, sin embargo, la parcialización generó una tendencia a mayor EUN. El tratamiento en que se aplicó 40 Kg N ha⁻¹ al estado de embuche fue el que tuvo mayor porcentaje de proteína en el grano, pero fue el de menor EUN (Cuadro 2). Esto se debe a que la EUN no considera la concentración de proteína en el grano siendo un concepto relacionado con la producción de grano independientemente de su contenido de proteína.

La eficiencia de absorción de nitrógeno no tuvo diferencias entre tratamientos ($p \leq 0,05$), sin embargo, se puede observar de que a medida que aumento la dosis de nitrógeno aplicado a la siembra la eficiencia de absorción disminuyó, de 93,1% a 66,1%, lo que concuerda con lo observado por diferentes autores (Yu *et al.*, 2007; Alcoz *et al.*, 1993). La eficiencia de absorción de N depende principalmente del desarrollo radical (profundidad y densidad de raíces), el que regula la cantidad total de nitrógeno absorbido (Rathke *et al.*, 2006), como también de factores externos asociados a pérdidas por volatilización, desnitrificación, lixiviación y escurrimiento superficial.

La alta eficiencia fisiológica puede resultar de una efectiva translocación de nitrógeno desde el tallo y hojas senescentes al grano (Aufhammer *et al.*, 1994, citado por Rathke *et al.*, 2006; Ladha *et al.*, 2005). En este experimento la eficiencia fisiológica disminuyó con el aumento de la dosis de nitrógeno, lo que muestra una reducción de la traslocación de nitrógeno desde la parte vegetativa del cultivo a grano.

Cuadro 2. Medias de ambas variedades por tratamiento para eficiencia de absorción, eficiencia fisiológica, EUN e ICN. Temporada 2010- 2011. Los diferentes números en la columna tratamiento indican: primero, dosis de nitrógeno a la siembra; segundo, dosis de nitrógeno a primer nudo y tercero, dosis de nitrógeno a embuche.

Tratamiento	Eficiencia de absorción (%)	Eficiencia fisiológica (Kg Kg ⁻¹)	EUN (Kg grano Kg ⁻¹ N)	ICN (%)
0 - 0 - 0	-	-	-	92 a
60 - 0 - 0	93,1 a	63,3 a	50,2 a	96 a
120 - 0 - 0	77,0 a	48,8 ab	36,4 ab	90 a
180 - 0 - 0	66,1 a	39,3 abc	25,5 bc	85 a
120 - 60 - 0	81,6 a	32,5 bc	27,2 bc	78 a
60 - 120 - 0	64,1 a	45,5 abc	27,3 bc	92 a
0 - 180 - 0	69,2 a	42,9 abc	24,9 bc	89 a
80 - 120 - 40	70,3 a	30,5 c	20,5 c	80 a

Letras diferentes muestran diferencias significativas ($p \leq 0,05$).

El índice de cosecha de nitrógeno (ICN), se define como la proporción de nitrógeno total de la planta que esta presente en el grano (Rattunde y Frey, 1986). Aunque el ICN tiene un componente genético importante, también prácticas de manejo de suelo y del cultivo pueden influir en su valor (Fageria y Baligar, 2005). En este experimento el ICN no tuvo diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre tratamientos, por lo que ni la dosis de nitrógeno, como tampoco la parcialización tuvieron efecto sobre el ICN. Sin embargo, este tuvo una amplia fluctuación que varió entre 78% y 96%.

Estos datos ratifican que las variedades Llaretta y Corcolén INIA con manejo del nitrógeno adecuado pueden lograr alto rendimiento y alta proteína, pero con un bajo EUN. Sin embargo, la EUN puede ser mejorada a través de herramientas que permitan una mejor gestión del N. El uso de clorofilometro SPAD es una herramienta de fácil uso, con lecturas no destructivas cuya medición puede ser usada como un indicador del estado de N del cultivo.

Información de rendimiento, contenido de proteína, lecturas SPAD en embuche y primer nudo en distintos experimentos con las variedades nacionales de trigo candeal mostró una relación estadísticamente significativa entre rendimiento y lecturas SPAD obtenidas en primer nudo ($R^2=0,92$ $p \leq 0,001$) y entre SPAD medido a espigadura y contenido de proteína ($R^2=0,83$ $p \leq 0,001$) (Figura 3). El uso del SPAD en las variedades estudiadas puede ser una herramienta para la toma de decisiones de una segunda dosis de nitrógeno en primer nudo para aumentar rendimiento y de una tercera dosis de nitrógeno en embuche para aumentar el contenido de proteína. En trigo harinero se han encontrado asociaciones similares en rendimiento (Singh *et al.*, 2002) y proteína (Hoel, 1998; Arregui *et al.*, 2006). El siguiente paso es validar la mejora del EUN usando lecturas SPAD bajo distintas condiciones de nitrógeno.

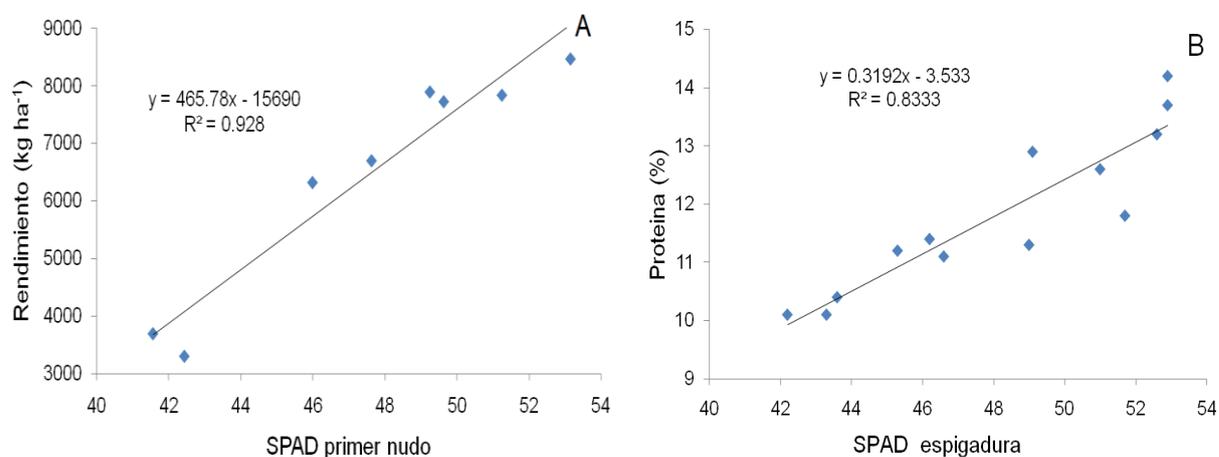


Figura 3. Regresión entre valores SPAD medidos en primer nudo y rendimiento (A) y valores SPAD medidos en espigadura y porcentaje de proteína en grano (B).

Rotación de cultivos en secano

La rotación de cultivos ha evolucionado como una estrategia para obtener buen rendimiento en ambientes estresados debido a una mayor eficiencia del uso del agua, a la fijación de nitrógeno cuando se incluyen leguminosas en la rotación, y a que se rompen los ciclos de enfermedades, plagas y malezas (Ryan *et al.*, 2008).

Numerosos estudios hablan del beneficio de las leguminosas en la rotación. Kirkegaard *et al.* (2008) señalan que el rendimiento de trigo después de cultivos como arveja, lupino, habas, garbanzo, entre otros, puede lograr aumentos en rendimiento, del orden de 30 a 50 % comparado con un monocultivo de trigo. Un trabajo de larga duración basado en la información climática de 53 años realizado en una rotación haba-trigo hecho en el sur de Italia, mostró que el haba tiene efecto positivo en la fijación de nitrógeno y en el rendimiento de grano de trigo. El aumento de rendimiento del trigo seguido del cultivo de haba fue de un 12% comparado con un monocultivo de trigo candeal. Además el estudio confirmó que al introducir haba en rotación con trigo candeal se redujo la necesidad de aplicación de nitrógeno (Garofalo *et al.*, 2009). Si bien el cultivo de leguminosas ha demostrado que aumenta el rendimiento de cereales en ambientes semiáridos, se ha dado poco énfasis a la calidad de los cereales en los ensayos de rotación (Ryan *et al.*, 2008). Las rotaciones donde se incluyen leguminosas son más eficientes fundamentalmente en la fijación de nitrógeno en el suelo, particularmente la rotación trigo sobre haba, y muestran su efecto positivo tanto en el rendimiento como en el contenido de proteína del grano de trigo (López- Bellido *et al.*, 1998). Carr *et al.* (2008) en un ensayo establecido en secano de clima templado, no encontraron diferencias para el contenido de proteína entre la rotación que incluía arveja y el mono cultivo de trigo pero encontraron beneficios para rendimiento, peso de los granos y peso del hectolitro.

Diversos estudios indican los beneficios de cultivos de quiebre (break crops) como el raps en las rotaciones. Por ejemplo, Kirkegaard *et al.* (2008) señalan que las rotaciones pueden generar beneficios en el rendimiento y calidad y además servir como una estrategia muy efectiva para el control de plagas y enfermedades del trigo como mal del pie (*Gaeumannomyces graminis var. tritici*).

El raps (*Brassica napus*) destaca por su capacidad de eliminar organismos patógenos del suelo mediante la producción de exudados radicales como los isotiacianatos (ITCs). Este fenómeno denominado biofumigación, puede ser eficiente en la supresión de agentes tan problemáticos para el trigo como el causante del mal del pie (Kirkegaard *et al.*, 2008). Ryan *et al.*, (2006) encontraron que el uso de brásicas aumenta el contenido de N mineral en los primeros 5 a 10 centímetros del suelo, llegando a tener acumulaciones similares a las de arveja. Este efecto no tiene una explicación clara, pero factores como la producción de ITCs radicales que provocan un cambio en la comunidad microbiológica del suelo y la alta labilidad de los compuestos que forman los tejidos radicales y aéreos explicarían parte de la acumulación de N mineral (Ryan *et al.*, 2006). Otro estudio señala como parte del beneficio, el aumento en la capacidad de almacenaje de humedad del suelo. Al poseer un sistema radical pivotante, el raps genera una mayor cantidad de macroporos y a la vez permitiría una mayor capacidad de exploración radicular del trigo (Kirkegaard *et al.*, 1994). Además, las rotaciones con raps logran mantener el sistema radical del trigo sano, lo que resulta en beneficios del orden del 60% en el rendimiento de este cultivo (Angus *et al.*, 1999).

En un estudio de rotaciones de cultivo en condiciones de secano mediterráneo de Chile Central en años con precipitación entre 221 y 306 mm en sistema de labranza convencional y tradicional por 2 años, los precultivos de trigo candeal, raps, haba y arveja no tuvieron efecto sobre la biomasa, rendimiento e IC del trigo candeal, sin embargo, se observó una tendencia a un menor establecimiento y biomasa cuando el cultivo de trigo candeal se manejó como monocultivo (Cuadro 3).

Cuadro 3. Establecimiento, biomasa, rendimiento e IC de trigo candeal después de distintos precultivos.

Precultivo	Establecimiento (Plantas m ⁻²)	Biomasa (Kg ha ⁻¹)	Rendimiento (Kg ha ⁻¹)	IC	Proteína (%)
Trigo	238 a	9.672 a	2.246 a	0,24 a	13,5 b
Raps	260 a	9.974 a	2.355 a	0,24 a	13,5 b
Haba	253 a	10.101 a	2.328 a	0,23 a	13,8 ab
Arveja	255 a	10.394 a	2.264 a	0,21 a	13,9 a

Letras diferentes muestran diferencias significativas ($p \leq 0,05$).

El contenido de proteína tuvo interacción del precultivo con los distintos manejos y años (Figura 4). El contenido de proteína en el grano tuvo valores que fluctuaron entre 11,2 y 14,1% cuando no se aplicó N hasta valores de 15,8% cuando se hicieron aplicaciones de N. El mayor contenido de proteína cuando no se aplicó N fue después del precultivo de arveja.

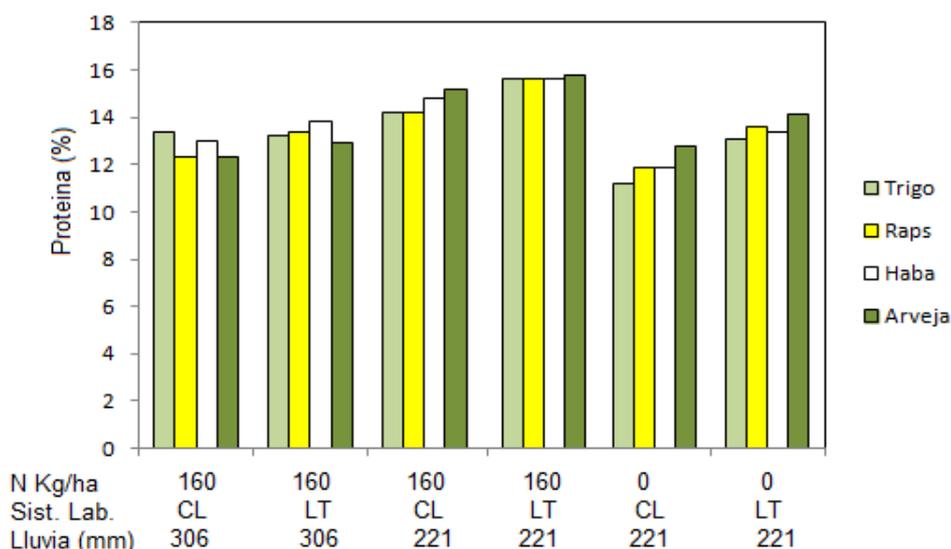


Figura 4. Contenido de proteína en trigo candeal en un monocultivo y después de un precultivo de raps, haba y arveja bajo distintos manejos de N, sistemas de labranza y años con distinta precipitación.

Este experimento estuvo sometido en sus dos años de estudio a fuertes sequías y el rendimiento fluctuó entre 3.494 y 1.283 Kg ha⁻¹, con bajo IC entre 0,32 y 0,18, evidenciando con esto un fuerte estrés hídrico terminal (Cuadro 4). Cuando existe un 50% de agua disponible en floración el IC no se ve afectado por la sequía terminal, sin embargo con valores menores de 30% de agua disponible en floración el IC se reduce al punto de afectar el rendimiento (Passioura, 2006). La alta fertilización nitrogenada durante el periodo sin limitación hídrica, como el invierno en zonas mediterráneas, provoca un crecimiento abundante del dosel y con ello un aumento en la demanda hídrica del cultivo, cuando se reducen las precipitaciones (primavera), estos doseles agotan el contenido de agua en el suelo tempranamente, reduciendo IC del cultivo y su rendimiento, produciéndose "Haying off" (Colwell, 1963; Fischer, 1980; Van Herwaarden et al, 1998a, 1998b, 1998c).

Cuadro 4. Biomasa, rendimiento e IC de trigo candeal en distintos manejos de labranza y nitrógeno en 2 años con limitación hídrica.

Año ¹	Precipitación (mm)	Sistema labranza	N (Kg ha ⁻¹)	Biomasa (Kg ha ⁻¹)	Rendimiento (Kg ha ⁻¹)	IC
2009	306	CL	160	14.464 a	3.494 a	0,24 a
2009	306	LT	160	15.530 a	3.228 a	0,21 b
2010	221	LT	0	7.917 a	1.978 a	0,25 b
2010	221	LT	160	8.125 a	1.618 b	0,19 c
2010	221	CL	0	7.034 a	2.188 a	0,32 a
2010	221	CL	160	7.142 a	1.283 b	0,18 c

Letras diferentes muestran diferencias significativas ($p \leq 0,05$).

¹ El análisis estadístico esta hecho por año.

Para darle apoyo a esta idea en el Cuadro 5 se presentan otras dos condiciones más contrastantes con 350 y 125 mm de precipitación, en ambos casos se usaron cantidades crecientes de nitrógeno. En las dos condiciones se evidencia una reducción del IC a medida que aumenta el nitrógeno aplicado, reduciendo con ello el rendimiento. Esto demuestra la fragilidad del sistema de secano en condiciones mediterráneas donde la dosis de nitrógeno no sólo puede tener efecto en rendimiento y calidad sino que actúa en disminución del rendimiento cuando la precipitación es muy baja y concentrada en el periodo vegetativo del cultivo.

Dependiendo de la intensidad del “Haying off”, este puede causar graves pérdidas económicas debido a la reducción del rendimiento, mala calidad de los granos debido a la alta presencia de granos chupados y bajo peso del hectolitro, además de la pérdida del nitrógeno aplicado.

Cuadro 5. Biomasa, rendimiento e IC de trigo candeal con distinta dosis de nitrógeno y 2 condiciones hídricas.

Año ¹	Precipitación (mm)	Sistema Labranza	N (Kg ha ⁻¹)	Biomasa (Kg ha ⁻¹)	Rendimiento (Kg ha ⁻¹)	IC
2007	350	LT	0	13.801 b	4.557 a	0,33 a
2007	350	LT	90	16.454 a	4.087 b	0,25 b
2007	350	LT	210	16.522 a	3.170 c	0,19 c
2007	125	LT	0	7.195 a	1.792 a	0,24 a
2007	125	LT	90	8.541 a	1.321 b	0,14 b
2007	125	LT	210	7.494 a	751 c	0,09 c

Letras diferentes muestran diferencias significativas ($p \leq 0,05$).

¹ El análisis estadístico esta hecho por año.

La información proporcionada está de acuerdo al modelo presentado en la Figura 5 (Passioura, 2002). Este autor señala que cuando la proporción de agua disponible usada a floración es mayor a 0,5 comienza una reducción del rendimiento directamente asociado con una caída en el índice de cosecha.

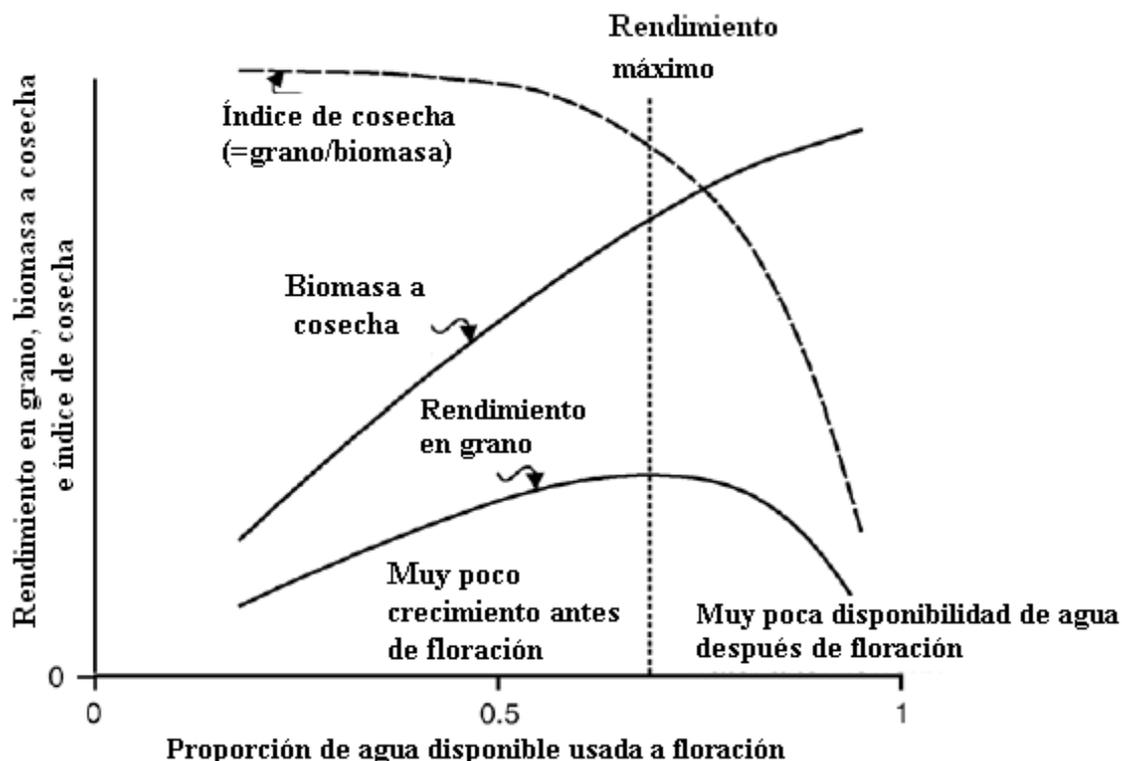


Figura 5. Rendimiento en grano de trigo, biomasa a cosecha e índice de cosecha, en relación a la proporción de disponibilidad de agua utilizada a floración. La escala del eje y es arbitraria, aunque el máximo índice de cosecha frecuentemente es 0,5. Adaptado de Passioura (2002).

La cero labranza en secanos mediterráneos tiene el potencial de estabilizar la producción en zonas semiáridas. La cobertura de rastrojos que queda sobre el suelo reduce la evaporación directa del agua desde la superficie del suelo y aumenta la infiltración (Lal, 1975; Fisher, 1987; Unger *et al.*, 1991; Rinaldi *et al.*, 2000). En condiciones de secano, la cero labranza puede aumentar tanto la eficiencia del uso del agua como el rendimiento de grano de trigo, al aumentar el almacenamiento del agua en el suelo (Bonfil *et al.*, 1999). Sin embargo, el efecto de la cero labranza es a veces contradictorio, y depende del tipo de suelo, el clima y el historial de manejo (Prasad y Power, 1991), debido a que en algunos casos este tipo de siembra puede ocasionar compactación, afectando negativamente el crecimiento de los cultivos (Ferrerías *et al.*, 2000; Martínez *et al.*, 2008). De Vita *et al.* (2007), destacaron un mayor rendimiento de trigo candeal en cero labranza en Italia bajo condiciones de secano sólo cuando las precipitaciones fueron menores a 300 mm.

Un experimento de cero labranza llevado a cabo en Chile bajo condiciones de secano en dos años de estudio no ha arrojado diferencias en rendimiento, sin embargo se observa un mayor IC (Cuadro 4) en el trigo de cero labranza lo que podría estar asociado a un mayor contenido de agua durante espigadura en este sistema. Lamentablemente el sistema de monitoreo de contenido de agua en el suelo no ha permitido verificar esta hipótesis.

Fecha de siembra y EUA en secano

En el secano mediterráneo de Chile central se observan diferencias en la precipitación anual, la cual aumenta de norte a sur, siendo de 350 mm en Santiago, 650 mm en Cauquenes y 1.100 mm en Yungay. También hay diferencias en el periodo libre de

heladas comenzando en Santiago el 15 de septiembre, en Cauquenes el 30 de septiembre y en Yungay 1 de noviembre (Figura 6).

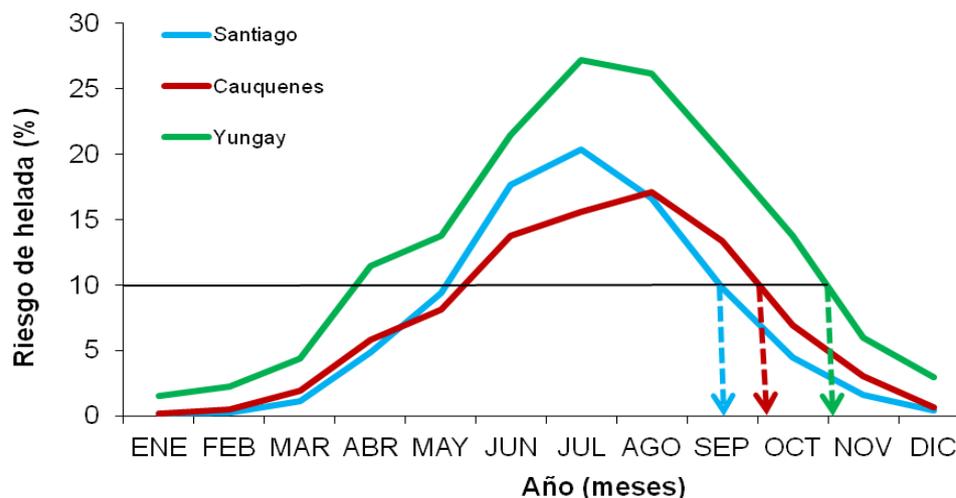


Figura 6. Probabilidad de helada para las localidades de Santiago, Cauquenes y Yungay.

Por otra parte, las tres localidades tienen diferentes características de suelo (Cuadro 6), que le entregan distinta capacidad de almacenaje de agua. Es así que el suelo de Yungay tiene la mayor capacidad para almacenar agua. Mientras que el suelo de Cauquenes tiene la menor, dado su bajo valor de CC y poca profundidad (bajo 40 cm de profundidad hay concreciones de Fe y Mn señalando que el nivel freático llega a esa profundidad en periodos del año). El suelo de Santiago tiene una capacidad intermedia.

Cuadro 6. Localización y características de los suelos de Santiago, Cauquenes y Yungay.

	Santiago	Cauquenes	Yungay
Coordenadas (LS, LO)	33°40', 70°38'	35°55', 72°19'	37°07', 72°00'
Altitud (m.s.n.m.)	605	177	300
Clasificación de suelo	Mollisol Franco arcillo-arenoso	Alfisol	Andisol
Textura		Franco arcilloso	Franco limoso
Profundidad (cm)	60	40	100 +
C.C. (mm)	176	91	345 ¹
P.M.P. (mm)	95	49	187 ²
Densidad aparente (g cm ⁻³)	1,42	1,43	0,61
pH	8,5	6,0	6,1
Materia orgánica (%)	2,0	1,7	13,0

1 y 2: fueron estimados para los primeros 100 cm

Los gráficos de datos experimentales para diferentes especies muestran una relación lineal entre rendimiento y la evapotranspiración total del cultivo. Mediante un planteamiento matemático de los diferentes conceptos involucrados en esta relación, Sinclair *et al.* (1984) establecieron que la pendiente de la regresión lineal corresponde a la eficiencia del uso de agua transpirada y la intercepción en el eje de la evapotranspiración a la evaporación directa desde el suelo.

Siguiendo estos planteamientos, French y Schultz (1984), determinaron para el hemisferio sur que el uso del agua está estrechamente relacionado a la lluvia de abril a octubre y si la escorrentía es menor, la lluvia dentro de este periodo puede ser usada como una aproximación del uso del agua de un cultivo. Estos autores desarrollaron el concepto de rendimiento potencial bajo limitación hídrica para trigo, a través de datos colectados en un periodo de 12 años en 61 sitios en el sur de Australia. Estimaron que para cultivos con alto rendimiento y uso eficiente del agua, el valor para la evaporación directa desde el suelo era del orden de 110 mm, correspondiendo a aproximadamente un tercio del promedio del uso total de agua, valores a la derecha del intercepto representan la cantidad de agua transpirada por el cultivo, la cual contribuye a un potencial de rendimiento de grano, limitado por agua de aproximadamente $20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$.

La relación entre rendimiento y uso de agua es un método simple para dividir el uso de agua en sus componentes de transpiración y evaporación del suelo y ha sido utilizado en zonas de secano de clima mediterráneo.

French y Schultz (1984) concluyeron que la baja lluvia por sí sola no explica los bajos rendimientos de muchos cultivos, ya que los datos bajo la línea discontinua de la Figura 7 indican los sitios donde la producción fue limitada por factores tales como temperaturas extremas, deficiencias agronómicas, el efecto de plagas y enfermedades, y posiblemente erosión del suelo. Otro enfoque de análisis para esta relación considera el rendimiento del cultivo-lluvia caída durante el periodo de crecimiento (Angus y van Herwaarden, 2001); los cultivos evaluados presentaron un buen manejo y estuvieron libres de enfermedades, para años secos y los rendimientos bajo la línea discontinua estuvieron relacionados a la distribución de las precipitaciones durante el periodo de crecimiento, el déficit de agua en periodo de floración y las pérdidas de agua por escorrentía (Passioura, 2006).

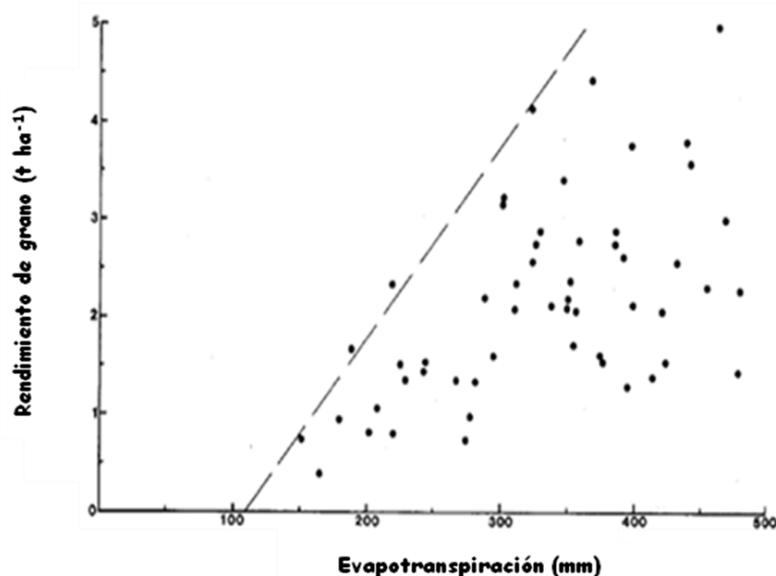


Figura 7. Potencial de rendimiento de trigo para el sur de Australia (French y Schultz, 1984).

En las localidades de Chile Central: Santiago, Cauquenes y Yungay se llevó a cabo experimentos de fecha de siembra y distancia entre hileras por tres años con el fin de afectar la eficiencia del uso del agua. Bajo estas condiciones la distancia entre hilera no tuvo efecto en rendimiento ni en ET en ninguna de las localidades estudiadas. Los

mayores rendimientos se lograron en el secano de Yungay, los menores rendimientos se registraron en Santiago y Cauquenes. En el secano de Santiago y Cauquenes desde fines de mayo se evidencia 4 a 7% de pérdida de rendimiento por cada semana de retraso en la siembra. En Yungay a partir de septiembre (no se puede sembrar antes por la incidencia de heladas y la siembra es primaveral y no de otoño como en los otros dos sitios) la pérdida en rendimiento fue de 14% por semana de retraso (Figura 8). Al momento de la cosecha el contenido de agua disponible en el suelo varió en cada localidad, Santiago y Cauquenes no tenían agua disponible a la cosecha, en cambio en Yungay todos los tratamientos contenían agua por sobre PMP.

Aplicando la metodología de French y Shultz (1984) se realizaron las regresiones de ET y rendimiento para Santiago y Cauquenes las cuales tienen una sequía terminal similar (Figura 9), con esto se obtuvo un intercepto en 110 mm mientras que la pendiente del rendimiento potencial limitado por agua fue de $20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$.

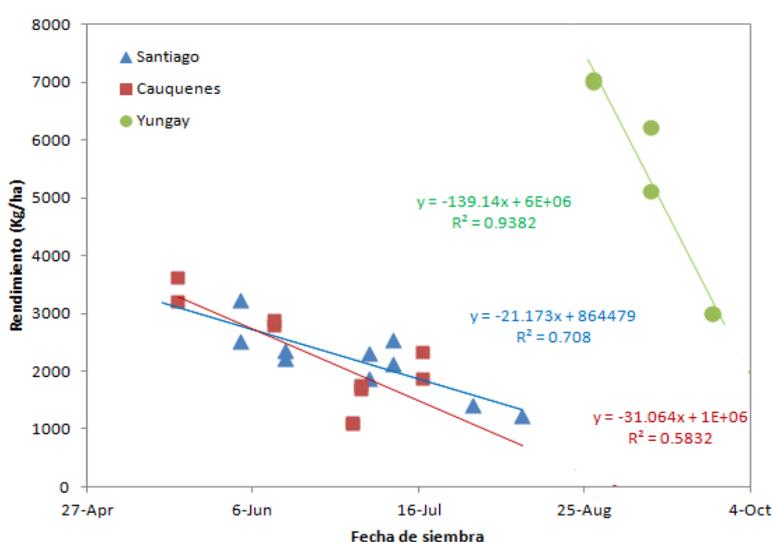


Figura 8. Rendimiento de trigo candeal en distintas fechas de siembra en Santiago, Cauquenes y Yungay.

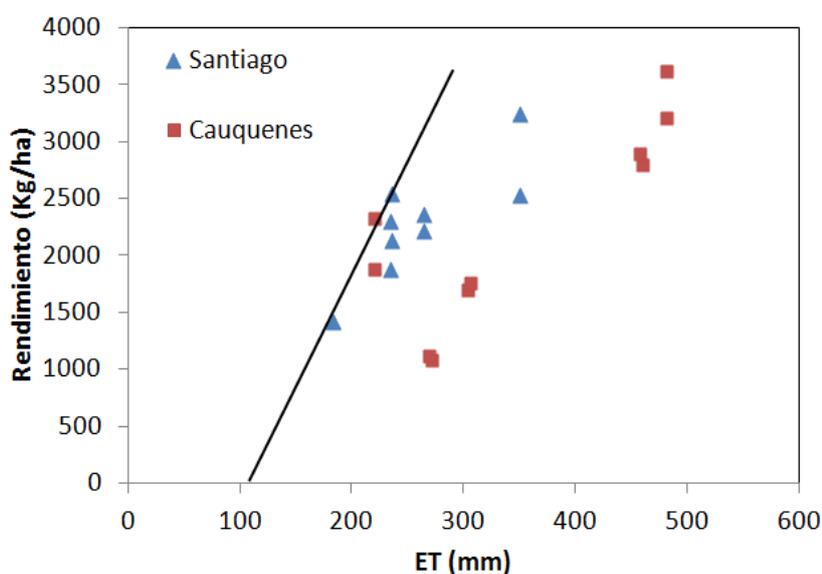


Figura 9. Relación entre rendimiento y la evapotranspiración (ET).

En cultivos de zonas de secano, el agua almacenada en profundidad del perfil de suelo es muy valiosa durante las etapas del cultivo más sensibles a déficit hídrico (Passioura, 1983), así lo demuestran los datos de Yungay. La absorción de agua depende considerablemente de la extensión y profundidad del crecimiento de raíces (Kirkegaard y Lilley, 2007), por lo que el desarrollo temprano de un sistema radical extenso que pueda utilizar el agua de las capas más profundas de suelo para fines de la estación de crecimiento resulta particularmente importante en periodos de sequía (Bonfil et al., 1999; Hurd, 1964), siempre que haya agua en profundidad. Las raíces del trigo se encuentran principalmente entre 0 y 120 cm de suelo (Bonfil et al., 1999), pudiendo alcanzar 150 cm en antesis (período de máxima profundidad de raíces en este cultivo) (Cramb, 2000).

Observaciones finales

- Se puede mejorar la EUN bajo riego de las variedades nacionales de trigo candeal, reduciendo la dosis de N y usando parcializaciones.
- El SPAD es una herramienta útil para la toma de decisiones de una segunda dosis de nitrógeno en primer nudo para aumentar rendimiento y de una tercera dosis de nitrógeno en embuche para aumentar el contenido de proteína.
- En condiciones de secano el precultivo de arveja mejora el contenido de proteína en el grano de trigo candeal cuando este no se fertiliza con N. No así el rendimiento.
- Se evidenció “haying off” cuando se aplicó N en condiciones de secano.
- La pérdidas de rendimiento en Santiago y Cauquenes secano comienzan a fines de mayo con 4 a 7% de pérdida por cada semana de retraso. Mientras que en Yungay comienzan en septiembre con 14% de pérdida de rendimiento por semana de retraso.

Referencias

- Acevedo, E., P. Silva, and H. Silva. 2002. Wheat growth and physiology. In "Bread wheat. Improvement and Production", BC Curtis, S. Rajaram, H Gomez Macpherson, eds. Food and Agriculture Organisation, Rome, Italy. 39-70.
- Acevedo, E. y Silva, P. 2007. Trigo Candeal: Calidad, mercado y Zonas de Cultivo. Santiago, Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. Serie Ciencias Agronómicas N° 12. 180 pp.
- Acevedo, E., Silva, P., Silva, H. and Solar, B. 1999. Wheat production in mediterranean environments. In: E.H. Satorre and G.A. Slafer (eds) WHEAT Ecology and Physiology of Yield Determination. pp 295-331. The Haworth Press, Inc. New York
- Alcoz, M.M, Hans, M.F. and Haby, A.V. 1993. Nitrogen fertilization timing effect on wheat production, nitrogen uptake efficiency, and residual soil nitrogen. *Agronomy Journal* 85:1198-1203.
- Arregui, L., B. Lasa, A. Lafarga, I. Iraneta, E. Baroja and M. Quemada. 2006. Evaluation of chlorophyll meters as tools for N fertilization in winter wheat under humid Mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy* 24: 140–148.
- Bassu, S., Asseng, S., Motzo, R. and Giunta, F. 2009. Optimising sowing date of durum wheat in a variable Mediterranean environment. *Field Crops Research* 111: 109-118.
- Bonfil, D., I. Mufradi, S. Klitman, and S. Asido. 1999. Wheat grain yield and soil profile water distribution in a No-Till arid environment. *Agronomy Journal* 91: 368-373.

- Cantero-Martínez, C., Angás, P. and Lampurlanés, J. 2007. Long-term yield and water use efficiency under various tillage systems in Mediterranean rainfed conditions. *Annals of Applied Biology* 150: 293-305.
- Carr P.M., G. B. Martin and R.D. Horsley. 2008. Wheat grain quality response to tillage and rotation with field pea. *Agronomy Journal* 100 (6): 1594-1599.
- Cramb, J. 2000. Climate in relation to agriculture in South-Western Australia. In "The wheat book, Principles and practice" edited by W. Anderson and J. Garlinge. *Agriculture Western Australia, Bulletin* 4443, pp 3-9.
- Colwell, J. D. 1963. The effect of fertilizers and season on the yield and composition of wheat in southern New South Wales. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry* 3, 51-61.
- Fageria, N.K. and Baligar, V.C. 2005. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. *Advances in Agronomy* 88: 97-185.
- Ferreras, L. A., J. L. Costa, F. O. García and C. Pecorari. 2000. Effect of no tillage on some soil physical properties of a structural degraded petrocalcic paleudoll of the southern "Pampa" Argentina. *Soil Tillage Research* 54: 31-39.
- Fischer, R. A. 1980. Influence of water stress on crop yield in semiarid regions. *In Adaptation of Plants to Water and High Temperature Stress*. (Eds N. C. Turner and P. J.Kramer.) pp. 323- 339.
- Fisher, R. A., 1987. Responses of soil and crop water relations to tillage. *In: Tillage. New directions in Agriculture.* (Eds. P.E. Cornish y J.E. Pratley):194-221.
- French, R.J. and Schultz, J.E. 1984. Water use of wheat in a Mediterranean-type Environment. I. Water use and Climate. *Australian Journal of Agricultural Research* 35: 743-764.
- Fundación Chile. 2008. Seminario "Estudio de competitividad en la cadena del trigo candeal". Chillán, Chile. Disponible en sitio web www.sap.uchile.cl. Leído el 12 de mayo de 2010.
- Garofalo , P., E . Di Paolo and M. Rinaldi. 2009. Durum wheat (*Triticum durum* Desf.) in rotation with faba bean (*Vicia faba* var. *minor* L.): long-term simulation case study. *Crop and Pasture Science* 60(3): 240–250.
- Gooding, M.J. and Davies, W.P. 1992. Foliar urea fertilization of cereals: a review. *Fertilizer Res.* 32: 209-222.
- Hoel, B.O. 1998. Use of a hand-held chlorophyll meter in Winter wheat: evaluation of different measuring positions on the leaves. *Acta Agricola. Scand. B. Soil and Plant* 48: 222–228.
- Hurd, E. 1964. Root study of three wheat varieties and their resistance to drought and damage by soil cracking. *Canadian Journal Plant Science* 44: 240-248.
- Kirkegaard J., P. Gardner and J. Angus. 1994. Effects of Brassica break crops on the growth and yield of wheat. *Crop and Pasture* 45: 592-545.
- Kirkegaard J., O. Christen, J. Krupinsky and D. Layzell. 2008. Break crop benefits in temperate wheat production. *Field Crops Research* 107: 185-195.
- Kirkegaard, J. and J. Lilley. 2007. Root penetration rate – a benchmark to identify soil and plant limitations to rooting depth in wheat. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 47: 590-602.
- Kruk, E. y Satorre, E. 2003. Densidad y arreglo especial del cultivo. p 276 - 316. *In: Pascale, A.. Producción de granos: bases funcionales para su manejo.* (Ed) Facultad de Agronomía. Buenos Aires, Argentina. 782p.
- Ladha., J.K., Pathak, H., Krupnik, T.J., Six, J. and van Kessel, C. 2005. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects. *Advances in Agronomy* 87:85-156.
- Lal, R. 1975. The role of mulching techniques in tropical soil and water management. *I.I.T.A. Technical Bulletin*, Ibadan, Nigeria, 38p.
- López-Bellido L., M. Fuentes, J.E. Castillo, and F.J. López-Garrido. 1998. Effects of tillage, crop rotation and nitrogen fertilization on wheat-grain quality grown under rainfed Mediterranean conditions. *Field Crops Research* 57:265–276.

- López-Bellido R.J., L. López-Bellido, F.J López-Bellido and J.E. Castillo. 2003. Faba bean (*Vicia faba* L.) response to tillage and soil residual nitrogen in a continuous rotation with wheat (*Triticum aestivum* L.) under rainfed Mediterranean conditions. *Agronomy Journal* 95: 1253-1261.
- Martinez, E., J.P. Fuentes, P. Silva, S. Valle and E. Acevedo. 2008. Soil physical properties and wheat root growth as affected by no-tillage and conventional tillage systems in a Mediterranean environment of Chile. *Soil & Tillage Research* 99: 232- 244.
- Moll, R.H., E. Kamprath and W. Jackson. 1982. Analysis and Interpretation of Factors Which Contribute to Efficiency of Nitrogen Utilization. *Agronomy Journal* 74: 562-564.
- Morancho, J. 2000. Production and marketing of durum wheat worldwide. Proceedings of the seminar Durum wheat improvement in the Mediterranean region: new challenges. Zaragoza, Spain, 12–14 April 2000. *Options Méditerranéennes, Série A, Séminaires Méditerranéens*, 40, 35–49.
- Mossedaq, F. and Smith, D. H. 1994. Timing nitrogen application to enhance spring wheat yields in a Mediterranean climate. *Agronomy Journal* 86:221-226.
- Novoa, B. and R.S. Loomis. 1981. Nitrogen and Plant Production. *Plant and Soil* 58: 177-204.
- Ortiz-Monasterio, J.I. 2002. Nitrogen management in irrigated spring wheat. In: B.C. Curtis, S. Rajaram and H. Gómez Macpherson (eds.). *Bread wheat improvement and production*. FAO, Roma, Italy. pp. 433-452.
- Oweis, T., Zhang, H. and Pala, M. 2000. Water Use Efficiency of rainfed and irrigated bread wheat in a Mediterranean environment. *Agronomy Journal* 92: 231-238.
- Passioura, J.B. 1983. Roots and drought resistance. *Agricultural Water Management* 7: 265-280.
- Passioura, J.B. 2002. Environmental biology and crop improvement. *Funct. Plant Biology*. 29: 537-546
- Passioura, J.B. 2006. Increasing crop productivity when water is scarce-from breeding to field management. *Agricultural Water Management* 80:176-196.
- Peterson, G., D. Schlegel, D. Tanaka, and O. Jones. 1996. Precipitation use efficiency as affected by cropping and tillage system. *Journal Production Agriculture* 9(2): 180-186.
- Prasad, R. and Power, J. F. 1991. Crop residue management. *Advances in Soil Sciences* 15: 205–250.
- Rathke, G.W., T. Behrens and W. Diepenbrock. 2006. Integrated nitrogen management strategies to improve seed yield, oil content and nitrogen efficiency of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): A review. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 117: 80–108.
- Rattunde H.F. and K.J. Frey. 1986. Nitrogen Harvest Index in Oats: Its Repeatability and Association with Adaptation. *Crop Science* 26: 606-610.
- Rinaldi, M., G. Rana and M. Introna. 2000. Effects of partial cover of durum wheat straw on soil evaporation in a semi-arid region. *ISHS Acta Horticulturae* 537: III International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops.
- Ryan J., M. Singh and M. Pala. 2008. Long-term cereal-based rotation trials in the Mediterranean region: Implications for cropping sustainability. *Advances in Agronomy* 97: 273-319.
- Ryan, J., M. Pala, S. Masri, M. Singh and H. Harris. 2008. Rainfed wheat-based rotations under Mediterranean conditions: Crop sequences, nitrogen fertilization, and stubble grazing in relation to grain and straw quality. *European Journal Agronomy* 28: 112–118.
- Sadras, V. and Angus, J. F. 2006. Benchmarking water use efficiency of rainfed wheat in dry environments. *Australian Journal of Agricultural Research* 57: 847-856.

- Sadras, V. and Rodriguez, D. 2007. The limit to wheat water-use efficiency in Eastern Australia. II. Influence of rainfall patterns. *Australian Journal of Agricultural Research* 58: 657-669.
- Singh, B., Y. Singh, J. Ladha, F. Kevin, V. Balasubramanian, J. Singh and C. Khind. 2002. Chlorophyll Meter- and Leaf Color Chart-Based Nitrogen Management for Rice and Wheat in Northwestern India. *Agronomy Journal* 94: 821-829.
- Soltani, A. and Galeshi, S. 2002. Importance of rapid canopy closure for wheat production in a temperature sub-humid environment: experimentation and simulation. *Field Crops Research* 77: 17-30.
- Unger, P. W., B. A. Stewart, J. F. Parr and R. P. Singh. 1991. Crop management and tillage methods for conserving soil and water in semiarid regions. *Soil Tillage Research* 20: 219-240.
- Van Herwaarden, A.F., G. D. Farquhar, J. F. Angus, R. A. Richards and G. N. Howe. 1998a. 'Haying-off', the negative grain yield response of dryland wheat to nitrogen fertiliser. I. Biomass, grain yield, and water use. *Australian Journal of Agricultural Research* 49(7):1067 – 1082.
- Van Herwaarden, A. F, J.F. Angus, R. A. Richards and G.D. Farquhar. 1998b. 'Haying-off', the negative grain yield response of dryland wheat to nitrogen fertiliser. II. Carbohydrate and protein dynamics. *Australian Journal of Agricultural Research* 49 (7): 1083 – 1093.
- Van Herwaarden, A. F, J.F. Angus, R. A. Richards and G.D. Farquhar. 1998c. 'Haying-off', the negative grain yield response of dryland wheat to nitrogen fertiliser. III. The influence of water deficit and heat shock. *Australian Journal of Agricultural Research* 49 (7): 1095 – 1110.
- Yu, S., Zhenwen, Y., Dong, W., Yanqi, L. and Xue, W. 2007. Effects of nitrogen rate and ratio of base fertilizer and topdressing on uptake, translocation of nitrogen and yield in wheat. *Agric. China* 1(2):142-148.
- Zhang, X., S. Chen, H. Sun, D. Pei, and Y. Wang. Dry matter, harvest index, grain yield and water use efficiency as affected by water supply in winter wheat. *Irrigation Science*. 2008; 27(1): 1-10.

¿Qué cambios presentaron en los últimos años los sistemas de producción de trigo y cebada en Argentina?

L. Gabriela Abeledo, Daniel J. Miralles

Cátedra de Cerealicultura, Departamento de Producción Vegetal, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Av. San Martín 4453, C1417DSE, Buenos Aires, Argentina. Email: abeledo@agro.uba.ar, miralles@agro.uba.ar.

Resumen

Trigo y cebada conforman el grupo de los principales cultivos de cereales a nivel mundial. En Argentina, ambos cultivos presentan una importancia semejante a la observada globalmente. Durante la última década, en Argentina, la superficie destinada al cultivo de cebada se incrementó marcadamente. Tomando como ejemplo lo sucedido en dicho país, se procedió a analizar si el incremento en el área sembrada con cebada cervecera ha sido a expensas de una sustitución por el cultivo de trigo, debido a una expansión del cultivo hacia áreas de menor potencial, y/o a causa de cambios en el rendimiento alcanzado. Para ello, en base a la caracterización de distintas regiones productivas de Argentina y tomando en consideración la información de los últimos 40 años se analizó: (i) la dinámica de evolución del área cosechada, (ii) la evolución de los rendimientos y (iii) la eficiencia en el uso del agua para los cultivos de trigo y cebada. El análisis de la superficie cosechada de trigo y cebada mostró cambios a lo largo de los años. En el caso de trigo, desde los años '70 y hasta el año 2000 el área cosechada se mantuvo estabilizada en alrededor de 6 millones de hectáreas; sin embargo, a partir de la campaña 2001 la superficie cosechada se redujo a razón de 270.000 ha año⁻¹ pero manteniéndose estable el nivel de producción. Por el contrario, la superficie destinada al cultivo de cebada se incrementó durante la última década a razón de ca. 40.000 ha año⁻¹, habiéndose triplicado durante dicho período la producción. Cebada incrementó claramente el porcentaje de área cosechada en dos regiones ambientalmente contrastantes, una caracterizada por importantes restricciones hídricas (SO), y otra definida como de alta potencialidad (SE). Sin embargo, la expansión geográfica del cultivo de cebada no fue competitiva con respecto a la asignación de superficie de trigo. En paralelo, la asignación de un cultivo u otro no presentó relación con la potencialidad del ambiente. La ganancia de rendimiento a nivel nacional para el período 1969-2010 fue de 34 y 57 kg ha⁻¹ año⁻¹ para trigo y cebada, respectivamente. Las diferencias en rendimiento se acentuaron durante la última década ya que en trigo no se evidenciaron durante dicho período cambios en el rendimiento, presentando las variedades actuales de cebada un rendimiento semejante al de trigo. Trigo y cebada presentaron similar eficiencia en el uso del agua (cuantificada como el cociente entre el rendimiento logrado y las precipitaciones durante el ciclo ontogénico de cada cultivo) para el promedio de las zonas analizadas (7,3 y 7,4 kg ha⁻¹ mm⁻¹ para trigo y cebada, respectivamente) aunque para el percentil 90% cebada presentó mayor eficiencia que trigo (14,1 y 13,3 kg ha⁻¹ mm⁻¹, respectivamente).

Palabras claves: producción, ganancia de rendimiento, eficiencia en el uso del agua, trigo, cebada.

Introducción

Los cereales son los cultivos de mayor relevancia en la alimentación humana. Cultivos como trigo y arroz constituyen el sustento de la dieta de la mayoría de la población mundial. En este contexto, la cebada es el cuarto cereal del mundo por volumen de producción, detrás de los cultivos de maíz, arroz y trigo (FAO, 2011). En Argentina, el cultivo de trigo es el cereal invernal de mayor importancia por área y volumen de producción, siguiendo la cebada cervecera como el cultivo invernal de mayor relevancia. El cultivo de trigo es destinado principalmente a la industria molinera para la elaboración de harinas. A diferencia de otros países, el destino principal de la cebada en Argentina es la producción de malta tanto para consumo interno como para exportación.

El predominio del cultivo de trigo, sobre la cebada, se refleja en el área sembrada, ya que históricamente en Argentina se han sembrado ca. seis millones de hectáreas anuales de trigo, mientras que en cebada se observa una importante fluctuación entre años oscilando de las trescientas mil a seiscientas mil hectáreas (FAO, 2011). Sin embargo, en los últimos años se ha producido un importante incremento en el área sembrada de cebada observándose como contrapartida una reducción en el área destinada a trigo. Este proceso ha sido disparado por condiciones climáticas poco propicias para la producción (i.e. sequías) en conjunto con intervenciones por parte del Estado en la comercialización del cultivo de trigo que dificultaron las operaciones de venta del cereal. Como contrapartida, el incremento en el cultivo de cebada ha sido determinado principalmente (i) por una demanda sostenida de malta, asociada a un aumento en el consumo mundial de cerveza, y (ii) por la introducción en el mercado Argentino de cultivares europeos de alto potencial de rendimiento y excelente calidad maltera (Cattaneo, 2011). Además, el cultivo de cebada libera más tempranamente el lote (5-10 días) respecto de trigo, permitiendo un adelantamiento de la siembra de soja en lotes que se destinan al doble cultivo con soja de segunda dentro de los esquemas de rotación cereal invernal/soja. De esta manera, una liberación más temprana de los lotes permite una reducción en la penalización del rendimiento en soja debido a atrasos en la fecha de siembra (Calviño et al., 2003).

En este escenario de aumentos en el área sembrada de cebada cervecera y reducciones en el área destinada a trigo, no se ha establecido con claridad cómo han evolucionado dichos cambios en las distintas áreas de producción que tradicionalmente ocupan ambos cultivos en Argentina. Un aspecto relevante es establecer si el incremento en el área sembrada con cebada cervecera ha sido a expensas de una sustitución por el cultivo de trigo y/o si el incremento en el cultivo de cebada se ha debido a su expansión hacia áreas de menor potencial donde la cebada podría adaptarse mejor a condiciones de menor disponibilidad hídrica respecto de trigo. A nivel productivo se considera que el cultivo de cebada presenta una mejor adaptación a condiciones de menor oferta hídrica que trigo. Algunas evidencias (Jamieson et al., 1995) mostraron que el valor crítico de potencial agua en el suelo para generar un estrés hídrico es menor en el cultivo de cebada respecto de trigo, sugiriendo una mejor adaptación de cebada a condiciones de menor oferta hídrica. En este contexto, sería esperable que un aumento en el área sembrada de cebada, siempre que no presente competencia por área con trigo, se ubique en zonas de menor potencial ambiental (al menos desde el punto de vista hídrico), debido a su mejor adaptación a estas condiciones. Sin embargo, otras evidencias de la literatura muestran que la eficiencia en el uso del agua es similar en ambos cereales (Albrizio et al., 2010; Cossani et al., 2010) por lo que no habría ventajas comparativas en la performance del rendimiento de ambas especies ante cambios en la disponibilidad hídrica. En este escenario, el aumento en el área sembrada con cebada podría no

estar confinado a una región en particular (con menor disponibilidad hídrica) sino que podría competir con trigo tanto en condiciones de mayor como de menor oferta hídrica.

Otro aspecto de relevancia vinculado al aumento en la superficie sembrada con cebada en Argentina ha sido la introducción de nuevos cultivares lo cual generó aumentos en el rendimiento logrado, manteniendo una adecuada calidad maltera. Tradicionalmente el mejoramiento de cebada cervecera en Argentina ha privilegiado, además de los aspectos sanitarios, una alta estabilidad de calibre en los granos asegurando una uniforme germinación para el proceso industrial de malteo, sin que se prioricen aspectos vinculados al potencial de rendimiento. Esta última característica, potenciada por una pobre fertilización nitrogenada (asociada al hecho de evitar un exceso de proteína en los granos, aspecto éste penalizado por las normas de comercialización), posicionaba al cultivo de cebada en una situación desventajosa respecto de trigo. Sin embargo, la introducción de cultivares europeos de cebada hacia mediados de los años '90 cambió el paradigma de manejo del cultivo de cebada ya que se favoreció el uso de fertilización nitrogenada. Así, mientras que en el pasado un cultivo de cebada que en términos generales era confinado a lotes (ambientes) de bajo potencial productivo, luego de la introducción de los materiales europeos, el cultivo no solo se posicionó en las áreas tradicionales (de bajo potencial ambiental) sino que se expandió hacia regiones de alto potencial de rendimiento. Este nuevo escenario de manejo del cultivo de cebada determinó que cebada iguale, en muchas áreas de producción, los rendimientos de trigo, e incluso los supere. De esta manera, sería posible postular que, tomando en consideración los últimos 20 años, la ganancia en rendimiento por unidad de área y tiempo sea mayor en el cultivo de cebada respecto de trigo en la mayoría de las áreas de producción de Argentina donde ambos cereales coexisten.

El objetivo de este capítulo fue caracterizar para distintas regiones productivas de Argentina y tomando en consideración la información de los últimos 40 años: (i) la dinámica de evolución del área cosechada, (ii) la evolución de los rendimientos en ambos cultivos y (iii) la eficiencia en el uso del agua para los cultivos de trigo y cebada. Los resultados y conclusiones derivadas del análisis del rendimiento logrado en trigo y cebada en Argentina serían válidas de ser extendidas a otros países ya que un adecuado comportamiento de ambos cultivos en diversidad de condiciones permitiría incrementar las alternativas de producción y opciones de rotación.

Metodología de análisis de la información

Para llevar adelante los objetivos detallados y analizar las hipótesis planteadas, se utilizó una base de datos pública obtenida del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación Argentina (<http://www.minagri.gob.ar/site/index.php>). La información analizada se tomó, en particular, para los cultivos de trigo y cebada de la sección de estadísticas del Ministerio mencionado (<http://www.sii.gov.ar/index.php/series-por-tema/agricultura>). La información recabada de dicha base de datos fue la de superficie cosechada y rendimiento para trigo y cebada desde el año 1969 hasta el año 2010 en Argentina.

A los efectos de realizar un análisis regional, se caracterizaron distintas áreas de producción teniendo en cuenta las variables de suelo, temperatura y precipitaciones de modo de uniformizar las variables edáficas y ambientales dentro de cada región (Fig. 1). Se consideraron solo aquellas áreas donde, de acuerdo a los registros estadísticos, ambos cultivos fuesen sembrados. Para caracterizar cada una de las regiones se tomó en consideración la Provincia de Buenos Aires, el oeste de la Provincia de La Pampa, sur de la Provincia de Santa Fe y sudeste de la Provincia de Córdoba. Las diferencias

climáticas entre sitios se analizaron considerando las variaciones zonales en temperatura y precipitaciones durante el período de crecimiento de los cultivos (estaciones de invierno y primavera). Dentro de las regiones analizadas, en términos generales, las temperaturas disminuyen hacia latitudes altas, mientras que las precipitaciones tienden a ser menores hacia la zona oeste (Fig. 1). Dentro de dichas provincias se identificaron los partidos que las conforman y para cada uno de los partidos se analizó la serie de suelo predominante utilizando la información obtenida de la digitalización de suelos de la República Argentina realizada por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (GeolNTA, 2011). A partir de esta información se diferenciaron 6 regiones/ambientes: (CN) Centro-Norte, que abarca el norte de la Provincia de Buenos Aires, sur de la Provincia de Santa Fe y sudeste de la Provincia de Córdoba, (CP) Centro Plano, abarcando el centro y centro-este de la Provincia de Buenos Aires con un relieve típicamente plano desde el punto de vista topográfico, (CE) Centro Este de la Provincia de Buenos Aires, caracterizada por presentar relieves ondulados y planos y abarcando parte de la denominada depresión del Río Salado, (SE) Sud-Este, región que abarca el sudeste de la Provincia de Buenos Aires, (SO) Sudoeste, dicha región además del sudoeste de la Provincia de Buenos Aires contempla el sudeste de la Provincia de La Pampa, y (OA) Oeste Arenoso que abarca el sudoeste de la Provincia de Buenos Aires, este de la Provincia de La Pampa y sur de la Provincia de Córdoba.

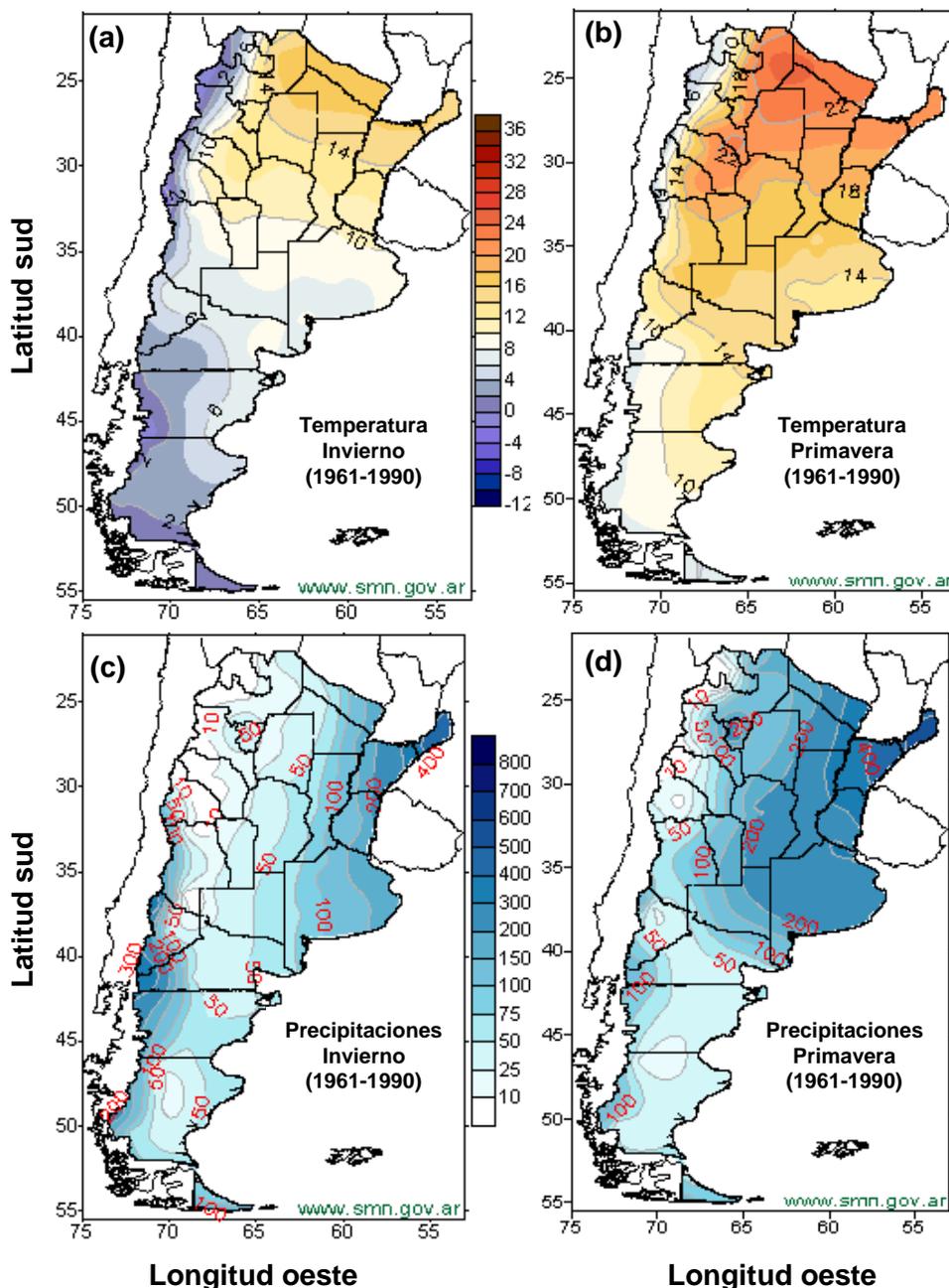


Figura 1. Mapas normales (período 1961-1990) de temperaturas medias (a, b) y de precipitaciones (c, d) durante el invierno (a, c) y la primavera (b, d) en la República Argentina. Adaptado de Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2011).

Desde el punto de vista edáfico las regiones detalladas muestran predominio de distintos tipos de suelo. Así, en la región CN predominan los Argiudoles típicos y los Hapludoles énticos, en la región CP prevalecen los Hapludoles énticos, típicos, ácuicos y los Natracuoles, en el CE los suelos predominantes son Natracuoles típicos, Hapludoles típicos y thaptos, en el SE predominan Argiudoles, Natracuoles y Hapludoles, mientras que en el SO los suelos del tipo Haplustoles, Argiustoles y Argiudoles son los predominantes, y finalmente en el OA los suelos Hapludoles son los de mayor influencia (Fig. 2).

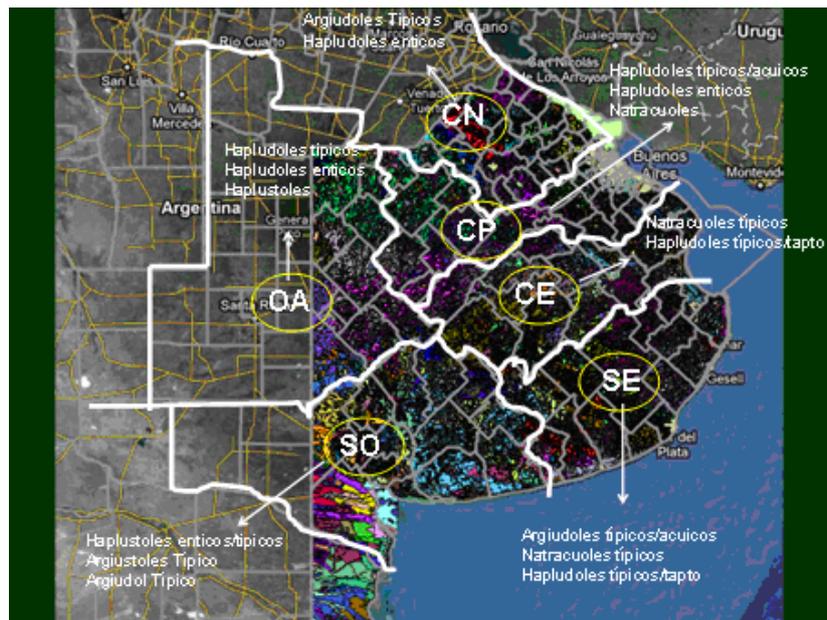


Figura 2. Límites de las distintas regiones caracterizadas en base a variables edafoclimáticas y de relieve contrastantes. Se indican los suelos predominantes en cada una de las regiones. El código de las regiones se indica en la sección de metodología de análisis de la información. Adaptado de GeoINTA (2011).

En cada una de las regiones descritas en la Fig. 2 se analizó la evolución de la superficie cosechada y de los rendimientos a lo largo de los años para el período 1969-2010. A partir del análisis de dicha información se obtuvo la tasa de cambio en la superficie cosechada por unidad de tiempo y la ganancia en rendimiento por unidad de área y tiempo.

Para el cálculo de la eficiencia en el uso del agua (EUA) en términos globales para el conjunto de regiones analizadas, así como para cada una de ellas, se recopilaron datos de precipitaciones ocurridas entre el 1ro de mayo y el 15 de diciembre (MAGyP, 2011), período coincidente con la estación de crecimiento de los ciclos de trigo y cebada. Para separar el efecto de las precipitaciones del debido a la ganancia de rendimiento por efecto de la mejora en los cultivares y en las prácticas de manejo, el análisis de la información referido a precipitaciones se restringió al período 2005-2010. El cálculo de la EUA se realizó contrastando el rendimiento de trigo y de cebada con las precipitaciones en el período mencionado. Para ello, se calculó la EUA como la pendiente de la regresión lineal entre ambas variables tomando los percentiles extremos (i.e. 90% y 10%) y para el conjunto de los datos.

Cambios en la superficie y producción de trigo y cebada

El análisis de la superficie cosechada de trigo y cebada mostró cambios a lo largo de los años. En el caso de trigo, desde los años '70 y hasta el año 2000 el área cosechada se mantuvo estabilizada en alrededor de 6 millones de hectáreas. Sin embargo, a partir de la campaña 2001 la superficie cosechada se redujo a razón de 270.000 ha año⁻¹ hasta alcanzar valores de aproximadamente 4 millones de hectáreas en la campaña 2010. A pesar de la reducción en el área cosechada, la producción de trigo en la última década se mantuvo relativamente estable con un promedio anual de 14 millones de toneladas (con excepción de los años 2008 y 2009 en los que el cultivo sufrió una intervención del estado en su comercialización, reduciéndose aún más la superficie de siembra, y una fuerte sequía que afectó el rendimiento del cultivo).

Contrariamente a lo observado en trigo, el área cosechada de cebada mostró reducciones desde los años '70 hasta mediados de los '80 revirtiéndose dicha tendencia de allí en adelante, presentado la superficie destinada al cultivo un destacado crecimiento en los últimos 10 años, período en el cual la superficie cosechada se incrementó ca. 40.000 ha año⁻¹ alcanzando en la última campaña valores de 800.000 ha (Fig. 3). En línea con el crecimiento del área cosechada, la producción anual de cebada cervecera se triplicó en los últimos 10 años pasando de algo menos de 1 millón a 3 millones de toneladas (Fig. 3).

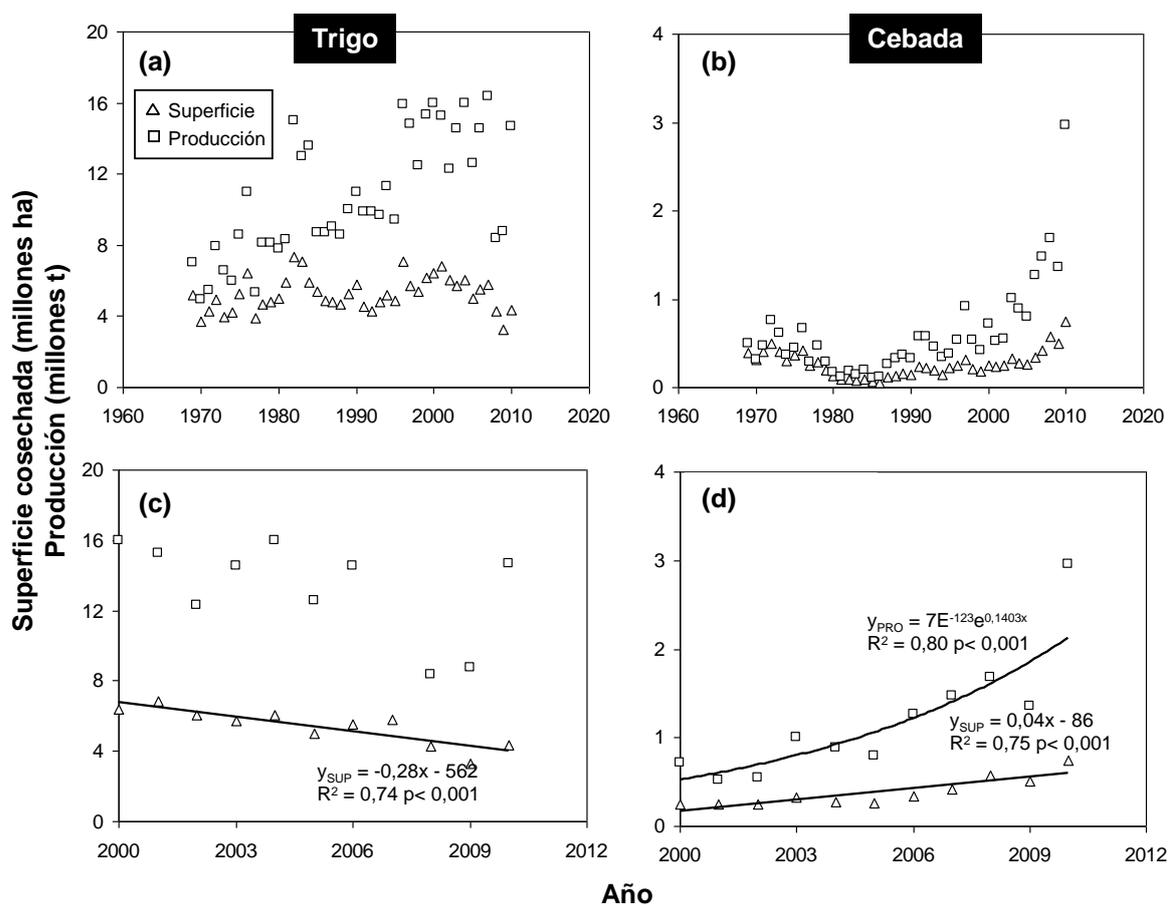


Figura 3. Superficie cosechada y producción en los cultivos de trigo (paneles a, c) y cebada (paneles b, d) para el período 1969 al 2010 (paneles a, b) y desde el año 2000 al 2010 (paneles c, d). En (c) y (d), las líneas llenas representan los ajustes del análisis de regresión.

En la actualidad (campaña 2010/11), la distribución por ambientes de la superficie destinada a ambos cultivos difiere ya que mientras que en trigo las áreas caracterizadas como SO, OA, CN y SE abarcan 92% del total de la superficie destinada a este cultivo; en el caso de cebada, ésta se concentra en las regiones SO, SE y OA, que representan el 51, 18 y 11% de la superficie total, respectivamente. Así esas tres zonas concentran el 80% del cultivo de cebada (Fig. 4).

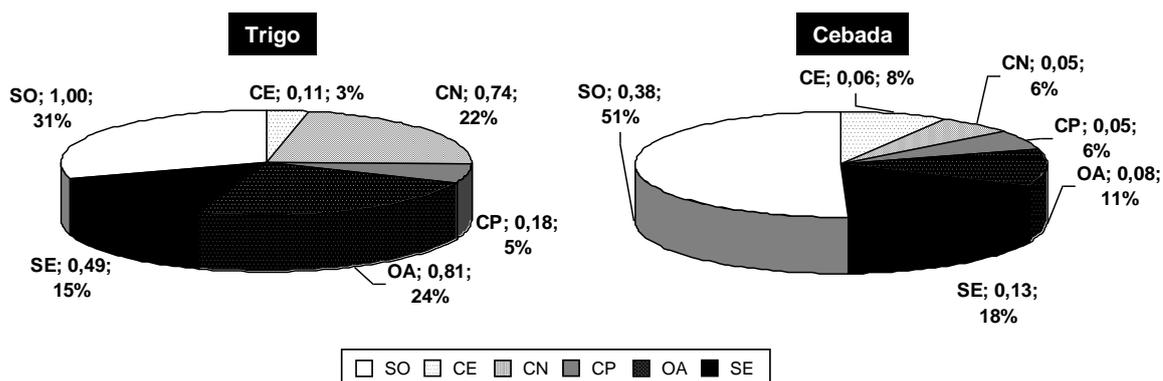


Figura 4. Área cosechada (millones ha) y proporción respecto al total (%) para los cultivos de trigo y cebada en el año 2010 en las distintas regiones seleccionadas.

El área cosechada de trigo en el período comprendido entre los años 2000 y 2010 no experimentó grandes cambios respecto a la participación parcial de las distintas zonas que la componen, aunque evidenció leves reducciones en el porcentaje de área cosechada en las regiones del SO y OA así como ligeros incrementos en el CP. Sin embargo, cebada incrementó claramente el porcentaje de área cosechada en dos regiones ambientalmente contrastantes como son el SO y SE ya que mientras la primera presenta importantes restricciones hídricas, el SE es una de las zonas de mayor potencialidad de Argentina (Fig. 5).

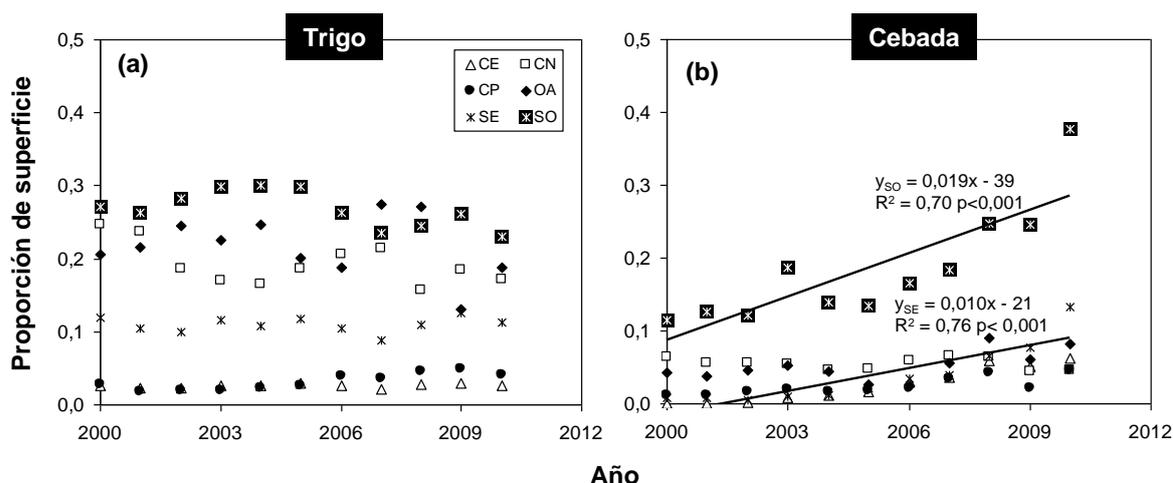


Figura 5. Proporción de la superficie cosechada en los cultivos de trigo (a) y cebada (b) durante el período 2000 a 2010. En (b), las líneas llenas indican el ajuste del análisis de regresión para las regiones SO y SE.

El hecho que el cultivo de cebada haya experimentado un importante incremento en regiones muy contrastantes sugiere que no necesariamente presente mejor eficiencia en el uso del agua respecto de trigo. De hecho, el cultivo de cebada ha mostrado expansión en su área sembrada tanto en zonas con restricciones hídricas (SO), como en regiones donde no se presentan tales restricciones (por el ejemplo, el SE).

El crecimiento de la superficie destinada a cebada no ha sido a expensas de la disminución en la superficie de trigo. De forma tal que la asignación de superficie a uno u otro cultivo no ha sido competitiva. De hecho, no hay correlación entre la superficie destinada a trigo y la destinada a cebada (Fig. 6a), parte de ello asociado a que el área destinada a cebada representa a nivel nacional una baja proporción (ca. 10%) de la destinada a trigo. En paralelo, la asignación de un cultivo u otro no

dependió de la potencialidad del ambiente ya que la proporción de superficie asignada a cebada respecto a la destinada a trigo no estuvo relacionada con la calidad del ambiente (cuantificada dicha calidad mediante el rendimiento logrado de trigo) (Fig. 6b). Es decir que, en forma contraria a lo tradicionalmente considerado, no se evidenció un predominio de cebada en ambientes de baja productividad sino que la asignación de cultivos fue independiente de la calidad ambiental.

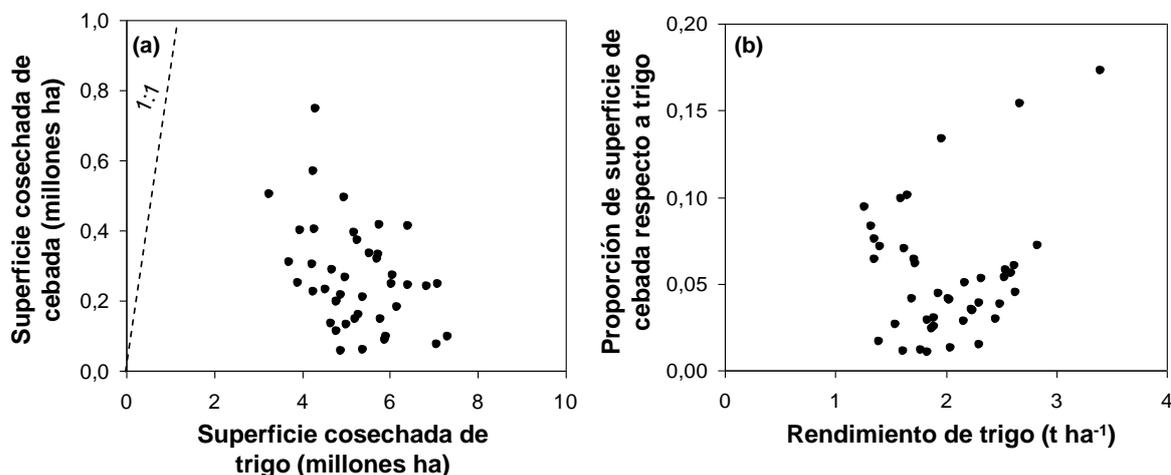


Figura 6. Superficie cosechada de cebada y de trigo (a), y proporción de la superficie cosechada de cebada respecto a la de trigo y rendimiento de trigo (b). En (a), la línea de puntos indica la relación 1:1.

¿Son los rendimientos de cebada menores respecto de los de trigo?

Uno de los aspectos importantes a la hora de decidir el cultivo a ser sembrado es su potencialidad de rendimiento. Históricamente, los rendimientos a nivel de lote en el cultivo de cebada fueron menores a los de trigo debido a (i) restricciones en la propia potencialidad de los materiales tradicionalmente utilizados, y (ii) a una menor disponibilidad de recursos, especialmente oferta de nitrógeno, debido al riesgo de incrementar en exceso el contenido de proteína en los granos (por encima de lo indicado en el estándar de comercialización) generando penalizaciones en el precio de la cebada al momento de la entrega del cereal. Además, un exceso de nitrógeno en el cultivo de cebada podría generar un mayor riesgo de vuelco del cultivo penalizando no solo el rendimiento sino también la calidad del producto a ser entregado.

El análisis de la evolución de los rendimientos a lo largo del período 1969-2010 mostró distintas tendencias entre cultivos y para las diferentes localidades, pero en todas las situaciones los ajustes mostraron pendientes positivas. En el caso de trigo, la evolución de los rendimientos en las regiones OA, SO, CN y CP presentó una ganancia constante a lo largo de los años, con tasas de ganancia anual de rendimiento de 30, 26, 45 y 57 kg ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente (Fig. 7; Tabla 1). En las regiones de CE y SE la evolución de los rendimientos presentó una tendencia bilineal, donde las menores ganancias en rendimiento se observaron en los períodos previos a los inicios de los años '90, observándose a partir de allí las mayores ganancias con valores cercanos a los 85-99 kg ha⁻¹ año⁻¹ (Fig. 7; Tabla 1). El promedio a nivel país para el cultivo de trigo en cuanto a la ganancia en rendimiento fue de 34 kg ha⁻¹ año⁻¹ para el período 1969-2010 pero sin que se hayan evidenciado cambios significativos en el rendimiento durante la última década (Fig. 7).

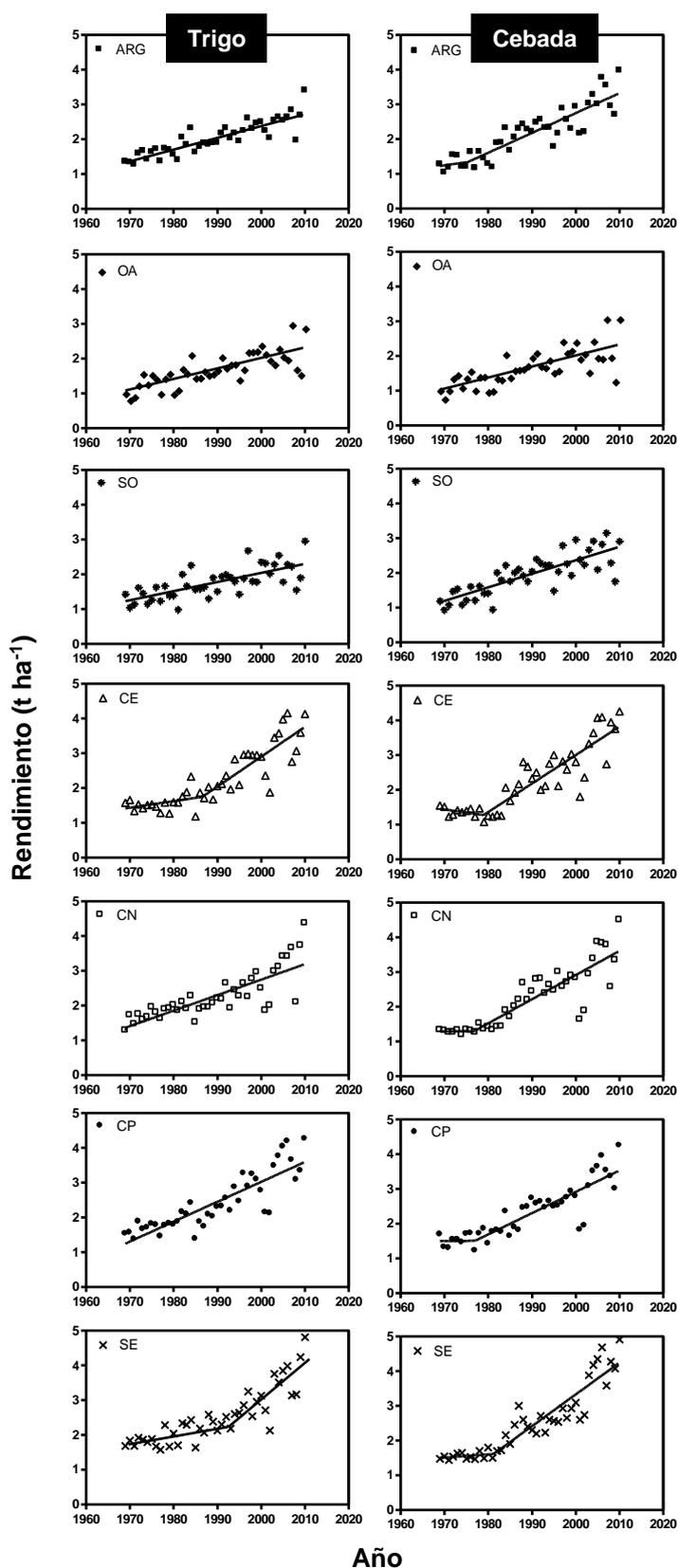


Figura 7. Rendimiento en función de los años para las distintas regiones analizadas para los cultivos de trigo y cebada. Las líneas llenas en cada una de las figuras representan al ajuste de las regresiones lineales o bi-lineales según corresponda. En la Tabla 1 se detallan los parámetros de los ajustes de regresión.

Tabla 1. Valores de los ajustes de regresión realizados en la Figura 7 utilizando ecuaciones lineales o bi-lineales correspondientes a la relación entre rendimiento y los años para Argentina y las distintas regiones consideradas: primer (b1) pendiente, segunda (b2) pendiente (en caso que el ajuste haya correspondido a una ecuación bi-lineal), año de quiebre en el que se produjo el cambio de la pendiente b1 a la pendiente b2 en los ajustes bi-lineales, y coeficiente de correlación R².

Cultivo	Parámetro	ARG	OA	SO	CE	CN	CP	SE
Trigo	b1 (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)	34	30	26	19	45	57	29
	b2 (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)	---	---	---	86	---	---	99
	Quiebre (año)	---	---	---	1987	---	---	1993
	Coeficiente R ²	0,76	0,59	0,51	0,80	0,65	0,75	0,80
Cebada	b1 (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)	18	32	39	0	0	0	9
	b2 (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)	57	---	---	82	70	61	192
	Quiebre (año)	1975	---	---	1979	1977	1977	1981
	Coeficiente R ²	0,80	0,56	0,66	0,81	0,78	0,78	0,86

En el caso de cebada, la ganancia de rendimiento a nivel nacional para el período 1969-2010 presentó dos fases: fue de 18 kg ha⁻¹ año⁻¹ hasta mediados de la década de 1970 y a partir de allí se incrementó hasta 57 kg ha⁻¹ año⁻¹ (Fig. 7). Es decir que a nivel nacional la ganancia anual de rendimiento para el período 1969-2010 fue superior en cebada que en trigo y las diferencias se acentuaron durante los últimos años (Fig. 7). Para la mayoría de las regiones analizadas, la evolución de los rendimientos en cebada presentó, al igual que lo observado a nivel nacional, una primera fase de nula a baja ganancia de rendimiento (hasta mediados de los '70) y una segunda fase de incremento sostenido del rendimiento. Similar a lo observado en el caso de trigo, las menores ganancias en el rendimiento de cebada se observaron (considerando la segunda fase) en las regiones de OA y SO con valores de 32 y 39 kg ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente, mientras que en el resto de las regiones las mayores ganancias se registraron en el SE (92 kg ha⁻¹ año⁻¹) seguido por CE y CN (82 y 70 kg ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente) y finalmente en la región CP la ganancia de rendimiento fue de 61 kg ha⁻¹ año⁻¹. Esta tendencia de aumento en los rendimientos logrados en condiciones productivas a partir de mediados de la década del '70 concuerda con el análisis de variaciones en el rendimiento potencial del cultivo asociado al proceso de mejoramiento genético (Abeledo et al., 2003a). Por efecto del mejoramiento genético, el rendimiento potencial del cultivo de cebada en Argentina se mantuvo estable en ca. 5,3 t ha⁻¹ hasta 1973 y a partir allí se incrementó a una tasa de ganancia genética absoluta de 20 kg ha⁻¹ año⁻¹ (ganancia relativa de 0,36 % año⁻¹; Abeledo et al., 2003a) hasta alcanzarse rendimientos potenciales de ca. 10 t ha⁻¹ (Miralles et al., 2011). Es decir que, en la actualidad, los rendimientos logrados productivamente representan alrededor de un tercio de los rendimientos potenciales del cultivo.

El análisis de los cambios en rendimiento evidenciados en los últimos 10 años permite reflejar con claridad la diferente potencialidad de las distintas regiones consideradas (Fig. 8). Áreas como el OA y el SO muestran los menores rendimientos, mientras que el SE es la región de mayor potencialidad para ambas especies. Las regiones CE, CN y CP presentan rendimientos intermedios (Fig. 8).

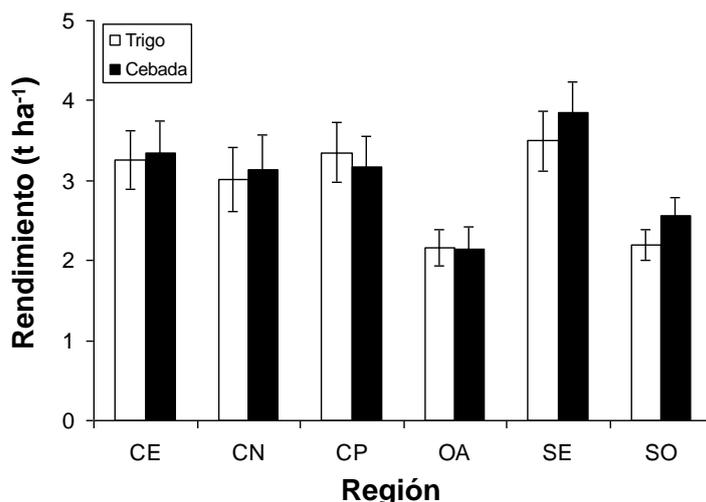


Figura 8. Rendimientos de trigo y cebada para las distintas regiones analizadas. Las barras verticales indican un desvío estándar. Datos promedio para el período 2000-2010.

Debido a que la potencialidad de las regiones analizadas es contrastante, los rangos de rendimientos y la probabilidad de obtener distintos rendimientos varían entre ellas. Así, áreas como el OA y SO presentan rangos de rendimiento de 0,8 a 3,1 t ha⁻¹, mientras que en el resto de las regiones el rango de rendimientos explorados oscila entre 1,1 a 4,9 t ha⁻¹ para ambas especies (Fig. 9).

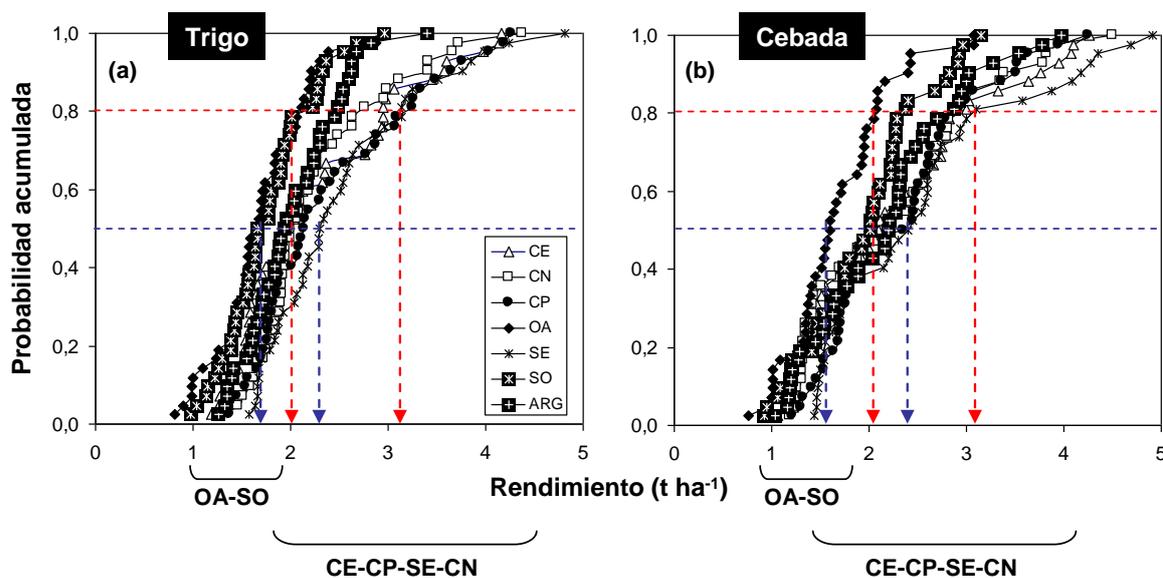


Figura 9. Probabilidad acumulada para rendimiento en las distintas regiones analizadas. Las líneas punteadas azules y rojas indican la probabilidad de ocurrencia de un determinado rendimiento para los percentiles 50% y 80% de los años, respectivamente. Se incluyen además los rendimientos a nivel nacional para los cultivos de trigo y cebada (ARG).

A modo de ejemplo, en 1 de cada 2 años (50% de probabilidad) el rendimiento obtenido en regiones como el OA es de 1,6 t ha⁻¹, mientras que en el SE para la misma probabilidad el rendimiento a ser obtenido es de 2,3 t ha⁻¹ (Fig. 9). Si bien las tendencias son similares, en áreas de menor oferta hídrica, como el SO, se observan diferencias en los valores absolutos en el rendimiento obtenido entre ambas especies. Así, mientras que trigo alcanza rendimientos de ca. 1,7 t ha⁻¹, cebada presenta 2,0 t

ha⁻¹ para la misma probabilidad (50%) (Fig. 7). En el otro extremo, mientras que trigo presenta para el 20% de los mejores años rendimientos mayores a las 3,1 t ha⁻¹ en las áreas de SE, CN y CP, cebada muestra para la misma probabilidad valores de rendimiento ligeramente mayores en el SE (3,1 t ha⁻¹) respecto del CE (2,1 t ha⁻¹) y CN (2,9 t ha⁻¹).

En función de la información descrita anteriormente queda demostrado que el rendimiento alcanzable con los cultivares actuales de cebada no es menor al de trigo. Así, es posible concluir que el potencial de rendimiento de las variedades actuales de cebada es similar al de los cultivares actuales de trigo. Más aún, se observa una leve tendencia hacia mayores rendimientos en cebada respecto de trigo aunque dichas diferencias no son significativas. De todas formas, las mayores diferencias en rendimiento se obtuvieron entre las regiones analizadas más que entre especies.

Eficiencia en el uso del agua (EUA) en trigo y cebada

Las EUA calculadas a partir de los datos de rendimiento y la disponibilidad de agua durante el ciclo ontogénico de cada cultivo, asumiendo en este trabajo las precipitaciones ocurridas entre el 1ro de mayo hasta el 15 de diciembre, no mostró diferencias significativas entre ambas especies. De hecho, el contraste entre las EUA de cebada en función de las de trigo mostró un coeficiente de correlación de 0,71 y una pendiente (0,96) y ordenada al origen (0,53) que no difirieron significativamente de 1 y 0, respectivamente, indicando que no hubo en promedio para las zonas analizadas diferencias en la EUA entre ambas especies (Fig. 10).

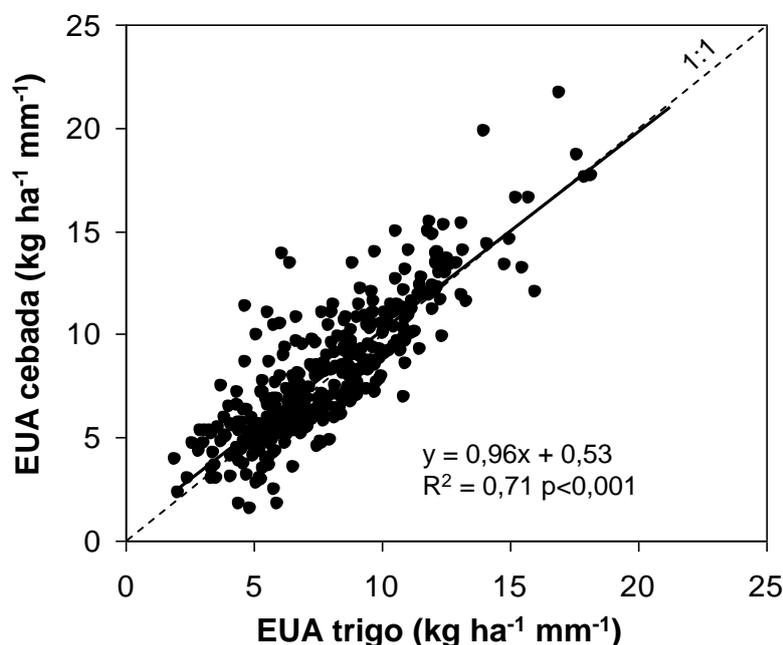


Figura 10. Eficiencia en el uso del agua en cebada y trigo. La línea llena indica el ajuste de la regresión mientras que la línea punteada refleja la relación 1:1.

El análisis de la EUA para los diferentes percentiles mostró similares valores entre especies para el conjunto de los datos (7,3 y 7,4 kg mm⁻¹ para trigo y cebada, respectivamente) y para el percentil 10% (4,2 y 4,3 kg mm⁻¹, para trigo y cebada, respectivamente) que representa los menores valores de EUA. Para el percentil 90%,

que representa la mayor EUA, mostró una ligera mayor eficiencia (6%) cebada ($14,1 \text{ kg mm}^{-1}$) respecto de trigo ($13,3 \text{ kg mm}^{-1}$) (Fig. 11).

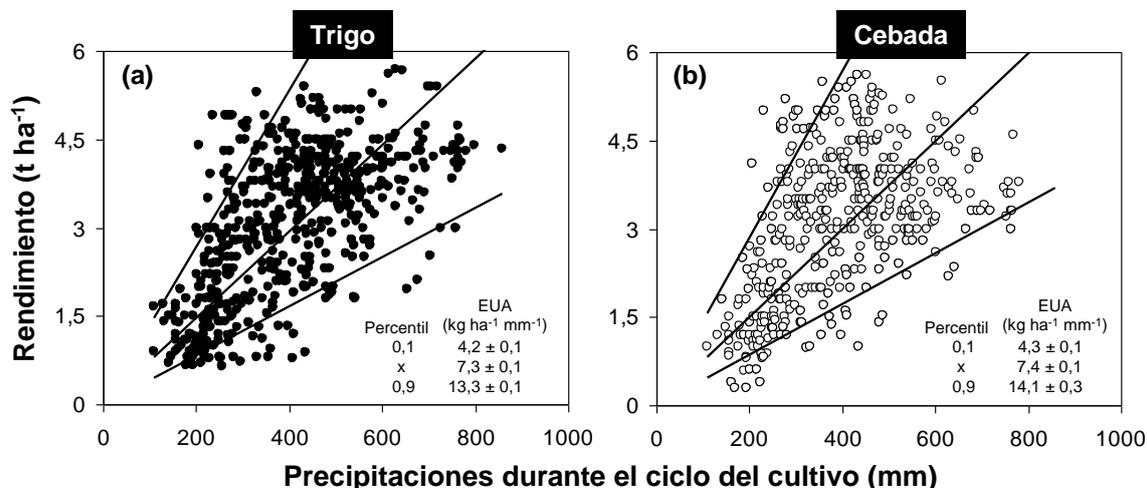


Figura 11. Rendimiento en función de las precipitaciones durante el ciclo del cultivo (cuantificadas desde el 1ro mayo al 15 de diciembre) para trigo (a) y cebada (b). Las líneas llenas indican los ajustes de regresión para el percentil 10% y 90% para los extremos y la línea llena central para el conjunto de los datos.

El análisis de los distintos percentiles confirma lo observado en el cálculo general de la EUA ya que no se registraron diferencias importantes en la EUA, con excepción del percentil 90% que muestra una ligera ventaja de cebada respecto de trigo.

Observaciones finales

Trigo y cebada comparten su estación de crecimiento a nivel productivo. El análisis de las características de sus sistemas de cultivo constituye una herramienta para evaluar estrategias tendientes a incrementar sus niveles de producción. En el presente capítulo se consideró como caso de estudio la evolución de ambos cultivos en Argentina considerando las variaciones en producción, superficie cosechada y rendimiento durante el período 1969-2010 en base a datos publicados por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca argentino (MAGyP, 2011).

La dinámica de la superficie asignada en Argentina a trigo o cebada presentó fuertes contrastes a lo largo de los años: la superficie de trigo tendió a mantenerse estable durante todo el período hasta que comenzó a descender a partir del año 2001; por el contrario, a partir de mediados de la década de 1980 el cultivo de cebada evidenció una fuerte expansión geográfica. En la actualidad, la superficie destinada al cultivo de cebada representa alrededor de un 20% de la destinada al cultivo de trigo. La disminución de la superficie destinada a trigo se debió a aspectos climáticos (años con sequía) así como a políticas gubernamentales que desfavorecieron la realización del cultivo. El avance del cultivo de cebada se evidenció tanto en ambientes de baja como de alta productividad, sin que el aumento de la superficie destinada a cebada explique por sí mismo la disminución en el área destinada a trigo. Por consiguiente, la asignación de superficie a trigo o cebada a nivel nacional no presentó carácter competitivo. Cebada ha sido tradicionalmente considerado un cultivo con mejor comportamiento que trigo ante condiciones de baja oferta de recursos (i.e. sequía, baja disponibilidad de nitrógeno). Sin embargo, la proporción de superficie destinada a

uno u otro cultivo ha sido independiente de la calidad del ambiente productivo. Ello significa que trigo y cebada han sido cultivos aptos de ser incorporados como alternativas productivas dentro de los esquemas de rotación independientemente de las características de la zona en cuestión; siendo ello válido de ser extrapolado a ambientes análogos a los explorados en este estudio.

El rendimiento alcanzado por un cultivo constituye un factor determinante al momento de definir o no su realización. La evolución de los rendimientos de trigo y cebada en Argentina presentó marcadas diferencias entre especies. Para el período 1969-2010 la ganancia de rendimiento en trigo fue constante a lo largo de los años; en cebada, los rendimientos tendieron a mantenerse estables hasta mediados de la década de 1970 y a partir de allí se incrementaron a una tasa superior a la observada para trigo. Actualmente, los rendimientos medios nacionales son de 2,7 y 3,3 t ha⁻¹ para trigo y cebada, respectivamente. A nivel productivo el cultivo de cebada era destinado a los ambientes de menor productividad y con un acotado uso de insumos. El proceso de renovación de cultivares e introducción en Argentina de cultivares europeos de cebada (Cattaneo, 2011) determinó que en la actualidad los rendimientos de ambos cultivos sean equiparables y sin diferencias contrastantes en el uso de insumos. Los cultivares modernos de cebada presentan un alto grado de respuesta del rendimiento a la fertilización nitrogenada (Abeledo et al., 2003b) sin que ello redunde en la obtención de altos contenidos de proteína en grano (Passarella et al., 2003), los cuales son penalizados por los estándares de comercialización de cebada destinada a la industria maltera-cervecera. Es decir que dada la positiva respuesta del rendimiento a aumentos en la disponibilidad de recursos, tanto trigo como cebada son cultivos aptos de ser realizados con adecuado nivel de uso de insumos (debiéndose a su vez considerar los costos productivos).

Más allá de las eventuales diferencias en rendimiento entre trigo y cebada, la mayor variabilidad en rendimiento para un año dado estuvieron asociadas al efecto sitio. De forma tal que las variaciones entre zonas en suelo, temperatura y precipitaciones durante la estación de crecimiento fueron grandes moduladores del rendimiento final alcanzado. Trigo y cebada se caracterizaron por presentar eficiencias en el uso del agua mínimas semejantes (4,3 kg ha⁻¹ mm⁻¹) así como también similares EUA ante condiciones medias (7,4 kg ha⁻¹ mm⁻¹); sin embargo, cebada tendió a presentar una EUA máxima superior a la observada en trigo (14,1 y 13,3 kg ha⁻¹ mm⁻¹, respectivamente). La mejora en la eficiencia del uso del agua constituye una estrategia para incrementar tanto el rendimiento potencial del cultivo (Condon et al., 2004; Tambussi et al., 2007) como el logro a nivel productivo (Angus et al., 2001; Tuberosa et al., 2007; Albrizio et al., 2010), máxime considerando el fuerte paralelismo existente entre la mejora del rendimiento potencial y el posteriormente evidenciado bajo condiciones de campo (Fischer y Edmeades, 2010).

Referencias

- Abeledo, L.G., Calderini, D.F., Slafer, G.A., 2003a. Genetic improvement of barley yield potential and its physiological determinants in Argentina (1944-1998). *Euphytica* 130, 325-334.
- Abeledo, L.G., Calderini, D.F., Slafer, G.A., 2003b. Genetic improvement of yield responsiveness to nitrogen fertilization and its physiological determinants in barley. *Euphytica* 133, 291-298.
- Albrizio, R., Todorovic, M., Maticb, T., Stellacci, A.M., 2010. Comparing the interactive effects of water and nitrogen on durum wheat and barley grown in a Mediterranean environment. *Field Crops Res.* 115, 179-190.

- Angus, J.F., 2001. Nitrogen supply and demand in Australian agriculture. *Aust. J. Exp. Agric.* 41, 277-288.
- Calviño, P.A., Sadras, V.O., Andrade, F.H., 2003. Development, growth and yield of late-sown soybean in the southern Pampas. *Europ. J. Agronomy* 19, 265-275.
- Cattaneo, M., 2011. Los mercados de cebada cervecera en la Argentina y en el mundo. En: Miralles, D.J., Benech-Arnold, R.L., Abeledo, L.G. (Eds.), *Cebada cervecera*. Editorial Facultad de Agronomía, Buenos Aires, pp. 275-284.
- Condon, A.G., Richards, R.A., Rebetzke, G.J., Farquhar, G.D., 2004. Breeding for high water-use efficiency. *J. Exp. Bot.* 55, 2447-2460.
- Cossani, M.C., Slafer, G.A., Savin, R., 2010. Co-limitation of nitrogen and water, and yield and resource-use efficiencies of wheat and barley. *Crop Past. Sci.* 61, 844-851.
- FAO, 2011. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Statistical Databases. <http://faostat.fao.org/>. Verificado noviembre 2011.
- Fischer, R.A., Edmeades, G.O., 2010. Breeding and Cereal Yield Progress. *Crop Sci.* 50: 85-98.
- GeolINTA, 2011. Suelos de la República Argentina. Visor de suelos. <http://geointa.inta.gov.ar/suelos/>. Verificado noviembre 2011.
- Jamieson, P.D., Martin, R.J., Francis, G.S., 1995. Drought influences on grain yield of barley, wheat, and maize. *New Zeal. J. Crop Hort. Sci.* 23, 55-66.
- MAGyP, 2011. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación Argentina. <http://www.minagri.gob.ar/site/index.php>. Verificado noviembre 2011.
- Miralles, D.J., Arisnabarreta, S., Alzueta, I., 2011. Desarrollo ontogénico y generación del rendimiento. En: Miralles, D.J., Benech-Arnold, R.L., Abeledo, L.G. (Eds.), *Cebada cervecera*. Editorial Facultad de Agronomía, Buenos Aires, pp. 1-34.
- Passarella, V.S. Savin, R., Abeledo, L.G., Slafer, G.A., 2003. Malting quality as affected by barley breeding (1944–1998) in Argentina. *Euphytica* 134, 161-167.
- SMN, 2011. Servicio Meteorológico Nacional. Climatología. Mapas normales. <http://www.smn.gov.ar>. Verificado noviembre 2011.
- Tambussi, E.A., Bort, J., Araus, J.L., 2007. Water use efficiency in C3 cereals under Mediterranean conditions: a review of physiological aspects. *Ann. App. Biol.* 150, 307-321.
- Tuberosa, R., Giuliani, S., Parry, M.A.J., Araus, J.L., 2007. Improving water use efficiency in Mediterranean agriculture: what limits the adoption of new technologies? *Ann. App. Biol.* 150, 157-162.

La producción de trigo y cebada en los valles altos de México: Estado actual y perspectivas.

Estrada-Campuzano Gaspar, Morales-Rosales Edgar Jesús, Martínez-Rueda Carlos Gustavo.

Introducción

En México, los cereales de grano pequeño (trigo y cebada) se siembran en condiciones de riego y temporal. Durante la década del 2000 se redujo el área irrigada debido a problemas fitopatológicos, escasez de agua y baja rentabilidad ocasionando la importación de grano para surtir la demanda nacional (Rodríguez et al., 2008). En este sentido, la producción de trigo y cebada en los valles altos de México se realiza bajo condiciones de secano en climas templados, húmedos y subhúmedos y en alturas que oscilan entre 2000 y 3000 msnm. La precipitación pluvial en esta región ocurre entre los meses de mayo a octubre y es del orden de 350 a 800 mm. En esta región se siembran alrededor de 50, 000 ha de trigo y cerca de 190, 000 de cebada (Fig.1), con rendimientos que fluctúan entre 2.0 y 1.8 t ha⁻¹, respectivamente (Fig. 2). En este capítulo se discutirán en primera instancia los cambios en los rendimientos obtenidos (RO) por los productores y se relacionaran algunas de las principales limitantes de la producción de trigo y cebada en esta región. La discusión de estos factores será en función de los conceptos eco fisiológicos que nos permiten entender mejor a los cultivos en términos de captación de los recursos disponibles (agua, luz y nutrientes) y la eficiencia de como dichos recursos son transformados en biomasa por el cultivo. Se describe cuáles pueden ser las oportunidades de uso de estos conceptos en la región; que se ha hecho respecto a su utilización en maximizar los rendimientos y cuáles serían las oportunidades que se tienen al usar a la ecofisiología como una herramienta para incrementar los rendimientos obtenibles por los agricultores en la zona.

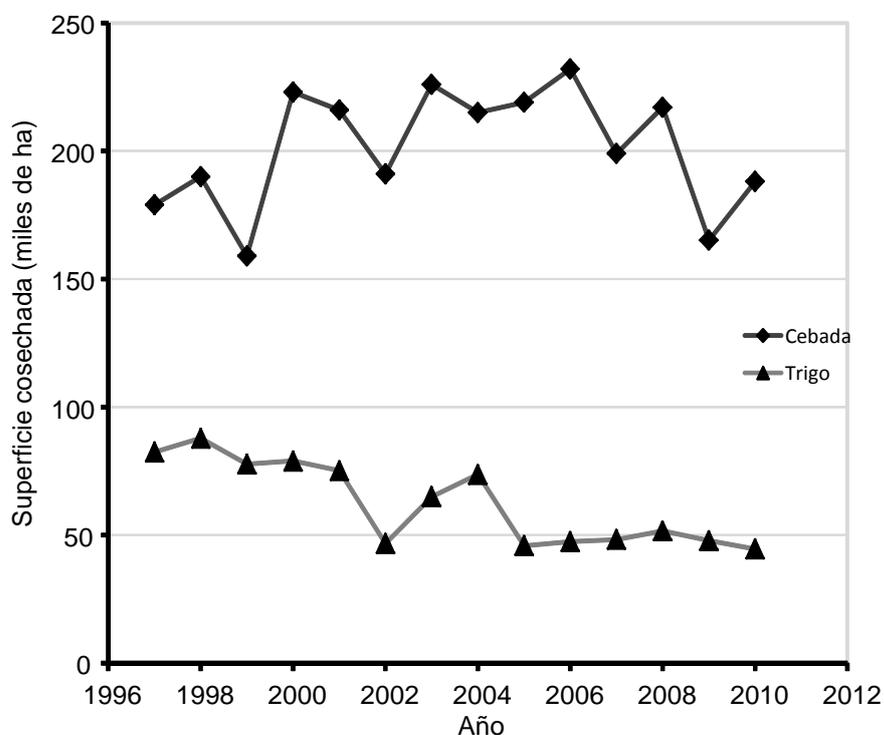


Fig 1. Superficie cosechada de trigo y cebada durante los últimos 14 años, en los valles altos de México.

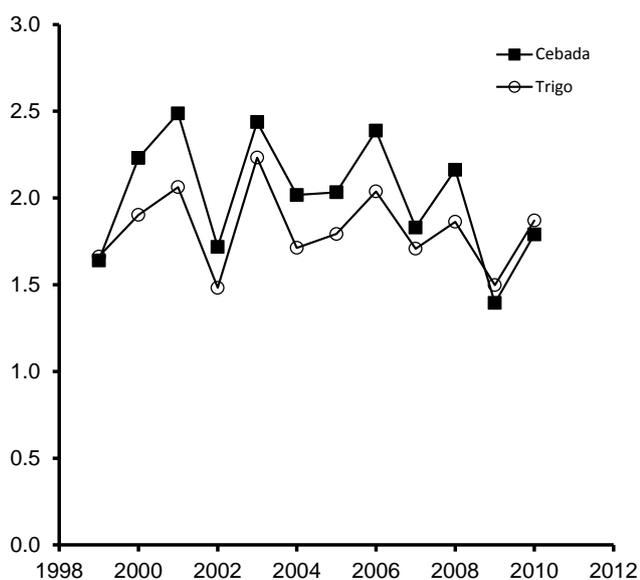


Fig. 2. Rendimientos obtenidos por los productores de trigo y cebada en los últimos 13 años, en los valles altos de México.

Condiciones agroecológicas de la región

Las condiciones de clima constituyen una problemática compleja para el cultivo de cereales de grano pequeño bajo secano, ya que las principales limitantes para la producción son las heladas tempranas y la sequía en diferentes etapas de desarrollo (Moreno y Villaseñor, 1993). En este sentido, la producción de trigo en los valles altos de México se realiza en pequeñas áreas aisladas y contrastantes de cinco estados que son: Puebla, Tlaxcala, Hidalgo, México y Querétaro (Cuadro 1).

En el Cuadro 1 se puede apreciar que de las 12 localidades presentadas, solamente en cuatro la precipitación pluvial es mayor a los 600 mm, en seis la lluvia oscila entre 513 y 593 mm y en dos se registran precipitaciones inferiores a 500 mm. De acuerdo con estas tendencias, se estima que en aproximadamente el 66,6% del área destinada al cultivo de trigo de temporal en México se registra con deficiencias hídricas en la planta en una o más etapas de desarrollo. La temporada de lluvias en los ambientes húmedos, subhúmedos y áridos ocurre a principios, mediados y finales de junio, respectivamente. En este orden de ideas, la agricultura de secano depende de la precipitación pluvial que ocurre en la estación de crecimiento de los cultivos como fuente única de agua; la obtención de mejores rendimientos depende de su uso eficiente.

Tabla 1. Características de altitud, temperatura, precipitación pluvial y tipo de clima de localidades productoras de trigo de temporal en los valles altos del centro de México.

Estado	Localidad	Altitud (msnm)	Temperatura Media (°C)	Precipitación Anual (mm) Jun-Oct (promedio)	Clima
Puebla	Oriental	2,345	16,8	513	Árido
Tlaxcala	Huamantla	2,553	15,5	568	Templado subhúmedo
Tlaxcala	Apizaco	2,408	13,9	753	Templado subhúmedo*
Tlaxcala	Tlaxco	2,444	13,8	593	Templado subhúmedo*
Hidalgo	Apan	2,501	15,0	537	Templado subhúmedo*
Hidalgo	Pachuca	2,435	14,2	330	Árido
México	Amecameca	2,470	14,4	906	Templado húmedo*
México	Polotitlán	2,100	16,7	544	Templado subhúmedo*
México	Teotihuacán	2,294	14,8	488,5	Árido
México	Toluca	2,675	12,7	719	Templado húmedo
México	Atlacomulco	2,500	13,7	687	Templado subhúmedo

* = Presencia de sequía a mitad del verano

Fuente: Villaseñor y Espitia (2000)

Por otro lado, la temperatura también es un factor importante para lograr un buen rendimiento de grano, y en general, es limitante en todas las áreas productoras, incluso en las de clima semicálido. Los efectos de las temperaturas extremas al rango óptimo fisiológico de la planta para su desarrollo en las diferentes etapas de su ciclo provocan cambios de diferente magnitud. En este sentido, en la región de los valles altos de México el riesgo de temperaturas extremas en algunas etapas del cultivo es poco probable debido a la ubicación altitudinal. Sin embargo, si es bastante común la presencia de bajas temperaturas principalmente durante el llenado de grano, de tal forma que la probabilidad de que se presenten heladas tempranas durante el mes de septiembre es de 5%, mientras que para el mes de octubre es de 13,3%. Sobre el efecto de la incidencia de las bajas temperaturas, es conveniente indicar que basta que se presente tan solo una helada durante el periodo que va desde el espigamiento (pre-antesis) a grano masoso para que el daño sea extremo (Villaseñor y Espitia, 2000).

En síntesis, el productor de trigo y cebada en la región bajo estudio dispone con cierto margen de seguridad de aproximadamente de 100 a 120 días para que su cultivo no se vean afectado por temperaturas extremas. El menor periodo de crecimiento se registra en los ambientes críticos (semiáridos), mientras que en los climas templados subhúmedos y húmedos se dispone de mayor periodo (Villaseñor y Espitia, 2000).

Principales factores limitantes de la producción de trigo y cebada en los valles alto de México

Factores bióticos

Dentro los factores bióticos se tienen las enfermedades causadas por royas (*Puccinia spp*), tizones (*Tilletia*) y manchas foliares (*Septoria*) (Huerta y Singh, 2000), lo cual se atribuye a que el sistema de producción se realiza bajo condiciones de temporal donde el exceso de humedad del suelo y la humedad relativa favorecen la presencia de dichos patógenos, disminuyendo considerablemente el rendimiento de grano (Leyva et al., 2006). En esta región las enfermedades que atacan a los cultivos de trigo y cebada han sido estudiadas en términos de la severidad e incidencia con la que ocurren en las diferentes regiones. Sin embargo, como lo menciona Carretero et al. (2011), los modelos empíricos que consideran tanto la severidad como la incidencia de la enfermedad en la mayoría de los casos no pueden ser extrapolados a todas las condiciones ambientales. Lo anterior dado que dichas variables dependen de la temporada de crecimiento y localidades, la susceptibilidad del cultivar, la rotación de cultivos y fecha de siembra, entre otros (Polley and Thomas, 1991). En este sentido, Rodríguez-Contreras et al. (2008) al estudiar el efecto del tizón foliar (*Mycosphaerella graminicola*) en trigo en dos ambientes contrastantes de los valles altos de México (Estado de México y Puebla), observaron que las pérdidas en el rendimiento de grano (44%) están relacionadas negativamente con el porcentaje de área foliar dañada y que las reducciones en el rendimiento dependen del ambiente (año y localidad) (Fig. 3). Con esta forma de evaluar las enfermedades no es posible apreciar la magnitud de daño del patógeno sobre las enfermedades ni el grado de afectación al aparato fotosintético. Para poder entender mejor el impacto de las enfermedades foliares en trigo y cebada se ha sugerido el uso de variables ecofisiológicas y patológicas (Carretero et al., 2010). En relación con las primeras no existen estudios que evalúen el impacto de las enfermedades sobre la capacidad de interceptación del cultivo (índice de área foliar, arquitectura del cultivo y distribución vertical de las enfermedades) o sobre la eficiencia de conversión de la radiación en biomasa (tasa de fotosíntesis y procesos relacionados, flujo de asimilados, entre otros). En este sentido, en los valles altos de México, el uso de la ecofisiología incrementaría el entendimiento de las enfermedades desde una perspectiva más mecanística que empírica.

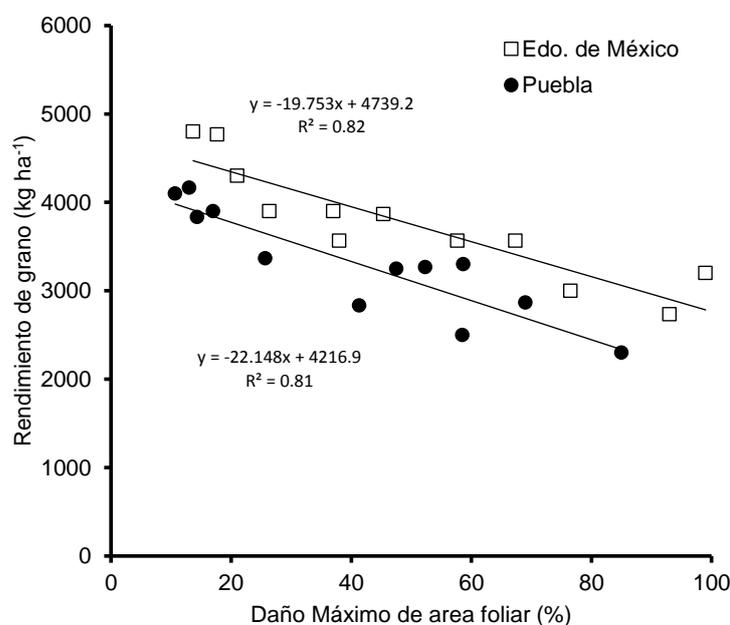


Fig. 3. Relación entre el rendimiento y daño del área foliar para dos localidades. Promedio de dos tratamientos, seis variedades de temporal y tres ciclos de producción (ambientes). P-V/1997-99.

Factores abióticos

Densidad de población

La densidad de población consiste en el arreglo uniforme del número de semillas en un área determinada con el fin de proporcionar a cada planta una distribución equitativa de los insumos para la producción agrícola. En ese sentido, una adecuada densidad de siembra, en función de los factores agroclimáticos y del conocimiento del genotipo a utilizar localmente que inciden en el crecimiento de las plantas, es importante para obtener una producción óptima, conservar la calidad industrial y obtener un mayor beneficio económico (García *et al.*, 2003; Arreola *et al.*, 2004).

El manejo de cebada en el altiplano central de México en los últimos veinte años incluía el uso de altas densidades de siembra hasta de 200 kg ha⁻¹ de semilla, lo que propiciaba problemas de “acame” y por consiguiente, pérdidas en el rendimiento (Gómez y Magallanes, 2004). En la actualidad, estudios relacionados al manejo de menores densidades de plantas muestran que además de evitar problemas de acame principalmente en el llenado de grano, disminuyen gastos innecesarios en la semilla usada para la siembra, sin demérito en el rendimiento (García *et al.*, 2003), esto debido a que en estas condiciones, la cebada tiene una mayor capacidad de amacollamiento y el grano producido presenta una mayor calidad física y fisiológica, situación ampliamente demostrada en la generalidad de genotipos varietales de cebada en diferentes ambientes, según lo reportado en varios estudios a través del tiempo (García *et al.*, 2001). Moreno *et al.* (1997), coinciden con lo anterior y mencionan que el número de tallos por planta aumentó en forma proporcional a medida que se redujo la densidad de población debido al decremento de la competencia entre plantas. Gómez *et al.* (2001) mencionan no haber encontrado respuesta positiva a la siembra de más de 120 kg ha⁻¹ de cebada en diferentes localidades del altiplano central de México y con distintos cultivares.

En relación al trigo, resultados de investigaciones han mostrado que las necesidades de semilla son menores cuando la siembra de este cereal se realiza en surcos. En los métodos tradicionales se recomienda de 110-120 kg ha⁻¹, cuando el terreno está libre de maleza; sin embargo, la realidad regional muestra que en un 75 % de los casos hay problemas de maleza con diferentes grados de intensidad; hecho que conduce al productor a sembrar en realidad 150 ó hasta 200 kg ha⁻¹, con media de 160 kg ha⁻¹. Esta cantidad tan fuerte de semilla contrasta con la encontrada como óptima en los ensayos de trigo en surcos. En dichos ensayos se encontró que la cantidad de semilla necesaria son 40 kg ha⁻¹ para el método de surcos con una hilera (Tabla 2). De esto se desprende que el uso del método de siembra en surcos ahorra cuando menos 100 kg de semilla ha⁻¹ (Moreno *et al.*, 2006).

Tabla 2. Efecto de la densidad de siembra sobre el rendimiento de trigo, en dos métodos de siembra.

Densidad de siembra (kg ha ⁻¹)	Método de Siembra	
	Surcos (kg ha ⁻¹)	Convencional (kg ha ⁻¹)
40	5,615	
80	5,566	5,046
120	5,668	5,305
160		5,534
DMS _{0,05}		96,0

Fuente: Moreno *et al.* (2006).

Manejo de la fertilización nitrogenada

La fertilización nitrogenada en los cultivos de grano es muy importante dado su impacto sobre la expansión foliar, capacidad de interceptar radiación y sobre la eficiencia de uso de la radiación (Trapani y Hall, 1996; Uhart y Andrade, 1995). En los valles altos de México las recomendaciones de fertilizante nitrogenado hechas por el Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas y pecuarias (INIFAP) no va más allá de 80 kgN ha^{-1} (Fig. 4), en esta figura se aprecia que la recomendación del INIFAP está basada en el hecho de que no encuentran respuesta positiva al incremento de Nitrógeno. Lo anterior, contrasta con lo mencionado por Barreto y Bell (1995), quienes al evaluar diferentes dosis de fertilización nitrogenada en 6 ambientes, mencionan que la mejor respuesta del cultivo de trigo en los valles altos de México se encuentra entre 76 y 200 kgN ha^{-1} . Por lo tanto, los bajos rendimientos obtenidos en esta región pueden atribuirse en parte a la baja dosis de nitrógeno aplicada, lo cual estaría limitando la capacidad del cultivo de interceptar radiación y su eficiencia de conversión en materia seca. Algunas evidencias recientes (Hernández et al., datos sin publicar) en la zona indican que con 100 kgN ha^{-1} , si bien se logra el índice de área foliar crítico (aquel necesario para interceptar el 95% de la radiación incidente) el periodo de tiempo en el cual se mantienen estos valores es muy reducido (Fig. 5a), mientras que con 200 y 300 kgN ha^{-1} , el IAF crítico se logra en etapas tempranas de crecimiento y su duración es por un mayor periodo de tiempo. Contrariamente a lo observado en trigo en el caso de la cebada resultados recientes (Castro et al. Datos sin publicar) indican que dosis de 150 kgN ha^{-1} , no permiten que el cultivo alcance el IAF crítico (Fig. 5b).

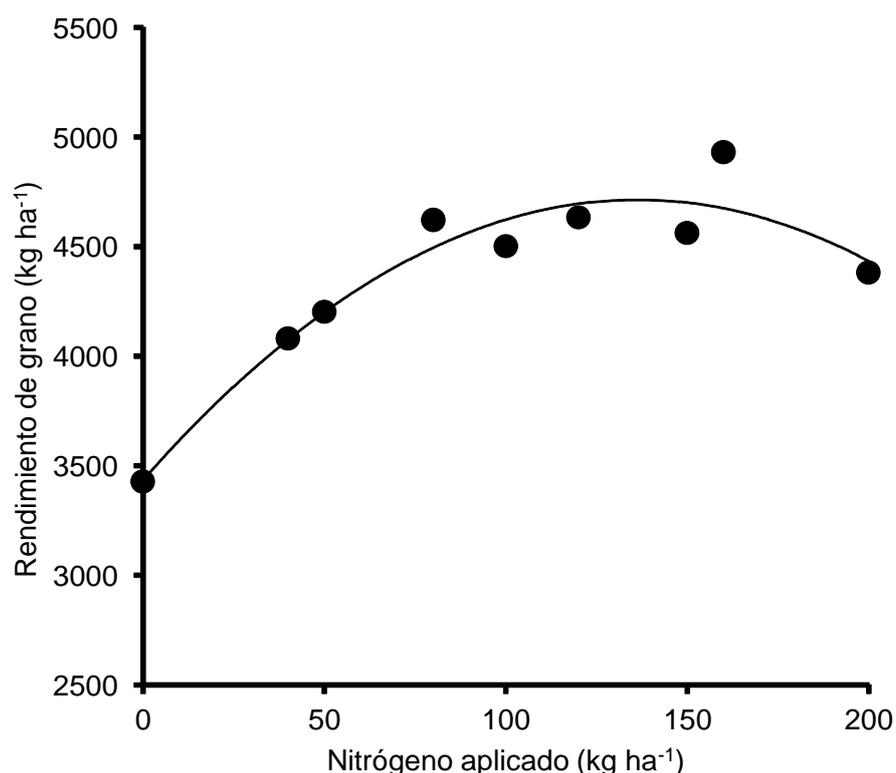


Fig. 4. Relación entre el rendimiento de grano y la cantidad de nitrógeno aplicado . Datos promedio de 10 localidades de los valles altos de México y en terrenos de productores.

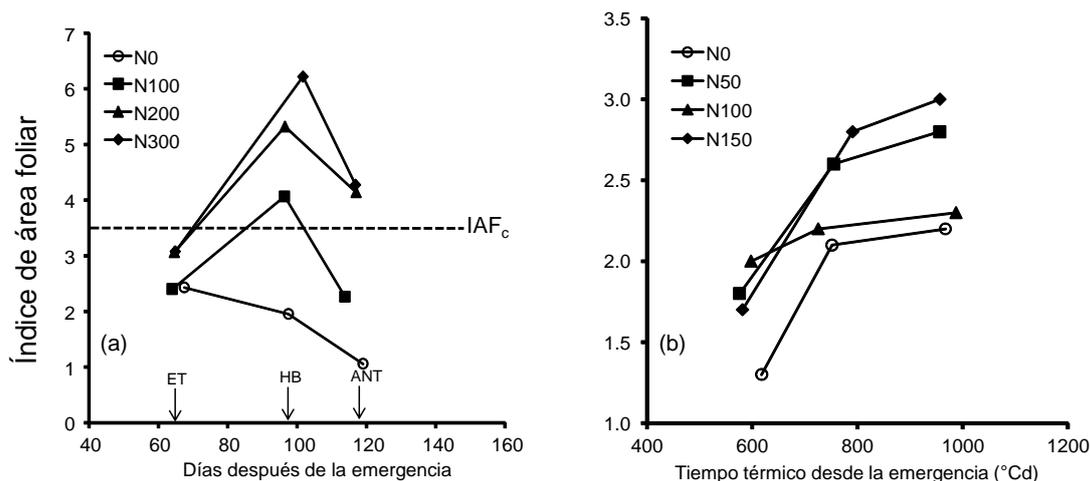


Fig. 5. Evolución del índice de área foliar en trigo (a) y cebada (b) creciendo en diferentes niveles de nitrógeno, en valles altos del centro de México. Datos en trigo son promedio de 9 cultivares y en cebada promedio de 3 cultivares.

Por otro lado, los rendimientos en la región se han mantenido casi constantes en función de año de liberación, mientras que el cambio en función de la fertilización nitrogenada ha sido muy marcado (Fig. 6). Lo anterior, remarca la importancia de la aplicación de nitrógeno a los cultivos de trigo y cebada para maximizar los rendimientos en la región.

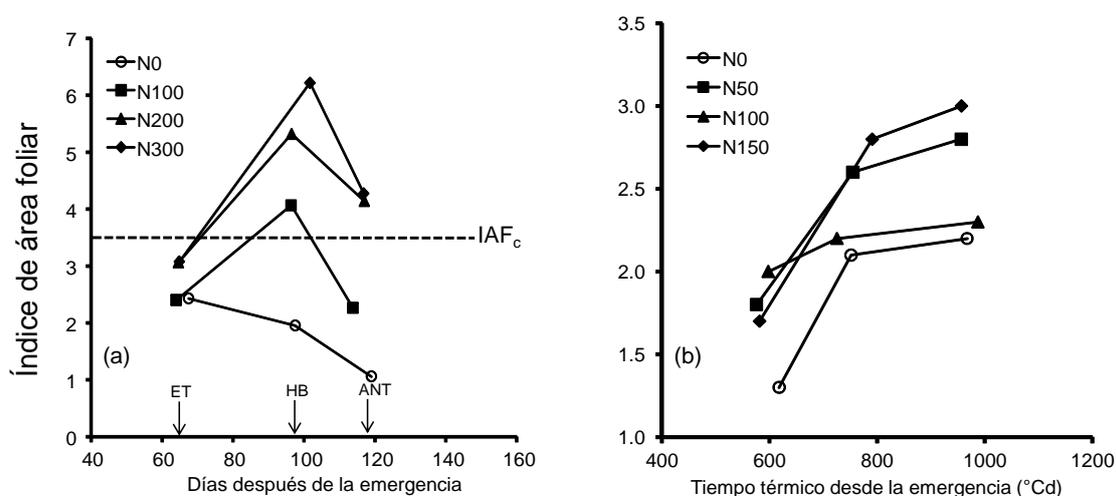


Fig. 5. Evolución del índice de área foliar en trigo (a) y cebada (b) creciendo en diferentes niveles de nitrógeno, en valles altos del centro de México. Datos en trigo son promedio de 9 cultivares y en cebada promedio de 3 cultivares.

Manejo del agua

La agricultura de secano depende de la precipitación pluvial que ocurre en la estación de crecimiento de los cultivos como fuente única de agua; la obtención de mejores rendimientos depende de su uso eficiente. En estas condiciones, las posibilidades de incrementar el rendimiento sin aumento en la cantidad de agua disponible para el cultivo, dependerán de las vías que permitan aumentar la eficiencia en el uso de la precipitación (López-Castañeda, 2006). En la Tabla 3, se muestran datos de un experimento en donde se midió la eficiencia en el uso de la precipitación en cereales de grano pequeño bajo condiciones de secano, en el cual se aprecia que ambos cereales tuvieron en promedio un rendimiento de grano similar, sin embargo, la eficiencia en el uso de la precipitación fue mayor en cebada. Por otra parte, la

expresión del rendimiento en trigo se debió a un mayor número de días a antesis y madurez fisiológica, y a una mayor cantidad de precipitación acumulada. El mejor ambiente para ambas especies fue Montecillo y los cultivares con mayor rendimiento de grano y eficiencia en el uso de la precipitación fueron la línea de cebada M-9578 (4312 kg ha^{-1} y $9,0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) y el cultivar de trigo México M-82 (3251 kg ha^{-1} y $6,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) (López-Castañeda, 2006).

Tabla 3. Días a antesis (DA), madurez fisiológica (MF), rendimiento de grano (RG), precipitación acumulada (PA) entre el mes de junio y la fecha de madurez fisiológica de los genotipos y eficiencia en el uso de la precipitación (EUP) en Tecámac y Montecillo, México.

CULTIVAR	TECÁMAC					MONTECILLO				
	DA	DMF	RG (kg ha^{-1})	PA (mm)	EUP ($\text{kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$)	DA	DMF	RG (kg ha^{-1})	PA (mm)	EUP ($\text{kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$)
CEBADA										
Centinela	57	108	807	313	2,3	53	97	2292	473	4,8
Cerro Prieto	60	110	908	313	2,4	59	99	2918	473	6,2
Celaya	64	109	1146	313	3,4	60	98	2967	473	6,3
M-9578	61	113	1681	313	5,1	63	105	4312	476	9,0
M-9310B	53	102	1276	310	3,8	50	94	2480	472	5,3
M-9645	57	104	820	313	2,3	55	97	2326	473	4,9
M-9717	54	99	1180	310	3,3	54	97	2718	473	5,8
Puebla	55	103	1090	310	2,9	52	95	2961	472	6,3
Tlaxcala	57	108	1433	313	4,1	54	98	3507	473	7,4
Porvenir	55	99	648	310	1,7	53	92	1761	466	3,8
TRIGO										
Toluca F-73	56	110	1054	310	2,8	54	103	2661	477	5,6
Lerma Rijo	59	112	902	313	2,2	57	113	2687	493	5,4
Zacatecas	65	120	871	321	1,6	60	118	2711	495	5,5
Zacatecas 2	59	115	1391	318	3,9	59	114	2822	493	5,7
Narro VF-74	58	114	835	315	2,1	59	115	2615	494	5,3
Cleopatra	57	112	1277	315	3,5	58	113	2532	490	5,2
Mixteco S-82	61	117	893	321	1,2	59	117	2334	495	4,7
Mixteco M-82	62	117	1314	318	3,2	56	116	3251	495	6,6
Pavón	69	120	947	321	2,7	61	121	2873	495	5,8
DSH	11	6	371	2	0.7	3	3	434	4	0,9
(P<0,05)										

Fuente: López-Castañeda (2006)

López-Castañeda (2006) afirma que el rendimiento de grano de ambos cereales estuvo positiva y significativamente asociado con la cantidad de precipitación acumulada entre el mes de junio y la fecha de madurez fisiológica de los genotipos, en promedio de todos los cultivares y ambientes (RG = 6.3(PA) - 723, $r = 0.43^*$, $P < 0.05$). Los cultivares con mayor rendimiento de grano utilizaron mayor cantidad de lluvia acumulada durante la estación de crecimiento; esta relación positiva muestra la posibilidad de lograr incrementos en el rendimiento, asociados con el mejoramiento de la eficiencia en el uso de la precipitación. Una asociación positiva entre la lluvia registrada durante la estación de crecimiento y el rendimiento de grano se ha observado en diversos estudios conducidos en ambientes de secano (López-Castañeda y Richards, 1994; Sadras *et al.*, 2002; Araus *et al.*, 2003). El rendimiento de grano también estuvo relacionado positiva y significativamente con el número de días a madurez fisiológica, en promedio de todos los genotipos y ambientes (RG = 30(DMF) - 1392, $r = 0.50^*$, $P < 0.05$). Los genotipos con mayor rendimiento de grano tuvieron mayor número de días a madurez fisiológica; esta asociación positiva entre el rendimiento de grano y el número de días a madurez fisiológica indica que una estación de crecimiento más larga o un mayor número de días a madurez podría dar oportunidad a incrementos en el rendimiento de grano, en tanto que haya disponibilidad de humedad en la etapa de crecimiento y formación del grano.

Consideraciones finales

La agricultura que se practica en los valles altos del centro de México generalmente se caracteriza por tener precipitación pluvial irregular y escasa, los suelos son delgados y su fertilidad baja, el periodo libre de heladas es corto y la presencia de factores bióticos como enfermedades, maleza y plagas constituyen un fuerte problema para establecer cultivos como maíz. Los cereales de grano pequeño constituyen una buena opción para los agricultores que siembran bajo condiciones de secano, sin embargo, los rendimientos obtenidos por estos son muy bajos. Dentro de las estrategias para incrementar los rendimientos por unidad de superficie en la región esta el mejoramiento genético, el cual debería estar orientado hacia aspectos ecofisiológicos para que los cultivos puedan explotar adecuadamente el ambiente donde se van a establecer. El manejo de nitrógeno también es fundamental para lograr una mayor cobertura y en consecuencia lograr altos índices de área foliar que permitan interceptar una mayor cantidad de radiación incidente, con las recomendaciones actuales, los cultivos de trigo y cebada no maximizan la interceptación por el canopeo. Por otra parte, las altas densidades de siembra que se utilizan en la actualidad y el nulo control de maleza traen como consecuencia problemas de acame reduciendo el rendimiento de grano. Asimismo, es necesario caracterizar la adaptación de los cultivares en cada una de las regiones agroclimáticas en función de la disponibilidad de agua y evaluar en términos de eficiencia cuales son los más aptos para la zona.

Referencias

- Araus, J. L., Villegas, D., Aparicio, N., García del Moral, L. F., El Haini, S., Rharrabti, Y., Ferrio, J. P., Royo, C. 2003. Environmental factors determining carbon isotope discrimination and yield in durum wheat under Mediterranean conditions. *Crop Sci.* 43: 170-180.
- Arreola, T.J.M., García, J.J., Gámez, F.P., Zamora, M. 2004. Cebada maltera en surcos a doble hilera: Tecnología versátil para ahorrar agua, sostener la

- calidad de la semilla y optar a la competitividad internacional. SAGARPA-INIFAP. México.
- Balbuena-Melgarejo, M.A., González-Huerta, A., Rosales-Robles, E., Domínguez-López, A., Franco-Mora, O., Pérez-López, D.J. 2008. Identificación de genotipos sobresalientes de trigo en el valle de Toluca, México. *Agric. Técnica Méx.* 34: 257-261.
- Barreto, H.J., Bell, M.A. 1995. Assessing risk associated with N fertilizer recommendations in the absence of soil test. *Fertilizer Res.* 40: 175-183.
- Carretero, R., Bancal, M.O., Miralles, D.J. 2011. Effect of leaf rust (*Puccinia triticina*) on photosynthesis and related processes of leaves in wheat crops grown at two contrasting sites and with different nitrogen levels. *Eur. J. Agron.* 35: 237-246.
- Carretero, R., Serrago, R.A., Bancal, M.O., Perelló, A.E., Miralles, D.J. 2010. Absorbed radiation and radiation use efficiency as affected by foliar diseases in relation to their vertical position into the canopy in wheat. *Field Crops Res.* 116: 184-195.
- García, R.J.J., Gámez, F.P., Arreola, J.M., Zamora, M., Solano, S. 2003. Producción de semilla de cebada maltera en surcos a doble hilera. INIFAP. Folleto Técnico No. 4.
- Gómez, M.R., Magallanes, E.A. 2004. Impacto económico y potencial del uso de bajas densidades de siembra en cebada maltera de temporal en el altiplano Hidalguense. INIFAP. Folleto Técnico No. 3.
- Gomez, M.R.A., Turrent, F., Ortiz, S.C., Peña, B. 2001. Productividad en cebada maltera. II. Analisis de las interacciones de seis factores de la producción. *Agricultura Técnica de México* 27: 95-105.
- Huerta, E. J., y R. Singh. 2000. Las royas del trigo. *In: Villaseñor M., H. E., y E. Espitia. R. (eds.) El Trigo de Temporal en México.* SAGAR, INIFAP, CIR-CENTRO y CEVAMEX. México. pp: 231-251.
- Kligman, G., Ashton, F. 1982. Estudio de las plantas nocivas. Principios y Prácticas, México. Editorial Limusa. 449pp.
- Leyva, M.S.G., Gilchrist-Saavedra, L., Zavaleta-Mejía, E., Khairallah, M. 2006. Yield losses in wheat (*Triticum aestivum* L.) genotype inoculated with single and mixed isolates of *Septoria tritici* Rob Ex Desm. *Agrociencia* 40: 315-323.
- López-Castañeda, C. 2006. Eficiencia en el uso de la precipitación en cereales en ambientes de secano. *TERRA Latinoamericana* 24: 477-487.
- López-Castañeda, C., Richards, R. A. 1994. Variation in temperate cereals in rainfed environments. III. Water use and water-use efficiency. *Field Crops Res.* 39: 85-98.
- Medina-Cazares, T., Rosales-Robles, E. 2000. Manejo integrado de maleza en trigo de temporal. En: *El trigo de temporal en México.* M.H.E. Villaseñor., R.E. Espitia (eds). INIFAP-Produce. México. pp. 85-98.
- Moreno, G.R., Villaseñor, M.H.E. 1993. Trigo de temporal. En: Márquez, S.F (ed). *Producción y genotecnia de plantas autogamas.* AGT editor. México DF, México. pp. 195-211.
- Moreno, R.O., Salas, G.M., Mendoza, S. Siembra de trigo en surco para el valle de Mexicali. CIANO, INIFAP. México. 14p
- Moreno, R.O.H., Salazar, J.M., Sayre, K., Ortiz, I., Camacho, M., Felix, P., Carrillo, L.E. 1997. La densidad de población en relación a la producción de cereales de grano pequeño, en el noroeste de México. INIFAP. Folleto Técnico No. 30.
- Polley, R.W., Thomas, M.R. 1991. Surveys of diseases of winter wheat in England and Wales, 1976–1988. *Ann. Appl. Biol.* 119: 1–20.
- Rodríguez-Contreras, E., Villaseñor-Mir, H.E., Leyva-Mir, G., Huerta-Espino, J., Sandoval-Islas, J.S., Santos-Posadas, H.M. 2008. Efecto de *Septoria tritici* en el rendimiento de trigo de temporal en ambientes lluviosos de los valles altos centrales de México. *Agrociencia* 42: 435-442.

- Sadras, V., Roger, D. O'Leary, G. 2002. On-farm assessment of environmental and management constraints to wheat yield and efficiency in the use of rainfall in the Mallee. *Austr. J. Agric. Res.* 53: 587-598.
- Trápani, N., Hall, A.J. 1996. Effects of level of insertion and nitrogen supply on the expansion of leaves of field-grown sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Plant Soil* 184: 331-340.
- Uhart, S.A., Andrade, F.H. 1995. Nitrogen deficiency in maize: I Effect on crop growth development, partitioning, and kernel set. *Crop Sci.* 35:1376-1383
- Villaseñor, M.H.E., Espitia, R.E. 2000. Características de las áreas productoras de trigo de temporal: Problemática y condiciones de producción. En: *El trigo de temporal en México*. Villaseñor, M.H.E., Espitia, R.E (eds). INIFAP-Produce. México. pp. 85-98.

Productividad de biomasa, captura de recursos y sustentabilidad de trigo y cebada en ambientes de alto potencial de rendimiento del sur de Chile.

Daniel F. Calderini, Carolina Lizana, Patricio Sandaña, Ricardo Riegel

Instituto de Producción y Sanidad Vegetal, Facultad de Ciencias Agrarias,
Universidad Austral de Chile. Campus Isla Teja, Valdivia Chile.
Email: danielcalderini@uach.cl, carolina.lizana@uach.cl

Resumen

La producción de trigo y cebada en Chile ha mostrado aumentos paralelos, dados por el incremento en el rendimiento de ambos cultivos. Las estadísticas muestran un desplazamiento de estos cultivos hacia la zona sur, de mayor potencial de rendimiento para los cereales de invierno y proporcionalmente menos afectada por el cambio global de acuerdo a proyecciones hechas en Chile. Esta zona caracterizada por altos cuocientes fototermales alrededor de antesis, temperaturas frescas durante el llenado de granos, alta pluviometría y “suelos trumaos” ofrece condiciones óptimas para el rendimiento de trigo y cebada. En este ambiente se logran rendimientos cercanos a los 12 Ton ha⁻¹ en un corto período de crecimiento (alrededor de 120 días) lo que implica que la tasa de crecimiento de estos cereales en el sur de Chile, es de las más altas del mundo. Los altos rendimientos alcanzados han sido explicados por un elevado número de granos, asociado a altos valores de cociente fototermal alrededor de antesis y también a altos pesos de grano por temperaturas moderadas y adecuado abastecimiento hídrico durante el llenado de granos. Si bien la captura de recursos como la eficiencia en el uso de los mismos (i.e. radiación y nitrógeno) es alta en estas condiciones ambientales, una preocupación creciente es sostener y aumentar los rendimientos de estos cultivos de una manera sustentable, mas aún en el contexto de cambio climático global. En este sentido la variabilidad encontrada entre cultivares en rasgos como el área foliar alcanzada a antesis y la eficiencia en el uso de la radiación, así como el uso de líneas doble haploides, parece promisorio como herramienta para el mejoramiento genético y la selección de cultivares adaptados a estas condiciones. Por otra parte prácticas de manejo como la densidad de plantas y el arreglo espacial en trigo ha mostrado efectos positivos sobre la captura de recursos y el peso de los granos en estos ambientes, que deben ser explotadas para favorecer la sustentabilidad y optimizar los beneficios para los productores.

Palabras claves: Trigo, cebada, rendimiento potencial, radiación, nitrógeno, agua, cambio climático.

Introducción

La definición de ambientes de alto potencial está dada por la inexistencia de limitaciones para el crecimiento y desarrollo de una especie en un determinado ambiente (Evans y Fischer, 1999). Además, los sistemas productivos en un ambiente de alto potencial, se caracterizan por estar poco limitados tecnológicamente permitiendo a los cultivos expresar el potencial de rendimiento (genética, calidad de semillas, insumos, maquinaria, manejo agronómico, etc.). Por lo tanto, los altos rendimientos son el resultado de la interacción de los factores antes mencionados (interacción genotipo por ambiente).

Trigo es un cultivo que tradicionalmente ha sido sembrado en diversas zonas pero que ocupa ambientes de altos rendimientos en todo el mundo. Cebada en cambio ha ido migrando de ambientes pobres a ambientes de alto potencial luego de la generación de cultivares Europeos que tienen estas características y que toleran alta fertilización nitrogenada aumentando el rendimiento pero sin que eso reduzca la calidad de los grano por altas concentraciones de N en los mismos.

El objetivo de este capítulo es caracterizar la producción de biomasa y captura de recursos de los cultivos de trigo y cebada en ambientes de alto potencial de rendimiento y analizar estrategias para incrementar los rendimientos, calidad y sustentabilidad de estos sistemas productivos.

Zonas de Producción de trigo y cebada en Chile: Rendimientos y atributos de calidad

Características Productivas

En Chile más del 80% de la superficie sembrada con trigo y cebada, se encuentra entre las regiones del Bio-Bío y Los lagos (36 - 42° lat. Sur) y concentrada en ambientes de alto potencial de rendimiento para estos cultivos. En promedio, en los últimos 10 años, la superficie sembrada de trigo y cebada ha sido de 339.029 ha y 18.857 ha (Fig. 1a), respectivamente, representando un 45 y 2.5%, respectivamente, del total sembrado con cultivos anuales (753.161 ha).

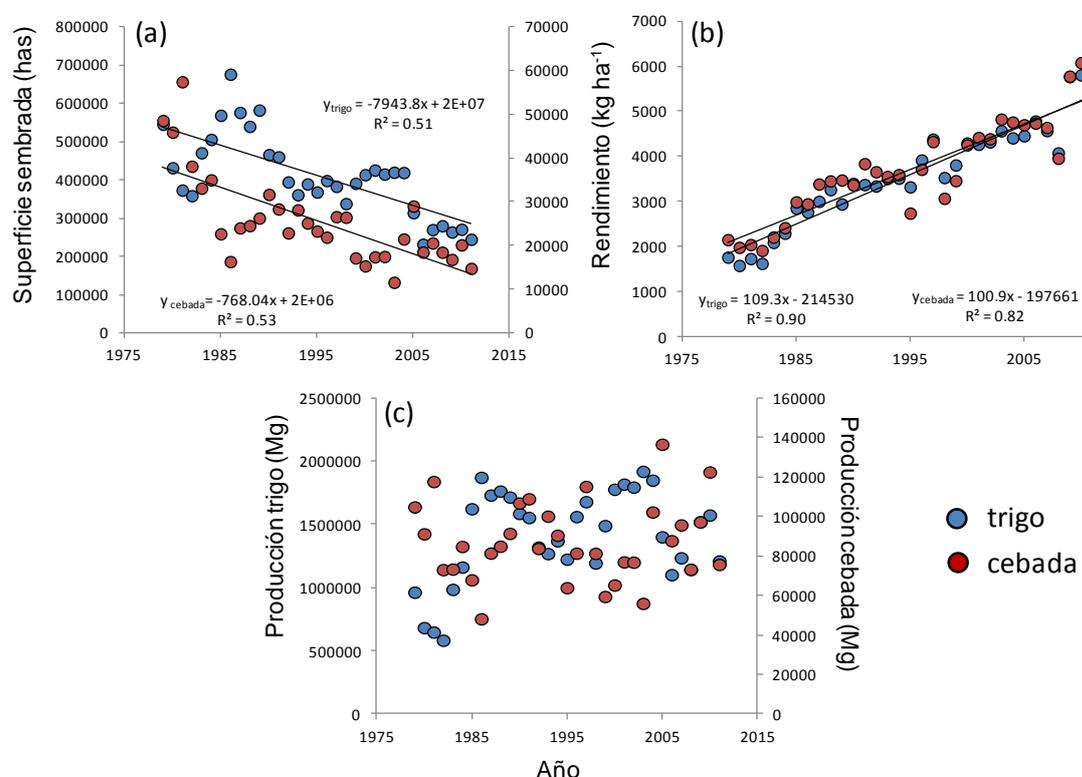


Figura 1. Superficie (a), rendimiento (b) y producción (c) de trigo y cebada en Chile desde el año 1979 al 2011.

En Chile, desde de los años 80 la superficie sembrada con cereales se ha ido reduciendo notoriamente, siguiendo la tendencia mundial para los cultivos anuales. En

el caso de trigo y cebada la tasa de pérdida en superficie sembrada ha sido de 7943 y 768 ha año⁻¹, respectivamente (Fig. 1a). En términos porcentuales la caída de superficie sembrada entre los años 1980 y 2011 en trigo y cebada han sido similares (1.4 y 1.6 % respectivamente) (Fig. 1a). Por otro lado, en este periodo ambos cultivos han mostrado ser muy similares tanto en los rendimientos logrados como en las tasas de incremento en rendimiento a través del tiempo (109 y 100 Kg ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente) (Fig. 1b). No obstante los rendimientos han mostrado rendimientos decrecientes en la última década siguiendo la tendencia mundial en estos cultivos (Tabla 1). En los últimos 5 años, el rendimiento promedio de trigo y cebada fue de 5037 y 5117 kg/ha, respectivamente (Fig. 1b). Los incrementos en rendimientos han compensado las reducciones en la superficie sembrada, ya que no se observan tendencias claras en la producción total de trigo y cebada (Fig. 1c)

Tabla 1. Porcentaje de cambio en el rendimiento en distintos períodos en Chile y el mundo.

Período	Cambio anual del rendimiento en Chile (Kg ha ⁻¹ año ⁻¹)		Cambio anual del rendimiento en el mundo (Kg ha ⁻¹ año ⁻¹)	
	Trigo	Cebada	Trigo	Cebada
1961-1979	10,4	2,6	42	33,6
1980-1999	139,7	110,9	42,6	21,1
2000-2010	96,5	29,6	36,6	20,1

Fuente: Odepa, 2012, Faostat, 2012

A pesar de que la superficie sembrada total de trigo y cebada en Chile ha disminuido, el cambio ha ocurrido diferencialmente entre distintas regiones, siendo porcentualmente mayor en las regiones de la zona centro norte que en las regiones de la zona sur del país (Tabla 2). Esto ha provocado que la distribución de Trigo y Cebada a lo largo de Chile se haya desplazado hacia ambientes de mayor potencial de rendimiento desde los años 80 al presente. La participación de las regiones de Coquimbo al Maule: paralelos 29-36° lat. Sur) se ha reducido en el período 1980-2011, mientras que las regiones de la zona sur (36-42° lat. Sur) han aumentado su participación en la producción de trigo nacional (Tabla 2). Las regiones de la zona centro sur han aumentado su contribución a la superficie nacional de trigo de un 68% en la década de los 80' a 80% en los últimos 5 años, mientras que en el caso de cebada pasaron de contribuir en 74% en la década de los 80 a un 94% en la actualidad.

Tabla 2. Cambio en la superficie sembrada, proporción de la superficie nacional y rendimiento de trigo y cebada durante el período 1980-2011 en Chile.

Región	Cambio en la superficie sembrada (%/año)		Cambio en la participación de la superficie Nacional (% entre 1980-2011)		Cambio en el rendimiento por ha (kg/año)	
	Trigo	Cebada	Trigo	Cebada	Trigo	Cebada
Coquimbo	-3.77	-3.42	-2.49	-1.58	69	33
Valparaíso	-4.22	-3.84	-0.93	-2.63	52	12
Metropolitana	-4.42	-2.41	-4.53	-3.74	76	56
O'Higgins	-2.73	-4.55	-4.31	-3.80	79	-16
Maule	-1.40	-6.01	-0.91	-11.97	122	80
Bío-Bío	-1.18	-0.79	-1.26	8.03	109	100
Araucanía	-0.43	-1.37	13.53	1.80	122	116
Los Lagos	-1.37	0.26	0.89	13.90	139	84

Comparativamente, el aumento de rendimiento de ambos cultivos ha sido mayor en los ambientes de mayor potencial, como los de las Regiones del Bío Bío, Araucanía y Los Lagos. Aunque muchos factores económicos y sociales pueden influir sobre estos indicadores, la tendencia parece mostrar una migración de los cultivos, a zonas de mayor potencial productivo para estos cultivos, que hasta la fecha mostrarían, además, el menor impacto del cambio climático si se considera a éste, dentro de los factores que pueden estar afectando la ganancia de rendimiento en los últimos años.

Caracterización de ambientes de alto rendimiento en Chile

La actividad agropecuaria en Chile se desarrolla fundamentalmente en un área de 1300 km de longitud entre los paralelos 30° y 42° de latitud sur y comprende desde las regiones de Coquimbo en el Norte hasta la región de los lagos en el Sur. Las características edafo-climáticas de Chile cambian altitudinal (desde la costa hasta la precordillera) y longitudinalmente logrando diferenciar 5 zonas agroecológicas con diferente potencial productivo: i) Secano costero e interior central, ii) la zona central de riego, iii) precordillera Centro-Sur, iv) Secano interior Sur y v) Húmeda del Sur (Fig. 2a).

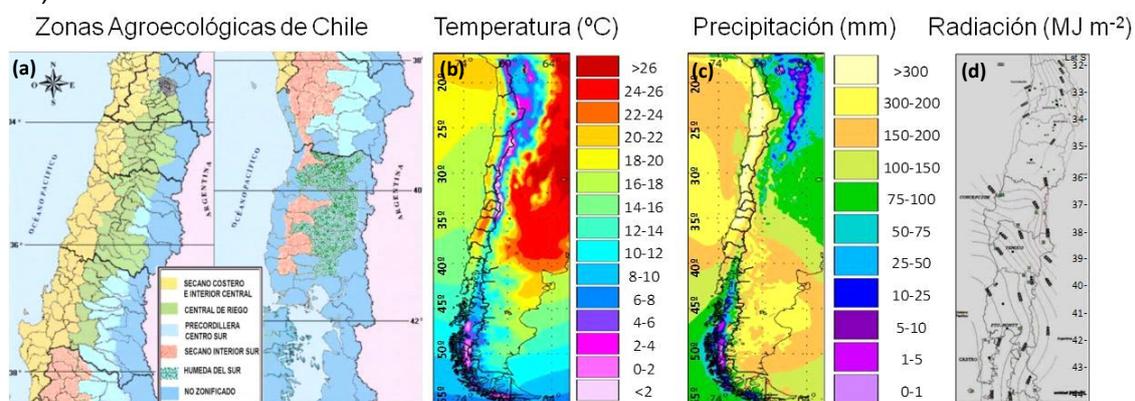


Figura 2. Temperatura (a) y precipitación (b) estival (promedio trimestre enero-febrero Marzo) a diferentes latitudes en Chile. (c) muestra la radiación global incidente mensual para las principales regiones productoras de trigo y cebada en Chile.

Fuente: Silva et al., 2009; U de Chile, 2010; U de la Serena, 2010.

Desde 29-37° de latitud sur (secano costero e interior central y la zona central de riego) el clima predominante es mediterráneo marino y mediterráneo temperado. En el secano la precipitación anual media varía entre 300 y 700 mm y puede llegar a 1300 mm en el sur de la zona central de riego, distribuida básicamente entre mayo y septiembre. La temperatura media anual varía en estas zonas entre 13,5 y 15°C (Novoa y Villaseca, 1989). Entre las latitudes 35° 30' a 39° S que comprende las zonas precordillera centro sur y secano interior sur, el clima corresponde a mediterráneo temperado a frío, con una pluviometría promedio anual que varía entre 1100 y 1300 mm y temperatura media anual de 12,5 a 13,9°C (Novoa y Villaseca, 1989). El clima de la zona Húmeda del sur (latitudes 39° a 41° S) en tanto corresponde a marino fresco con precipitaciones del orden de 1500 a 2100 mm anuales y temperatura media anual entre 10,9 y 12,5 °C. Aunque en estos ambientes precipita todo el año, ésta disminuye en verano, determinando 3 a 4 meses sub-húmedos (Novoa y Villaseca, 1989).

Las condiciones edáficas también varían de norte a sur en Chile a través de las zonas agroecológicas. En la parte norte (secano costero e interior) las limitaciones hídricas y edáficas (baja materia orgánica (1 a 2%), pH ácido (5,5 –6,0), texturas arcillosas en

superficie y topografía escarpada), son las principales determinantes del bajo potencial productivo comparado con la zona central de riego, que presenta topografía plana, mejores texturas (franco arenosas a franco arcillosas), mayores contenidos de materia orgánica (2,5 - 5.3%) y pH ligeramente básicos (6 - 8). Desde la parte sur de la zona central es posible encontrar suelos profundos, derivados de cenizas volcánicas con densidad aparente baja, 0,8 g/cm³ y alta materia orgánica (13-20% en la zona húmeda del sur) denominados "trumaos". La mayor limitación de estos suelos es la alta retención de fósforo y pérdida de cationes del suelo, con el consecuente aumento del aluminio activo y acidificación. El pH natural encontrado en suelos con estas características fluctúa entre 4.8 a 6.2, siendo más bajo en el extremo sur. En la cordillera de la costa (secano interior Sur) entre las latitudes 37° 50' a 41° S también predominan suelos de origen volcánico, pero tipo rojo arcillosos formados a partir de cenizas antiguas, con arcillas fácilmente dispersables, lo que sumado a las características topográficas hacen que estos suelos sean muy susceptibles a la erosión. Son suelos moderadamente profundos a profundos (100 y 170 cm), con niveles de materia orgánica de 6 a 8%, pH fuertemente ácido (5,0 a 5,2) y alto aluminio intercambiable, aunque su capacidad de fijación de fósforo es inferior a la de los suelos Trumaos (Teuber, 1996; Balocchi, 1998).

A pesar de que cada una de estas zonas posee características edafoclimáticas distintas y definidas, es posible distinguir, un gradiente climático de norte a sur en Chile, con una reducción de la temperatura media desde 16 a 12°C a mayor latitud. Los niveles PAR promedio anual varían en este transecto latitudinal desde 18 a 11 MJ m⁻² d⁻¹ y la amplitud fotoperiódica aumenta desde 3h 43min a 30° de latitud Sur a 6h 7min a 42° de latitud sur (Fig 3a). Las precipitaciones, en tanto aumentan de norte a sur desde aproximadamente 200 a 2000 mm anuales con una consecuente disminución de la evaporación hacia el extremo sur (Fig 3b). Las condiciones edáficas que más varían de norte a sur en Chile, son la densidad aparente y pH, con menores valores hacia el extremo sur. Por otra parte el contenido de materia orgánica se incrementa fundamentalmente en los suelos "trumaos" del Sur de Chile derivados de cenizas volcánicas. Todas estas características definen zonas con diferente potencial de rendimiento para los cultivos. Específicamente, los cereales invierno-primaverales son mejor adaptados a las regiones del sur de Chile donde se concentra además la mayor producción de estos cultivos.

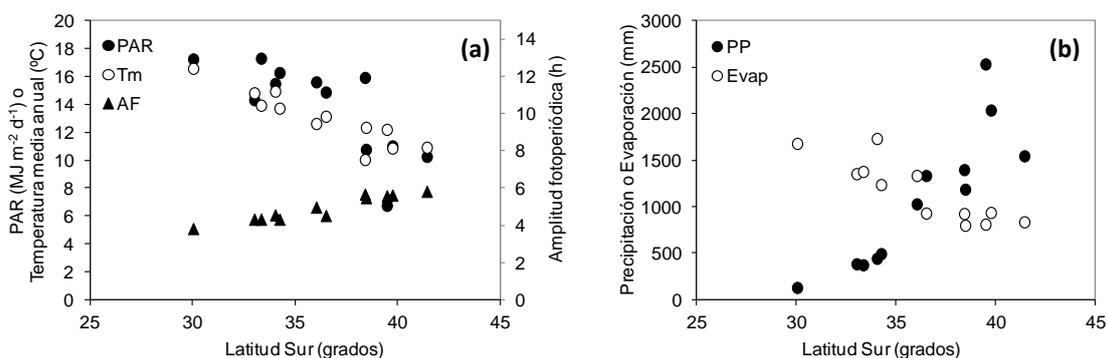


Figura 3. PAR, Temperatura media (Tm), amplitud fotoperiódica (AF), precipitación (PP) y evaporación (Evap) en 12 localidades de Chile situadas geográficamente a distinta latitud Sur.

Relación entre características climáticas y productivas

La variabilidad climática latitudinal en Chile define diferentes condiciones ambientales durante etapas críticas para la determinación del rendimiento. El cociente fototermal alrededor del período crítico en trigo y cebada, alcanza valores mayores hacia el sur de Chile, incluso superiores a los encontrados a altas latitudes en el hemisferio Norte (Fig. 4a). Esto determina en parte los altos rendimientos alcanzados en zonas del sur de Chile, especialmente asociados a suelos trumaos con las características edáficas antes descritas. Por otra parte, las temperaturas medias durante el llenado de granos en la zona sur son frescas (Fig. 4b), induciendo a largos períodos de llenado de granos que permiten, en ausencia de limitaciones hídricas, alcanzar altos pesos de grano. Este componente del rendimiento contribuye a los elevados rendimientos obtenidos por los productores y en el caso de trigo, a la valoración de esta producción por la industria molinera, que encuentra mayor rendimiento industrial y mejores características para panificación en trigos cultivados en estas regiones. A pesar de que la alta precipitación y moderada temperatura aseguran un adecuado abastecimiento hídrico de estos cultivos en el sur de Chile, la variabilidad interanual puede traducirse, eventualmente, en déficit hídrico durante el llenado, así como excesos de humedad pueden inducir el prebrotado de los granos en las espigas, reduciendo el rendimiento y/o calidad de los granos cosechados.

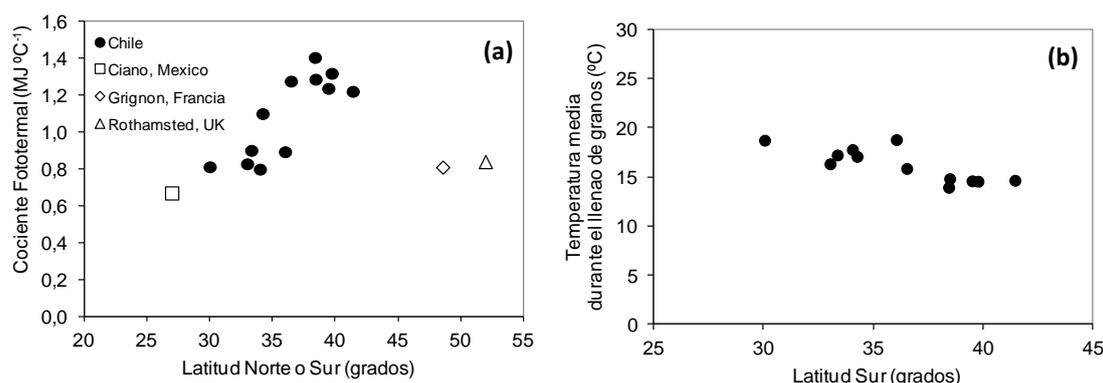


Figura 4. Cociente fototermal (a) en diferentes localidades de Chile (Latitud Sur) y 3 localidades en el hemisferio Norte de acuerdo con datos de Fisher (1985), Demontes Mainard et al. (2001) y Brooks et al. (2001). (b) Temperatura media del llenado de granos a diferentes latitudes en Chile.

Producción y partición de biomasa

El rendimiento de los cultivos se puede analizar de manera sencilla como el producto del número de granos (NG) y el peso promedio de los mismos (PG):

$$\text{Rendimiento} = \text{NG} \times \text{PG} \quad (1)$$

Desde una perspectiva ecofisiológica, el rendimiento también puede ser comprendido como el producto de la biomasa (B) y el índice de cosecha (IC):

$$\text{Rendimiento} = \text{B} \times \text{IC} \quad (2)$$

Al mismo tiempo, la biomasa es el producto entre la cantidad de radiación fotosintéticamente activa interceptada por el cultivo (R_{lac}) y la eficiencia de uso de la radiación en biomasa (EUR):

$$\text{Biomasa} = \text{RIac} \times \text{EUR} \quad (3)$$

Estos atributos del cultivo se encuentran desarrollados en Satorre et al. 2003.

El análisis de los atributos de la producción de biomasa utilizará las ecuaciones (1), (2) y (3) y se centrará además en trigos y cebadas de tipo alternativos y especialmente primaverales considerando que ambos grupos representan la mayor proporción de estos cultivos en Chile, ca. el 80% de la superficie cultivada (ODEPA, 2012).

En el centro-sur de Chile las fechas de siembra de los trigos y cebadas alternativos/primaverales fluctúa entre mediados de junio y principios de septiembre, correspondiendo las fechas más tardías del rango para las regiones del sur del país (Regiones X y XIV). Los rendimientos potenciales en la zona sur alcanzan los 12.500 kg ha⁻¹ en peso seco (Sandaña et al., 2009). La particularidad de estos ambientes, comparativamente con otras zonas productoras del mundo, es que se logran con ciclos de cultivo que pueden extenderse sólo 130 días desde que el cultivo emerge hasta que alcanza madurez fisiológica (Fig. 5). Si bien rendimientos similares han sido reportados para otros lugares del mundo (Foulkes et al, 2007), la mayoría de ellos se logran con trigos invernales y duraciones sensiblemente mayores (aproximadamente 6 meses o más). Tanto en trigo como en cebada, rendimientos de 12.015 y 12.500 kg ha⁻¹, respectivamente fueron logrados en experimentos realizados en la Universidad Austral de Chile, Valdivia (39° 47'S, 73° 14' O, 19 m s.n.m.) aún con siembras tardías (22 de septiembre) y duraciones de ciclo de 115 días. Esto permite afirmar que los ambientes del sur de Chile están en los primeros lugares del mundo considerando la relación rendimiento-tiempo de crecimiento del cultivo (kg de rendimiento d⁻¹).

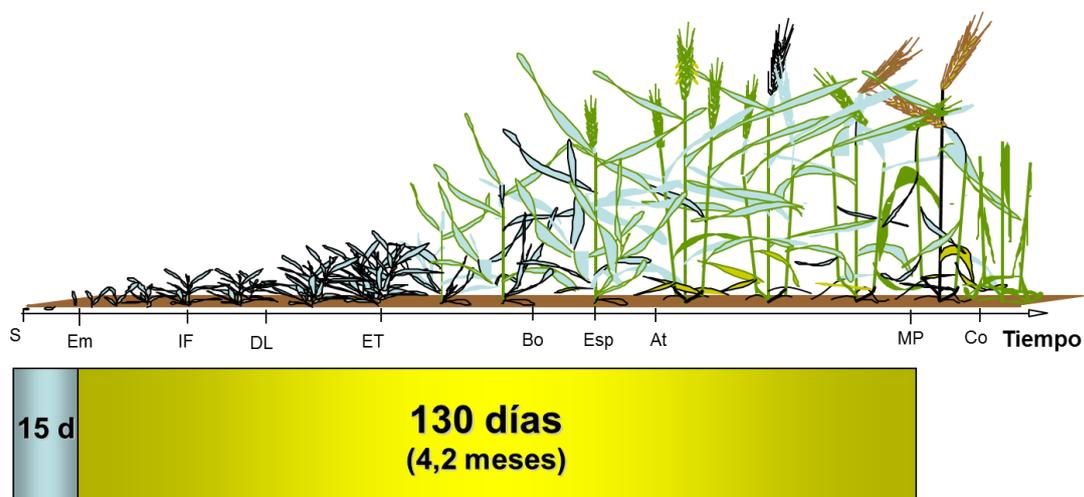


Figura 5. Ciclo un cultivo primaveral sembrado en Septiembre en la zona sur de Chile (Adaptado de Slafer y Rawson, 1995).

Componentes numéricos del rendimiento

De los dos componentes numéricos, el número de granos por unidad de superficie es el que muestra una mayor asociación con el rendimiento de los cultivos de grano (Peltonen-Sainio et al., 2007; Sadras y Slafer, 2012). En el caso del sur de Chile, el alto potencial se debería a la combinación de condiciones favorables para ambos

componentes del rendimiento. Por ejemplo, en comparaciones con otras zonas productoras del mundo como son el Valle del Yaqui en el norte de México y Buenos Aires en Argentina, el análisis comparativo de experimentos realizados con el mismo genotipo en las zonas comentadas permite inferir que tanto el número como el peso medio de los granos fueron superiores en el sur de Chile. Por ejemplo, en trigo el rendimiento del cultivar Bacanora se duplicó respecto al obtenido en Buenos Aires y Ciudad Obregón con un 60% más de granos y 26% de peso de grano (Fig. 6). En el caso de cebada, el cultivar Scarlet mostró incrementos de entre 36 y 74% respecto de los logrados en Buenos Aires dónde tanto el número (entre 10 y 57% de incremento) como el peso (entre 15 y 23%) de granos contribuyeron al mayor rendimiento (Tabla 3).

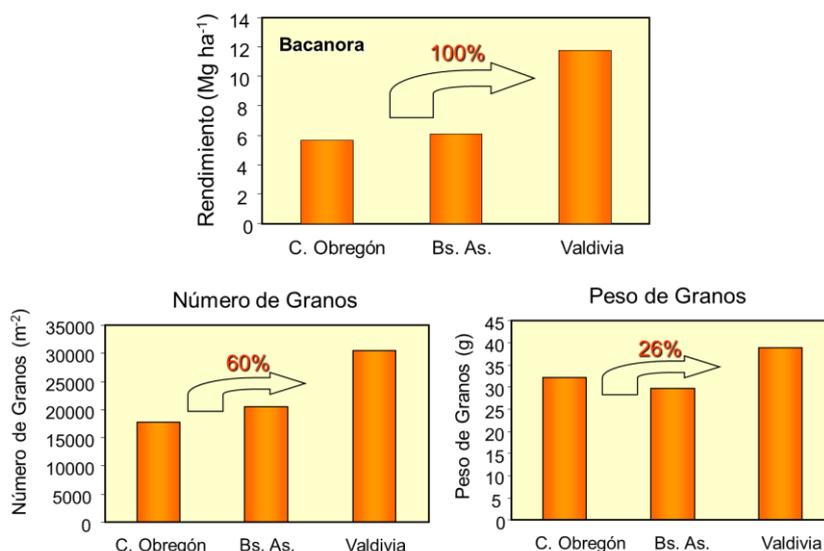


Figura 6. Rendimiento (a), número de granos (b) y peso de grano (c) en tres localidades con diferente potencial de rendimiento: Ciudad Obregón (México), Buenos Aires (Argentina), Valdivia (Chile).

Tabla 3. Rendimiento, número de granos y peso de grano del cultivar de cebada Scarlet, en Buenos Aires (Argentina) y Valdivia en el sur de Chile.

Sitio	Genotipo	Rendimiento Mg ha ⁻¹		NG		PG (g)	
Bs. Aires	Scarlet	7.2		17104		40.6	
	Scarlet	9.2		24581		37.8	
			74%		57%		15%
Valdivia	Scarlet	12.5	36%	26773	9%	46.6	23%

Las razones de los mayores niveles de número y peso de granos logrados en el sur de Chile se deben principalmente a una combinación muy favorable entre la radiación solar y la temperatura alrededor de anthesis (Fig. 3), conocido como cociente fototermal (Fischer, 1985), y a las temperaturas frescas durante el llenado de los granos (Fig. 4). En el primer caso, existe una ventana de tiempo en la que se determina el número de granos de trigo y cebada durante la cual, las condiciones ambientales generarán un mayor o menor número de granos de acuerdo con el crecimiento del cultivo (trigo: Fischer, 1985; cebada; Arisnabarreta y Miralles, 2008). Por otra parte, en la mayoría de los ambientes agronómicos el peso de los granos muestra una relación inversa con

las temperaturas medias durante el llenado (Fig. 7). Un comportamiento similar al de trigo ha sido encontrado para el cultivo de cebada (Chowdhury y Wardlaw, 1978). En el sur de Chile, la temperatura media durante el llenado es cercana a la óptima como se muestra en la Fig. 7).

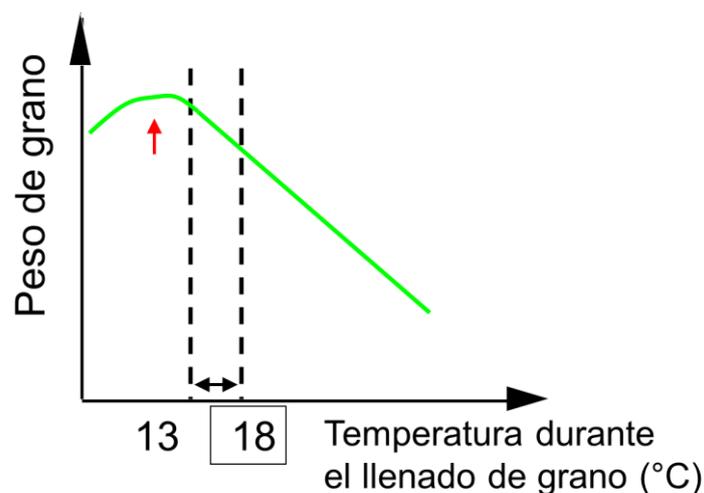


Figura 7. Relación entre el peso medio de los granos del cultivo de trigo y la temperatura media del llenado de los granos. La flecha indica el óptimo de peso en relación con la temperatura y las líneas segmentadas el rango térmico durante el llenado en el sur de Chile. Adaptado de Chadwry y Wardlaw, 1978).

Determinantes ecofisiológicos de la productividad en ambientes de alto potencial

Desde la perspectiva ecofisiológica (ecuaciones 2 y 3), los niveles de biomasa e índice de cosecha de trigo, cebada e incluso triticale, muestran una estrecha relación con la biomasa a cosecha (Fig. 8). La partición de la biomasa es menos explicativa. En condiciones potenciales la biomasa de trigo y cebada alcanza valores de hasta 26.000 kg ha⁻¹, lo que implica índices de cosecha de alrededor del 45%.

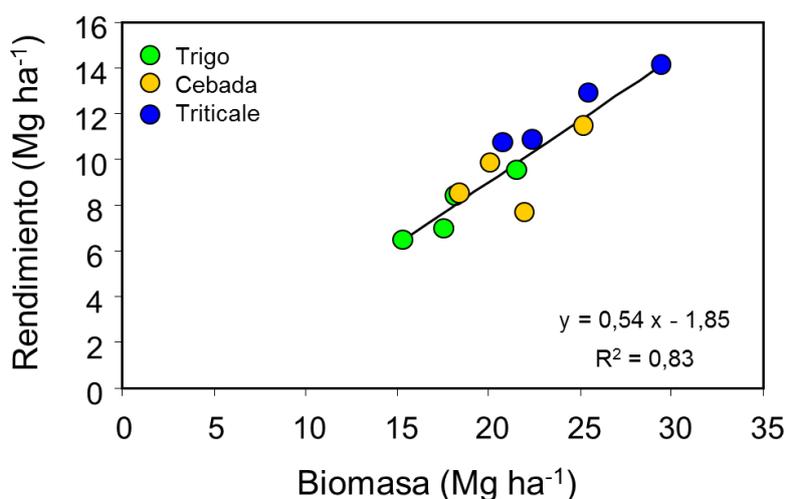


Figura 8. Relación entre el rendimiento y la biomasa aérea a cosecha en cultivares de trigo, cebada y triticale correspondientes a experimentos realizados en el campo experimental de la UACH en Valdivia.

La importancia de la producción de biomasa se ve resaltada por el corto período de crecimiento efectivo del cultivo, en especial en trigos primaverales del sur de Chile. Como se muestra en la Fig. 9, a los 51 días post-emergencia la biomasa del cultivo alcanza valores de aproximadamente el 15% del total que tendrá a cosecha. Valores similares corresponden al cultivo de cebada. Por lo tanto, una de las características sobresalientes de este ambiente es la alta tasa de crecimiento de los cultivos de trigo y cebada considerando que en el 60% del ciclo de cultivo (aproximadamente entre fin de macollaje y madurez fisiológica) deben acumular más del 80% de la biomasa a una tasa de crecimiento de aproximadamente $275 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

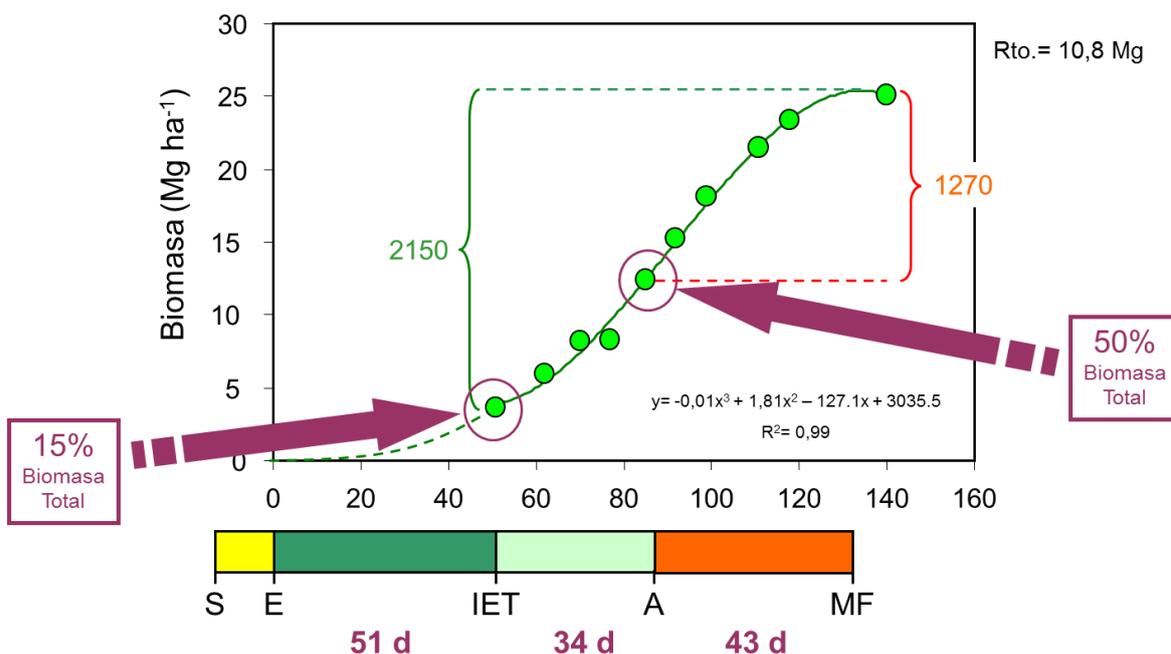


Figura 9. Evolución de la biomasa aérea de un cultivo de trigo evaluado en el campo experimental de la UACH en Valdivia. La barra inferior los estadios fenológicos de un cultivo de trigo. S: siembra, E: emergencia, IET: iniciación de espiguilla terminal, A: antesis y MF: madurez fisiológica.

La ecuación (3) permite descomponer a la biomasa en sus dos determinantes fisiológicos (la captura de radiación por parte del cultivo y la eficiencia con la que esa radiación es convertida en biomasa). En general, la RIac. es el determinante de la biomasa que mejor explica la producción de la misma en diversos ambientes (Sandaña et al, 2009), aún en condiciones de limitaciones nutricionales (Salvagiotti y Miralles, 2008; Sandaña y Pinochet, 2011), de toxicidad por aluminio (Valle et al., 2009) y de suelos compactados (Sadras, et al., 2005). Por otra parte, la EUR es un carácter más conservativo que muestra menor variación inclusive en rangos amplios de toxicidad por aluminio (ver Valle et al., 2009). En el caso de los ambiente de alto potencial del sur de Chile es importante considerar las particularidades de ambos determinantes. En el caso de la captura de radiación, la acumulación de radiación interceptada por el cultivo hasta antesis permitió explicar diferencias en el número de granos y de rendimiento de trigo entre fechas de siembra, como se muestra en la figura 10. En relación a la EUR, es importante destacar los altos valores de este atributo registrados para los cultivos de trigo y cebada en el sur de Chile (entre 3 y 3,5 g MJ^{-1} . Fig. 11), en comparación con los que generalmente se encuentran en la literatura (entre 2 y 2,5 g MJ^{-1}). Posiblemente, esto último se deba a una mayor

proporción de radiación difusa y menor déficit de presión de vapor durante el ciclo de cultivo (ver Stöckle y Kemanian, 2009).

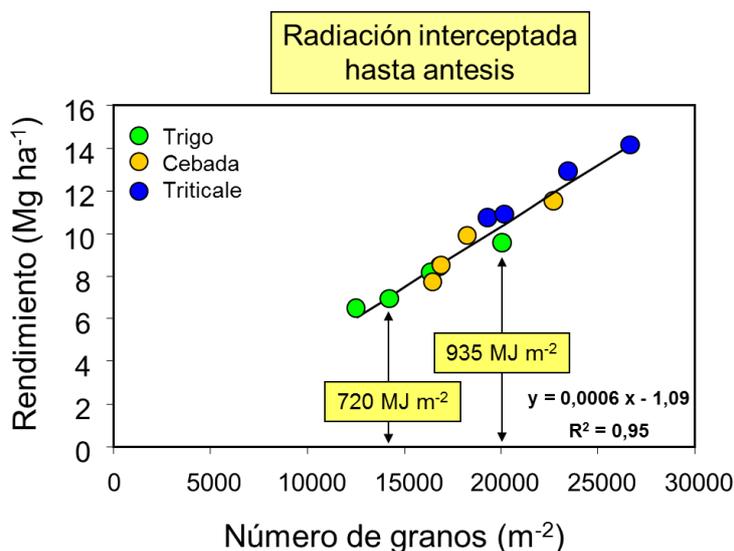


Figura 10. Relación entre el rendimiento y el número de granos por unidad de superficie de los cultivos de trigo, cebada y triticale correspondientes a experimentos realizados en el campo experimental de la UACH en Valdivia. Los rectángulos indican la cantidad de radiación interceptada acumulada hasta antesis para dos situaciones del cultivo de trigo.

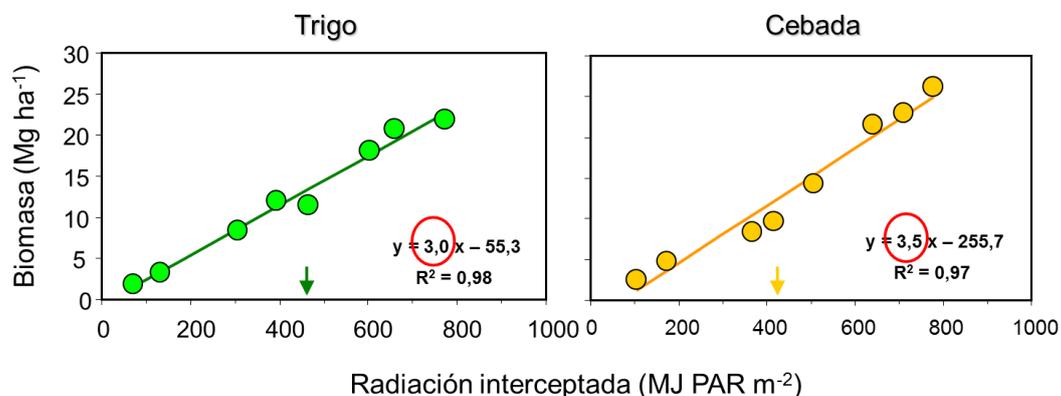


Figura 11. Relación entre la biomasa aérea y la radiación interceptada acumulada durante el ciclo, correspondiente a los cultivos de trigo y cebada correspondientes a experimentos realizados en el campo experimental de la UACH en Valdivia. La pendiente de la recta de regresión corresponde a la Eficiencia de Uso de la Radiación (resaltada con un círculo en cada cultivo).

Un aspecto de suma importancia para asegurar al productividad de trigos y cebadas primaverales en este ambiente es la cobertura del suelo (intercepción de radiación). La misma debe ser completa al momento de iniciarse el período crítico para la determinación del número de granos. En la Fig. 12 se ilustra la dinámica de intercepción de radiación de un cultivar primaveral. Es importante señalar que cualquier contingencia que limite la expansión foliar (déficit de nutrientes, agua,

toxicidad por aluminio, retraso en la fecha de siembra, etc.) impedirá que el cultivo alcance la cobertura completa durante éste período con la consiguiente caída en el rendimiento. Una menor cantidad de radiación interceptada generará una caída en la cantidad de número de granos logrados y consecuentemente, un menor rendimiento.

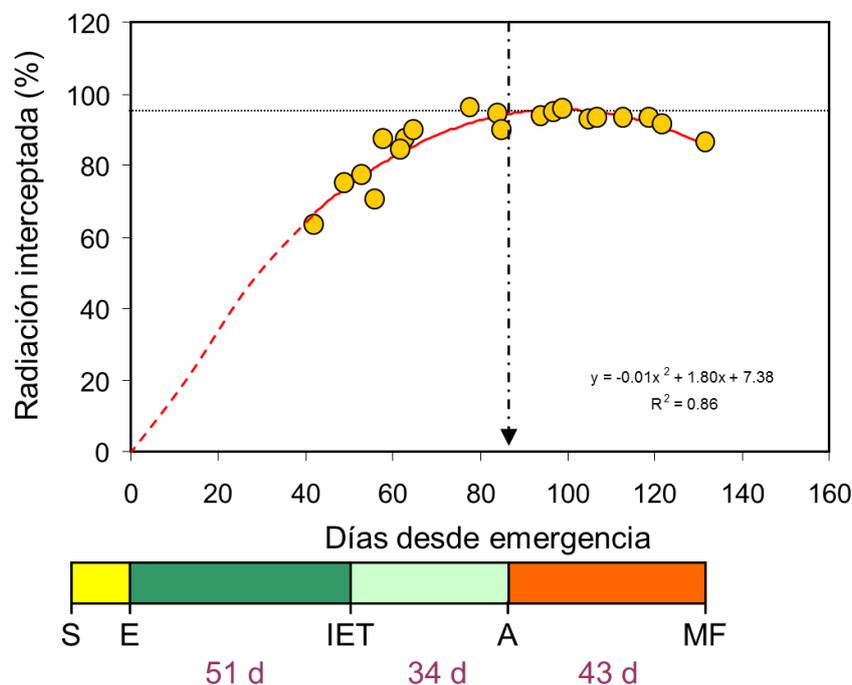


Figura 12. Evolución del porcentaje de radiación interceptada. La flecha indica el momento de antesis y la barra inferior los estadios fenológicos de un cultivo de trigo evaluado en el campo experimental de la UACH en Valdivia. S: siembra, E: emergencia, IET: iniciación de espiguilla terminal, A: antesis y MF: madurez fisiológica.

Captura de nutrientes

La alta productividad de los ambientes del sur de Chile conlleva una alta demanda de recursos tanto nutricionales como hídricos. Como se mencionó anteriormente el cultivo de trigo y cebada en Chile se concentra (80%) principalmente en la zona centro sur del país (36 - 42° lat. Sur), la cual se caracteriza por presentar altos niveles de precipitaciones tanto durante el año (Fig. 3b) como también durante ciclo de los cultivos primaverales de trigo y cebada (Tabla 4). En promedio, las precipitaciones anuales y durante el ciclo de cultivo en la zona intermedia del centro sur de Chile son del orden de 1550 y 750 mm, respectivamente. Mientras que la precipitación promedio durante el llenado de granos es de 130 mm. Por otro lado, al momento de siembra (agosto), los suelos trumaos de ambientes de alta potencialidad (>38° Lat. Sur) pueden contener una reserva de agua de 600 mm de agua almacenada a 1,2 m de profundidad. Por lo tanto, considerando los niveles de pluviometría de los ambientes de alta potencialidad del país (Fig. 3b y Tabla 4) y la capacidad de almacenaje de agua de los suelos trumaos, en la mayoría de los años el recurso hídrico no es una limitante importante para el rendimiento aunque existe variabilidad interanual y espacial. Podrían existir deficiencias hídricas tanto en pre- como en post-antesis en ambientes con características similares los de Cauquenes y Chillán (Tabla 4). Sin embargo, aun faltan evidencias científicas para comprobar posibles limitaciones hídricas en estas zonas.

Tabla 4. Precipitación anual, durante el ciclo del cultivo (primavera-verano) y durante el llenado de granos de un cultivo primaveral en distintas localidades del Centro Sur de Chile.

Precipitación (mm)	Cauquenes 36°57' S	Chillán 36°03' S	Carillanca 38° 41' S	Loncoche 39° 33' S	Valdivia 39° 48' S	Futrono 40° 07' S	Osorno 40° 35' S
Anual	632	1025	1394	2138	2531	1641	1382
Total ciclo	478	722	800	1086	902	704	508
Post-antesis	35	75	113	157	157	262	107

En cuanto a la captura de nutrientes, la Fig. 13 muestra la relación entre la biomasa aérea a cosecha y el nitrógeno o el fósforo absorbidos al fin del cultivo de dos cultivares de trigo en un amplio rango de rendimientos generado por distintas concentraciones de aluminio en el suelo. Es importante destacar la alta asociación entre estas variables indicando que para alcanzar rendimientos de $12.000 \text{ kg ha}^{-1}$ (peso seco), que corresponden a los mayores niveles de biomasa que se muestran en la figura, la absorción de nitrógeno y fósforo fue de 300 y 30 kg ha^{-1} , respectivamente. De ellos, 250 y 27 kg ha^{-1} de N y P fueron extraídos del sistema productivo al cosecharse los granos (equivalentes al 83 y 90%, respectivamente), quedando un remanente de 50 y 3 kg ha^{-1} de cada nutriente, respectivamente, que deberían ser incorporados a través de un correcto manejo del rastrojo. En el caso del potasio, la cantidad absorbida correspondiente a los altos niveles de rendimiento comentados alcanza los 200 kg ha^{-1} . Sin embargo, la partición de este nutriente entre los órganos del cultivo es muy diferente teniendo en cuenta que el índice de cosecha de potasio fue de aproximadamente 20%. Por lo tanto, se extraerían del sistema productivo solamente 20 kg ha^{-1} en los granos. Información más detallada sobre la nutrición de los cultivos de trigo y cebada se puede ver en el capítulo 2 de este libro.

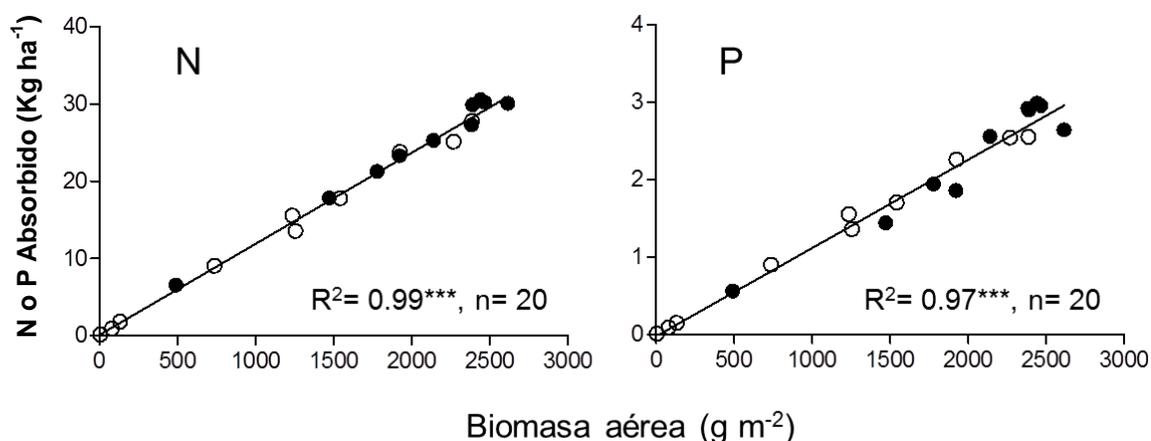


Figura 13. Relación entre el nitrógeno y fósforo absorbidos por un cultivo de trigo y la biomasa aérea en diferentes condiciones de toxicidad por aluminio. Los valores superiores correspondieron a los tratamientos testigo sin toxicidad. Fuente: Valle et al. (2011).

Incrementos del rendimiento y sustentabilidad de trigo y cebada en ambientes de alto potencial del sur de Chile

Debido a las condiciones favorables del sur de Chile para los cultivos de trigo y cebada, el desafío actual es incrementar la productividad y lograr la sustentabilidad de los mismos. Por otra parte, existen retos importantes como el cambio climático que

aumentarán la temperatura media e incrementarán los episodios de temperaturas extremas (Departamento de Geofísica-Universidad de Chile, 2006). En ese escenario, el incremento térmico afectará uno de los factores ambientales claves que permiten la alta potencialidad de rendimiento del sur de Chile (ver Lizana y Calderini, 2013).

La productividad de los sistemas del sur de Chile no podrá incrementarse, o al menos mantenerse, sin una alta demanda de insumos, tanto nutricionales como hídricos, por parte del cultivo. Esto podría poner en riesgo la sustentabilidad. Por lo tanto, es importante encontrar alternativas en el mejoramiento genético o en el manejo del cultivo que permitan los altos niveles de producción en el tiempo. Desde la perspectiva del mejoramiento, el desarrollo de cultivares con mayor potencial no sólo redundará en incrementos en los ambientes más favorables sino también en aquellos de menor potencial como ha sido demostrado por la revolución verde. Existen claros ejemplos que los cultivares que portan los alelos de reducción de altura (aquellos que generaron la revolución verde) que también incrementaron la productividad en algunos ambientes de bajo potencial como los de Australia (Perry y D'Antuono, 1989) y en otras zonas del mundo (Calderini y Salfer, 1999; Foulkes et al. 2009). Recientemente se ha encontrado que líneas doble haploides producto del cruzamiento de padres que difieren en la composición de su rendimiento (alto número o alto peso) pero de similar rendimiento, superaron al mejor de sus progenitores en un 20% y en un 50% a los cultivares locales más difundidos (Bustos et al., en revisión). Estos resultados son promisorios para el sur de Chile y otros ambientes.

En el caso de cultivares primaverales, la estabilidad del rendimiento entre localidades, fechas de siembra y años dependerá fuertemente de la captura de radiación durante el período crítico para la determinación del número de granos. En ese sentido, lograr el índice de área foliar crítico (el IAF con el que se alcanza la intercepción completa de la radiación incidente) en estadios tempranos del cultivo favorecerá no solo el rendimiento sino también la estabilidad entre situaciones. Afortunadamente existe variabilidad en este atributo del cultivo entre los genotipos actuales como se puede ver en la Fig. 14. donde el cultivar Otto logra mayor captura de radiación que los otros. Este atributo, de ser transferido a otros materiales, favorecerá el logro de los rendimientos.

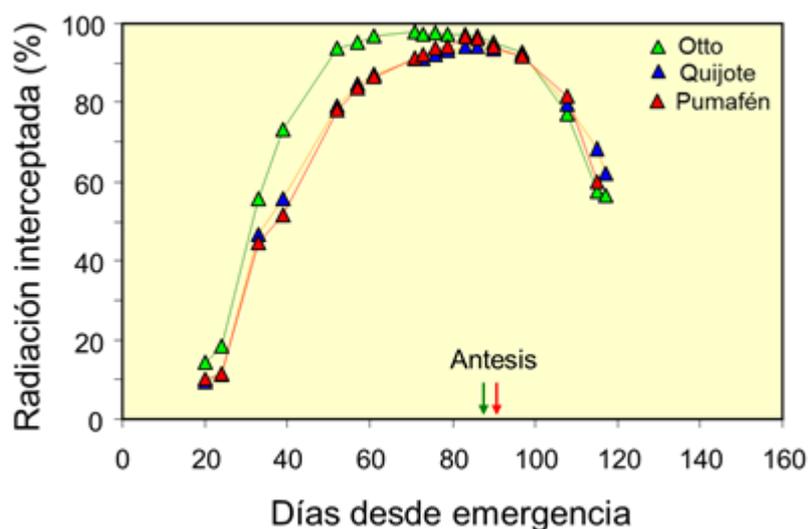


Fig. 14. Evolución del porcentaje de radiación interceptada en tres cultivares de trigo evaluados en el campo experimental de la UACH en Valdivia. Las flechas indican los momentos de antesis.

Respecto al manejo, aquellas medidas que permitan mejorar la eficiencia de la captura de recursos tendrán un efecto directo sobre la sustentabilidad. La densidad y el arreglo espacial de las plantas podrían contribuir en ese sentido. En investigaciones recientes, se han encontrado resultados promisorios en cuanto al rendimiento, la captura de nutrientes e indicadores de calidad. Es necesario destacar que las evaluaciones se encuentran en una etapa preliminar y que por el momento no es de aplicación directa en los sistemas de producción pero en la medida que se avance en las causas que permiten esto será posible transferirlo al medio productivo.

En comparaciones entre un sistema de siembra convencional con densidades de 350 y otro de 45 plantas m^{-2} , éste último con espaciamiento equidistante entre las plantas (0,15m) se encontró que el sistema de baja densidad mantenía los niveles de rendimiento en el caso del cultivar Bacanora o los incrementaba un 10% en Kambara, al mismo tiempo que favorecía el peso de los granos y la captura de nitrógeno y fósforo (Fig. 15). El avance en esta investigación podría redundar en una mayor eficiencia de absorción de los dos principales nutrientes del cultivo con un saldo positivo para disminuir el impacto ambiental de la agricultura y los costos de producción. En el caso de cebada las investigaciones son más preliminares aún pero los resultados obtenidos hasta el momento no muestran el grado de compensación entre los componentes del rendimiento encontrados en trigo por lo que no sería tan promisorio.

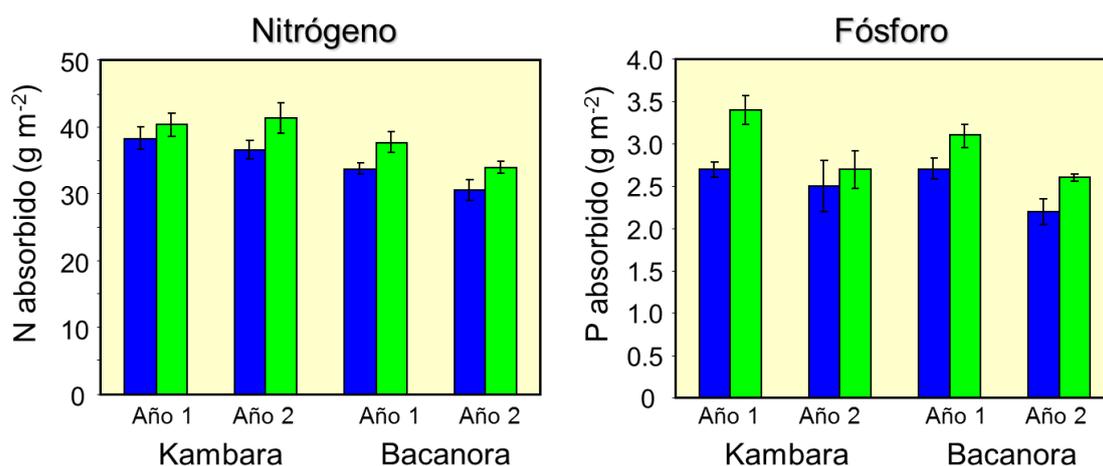


Figura 15. Captura de Nitrógeno y Fósforo de dos cultivares de trigo (Kambara y bacanora) cultivados a densidad normal (350 plantas m^{-2} , barras azules) y baja densidad (45 plantas m^{-2} , barras verdes) en dos temporadas.

Por último, el cambio climático impondrá restricciones a la productividad del sur de Chile. En este sentido está previsto que la temperatura media en la zona centro-sur de Chile se incremente entre 1 y 4°C en el 2100, dependiendo de los escenarios futuros de emisión de gases con efecto invernadero (Departamento de Geofísica-Universidad de Chile, 2006). Los mayores aumentos son esperados entre los meses de Diciembre y Febrero cuando el número y peso de los granos está siendo determinado en estos cultivos. La elección de genotipo a sembrar sería una herramienta útil para mitigar los efectos del cambio climático por parte de los productores. Se han encontrado cultivares de trigo y cebada con diferente sensibilidad al golpe de calor (Stone y Nicolas, 1995; Savin y Nicolas, 1996). En el sur de Chile, Lizana y Calderini (2012) encontraron que un período de sólo 12 días de alta temperatura (T media de 20°C, 3-4°C superior al control) alrededor de antesis, redujo el rendimiento en hasta 30% en trigo, pero la respuesta dependió del cultivar, por lo cual la elección del cultivar y

rasgos asociados fueron propuestos como herramientas de selección para la elección de cultivares más adaptados a las nuevas condiciones climáticas. La calidad de los granos de trigo, estimada a partir de su porcentaje de proteína no fue alterada en este estudio, por lo cual es posible pensar que será un rasgo más estable a los cambios climáticos al menos en ambientes de alto potencial como el evaluado, donde, a pesar de la caída en el rendimiento, debido a la mayor temperatura de los tratamientos, estos alcanzaron sobre las 7 Ton/ha.

Observaciones finales

El análisis de la generación del rendimiento en ambientes de alto potencial como el sur de Chile, puede contribuir a generar estrategias para incrementar las ganancias en rendimiento futuras, a los niveles necesarios para satisfacer la demanda de la población. La producción en estos ambientes puede ganar aún mayor relevancia en los escenarios futuros de limitación en la disponibilidad de recursos y cambio climático global. En el análisis aquí presentado el favorable cociente fototermal en períodos claves para la determinación del número de granos, principal componente del rendimiento en cultivos de grano, así como las temperaturas, prácticamente óptimas para el llenado, son responsables de los altos rendimientos logrados en trigo y cebada. La escasa compensación entre los componentes del rendimiento en estas condiciones, estaría sustentada en la alta tasa de crecimiento del cultivo, que como fue mencionado, alcanza alrededor de 12 Ton de grano por hectárea (con 14% de humedad) en un período de 4 meses. Más aún prácticas de manejo como la densidad y el arreglo espacial, y de mejoramiento genético, como el uso de líneas doble haploides muestran resultados promisorios para el incremento de los rendimientos en ambientes potenciales, por mejorar la captura y eficiencia del uso de los recursos, que se traduce en menos compensaciones y mayores ganancias en rendimiento, especialmente en trigo. La variabilidad en estos caracteres debe ser explotada para generar ideotipos capaces de lograr rendimientos excepcionales, estables, y eficientes en el uso de los recursos, como vía para incrementar la producción mundial de trigo y cebada, no solo en ambientes potenciales sino también en aquellas con mayores limitaciones.

Referencias

- Arisnabarreta, S., Miralles, D., 2008. Critical period for grain number establishment of near isogenic lines of two- and six-rowed barley. *Field Crops Res.* 107, 196-202.
- Balocchi, O. 1998. Praderas y recursos forrajeros en la zona sur de Chile. In: Amtmann, C; Mujica, F. y Vera, B. (eds.) *Pequeña agricultura en la Región de Los Lagos, Chile.* Universidad Austral de Chile. pp 59-73.
- Brooks, R. J., Semenov, M. A., Jamieson, P. D. 2001. Simplifying Sirius: sensitivity analysis and development of a meta-model for wheat yield prediction *Eur. J. Agron.* 14, 43-60.
- Chowdhury S.I. & Wardlaw I.F. 1978 The effect of temperature on kernel development in cereals. *Australian Journal of Agricultural research* 29:205-223
- Del Pozo, A., Del Canto, P. 1999. Áreas agroclimáticas y sistemas productivos en la VII y VIII regiones. Serie Quilamapu N°113. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Chillán Chile. 115p.
- Demotes-Mainard, S. Y., Jeuffroy, M. H. 2001. Incorporating radiation and nitrogen nutrition into a model of kernel number in wheat. *Crop Sci.* 41, 415-423.
- Department of geophysics, university of chile. 2006. Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI. Informe Final 45p.
- FAO 2012. Estadísticas productivas. URL: <http://www.Faostat.fao.org/>

- Fischer, R. A. 1985. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *J. Agric. Sci., Camb*, 105, 447-461.
- Foulkes, M.J., Snape, J.W., Shearman, V.J., Reynolds, M.P., Gaju, O. & Sylvester-Bradley, R. 2007. Genetic progress in yield potential in wheat: recent advances and future prospects. *Journal of Agricultural Science, Cambridge* 145: 17-29.
- Instituto de Investigaciones Agropecuarias. 1985. Suelos Volcánicos de Chile. Tosso, J. (Ed.) Santiago, Chile. 723p.
- Novoa, R., Villaseca, S. 1985. Mapa Agroclimático de Chile. Instituto de investigaciones Agropecuarias, Santiago, Chile. 221p.
- Odepa, 2012. Estadísticas productivas por macrorubros. Cultivos esenciales. URL: <http://www.odepa.gob.cl/>
- Perry, M. W. and M. F. D'Antuono, 1989. Yield improvement and associated characteristics of some Australian spring wheat cultivars introduced between 1860 and 1982. *Australian Journal of Agricultural Research* 40: 457-472.
- Sadras VO, O'Leary GJ, Roget DK., 2005. Crop responses to compacted soil, capture and efficiency in the use of water and radiation. *Field Crops Res.* 91, 131–148.
- Salvagiotti, F., Miralles, D., 2008. Radiation interception, biomass production and grain yield as affected by the interaction of nitrogen and sulfur fertilization in wheat. *Eur. J. Agron.* 28, 282-290.
- Sandaña, P., Harcha, C.I., Calderini, D.F., 2009. Sensitivity of yield and grain nitrogen concentration of wheat, lupin and pea to source reduction during grain filling. A comparative survey under high yielding conditions. *Field Crops Research.* 114:233-243.
- Sandaña, P., Pinochet, D., 2011. Ecophysiological determinants of biomass and grain yield of wheat under P deficiency. *Field Crops Res.* 120, 311-319.
- Sarmiento P.M. 2007. Irradiancia solar en territorios de la república de Chile.
- Satorre, E.H., Benech Arnold, R.L., Slafer, G.A., de La Fuente, E.B., Miralles, D.J., Otegui, M.E. y Savin, R. 2008. Producción de Granos. Bases funcionales para su manejo. (3ra edición) Editorial Facultad de Agronomía, Buenos Aires, Argentina. 783 pp. (1ra Edición impresa en 2003; 1ra reimpresión en el 2004, 2da en 2006 y 3ra en 2008).
- Savin, R. and Nicolas, M.E., 1996. Effects of short periods of drought and high temperature on grain growth and starch accumulation of two malting barley cultivars. *Australian Journal of Plant Physiology*, 23:201-210.
- Savin, R. and Nicolas, M.E., 1999. Effects of timing of heat stress and drought on grain growth and malting quality of barley. *Australian Journal of Agricultural Research*, 50:357-364.
- Silva, P., Acevedo, E., Rouanet J. L. 2005. Zonas agroecológicas de producción agrícola. En: Rotaciones de Cultivos y sus Beneficios para la Agricultura del Sur. Rouanet, J.L. (Ed.). Fundación Chile. Santiago, Chile 91 p.
- Teuber, N. 1996. La pradera en la costa de la X región (Valdivia- Llanquihue) In: Ruiz, I. (ed.) Praderas para Chile. INIA. Ministerio de Agricultura. Santiago, Chile. pp:579-589.

Restricciones edáficas para trigo y cebada en suelos volcánicos ácidos del Sur de Chile: Disponibilidad de P y Toxicidad por Al

Susana Valle¹, Patricio Sandaña² y Dante Pinochet¹

¹Instituto de Ingeniería Agraria y Suelos, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Austral de Chile. Edificio Federico Saelzer, 2º Piso. Campus Isla Teja, Valdivia. ²Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), CRI-Remehue, Box 24-O, Osorno, Chile.
mail: susanavalle@uach.cl

Resumen

En la zona Centro Sur de Chile (ej: 38° – 40° Latitud Sur) los cultivos de grano pueden alcanzar altos rendimientos potenciales debido a las favorables condiciones climáticas durante la temporada de cultivo (temperaturas frescas y alta radiación). Sin embargo, estos rendimientos potenciales no son alcanzados por los productores debido, en parte, a restricciones edáficas. Los suelos de estos sistemas productivos son en su gran mayoría derivados de materiales volcánicos, los cuales si bien desde el punto de vista físico otorgan al suelo una serie de propiedades únicas y muy beneficiosas para el desarrollo de los cultivos, desde el punto de vista químico, presentan serias limitaciones de retención de fósforo (P) (sobre un 85%) y acidez, lo que se traduce en toxicidad por aluminio (Al) afectando negativamente los rendimientos. Estudios realizados en estos suelos, han demostrado que estas limitaciones químicas (P y Al) reducen el rendimiento de cereales como trigo debido principalmente a la disminución de la biomasa total producida por el cultivo y, en menor medida por caídas en su índice de cosecha. A su vez, la reducción de la biomasa del cultivo se debe a reducciones en la intercepción de radiación (por una menor generación de área foliar), mientras que la eficiencia de uso de la radiación es un carácter bastante conservativo y sólo se afecta bajo condiciones extremas de toxicidad de Al. Bajo estas mismas condiciones la captura de nutrientes (y la eficiencia de absorción) también es seriamente afectada, disminuyendo en mayor proporción que la eficiencia de utilización de los mismos.

Introducción

Los suelos derivados de cenizas volcánicas constituyen aproximadamente el 0,86% de los suelos del mundo (Quantin, 1988; Shoji et al., 1993). Sin embargo, en Chile, su presencia es significativa y representan cerca del 60% de los suelos agrícolas (Luzio y Casanova, 2006). Estos suelos se caracterizan por presentar una alta retención de fósforo, una ligera acidificación que se ha ido acentuando con el manejo agrícola, un gran espacio poroso que se refleja en una baja densidad aparente, usualmente menor a 1,0 g cm⁻³ y, contenidos de materia orgánica que sobrepasan los 50 g kg⁻¹ de suelo, llegando incluso hasta más de 300 g kg⁻¹ de suelo (Tabla 1). Estas propiedades están dadas por la existencia de minerales de tipo aluminosilicatos no cristalinos en la fracción arcilla, principalmente alófono, imogolita, ferrihidrita y complejos humus-aluminio (Besoain, 1985; Shoji et al., 1993). Como se muestra en el Cuadro 1, los suelos derivados de materiales volcánicos, conocidos en Chile como los grandes grupos de suelos rojo arcillosos y trumaos, en su condición agrícola presentan un índice de disponibilidad de P muy bajo (CDF, capacidad de disponibilidad de P-Olsen) el cual se encuentra asociado a su nivel de Al extractable en acetato de amonio (pH 4,8), que es un índice de reactividad de las arcillas contenidas en su capacidad de retención de fosfatos, no asociándose a su contenido de arcillas. Presentan

mayoritariamente valores de pH menores a 6,0 pero superiores a 5,0, lo que muestra que presentan una acidificación ligera, pero que se incrementa con el manejo de los suelos.

Tabla 1. Variaciones de los parámetros relevantes en Fertilidad de suelos de grandes grupos de suelo chilenos desde la región de Valparaíso hasta la Región de Los Lagos (adaptado desde Rodríguez, 1993)

	Parámetros de los suelos					
	Arcilla %	MO g kg ⁻¹	SB cmol kg ⁻¹	pH	CDF	Ks/Ki
Terrazas marinas						
< 25	20,3	40,5	7,3	5,45	0,452	0,426
> 25	33,3	37,2	8,8	5,77	0,363	0,356
Graníticos						
< 25	18,1	18,1	9,1	6,43	0,537	0,394
> 25	32,4	25,1	14,6	6,61	0,513	0,349
Suelos Aluviales Z. Central						
< 25	16,3	16,9	18,5	7,47	0,576	0,308
25-35	29,8	34,0	24,7	7,19	0,479	0,222
> 35	45,8	41,8	32,5	7,11	0,489	0,187
Rojo arcillosos						
Tobíferos						
	29,4	25,8	8,6	6,07	0,406	0,328
Profundos						
< 100	39,3	40,7	11,7	5,62	0,337	0,270
100-200	39,3	60,6	9,7	5,34	0,235	0,264
200-400	43,1	86,1	9,5	5,27	0,197	0,318
400-600	42,1	115,9	6,5	5,20	0,154	0,481
Trumaos						
< 200	25,0	46,8	10,9	6,16	0,373	0,377
200-400	27,0	96,6	11,2	6,16	0,224	0,346
400-600	28,1	136,4	9,6	5,52	0,169	0,523
600-1000	19,8	174,8	6,7	5,59	0,125	0,576
1000-1500	20,5	191,5	4,5	5,38	0,102	0,641
1500-2000	14,5	204,0	2,8	5,45	0,092	0,568
> 2000	14,7	312,4	2,8	5,19	0,091	0,766

Los resultados de la Tabla 2 muestran que el problema principal en los suelos volcánicos continúa siendo sus bajos niveles de P disponible, de acuerdo con el indicador de P-Olsen. Si consideramos que un nivel alto es 15 mg kg⁻¹ (P-Olsen) el cual es necesario para sostener adecuadamente la productividad de praderas y rendimientos medios a altos de cereales, estos resultados muestran que aún cerca de 66% de las muestras de agricultores con fertilización regular, aun no alcanzan este nivel, lo cual se agrava en agricultores de fertilización infrecuente o de muy baja fertilización a niveles de 82% de los agricultores medianos a grande y hasta un 88% en agricultura de tamaño pequeño y campesina. Por su parte, la condición de acidificación de los suelos considerando el límite de 5% de saturación de aluminio muestra que los suelos se encuentran aun acidificados en 33% de los agricultores de fertilización frecuente, lo que se eleva a un 44% en agricultores medianos y grandes de fertilización poco frecuente y hasta un 58% de los agricultores de pequeña agricultura.

Tabla 2. Distribución de frecuencia de muestras de suelos en sus niveles de disponibilidad de P-Olsen y de Saturación de Aluminio de acuerdo al tipo de agricultor y al nivel de manejo de fertilización (datos del Laboratorio de Suelos del Instituto de Ingeniería Agraria y Suelos de la Universidad Austral)

	Frecuencia relativa de muestras de suelo		
	Tipo Agricultores		
	Con fertilización frecuente Particulares	Sin fertilización frecuente Medianos	Sin fertilización frecuente Campesina
Nivel de P-Olsen			
< 5 mg kg ⁻¹	11,0	30,9	49,1
5 – 10 mg kg ⁻¹	30,0	32,9	28,4
10 – 15 mg kg ⁻¹	25,5	18,0	9,7
15 – 30 mg kg ⁻¹	26,4	14,0	9,4
30 – 60 mg kg ⁻¹	5,4	3,7	2,5
> 60 g kg ⁻¹	1,4	0,5	0,9
Nivel de Saturación de Aluminio intercambiable			
< 1%	21,9	23,4	8,2
1 – 5%	45,1	32,4	33,5
5 – 10%	16,7	17,1	19,2
10 – 15%	6,1	7,6	10,2
15 – 30%	6,9	10,0	14,0
30 – 50%	3,0	6,5	9,9
> 50%	0,4	3,0	5,0

En Chile durante la última década la superficie promedio sembrada de trigo y cebada fue de 339 y 19 mil ha año⁻¹, respectivamente, concentrándose principalmente en la zona centro sur de Chile (VII, VIII, IX y X regiones). Durante este periodo ambos cultivos mostraron rendimientos promedios del orden 4,7 Mg ha⁻¹ (ODEPA, 2011). Sin embargo, en estas zonas productivas el rendimiento potencial de estos cereales superan en promedio los 10 Mg ha⁻¹. Esto deja de manifiesto una importante brecha entre los rendimientos promedios alcanzados y los rendimientos máximos alcanzados en estos cultivos. Una proporción de esta brecha productiva podría deberse a restricciones edáficas relacionadas principalmente con la deficiencia de fósforo (P) y la toxicidad de aluminio (Al) que son características comunes de los suelos ligeramente ácidos del sur de Chile.

La acidificación de los suelos se produce por una pérdida de cationes básicos (Ca⁺², Mg⁺², K⁺, y Na⁺) y, con la consecuente acumulación de cationes ácidos (Al⁺³ e H⁺) (Rowell, 1994). Sin embargo, la mayor limitante para el crecimiento de los cultivos en los suelos ácidos del sur de Chile están dadas por la toxicidad del Al soluble e intercambiable (Sadzawka y Campillo, 1999). Además de la acidificación natural debido al aumento de las precipitaciones en dirección al sur en Chile y, por ende, al lavado de los cationes básicos, el proceso de acidificación se ha intensificado debido a la aplicación de fertilizantes amoniacales y amídicos, los cuales inducen la acidificación (Campillo y Sadzawka, 2006). Junto con lo anterior, los suelos de la zona centro-sur del país derivan de materiales volcánicos, lo cual produce que la acidez de los suelos se encuentre en superficie, primeros 20 cm (Luzio y Casanova, 2006), situación diferente a la descrita en otras áreas del mundo donde hay presencia de suelos ácidos y alta disponibilidad de Al fitotóxico, como es el caso de Australia o Brasil.

La solución agronómica al problema de la acidez y toxicidad por Al en los suelos ha sido la aplicación de enmiendas encalantes, las cuales aumentan el pH de los suelos y a su vez, reducen la disponibilidad de Al fitotóxico. Un complemento a esta práctica es la utilización de cultivares tolerantes al Al (Fig. 1), que se presenta como la mejor

estrategia en algunos suelos ácidos (Hede et al., 2001; Tang et al., 2001), principalmente porque en la práctica no es siempre factible aplicar enmiendas encalantes, ya sea por razones económicas, de manejo (Samac y Tesfaye, 2003) o conservación de los recursos.

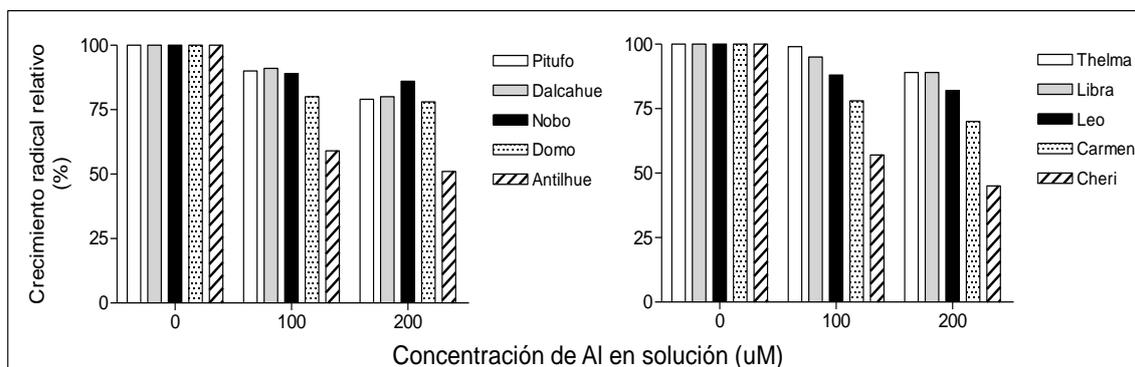


Figura 1. Efecto de la fitotoxicidad del Al sobre el crecimiento radical relativo para diferentes cultivares de trigo (izquierda) y cebada (derecha). Datos adaptados de Gallardo y Borie, 1999.

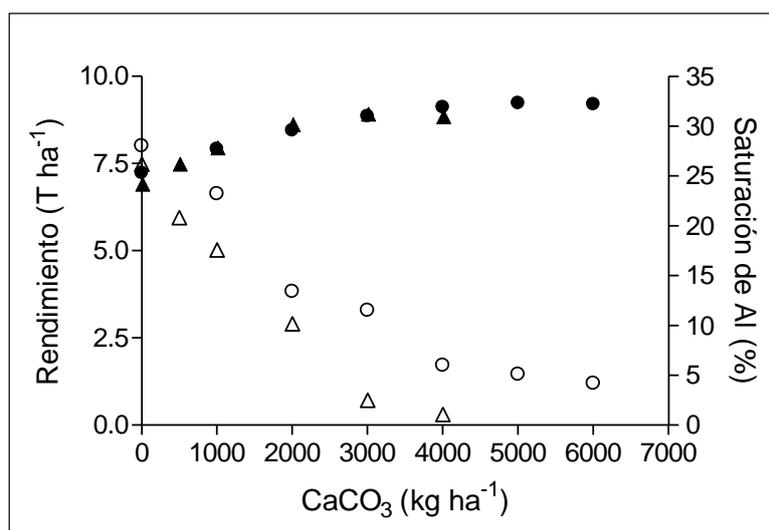


Figura 2. Efecto del encalado sobre el rendimiento de trigo (símbolos llenos) de los cultivares Kumpa-INIA (triángulos) y Dollinco-INIA (círculos) y, sobre la saturación de Al (símbolos vacíos) en los suelos Andisoles Vilcún (triángulos) y Cunco (círculos). Datos adaptados de Campillo et al., 2011.

Considerando la práctica de encalado, en Chile se han realizado numerosos trabajos en los cuales se evalúa la producción de materia seca o rendimiento en función de la aplicación de cal, en todos ellos, hay una mejora en la producción de los rendimientos, la cual varía en función de la sensibilidad varietal del cultivo (Fig. 2). Sin embargo son escasos los estudios que han evaluado en mayor detalle la captura y eficiencia de uso de los recursos bajo la restricción de alta acidez y disponibilidad de Al fitotóxico.

En el desarrollo de este capítulo se mostrarán los determinantes ecofisiológicos de la producción de biomasa, con énfasis en la captura y eficiencia de uso de recursos bajo las principales restricciones edáficas que se encuentran en los suelos ácidos, es decir, la deficiencia de P disponible y la toxicidad por Al. Para ello, se describirán los principales resultados de trabajos realizados bajo condiciones locales (Valdivia) sobre suelos Andisoles.

Condiciones edafoclimáticas del centro sur de Chile

Los trabajos se realizaron en la Estación Experimental Santa Rosa (39° 47'S, 73° 14'O, 19 m s.n.m) de la Universidad Austral de Chile, Valdivia. El suelo correspondió a un Andisol con valores de materia orgánica, pH, P-Olsen y densidad aparente de 12-14%, 5.5-6.2, 8-13 mg kg⁻¹ y 0.72 g cm⁻³, respectivamente.

Las condiciones de temperatura de estos experimentos, sembrados oportunamente (ej: última semana de Agosto o primera semana de Septiembre), fluctuaron en promedio entre 11.7 y 12.5 °C en el periodo previo a la antesis (emergencia-antesis), mientras que durante el llenado de granos (antesis-madures fisiológica) estas temperaturas estuvieron entre 16.9 y 16.5 °C (Fig. 3). Por otro lado, el promedio de radiación global durante del periodo de pre-antesis fluctuó entre 17.3 y 23.6 MJ m⁻² d⁻¹, mientras que durante el llenado de granos es de 24.1 y 30.4 MJ m⁻² d⁻¹ (Fig. 3). Las cargas de radiación global incidente que experimenta este cultivo a lo largo de su ciclo fluctúan entre 2618 a 3220 MJ m⁻².

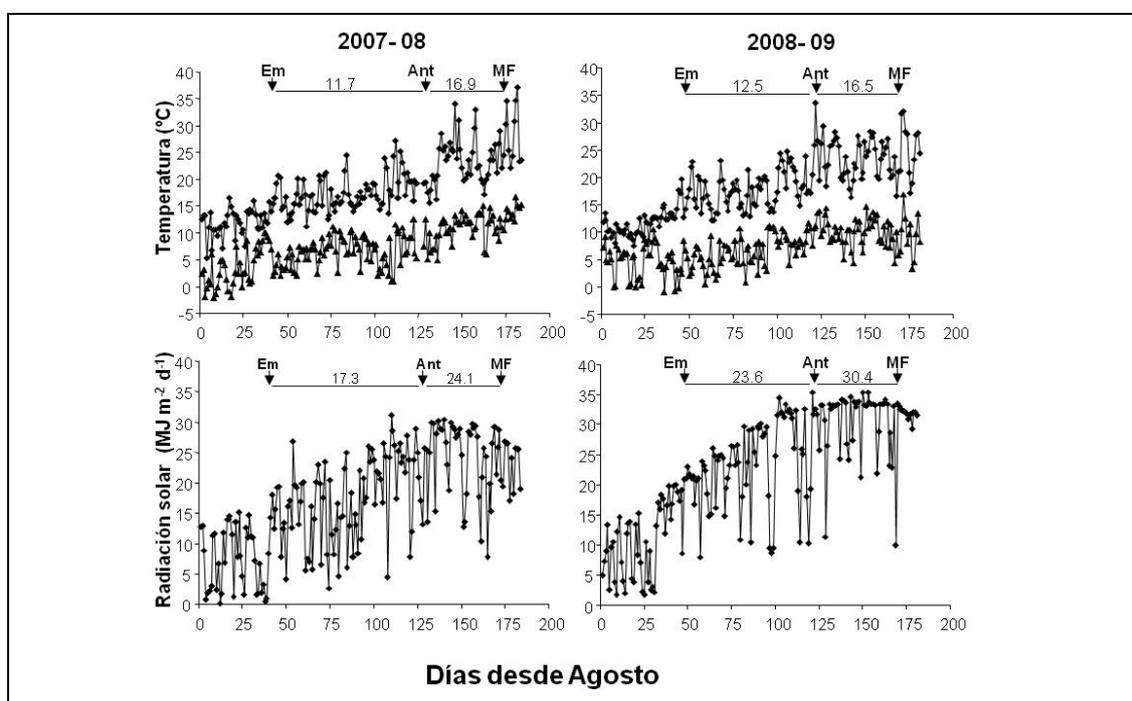


Figura 3. Temperaturas diarias máximas (rombos) y mínimas (triángulos) y radiación global incidente durante el ciclo de cultivo de trigo en tres experimentos (2007-08, 2008-09 y 2009-10). Em, Ant y MF corresponden a los momentos de emergencia, antesis y madurez fisiológica, respectivamente. Los valores entre periodos corresponden a los promedios de temperatura (°C) y radiación (MJ m⁻² d⁻¹) solar incidente de cada periodo. Fuente: (adaptado de Sandaña y Pinochet, 2011).

Captura y Eficiencia de Uso de Recursos bajo Restricciones Edáficas

Disponibilidad de P

Efecto de la disponibilidad de P en la fenología de trigo.

En general en estos ambientes de alto rendimiento se ha observado que la disponibilidad de P afecta ligeramente al fenología del cultivo de trigo (cv. Pandora) (Fig. 4). Bajo condiciones de deficiencia de P (tratamientos P0, P1 y -P) el momento de floración y madurez fisiológica se extienden en promedio de 3 a 5 días (Fig. 4). Las

bajas respuestas en fenología, frente a restricciones edáficas tales como el P, concuerdan con el hecho de que los principales factores ambientales que determinan el desarrollo de los cultivos son la temperatura y fotoperiodo (Slafer y Rawson, 1994; Slafer et al., 2009).

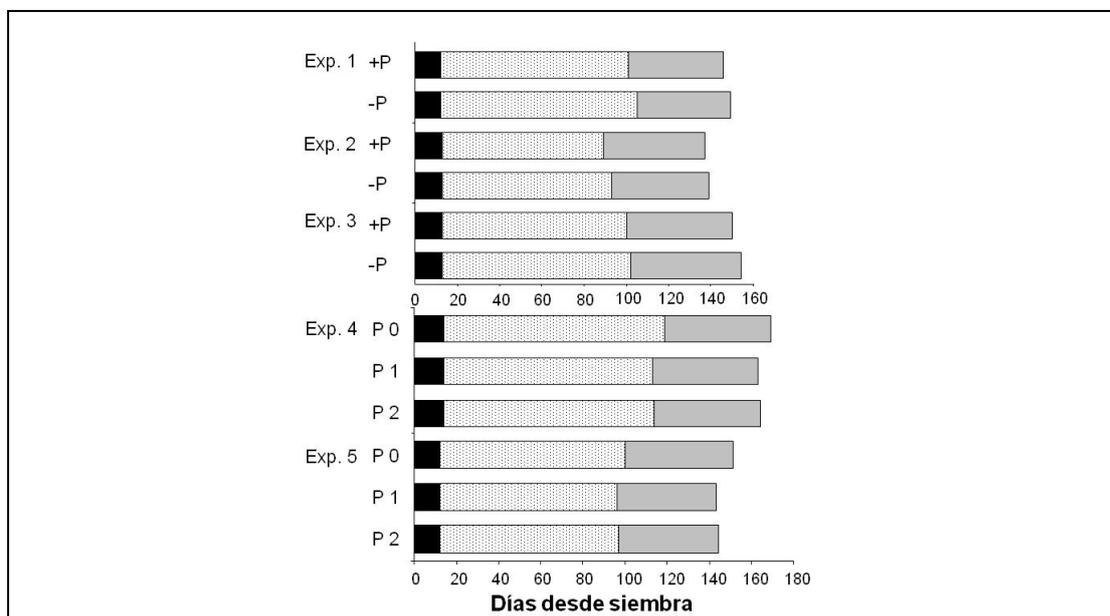


Figura 4. Duración de los periodos de siembra-emergencia (barras negras), emergencia-floración (barras punteadas) y floración-madurez fisiológica (barras grises) de trigo cultivado bajo distintos niveles de disponibilidad de P en distintos experimentos (adaptado de Sandaña y Pinochet, 2011; Sandaña et al., 2012).

Respuestas de los componentes del rendimiento.

En general los rendimientos potenciales alcanzados en este ambiente están por sobre 10 Mg ha^{-1} con producciones de biomasa que pueden llegar a 25 Mg ha^{-1} . En los suelos donde se realizaron estos experimentos contienen niveles iniciales de P que fluctúan entre 8 a 12 mg kg^{-1} P-Olsen. Estos niveles de P han reducido el rendimiento potencial de trigo hasta en un 35% (Sandaña y Pinochet, 2011). En general, las respuestas del rendimiento frente a variaciones en la disponibilidad de P han sido relacionadas a modificaciones en la producción de biomasa aérea (Fig. 5a) y no a cambios en el índice de cosecha (Fig. 5b). Estos resultados concuerdan con otros estudios en trigo, en los cuales se ha observado que el índice de cosecha es poco modificado por restricciones de suelo tales como deficiencias de P (Batten et al., 1999; Manske et al., 2001, Aulakh et al., 2003; Sandaña y Pinochet, 2011), N (Dreccer et al., 2000; Salvagiotti y Miralles, 2008), S (Salvagiotti y Miralles, 2008) y toxicidad de Al (Valle et al., 2009a).

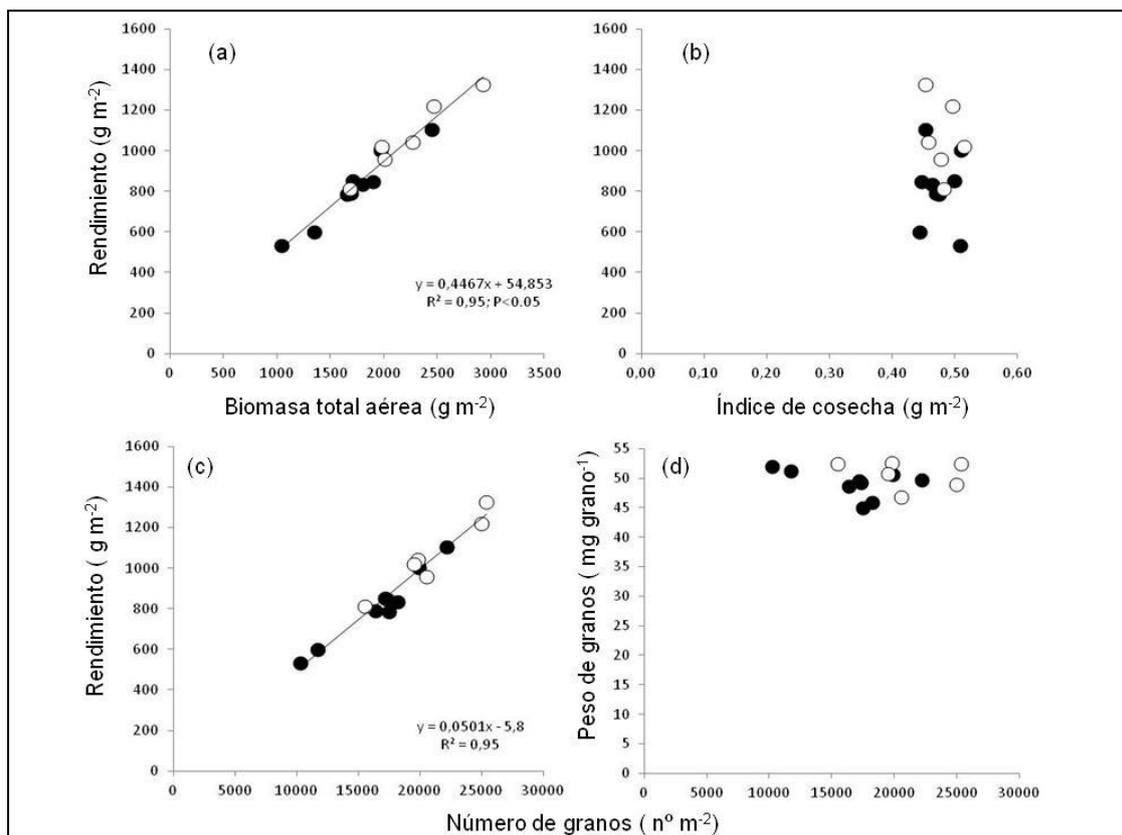


Figura 5. Relación del rendimiento con la biomasa aérea (a), el índice de cosecha (b) y el número de granos por unidad de superficie (c). Y la relación entre el peso y número de granos en trigo bajo tratamientos sin (círculos negros) y con (círculos blancos) fertilización fosforada P en los experimentos 1 al 5 (adaptado de Sandaña y Pinochet 2011; Sandaña y Pinochet, datos no publicados).

Dentro de los componentes numéricos del rendimiento, se ha observado que es el número de granos el componente que mejor explica las respuestas en rendimiento (Figura 5c). Es interesante destacar que, a pesar del alto potencial de rendimiento, el peso de granos no presenta una relación con el número de granos producidos por unidad de superficie (Figura 5d). Estos antecedentes están en línea con estudios previos en cereales de grano pequeño donde se ha observado que el número de granos es el componente principal que explica las respuestas en rendimiento debido a factores genéticos o agronómicos (Sadras et al., 2007; Peltonen-Sainio et al., 2007; Cossani et al., 2009; Valle et al., 2009a, Lázaro et al., 2010; Sandaña y Pinochet, 2011). Las modificaciones en el número de granos estarían relacionadas con la incidencia de la disponibilidad de P sobre el cociente fototermal durante el periodo crítico del cultivo (calculado entre 20 días previos y 10 días posteriores a floración) (Sandaña y Pinochet, 2011). Estos autores reportaron que esta variable fue reducida por la deficiencia de P, debido a disminuciones de la radiación interceptada durante dicho periodo (periodo crítico). Finalmente, el rendimiento, número de granos y biomasa de espigas en anátesis estuvieron relacionados con el cociente fototermal. Por otro lado, tanto la biomasa de espigas como el número de granos estuvieron relacionados con la tasa de crecimiento del cultivo durante el periodo crítico del cultivo.

Tomando en cuenta la baja respuesta en el desarrollo del cultivo frente a la disponibilidad de P, no es sorpresa que la generación de biomasa haya estado relacionada con la tasa de crecimiento del cultivo (fase lineal) (Figura 6a). En estos estudios además se observó una relación directa entre la tasa de crecimiento y la cantidad de radiación global interceptada durante el ciclo del cultivo (Figura 6b), lo cual

estaría indicando que son los procesos de captura y uso de radiación los que están siendo afectados por las limitaciones de P (Sandaña et al., 2012).

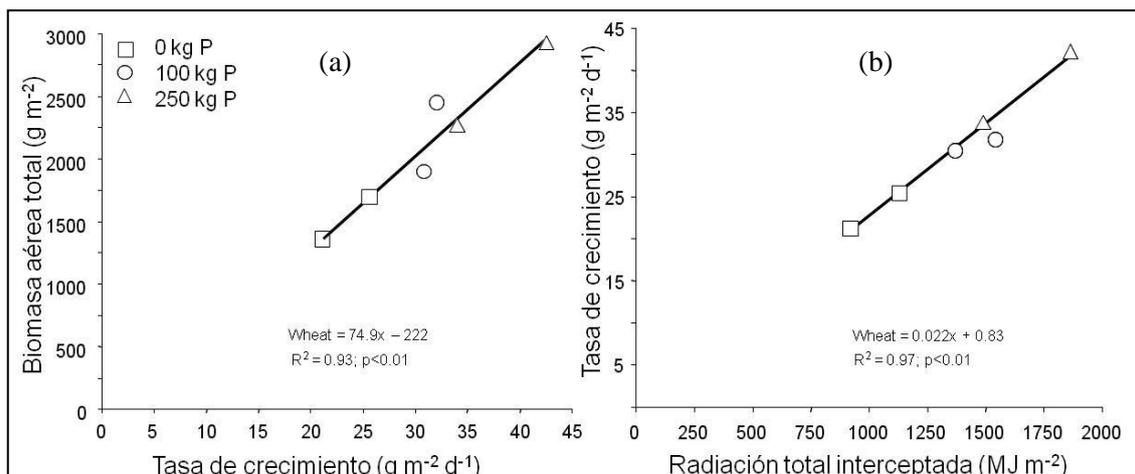


Figura 6. Relación entre la producción de biomasa y la tasa de crecimiento (a) y entre la tasa de crecimiento y la radiación total global interceptada durante el ciclo de cultivo (b) de trigo bajo distintos niveles de fertilización fosforada (datos combinados del experimento 4 y 5 (Sandaña et al., 2012)).

Captura y uso de radiación bajo distintas disponibilidades de P.

En los experimentos 4 y 5 las distintas dosis de fertilización fosforada afectaron el desarrollo de área foliar del cultivo. Las mayores reducciones en el IAF fueron registradas en el tratamiento sin fertilización fosforada (Fig. 7). En relación al momento de máximo IAF, el tratamiento sin P redujo esta variable, en relación al tratamiento con mayor dosis, en 55 y 50% en el experimento 4 y 5, respectivamente. Similarmente a lo observado con el IAF, el porcentaje de radiación interceptada fue principalmente reducida por el tratamiento sin fertilización fosforada (Fig. 8). El porcentaje de radiación interceptada estuvo significativamente relacionada con el IAF. En este cultivo se registró un coeficiente de extinción lumínica de 0.56, el cual no fue afectado por los tratamientos de fertilización (datos no mostrados). Otros estudios en trigo bajos distintas deficiencias nutricionales han demostrado también reducciones en la radiación interceptada (P: Rodríguez et al., 2000; Lázaro et al., 2010; Sandaña et al., 2012; N: Dreccer et al., 2000; Salvagiotti and Miralles, 2008; S: Salvagiotti y Miralles, 2008), así como bajo toxicidad de aluminio (Valle et al., 2009b). Estas reducciones han estado relacionadas principalmente a cambios en el IAF y no al cociente de extinción lumínica (N: Muurinen y Peltonen-Sainio, 2006; Salvagiotti y Miralles, 2008; S: Salvagiotti y Miralles, 2008; P: Rodríguez et al., 2000; y toxicidad de Al: Valle et al., 2009b).

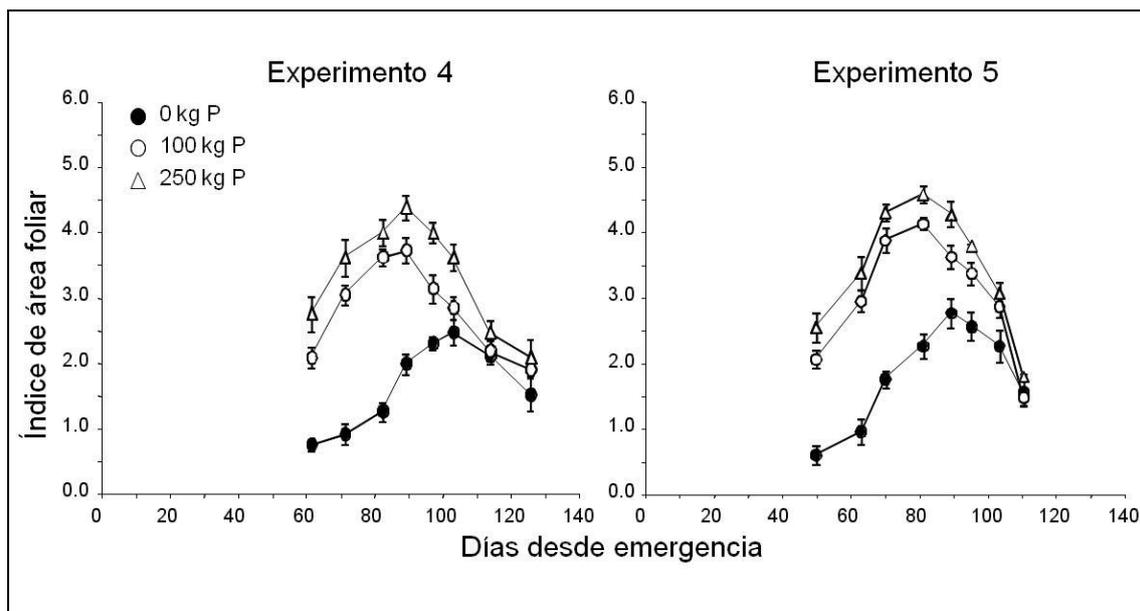


Figura 7. Desarrollo del área foliar en el cultivo de trigo bajo tres niveles de fertilización fosforada en los experimentos 4 y 5 (Sandaña et al., 2012).

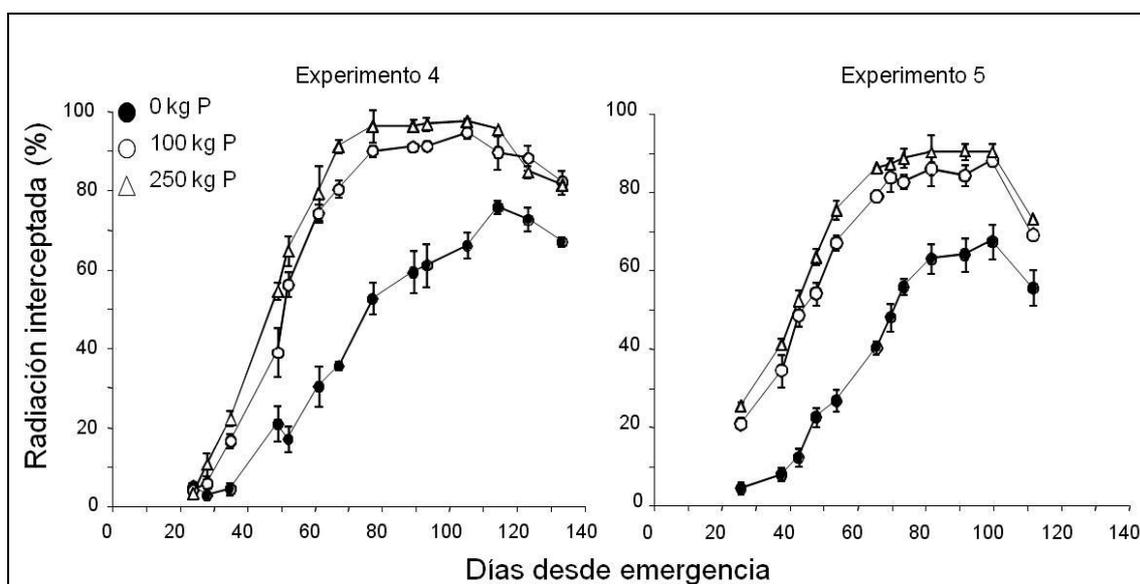


Figura 8. Radiación interceptada (%) en el cultivo de trigo bajo tres niveles de fertilización fosforada en los experimentos 4 y 5 (adaptado de Sandaña et al., 2012).

En cuanto a la eficiencia de uso de la radiación (EUR) se ha observado que la deficiencia de P, en los distintos experimentos realizados en este ambiente, no afecta esta variable ecofisiológica. El valor promedio de EUR registrado en estos ambientes es de $1,49 \text{ g MJ}^{-1}$ (Fig. 9). Diversos estudios han mostrado que la EUR es una variable estable frente a deficiencias de P (trigo: Sandaña y Pinochet, 2011; maíz: Pellerin et al., 2000; Colomb et al., 2000; Plénet et al., 2000; Fletcher et al., 2008). Hasta el momento solo dos estudios han reportados bajas en la EUR en condiciones de deficiencia de P (Lázaro et al., 2010; Rodríguez et al., 2000). Al parecer reducciones en EUR podrían esperarse bajo deficiencias de P más extremas reflejadas en reducciones en biomasa o rendimiento por sobre el 40% (Sandaña y Pinochet, 2011).

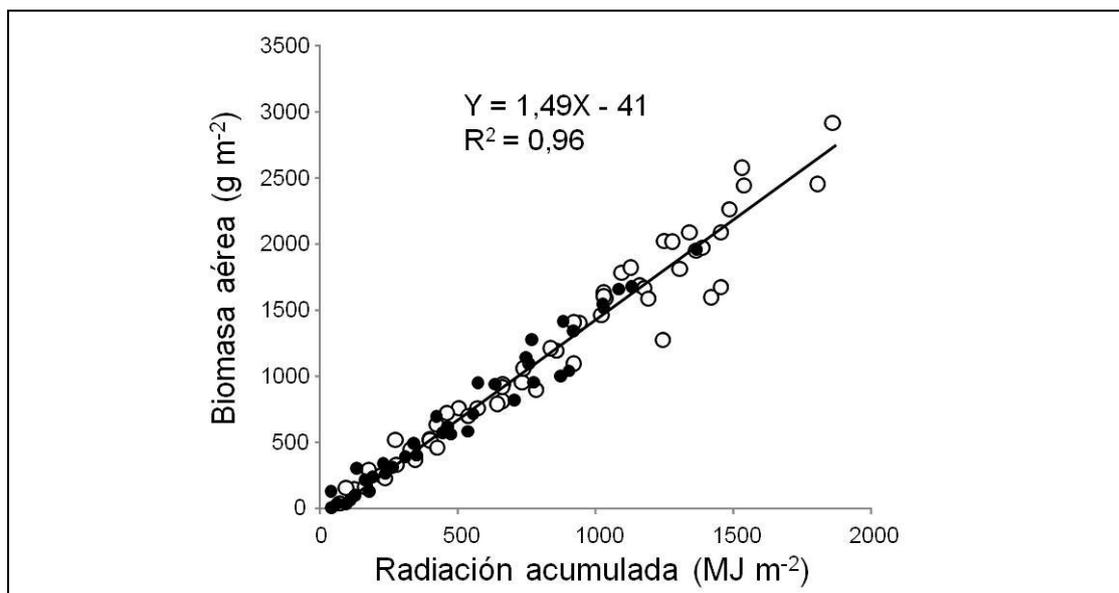


Figura 9. Relación entre la acumulación de biomasa y la radiación global acumulada por el cultivo de trigo con (símbolos blancos) y sin (círculos negros) fertilización fosforada (experimentos 1, 2, 3, 4 y 5) (adaptados de Sandaña y Pinochet, 2011; Sandaña et al., 2012).

Eficiencia de uso de P.

Tanto en el experimento 4 como 5 los distintos niveles de fertilización fosforada afectaron la concentración de P en tejidos principalmente durante las primeras etapas del cultivo con valores de biomasa menores a 1000 g m^{-2} . Además en todos los tratamientos se observó una reducción de la concentración de P en la medida que la biomasa aumentó (Fig. 10), logrando niveles promedios de 0,12% en madurez fisiológica. Estas concentraciones están por debajo de los reportados por Manske et al., (2002) (0,14-0,18%) en los que se compararon líneas isogénicas de trigos altos, semi-enanos y enanos. Sin embargo, en el presente estudio los rendimientos estuvieron muy por sobre ($>10 \text{ Mg ha}^{-1}$) los rendimientos reportados por estos autores (4 Mg ha^{-1}), lo cual podría implicar un mayor efecto dilución del nutriente en estos ambientes más productivos.

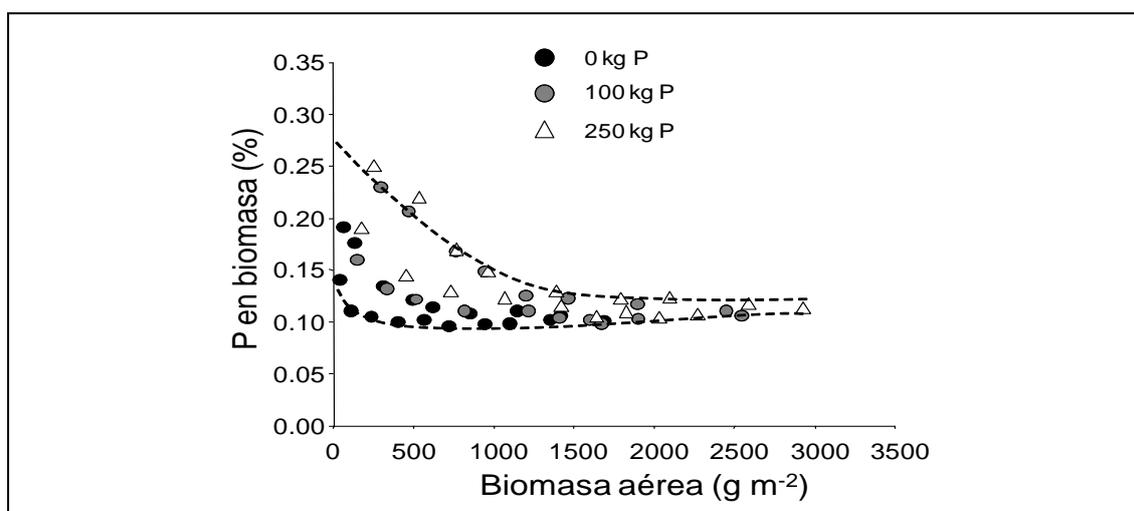


Figura 10. Relación entre la concentración de P en biomasa y la producción de biomasa en trigo bajo tres niveles de disponibilidad de P (datos de experimentos 4 y 5) (Sandaña y Pinochet, datos no publicados).

La biomasa aérea total y el rendimiento estuvieron directamente relacionados ($p < 0,01$) con la absorción de P. Los coeficientes de regresión, que representan las eficiencias de utilización de P (EUP), para biomasa y rendimiento fueron de 781 y 354 g g P^{-1} , respectivamente (Fig. 11). Estos valores de EUP para rendimiento están dentro del rango de valores (274 - 480) reportados por Manske et al (2001) durante dos temporadas en once genotipos de trigo y bajo dos niveles de P. Además, en el presente estudio se observó que la absorción total de P estuvo relacionada ($P < 0,05$) tanto con la biomasa de raíces como con la densidad de raíces. Por otro lado, no se observó una relación entre el P absorbido y el largo específico de raíz (Fig. 12). Finalmente la eficiencia de uso de P (EUP), producto entre la EUP y EAP, fue significativamente ($P < 0.01$) afectada por la disponibilidad de P. La EUP fluctuó entre 46 y 82 $\text{g rendimiento ppm}^{-1}$ P-Olsen (Fig.13). Variaciones en la EUP estuvieron relacionadas ($P < 0.01$) con cambios en la EAP y no con la EUP (Fig. 13). Similarmente, previos estudios en trigo han mostrado que diferencias en rendimiento entre genotipos de trigo han estado relacionadas con la eficiencia de absorción de P (Manske et al., 2001). Rasgos radicales como la densidad de raíces y excreciones de sustancias orgánicas estarían detrás de las diferentes eficiencias de absorción de P (EAP) de trigo (Manske et al., 2000).

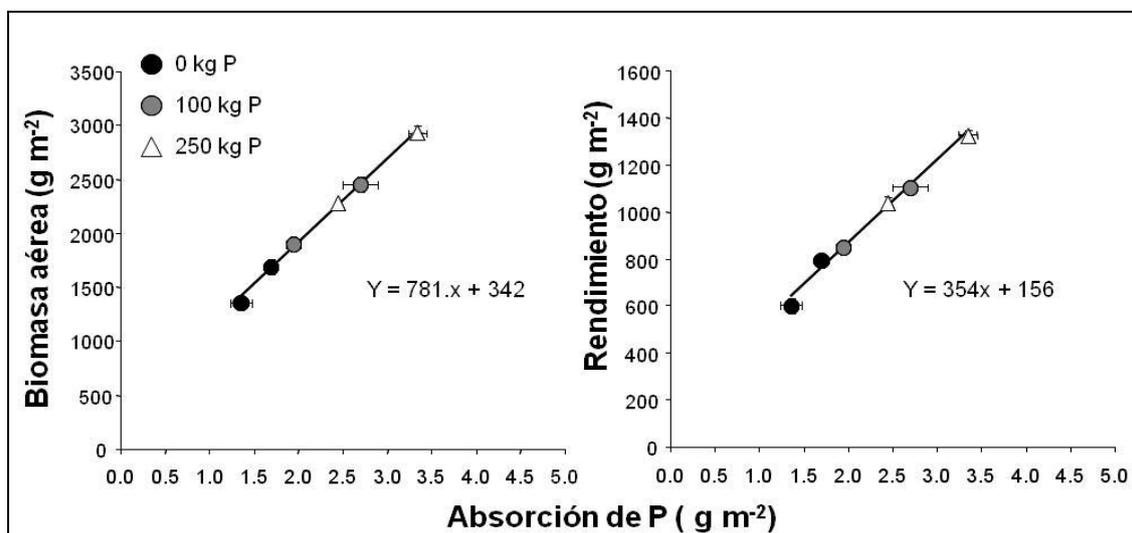


Figura 11. Relación de la biomasa aérea (a) y rendimiento (b) con la absorción de P total en trigo cultivado bajo tres niveles de disponibilidad de P (datos de experimentos 4 y 5) (Sandaña y Pinochet, datos no publicados).

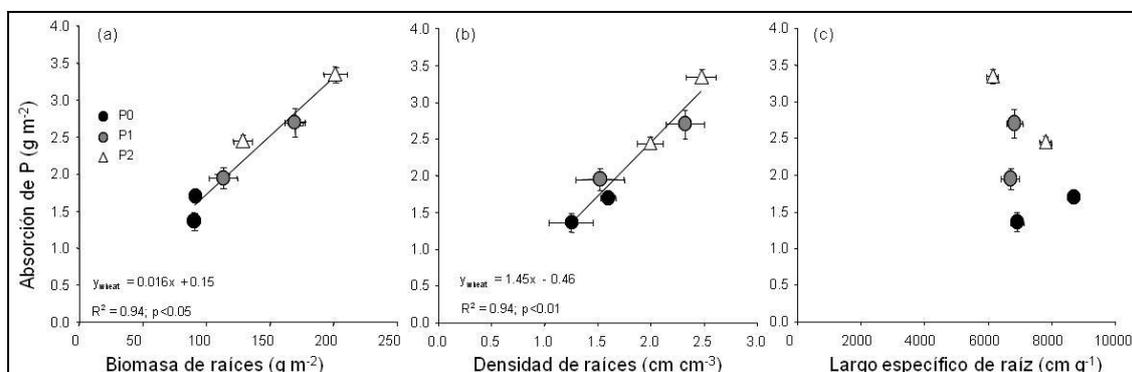


Figura 12. Relación entre la absorción de P y distintos rasgos radicales, (a) biomasa de raíces, (b) densidad de raíces y (c) largo específico de raíz en trigo cultivado bajo tres niveles de disponibilidad de P (datos de experimentos 4 y 5) (Sandaña y Pinochet, datos no publicados).

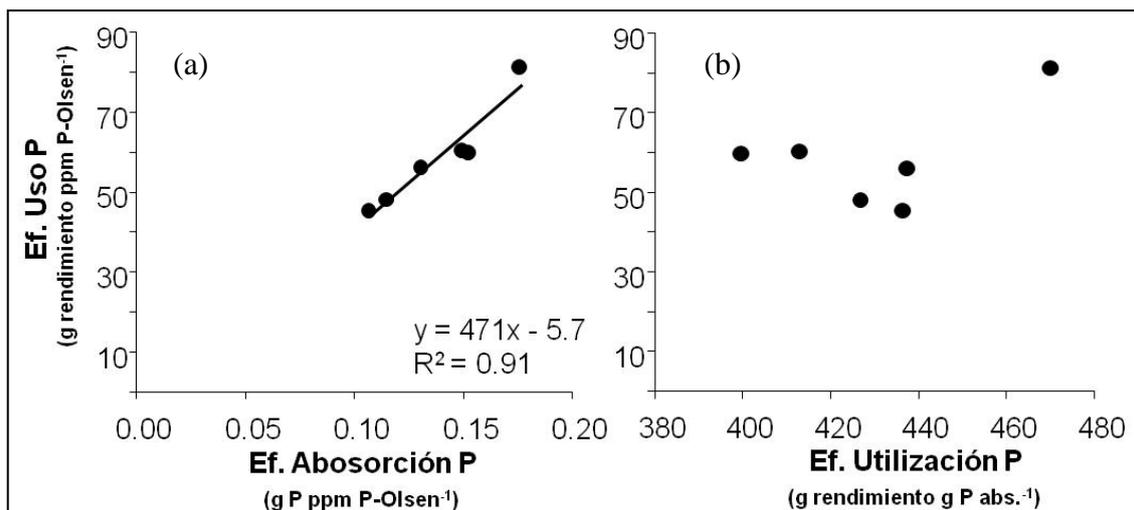


Figura 13. Relación entre (a) la eficiencia de uso de P y la eficiencia de absorción de P y (b) entre la eficiencia de uso de P y la eficiencia de utilización de P en trigo cultivado bajo tres niveles de disponibilidad de P (datos de experimentos 4 y 5) (Sandaña y Pinochet, datos no publicados).

Toxicidad por Aluminio

Efecto de la Toxicidad por Al sobre al fenología del cultivo

En general, la fenología del cultivo de trigo fue ligeramente afectada bajo condiciones de toxicidad por Al, excepto en un caso de extrema toxicidad (sobre 60% de saturación de Al) en el cultivar sensible (Fig. 14). El efecto principal se manifestó como un retraso de las etapas, principalmente desde emergencia a doble anillo y emergencia a antesis en los casos más extremos. En cambio el período de llenado de grano, prácticamente no se afectó bajo condiciones de toxicidad por Al. Este atraso en la fecha a antesis ha sido reportado en maíz, bajo suelos ácidos Sierra et al. (2003). Sin embargo, cabe destacar que la magnitud del efecto sobre la fenología es bastante menor al encontrado en variables del crecimiento (como se detallará más adelante), lo cual está en concordancia con los señalado por Slafer y Rawson (1994).

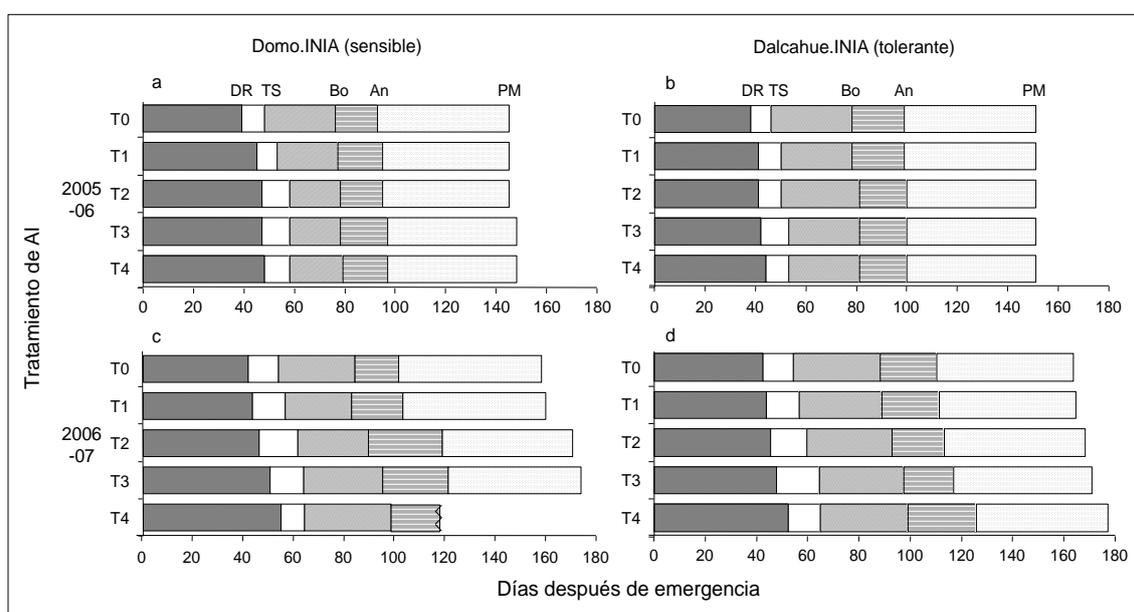


Figura 14. Estados fenológicos para los cultivares sensible (a, c) y tolerante (b, d) al Al, para los diferentes tratamientos de Al (T0, T1, T2, T3 y T4; tratamientos en orden creciente de Al intercambiable en el suelo), durante las estaciones de crecimiento 2005–06 (a, b) y, 2006–07 (c, d). Las barras muestran la longitud de cada etapa: emergencia-doble anillo (DR, barra achurada), doble anillo-espiguilla terminal (TS, barra blanca), espiguilla terminal- bota (Bo, barras con línea diagonal), bota-antesis (An, barra con líneas horizontales), Antesis-madurez fisiológica (PM, barras punteadas). Plantas del cultivar sensible en el tratamiento T4 en 2006-07 murieron antes de alcanzar antesis (línea zig-zag).

Generación del rendimiento y sus componentes bajo condiciones de toxicidad por Al

El rendimiento de un cultivo por unidad de área, sobre un período de tiempo dado, puede ser expresado mediante la producción de biomasa que éste alcance y la partición de esa biomasa hacia los órganos de consumo (granos en el caso de los cereales), es decir el índice de cosecha.

A nivel mundial existen varios estudios (ya sea a través de experimentos a campo o bajo condiciones controladas) que muestran que al aumentar el nivel de Al en el suelo, el rendimiento cae fuertemente y la magnitud de la caída está dada principalmente por la sensibilidad varietal (Tang et al., 2003; Kariuki et al., 2007; Caires et al., 2008). En Chile, estudios realizados en un suelo Andisol en Valdivia, bajo diferentes disponibilidades de Al intercambiable en el suelo, han mostrado que el rendimiento de trigo disminuye en función del aumento del Al intercambiable del suelo y, el componente fisiológico que mejor explica esta caída es la producción e biomasa del cultivo, siendo el índice de cosecha un carácter bastante estable, que sólo manifiesta una caída en condiciones de muy alta toxicidad por Al en cultivares sensibles (Fig. 15). Esta tendencia general, en que el rendimiento está determinado principalmente por la biomasa del cultivo, ya ha sido ampliamente descrito bajo otras restricciones edáficas y bajo diferentes ambientes (Dreccer et al., 2000; Manske et al., 2001, Aulakh et al., 2003; Salvagiotti y Miralles, 2008; Sandaña y Pinochet, 2011).

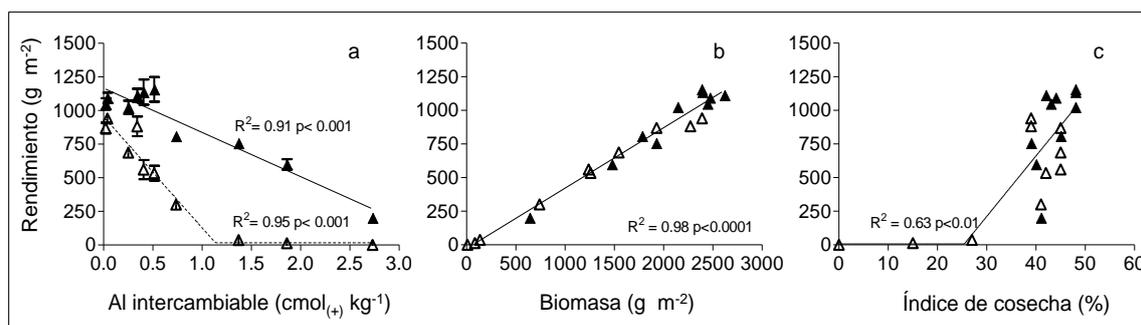


Figura 15. Efecto del Al intercambiable sobre el rendimiento del cultivo (a), y relación entre el rendimiento y la biomasa producida (b) y su partición a granos (c). Triángulos llenos representan cultivar tolerante al Al (Dalcahue.INIA) y triángulos vacíos al cultivar sensible (Domo.INIA). Barras de los símbolos muestran el error estándar de la media. Figuras adaptadas de Valle et al., 2009a.

La acumulación de biomasa depende de la habilidad de los cultivos de interceptar radiación (fotosintéticamente activa) y transformarla en biomasa, es decir, eficiencia de uso de radiación, EUR (Monteith, 1977). Diversos estudios evaluando diferentes restricciones edáficas (disponibilidad de N, P, impedancia mecánica) han mostrado que el principal determinante de la biomasa del cultivo es su habilidad para capturar la radiación, y las variables que permiten esa captura, es decir, la generación del área

foliar (Plénet et al., 2000; Sierra et al., 2003; Muurinen y Peltonen-Sainio, 2006; Sadras et al., 2005). Sin embargo, bajo condiciones de toxicidad por Al estos determinantes han sido escasamente evaluados. Bajo condiciones de campo, Valle et al. (2009b) muestran en sus resultados que el comportamiento descrito para el cultivo de trigo para otros ambientes y restricciones es similar al encontrado bajo otras restricciones, es decir, la biomasa está principalmente relacionada con la captura de radiación y en menor medida con la conversión de esa radiación en biomasa, es decir, la eficiencia de uso de la radiación se muestra como un carácter más estable e insensible (según el cultivar utilizado) ante incrementos en el nivel de Al del suelo (Fig. 16).

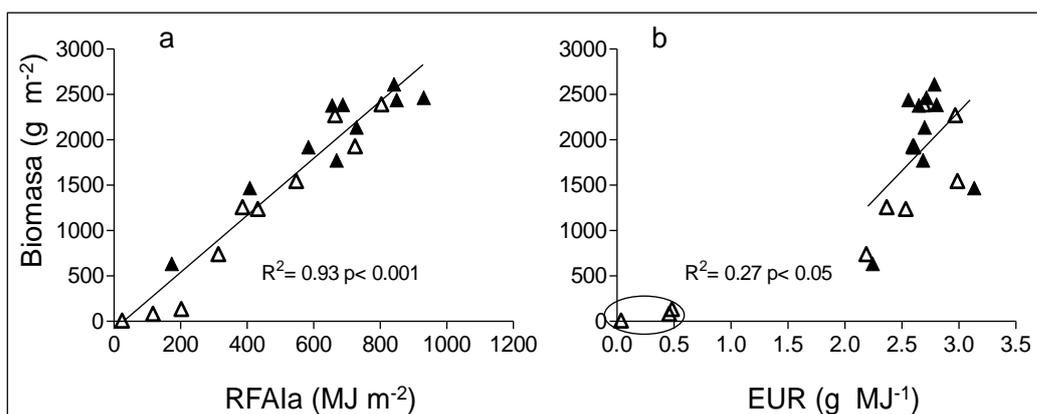


Figura 16. Relación entre la biomasa del trigo y sus determinantes ecofisiológicos, (a) radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada (RFAla) y (b) eficiencia de uso de la radiación (EUR). Triángulos llenos representan cultivar tolerante al Al (Dalcahue.INIA) y triángulos vacíos al cultivar sensible (Domo.INIA). Datos encerrados en un círculo no fueron considerados en el análisis de regresión. Figuras adaptadas de Valle et al., 2009b.

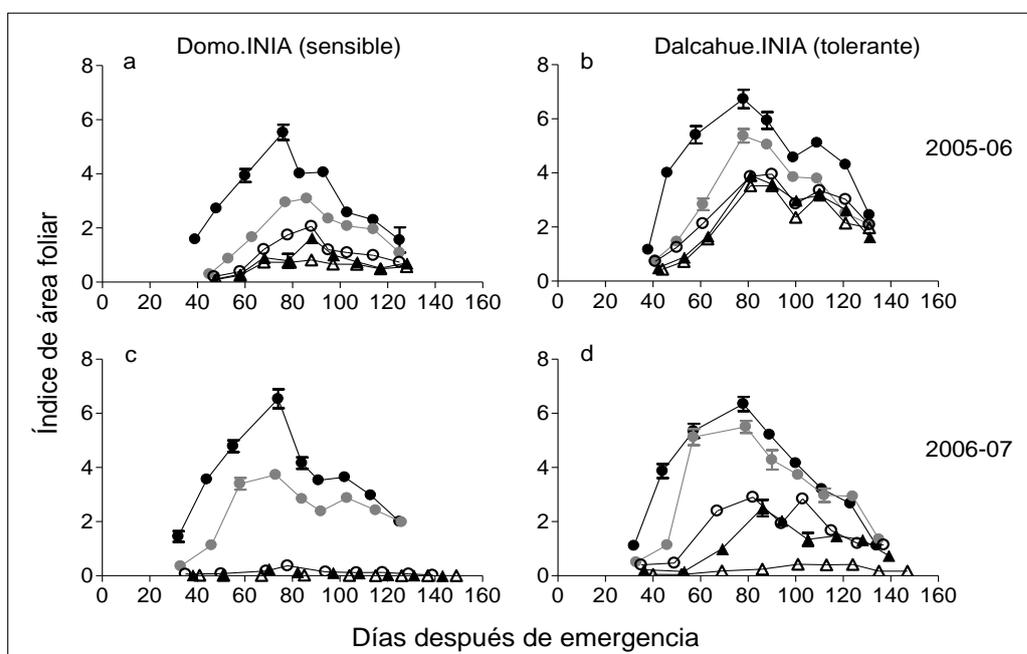


Figura 17. Evolución del índice de área foliar del cultivar sensible al Al (a, c) y tolerante (b, d), para los tratamientos de Al (T0, círculo negro; T1, círculos grises; T2, círculos vacíos; T3, triángulos negros; T4, triángulos vacíos; tratamientos en orden creciente de Al intercambiable en el suelo), durante las estaciones de crecimiento 2005–06 (a, b) y, 2006–07 (c, d). Barras verticales muestran el error estándar de la media. Figuras adaptadas de Valle et al., 2009b.

Además, este estudio mostró que la principal causa de disminución de la captura de radiación se debió a la menor generación del área foliar (Fig. 17), lo que finalmente se tradujo en una menor intercepción de radiación (Fig 18). La importancia del tamaño del área foliar como captador de radiación ha sido bastante documentado bajo condiciones experimentales muy diferentes e incluso bajo otras restricciones edáficas (Gallagher y Biscoe, 1978; Fischer, 1993; O'Connell et al., 2004; Sadras et al., 2005; Salvagiotti and Miralles, 2008).

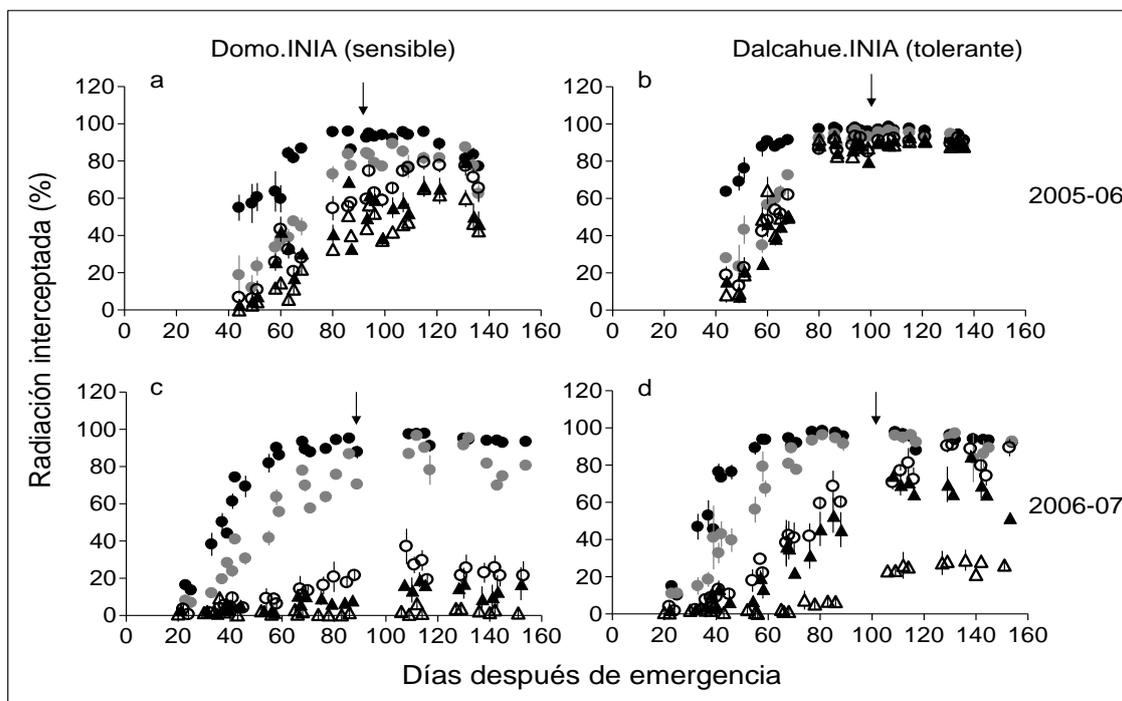


Figura 18. Evolución de la radiación interceptada para los cultivares sensible (a, c) y tolerante (b, d) al Al, para los diferentes tratamientos de Al (T0, círculo negro; T1, círculos grises; T2, círculos vacíos; T3, triángulos negros; T4, triángulos vacíos; tratamientos en orden creciente de Al intercambiable en el suelo), durante las estaciones de crecimiento 2005–06 (a, b) y, 2006–07 (c, d). Barras verticales muestran el error estándar de la media. Flechas en las figuras indican el momento de antesis en el tratamiento control (T0). Figuras adaptadas de Valle et al., 2009b.

Efecto del Al fitotóxico sobre el crecimiento radical, captura y uso de nutrientes

En la literatura, existen una gran cantidad de trabajos en los cuales se describe que el efecto principal del Al sobre las plantas es el daño a sus sistemas radicales, con un consecuente menor crecimiento, con lo cual, se impide o disminuye la captura de agua y nutrientes, manifestándose este daño desde etapas muy tempranas e incluso sometiendo las plántulas a exposiciones muy cortas (horas) a una solución con Al (Delhaize et al., 1993; Pellet et al., 1996; Tang et al. 2001 Tang et al., 2002a). Considerando que son las raíces los órganos encargados de capturar agua y nutrientes, se han realizado muy pocos trabajos conducentes a evaluar la respuesta de las raíces en crecimiento, captura y eficiencia de uso de nutrientes bajo condiciones de toxicidad por Al bajo condiciones de campo. Sin embargo, existe profusa literatura evaluando estas variables bajo condiciones controladas (Foy et al., 1978; Mugwira et al., 1980; Taylor y Foy, 1985; Moustakas et al., 1992; Delhaize et al., 1993; Foy, 1996; Silva et al., 2010).

En Chile, se han realizado trabajos principalmente bajo condiciones controladas evaluando el crecimiento radical de diferentes cultivos y cultivares con la finalidad de

seleccionar genotipos (ver Figura 1). Sin embargo, a nivel de campo, son escasos los trabajos que evalúen las características del sistema radical bajo condiciones de toxicidad por Al y su efecto sobre la captura y eficiencia de uso de nutrientes.

El crecimiento radical del trigo bajo condiciones de toxicidad por Al sigue un comportamiento similar al mostrado por la biomasa aérea, disminuyendo en función del aumento del nivel de Al intercambiable en el suelo (Fig. 19), y la caída en la acumulación de biomasa es dependiente de la sensibilidad varietal. Además, la acumulación de biomasa aérea se asoció estrechamente a la producción de biomasa radical (Figura 19).

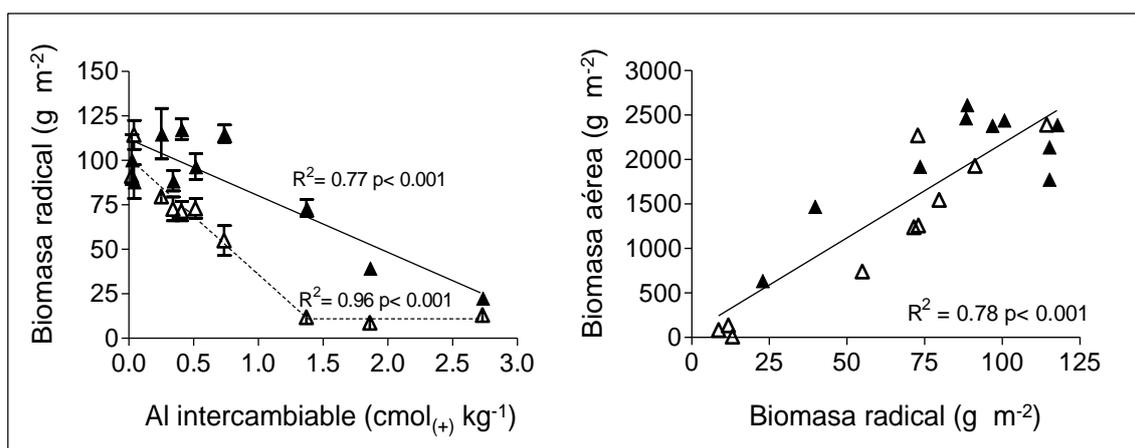


Figura 19. Relación entre la biomasa radical y el contenido de Al intercambiable en el suelo (a) y, entr la biomasa aérea y la biomasa radical (b). Triángulos Llenos representan cultivar tolerante al Al (Dalcahue.INIA) y triángulos vacíos al cultivar sensible (Domo.INIA). Barras de los símbolos muestran el error estándar de la media. Figuras adaptadas de Valle et al., 2009a.

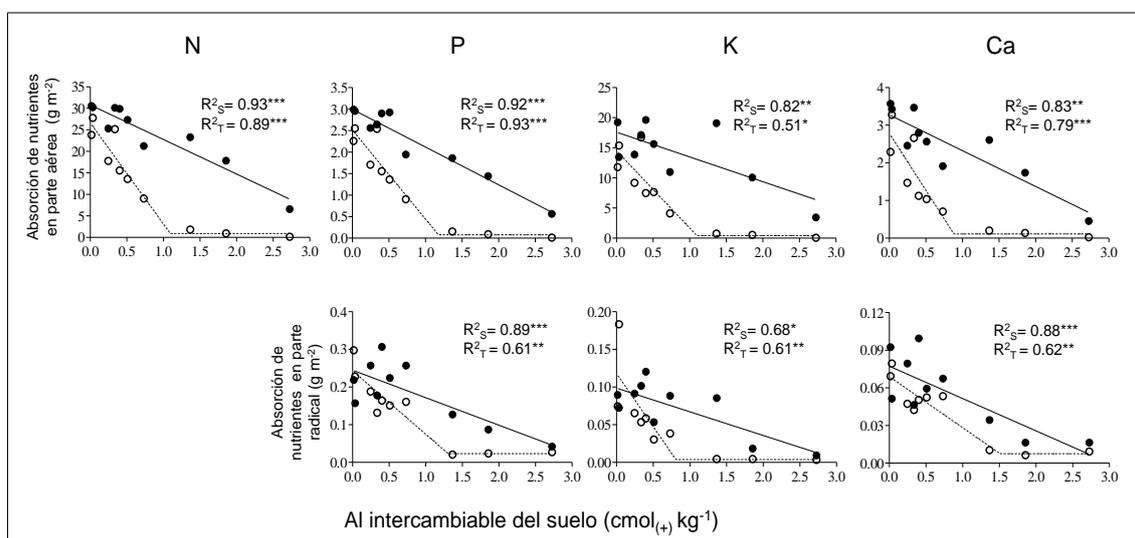


Figura 20. Relación entre la absorción de nutrientes (N, P, K, Ca) en la biomasa aérea (línea superior), radical (línea inferior) y la concentración de Al del suelo. Círculos llenos representan cultivar tolerante al Al (Dalcahue.INIA) y círculos vacíos al cultivar sensible (Domo.INIA). *, **, *** representan significancia de la regresión al nivel de $p < 0.05$, 0.01, 0.001, respectivamente. Figuras adaptadas de Valle et al., 2011.

Efectivamente, la absorción o captura de nutrientes por las raíces fue fuertemente disminuída debido a aumentos en la concentración de Al intercambiable del suelo (Fig. 20). Estos datos son los primero en mostrar el efecto de la concentración del Al, bajo

condiciones de campo, sobre la absorción de nutrientes, tanto en la parte aérea como en la radical. En forma análoga a la captura y eficiencia de uso de radiación, los resultados mostrados por Valle et al. (2011) muestran que la eficiencia de absorción o captura de nutrientes es el componente de la eficiencia de uso de nutrientes que más se afecta debido a la toxicidad por Al, así, la Figura 9 muestra que el componente de eficiencia de absorción cae al aumentar la concentración de Al del suelo y, la eficiencia de utilización se mantiene más estable, cayendo en casos de extrema toxicidad en el cultivar sensible a este elemento (Fig. 21). Este efecto del Al sobre el crecimiento radical se evidencia además en la estrecha relación entre la absorción de nutrientes y la acumulación de biomasa radical presentada en el mismo trabajo por los autores (Fig. 22).

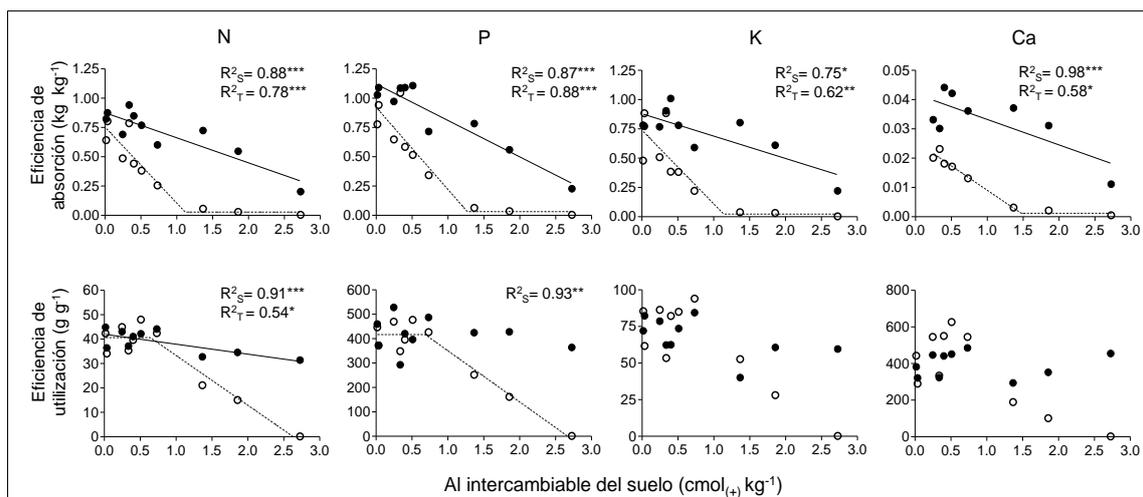


Figura 21. Relación entre la eficiencia de absorción (línea superior de figuras) y eficiencia de utilización (línea inferior de figuras) de nutrientes (N, P, K y Ca) y, la concentración de Al intercambiable del suelo. Círculos llenos representan cultivar tolerante al Al (Dalcahue.INIA) y círculos vacíos al cultivar sensible (Domo.INIA). *, **, *** representan significancia de la regresión al nivel de $p < 0.05$, 0.01 , 0.001 , respectivamente. Figuras adaptadas de Valle et al., 2011.

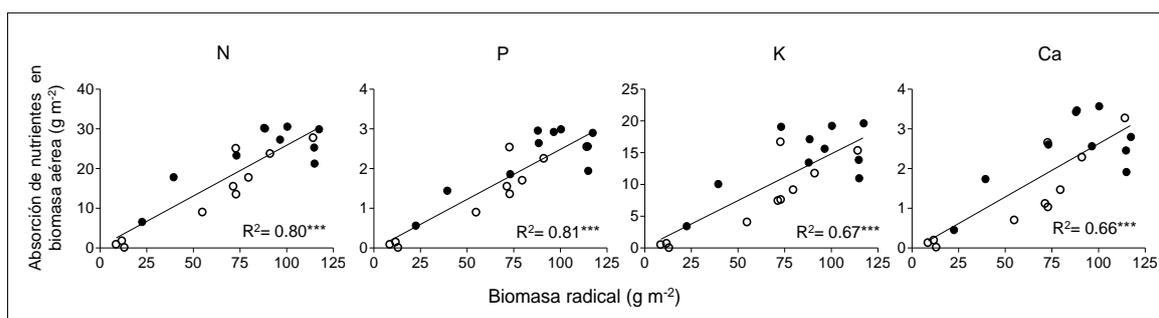


Figura 22. Relación entre la absorción de nutrientes (N, P, K y Ca) en la biomasa aérea y la biomasa radical. Círculos llenos representan cultivar tolerante al Al (Dalcahue.INIA) y círculos vacíos al cultivar sensible (Domo.INIA). *, **, *** representan significancia de la regresión al nivel de $p < 0.05$, 0.01 , 0.001 , respectivamente. Figuras adaptadas de Valle et al., 2011.

Observaciones finales

Considerando ambas restricciones edáficas (P y Al), en suelos con problemas de acidez, la fenología del cultivo fue ligeramente afectada por los distintos niveles

evaluados. En general, bajo ambas restricciones de suelo el ciclo de cultivo fue extendido.

Tanto la deficiencia de P como la toxicidad de Al afectan de forma similar los determinantes ecofisiológicos del rendimiento. Las respuestas en rendimiento estuvieron relacionadas con la producción de biomasa y solo en casos extremos se afectó la partición de biomasa hacia los granos. En consecuencia, la producción de biomasa fue afectada por ambas restricciones, principalmente a través de su efecto sobre la captura de radiación (reducción del IAF y fracción de radiación interceptada). La eficiencia de uso de radiación mostró ser un carácter bastante estable bajo estas restricciones (excepto en casos muy extremo de estrés).

El crecimiento radical fue afectado por ambas restricciones de suelo, disminuyendo la biomasa, longitud y densidad radical. Además, estas variables del crecimiento radical resultaron ser buenos descriptores de la producción de biomasa aérea. Así, la absorción de nutrientes estuvo relacionada con la producción de biomasa, en cambio, la concentración de nutrientes fue poco afectada por las restricciones edáficas evaluadas. Además, la determinación de la eficiencia de uso de nutrientes (rendimiento/disponibilidad de nutriente) fue principalmente asociada a la eficiencia de absorción (absorbido/disponible) y en menor medida a la eficiencia de utilización de nutrientes (rendimiento/absorbido), considerando ambas restricciones de suelo.

Referencias

- Aulakh, M., Pasricha, N., Bahl, G., 2003. Phosphorus fertilizer response in an irrigated soybean–wheat production system on a subtropical, semiarid soil. *Field Crops Res.* 80: 99-109.
- Batten, G., Fettell, N., Mead, J., Khan, M., 1999. Effect of sowing date on the uptake and utilization of phosphorus by wheat (cv. Osprey) grown in central New South Wales. *Aust. J. Exp. Agric.* 39, 161-170.
- Campillo, R., Hirzel, J., Jobet, C. 2011. Fertilización del cultivo de trigo harinero. En: Hirzel, J., (Ed). *Fertilización de los Cultivos en Chile. Colección Libros INIA N° 28.* INIA, Centro regional de Investigación Quilamapu, Chillán, Chile. pp 11-89.
- Caires, E.F., Garbuio, F.J., Churka, S., Barth, G., Corrêa, J.C.L. 2008. Effects of soil acidity amelioration by surface liming on no till corn, soybean, and wheat root growth and yield. *Europ J Agron*, 28:57–64.
- Colomb, B., Kiniry, J., Debaeke., P., 2000. Effect of soil phosphorus on leaf development and senescence dynamics af field-grown Maize. *Agron. J.* 92, 428-435.
- Cossani, M., Slafer, G., Savin, R., 2009. Yield and biomass in wheat and barley under a range of conditions in a mediterranean site. *Field Crops Res.* 112, 205-2013.
- Costa, A., Cogrossi, L.A., Riede, C.R. 2003. Reaction of wheat genotypes to soil aluminum differential saturations. *Braz Arch Biol Technol*, 46: 19–25.
- Delhaize, E., Craig, S., Beaton, C.D., Bennet, R.J., Jagadish, V.C., Randall, P.J. 1993. Aluminium tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) I. Uptake and distribution of aluminum in root apices. *Plant Physiol*, 103: 685–693.
- Dreccer F, Schapendonk AHCM, Slafer GA, Rabbinge R., 2000. Comparative response of wheat and oilseed rape to nitrogen supply: absorption and utilization efficiency of radiation and nitrogen during the reproductive stages determining yield. *Plant Soil.* 220, 189-205.
- Fischer, R.A., 1993. Irigated spring wheat and timing and amount of nitrogen fertilizer. II. Physiology of grain yield response. *Field Crops Res.* 33: 57–80.

- Fletcher, A., Moot, D., Stone, P., 2008. Radiation use efficiency and leaf photosynthesis of sweet corn in response to phosphorus in a cool temperate environment. *Eur. J. Agron.* 29, 88-93.
- Foy, C.D., Chaney, R.L., White, M.C., 1978. The physiology of metal toxicity in plants. *Ann. Rev. Plant Physiol*, 29: 511–566.
- Foy, C.D., 1996. Tolerance of durum wheat lines to an acid, aluminum-toxic subsoil. *J Plant Nutr*, 19: 1381–1394.
- Gallagher, J.N., Biscoe, P.V., 1978. Radiation absorption, growth and yield of cereals. *J. Agric. Sci. Camb.* 91: 47–60.
- Gallardo, F., Borie, F. 1999. Sensibilidad y tolerancia de especies y cultivares a condiciones de acidez. *Tests rápidos de diagnóstico. Frontera Agrícola*, 5 (1-2): 2-18.
- Hede, A.R., Skovmand, B., López-Cesati, J. 2001. Acid soils and aluminum toxicity. In: Reynolds MP, McNab A (eds) *Application of Physiology in wheat breeding*, CIMMYT, pp, 240
- Kariuki, S.K., Zhang, H., Schroder, J.L., Edwards, J., Payton, M., Carver, B.F., Raun, W.R., Krenzer, E.G., 2007. Hard red winter wheat cultivar responses to a pH and aluminum concentrations gradient. *Agron. J.* 99, 88–98.
- Lázaro, L., Abbate, P., Cogliatti, D., Andrade, F., 2010. Relationship between yield, growth and spike weight in wheat under phosphorus deficiency and shading. *J. Agric. Sci. Camb.* 148, 83-93.
- Luzio, W., Casanova, M., 2006. *Avances en el Conocimiento de los suelos de Chile.* SAG-Universidad de Chile, Chile.
- Manske, G., Ortiz-Monasterio, J., Van Ginkel, M., González, R., Fischer, R., Rajaram, S., Vlek, P., 2001. Importance of uptake efficiency versus P utilization for wheat yield in acid and calcareous soils in Mexico. *Eur. J. Agron.* 14, 261-274.
- Manske, G., Ortiz-Monasterio, J., Van Ginkel, M., Rajaram, S., Vlek, P., 2002. Phosphorus use efficiency in tall, semi-dwarf and dwarf near-isogenic lines of spring wheat. *Euphytica* 125, 113-119.
- Manske, G., Ortiz-Monasterio, J., Van Ginkel, M., González, R., Rajaram, S., Molina, E., Vlek, P., 2000. Traits associated with improved P-uptake efficiency in CIMMYT's semidwarf spring bread wheat grown on an acid Andisol in Mexico. *Plant and Soil* 221, 189-204.
- Monteith, J.L. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Phil. Trans. Royal Soc. London.* 281: 277-294.
- Moustakas, M., Yupsanis, T., Symeonidis, L., Karataglis, S., 1992. Aluminum toxicity effects on durum wheat cultivars. *J Plant Nutr*, 15: 627–638.
- Mugwira, L.M., Patel, S.U., Fleming, A.L., 1980. Aluminium effects on growth and Al, Ca, Mg, K and P levels in triticale, wheat and rye. *Plant Soil*, 57: 467–470.
- Muurinen, S., Peltonen-Sainio, P., 2006. Radiation-use efficiency of modern and old spring cereal cultivars and its response to nitrogen in northern growing conditions. *Field Crop. Res.* 96, 363-373.
- O'Connell, M.G., O'Leary, G.J., Whitfield, D.M., Connor, D.J., 2004. Interception of photosynthetically active radiation and radiation-use efficiency of wheat, field pea and mustard in a semi-arid environment. *Field Crops Res.* 85: 111–124.
- Pellerin, S., Mollier, A., Plenét, D., 2000. Phosphorus deficiency affects the rate of emergence and number of maize adventitious nodal roots. *Agron. J.* 92, 690-697.
- Pellet, D.M., Papernik, L.A., Kochian, L.V. 1996. Multiple aluminum-resistance mechanisms in wheat. Roles of root apical phosphate and malate exudation. *Plant Physiol*, 112:591–597.
- Peltonen-Sainio, P., Kangas, A., Salo, Y., Jauhiainen, L., 2007. Grain number dominates grain weight in temperate cereal yield determination: evidence based on 30 years of multi-location trials. *Field Crops Res.* 100, 179-188.

- Plénet, D., Mollier, M., Pellerin, S., 2000. Growth analysis of maize field crops under phosphorus deficiency. II. Radiation-use efficiency, biomass accumulation and yield components. *Plant Soil* 224, 259-272.
- Quantin, P., Gautheyrou, J., Lorenzoni, P. 1988. Halloysite formation through *in situ* weathering of volcanic glass from trachytic pumices, Vico's volcano, Italy. *Clay Minerals*. 23: 423-431.
- Rodríguez, J. 1993. La fertilización de los cultivos. Un método racional. Colección en Agricultura. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile. 149 pp.
- Rodríguez, D., Andrade, F., Goudriaan, J., 2000. Does assimilate supply limit leaf expansion in wheat grown in the field under low phosphorus availability?. *Field Crops Res.* 67, 227-238.
- Rowell, D.L. 1994. *Soil Science. Methods & Applications.* Longman Singapore Publishers (Pte) Ltd. 350 p.
- Sadras, V.O., O'Leary, G.J., Roget, D.K., 2005. Crop responses to compacted soil: capture and efficiency in the use of water and radiation. *Field Crops Res.* 91: 131–148.
- Sadras, V.O., 2007. Evolutionary aspects of the trade-off between seed size and number in crops. *Field Crops Res.* 100, 125-138.
- Sadzawka, R.A., Campillo, R. 1999. Acidificación de los suelos y los procesos involucrados. In: Alfaro, M. (Ed.). *Curso de capacitación para operadores del Programa de Recuperación de Suelos Degradados Zona Sur (regiones IX y X).* INIA-Remehue, Osorno, Chile. Serie Remehue, N° 71: 93-103.
- Campillo, R., Sadzawka, R.A. 2006. La acidificación de los suelos. Origen y mecanismos involucrados. In: Campillo, R.. (Ed.). *Manejo de los recursos naturales en el Sistema de Incentivos para la Recuperación de Suelos Degradados de la Araucanía.* INIA-Carillanca, Temuco, Chile. Serie Actas, N° 38: 44-60.
- Salvagiotti, F., Miralles, D., 2008. Radiation interception, biomass production and grain yield as affected by the interaction of nitrogen and sulfur fertilization in wheat. *Eur. J. Agron.* 28, 282-290.
- Samac, D.A., Tesfaye, M. 2003. Plant improvement for tolerance of aluminum in acid soils — a review. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* 75:189–207.
- Sandaña, P., Pinochet, D., 2011. Ecophysiological determinants of biomass and grain yield of wheat under P deficiency. *Field Crops Res.* 120, 311-319.
- Sandaña, P., Ramírez, M., Pinochet, D., 2012. Radiation interception and radiation use efficiency of wheat and pea under different P availabilities. *Field Crops Res.* 127, 44-50.
- Shoji, S., Nanzyu, M., Dahlgren, R.A. 1993. *Volcanic Ash Soils. Genesis, Properties and Utilization.* Elsevier. Amsterdam-London-New York-Tokyo. 288 p.
- Sierra, J., Noel, C., Dufour, L., Ozier-Lafontaine, H., Welcker, C., Desfontaines, L. 2003. Mineral nutrition and growth of tropical maize as affected by soil acidity. *Plant Soil*, 252: 215–226.
- Silva, S., Pinto-Carnide, O., Martines-Lopes, P., Matos, M., Guedes-Pinto, H., Santos, C. 2010. Differential aluminium changes on nutrient accumulation and root differentiation in an Al sensitive vs. tolerant wheat. *Environ Exp Bot.* 68: 91–98.
- Slafer, G., Rawson, H., 1994. Sensitivity of wheat phasic development to major environmental factors: A re-examination of some assumptions made by physiologists and modelers. *Aust. J. Plant Physiol.* 21, 393-426.
- Slafer, G. A., Kantolic, A.G., Appendino, M.L., Miralles, D.J., Savin. R., 2009. Crop development: genetic control, environmental modulation and relevance for genetic improvement of crop yield. in: Sadras, V.O., and Calderini, D.F. (Eds.), *Crop Physiology: Applications for Genetic Improvement and Agronomy.* Academic Press, San Diego, CA, USA, pp 277-308.

- Tang, C., Diatloff, E., Rengel, Z., Mc Gann, B. 2001. Growth response to subsurface soil acidity of wheat genotypes differing in aluminum tolerance. *Plant Soil*, 236:1–10.
- Tang, Y., Garvin, D.F., Kochian, L.V., Sorrells, M.E., Carver, B.F. 2002a. Physiological genetics of aluminum tolerance in the wheat cultivar Atlas 66. *Crop Sci*, 42:1541–1546.
- Tang, C., Rengel, Z., Diatloff, E., Gazey, C. 2003. Responses of wheat and barley to liming on a sandy soil with subsoil acidity. *Field Crops Res*, 80: 235–244.
- Taylor, G.J., Foy, C.D. 1985. Effects of aluminium on the growth and element composition of 20 winter cultivars of *Triticum aestivum* L. (wheat) grown in solution culture. *J Plant Nutr*, 8: 811–824.
- Valle, S., Carrasco, J., Pinochet, D., Calderini, D., 2009a. Grain yield, above-ground and root biomass of Al-tolerant and Al-sensitive wheat cultivars under different soil aluminum concentrations at field conditions. *Plant Soil* 318, 299-310.
- Valle, S., Carrasco, J., Pinochet, D., Calderini, D., 2009b. Al toxicity effects on radiation interception and radiation use efficiency of Al-tolerant and Al-sensitive wheat cultivars under field conditions. *Field Crops Res*. 114, 343-350.

Disponibilidad y aumento de la eficiencia de uso del Nitrógeno en sistemas de producción de cereales de invierno en regiones subtropicales

Christian Bredemeier, Danielle Almeida, Alexandre Tonon Rosa, Clever Variani
Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Porto Alegre, Brasil. Email: bredemeier@ufrgs.br

Resumen

En trigo, la definición del potencial productivo es dependiente del empleo correcto de las prácticas culturales. Entre estas, se destacan la dosis y la época de aplicación de nitrógeno. Para los cereales de estación fría en la región sur de Brasil, la recomendación de la cantidad de fertilizante nitrogenado a ser aplicado está basada en el contenido de materia orgánica del suelo, del cultivo anterior y en el rendimiento de granos esperado (potencial productivo). Estos indicadores son poco precisos, sin embargo vienen siendo utilizados a lo largo de los años, en los más diversos cultivos, debido a la facilidad en disponer de estos parámetros. Así, la condición de desarrollo y nutrición de las plantas no es tomada en cuenta en el momento de la determinación de las dosis de N que serán aplicadas en cobertura. Este capítulo presenta una serie de estudios de variables de planta que indiquen la necesidad de N por la planta y posibiliten la predicción de las dosis a ser aplicadas. La medición de variables del dosel durante el desarrollo del cultivo, como el Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), es una oportunidad para aumentar el rendimiento y la calidad de granos, por la aplicación localizada y variable de fertilizantes nitrogenados.

Introducción

El nitrógeno (N) es considerado un elemento esencial para las plantas, pues está presente en la composición de las más importantes biomoléculas, tales como ATP, NADH, NADPH, clorofila, proteínas e incontables enzimas (Harper, 1994). En muchos sistemas de producción, la disponibilidad de nitrógeno es casi siempre un factor limitante, influenciando el crecimiento de la planta más que otro nutriente cualquiera. Con esa importancia y la gran movilidad en el suelo, el nitrógeno ha sido intensamente estudiado, con el objetivo de maximizar la eficiencia de su utilización. Por lo tanto, se ha buscado disminuir las pérdidas del nitrógeno en el suelo, así como mejorar la absorción y la metabolización de N en el interior de la planta.

La eficiencia de la utilización del nitrógeno añadido al suelo se refiere al grado de recuperación de ese elemento por las plantas, considerando las pérdidas que generalmente ocurren. Normalmente, menos del 50% del nitrógeno aplicado bajo la forma de fertilizante es utilizado por los cultivos. Las pérdidas en el suelo son debido a los incontables procesos a los cuales el nitrógeno está sujeto. El nitrógeno es perdido principalmente por la lixiviación de nitrato,

volatilización de amonio y emisión de N_2 , N_2O y otros óxidos de nitrógeno (Anghinoni, 1986).

El manejo de la fertilización nitrogenada es una de las prácticas agrícolas más estudiadas, especialmente en zonas húmedas de las grandes regiones productoras de granos del mundo. En estas áreas, la lixiviación de nitrato para las aguas superficiales y subterráneas es uno de los más graves problemas de contaminación ambiental.

La mayor causa de la contaminación de aguas superficiales y subterráneas por el nitrato es la aplicación excesiva de fertilizante nitrogenado, además de la cantidad exigida por el cultivo. El uso excesivo de N es debido a la falta de pruebas que evalúen, con precisión, la disponibilidad de N en el suelo y las exigencias del cultivo en cada estación de crecimiento y en cada situación específica. Este problema se hace más grave con los aumentos del potencial productivo de los cultivos, pues aumentan las exigencias de nitrógeno y la cantidad aplicada de este nutriente.

El cultivo de trigo en la región sur de brasil

El cultivo del trigo en Brasil alcanzó un área cultivada de 2.149,8 mil hectáreas en el año de 2010, presentando reducción del 11,5% comparado con el año 2009. La productividad media en el país, en el año 2010, fue de 2.736 kg ha^{-1} , con incremento del 32,2%, comparado con la cosecha anterior (CONAB, 2011). Esta variación ocurrió, principalmente, por las condiciones meteorológicas favorables para el desarrollo del cultivo del trigo en 2010. En el año 2009, con todo, los rendimientos medios de granos fueron inferiores a los verificados en 2010. En el estado del Rio Grande do Sul, la media de productividad del cultivo de trigo en 2009 fue de 2.100 kg ha^{-1} , la cual fue semejante a la media nacional en esta misma cosecha (CONAB, 2011).

A pesar del rendimiento de granos más elevado observado en la cosecha pasada (2010), los rendimientos medios del cultivo del trigo en Brasil y en el estado del Rio Grande do Sul son considerados bajos, cuando se analiza una serie histórica de productividad.

En el estado de Rio Grande do Sul, la media de productividad es de 1.841 kg ha^{-1} , considerando los datos de los años de 2000 hasta 2010 (CONAB, 2011). En áreas experimentales, sin embargo, han sido verificadas productividades de trigo superiores a 6.000 kg ha^{-1} , como las encontradas en experimentos conducidos por Grohs (2008) en la Estación Experimental de la Universidad Federal do Rio Grande do Sul, localizada en el municipio de Eldorado do Sul, distante 60 km de Porto Alegre.

Esta región presenta clima subtropical, conforme clasificación climática de Koeppen, de verano húmedo caliente, del tipo Cfa. La precipitación pluvial media anual en Eldorado do Sul (RS) es de 1445 mm y la temperatura media mensual varía entre $13,5^\circ\text{C}$ y $24,6^\circ\text{C}$, entre los meses más frío (Junio) y el más calido del año (Enero) (Bergamaschi et al., 2003).

Una serie de factores, como la mejora del manejo del cultivo en lo que se refiere a la aplicación de la fertilización nitrogenada y control de problemas fúngicos, ha contribuido al aumento de las productividades registradas en los experimentos conducidos en esta localidad.

La productividad media obtenida actualmente en campos comerciales de cereales de estación fría en la región sur de Brasil está muy por debajo de su potencial, una vez que no es técnicamente posible, ni económicamente viable, remover todos los factores limitantes al desarrollo de estos cultivos, tales como el suministro de dosis óptimas de fertilizantes, competencia con plantas dañinas y daños causados por la ocurrencia de plagas y enfermedades. Consecuentemente, la interacción entre condiciones meteorológicas y manejo resulta en variaciones, de año en año, en el potencial de productividad de granos y en la necesidad de nitrógeno por los cereales de estación fría (Cassman et al., 2002).

Manejo de la fertilización nitrogenada en cereales de estación fría en sistemas de producción subtropicales

En trigo, la definición del potencial productivo es dependiente del empleo correcto de las prácticas culturales. Entre estas, se destacan la dosis y la época de aplicación de nitrógeno, que ya fue objeto de estudio de diversos trabajos de investigación.

El nitrógeno constituye el macroelemento más limitante en la productividad de los cultivos de trigo y cebada, ya que ejerce una fuerte influencia en el número de macollos emitidos por la planta (Sala et al., 2005) y, en consecuencia, el número de espigas producidas por planta y por unidad de área.

En el sur de Brasil, Bredemeier & Mundstock (2001), en trigo, Mundstock & Bredemeier (2001), en avena, y Wamser & Mundstock (2007), en cebada, definieron el momento de emisión de la sexta hoja del tallo principal (planta con cinco hojas completamente expandidas) como el momento ideal para aplicación de nitrógeno en cobertura en estos cultivos. El N aplicado en este momento posibilita mayor sincronismo de desarrollo entre el tallo principal y los macollos, reduciendo la mortalidad de estos y consolidando un mayor número de tallos. Consecuentemente, se genera un mayor número de espigas por área y mayor número de granos por espiga en el momento de la cosecha (Bredemeier & Mundstock, 2001).

La práctica de la fertilización en cobertura con nitrógeno es ampliamente adoptada como forma de mantenimiento y maximización del potencial productivo de los cultivos. Esta herramienta es de extrema importancia, siendo fácilmente perceptible la ocurrencia de errores en la dosis aplicada de este nutriente, tanto sub como sobredosis, o aún en casos en que hay supresión de la aplicación.

Para los cereales de estación fría en la región sur de Brasil, la recomendación de la cantidad de fertilizante nitrogenado a ser aplicado está basada en el contenido de materia orgánica del suelo, en el cultivo antecesor y en la expectativa de rendimiento de granos del cultivo (potencial productivo).

Estos indicadores son poco precisos, sin embargo vienen siendo utilizados a lo largo de los años en los más diversos cultivos, debido a la facilidad de la recomendación utilizando estos parámetros y a la amplia difusión entre los profesionales del área de asistencia técnica y extensión rural. A pesar de existir otras formas de determinarse las cantidades de N a ser aplicadas, por el análisis de variables de suelo y planta, estas, muchas veces no son adoptadas,

debido a otros factores que son limitantes para su empleo, como subsidiar la recomendación de fertilización nitrogenada en cobertura.

La forma en que se recomienda la fertilización nitrogenada es simple y de fácil determinación, sin embargo incompleta, ya que la disponibilidad de N mineral en el suelo (nitrato y amonio) es función de factores edafoclimáticos y del contenido medio de materia orgánica del suelo en cada área. Otro factor que es variable y no se puede controlar en el manejo del cultivo es la presencia de residuos del cultivo antecesor, los cuales, en muchas situaciones, están distribuidos desuniformemente a lo largo de un área. Estos afectarían directamente la cantidad de N disponible y el desarrollo inicial de las plantas del cultivo sucesor, en el caso los cereales de estación fría, y, consecuentemente, las dosis de nitrógeno necesarias para obtención de elevadas productividades.

Las recomendaciones de fertilización nitrogenada, basadas en el contenido de materia orgánica, se iniciaron en Brasil a la mitad de la década de los 60, basándose en resultados de investigación obtenidos en los cultivos de mayor interés, como arroz, trigo y maíz. Sin embargo, la utilización del contenido de materia orgánica como índice único de disponibilidad de nitrógeno para los cultivos no es recomendada, pues, a pesar de ser la materia orgánica, una importante fuente de N para las plantas, es necesario que este elemento sea liberado bajo formas minerales para que pueda ser absorbido por las plantas.

En relación a parámetros de suelo, el uso del contenido de N mineral en el suelo (amonio y nitrato) en la presiembra no son adecuados para estimar la necesidad de fertilización nitrogenada en la siembra en cebada, pues el rendimiento de granos depende, en gran medida, de las condiciones de desarrollo de las plantas después del macollaje (Poletto, 2004).

La recomendación de la fertilización nitrogenada que no esten basada precisamente en las necesidades de la planta y el suministro de N por el suelo lleva a problemas relacionados con la sobre o subfertilización. La sobrefertilización puede incrementar la lixiviación de nitrato y el acamado de plantas, sumado a la pérdida innecesaria de N y al bajo retorno económico del cultivo. La subfertilización puede causar reducciones considerables en el rendimiento de granos. Así, es importante que, para cada situación específica, las recomendaciones se relacionen con la necesidad del cultivo.

La aplicación de dosis adecuadas de N en el cultivo del trigo es todavía la mayor duda en la mayoría de las regiones húmedas del mundo. En ellas, son pocos los sistemas de recomendación, debido a la naturaleza transitoria de este elemento en los suelos de estas regiones. Sin embargo, hay necesidad de estos estudios, con énfasis mayor que en regiones semiáridas, por el mayor potencial de lixiviación y de transporte de N hacia las aguas superficiales y subterráneas.

Variables de planta y suelo como criterios para definición de la necesidad de nitrógeno

Estudios de variables de planta y de suelo que indiquen la necesidad de N por la planta y posibiliten la predicción de las dosis a ser aplicadas fueron hechos por Bredemeier (1999), en trigo, y por Poletto (2004), en cebada, en la región sur de Brasil. Las variables de planta utilizadas fueron contenido de nitrógeno foliar, rendimiento de materia seca de la parte aérea y patrón de macollaje

(desarrollo foliar de la comunidad de plantas y número de macollos por área). El potencial de mineralización de N y los contenidos de amonio, de nitrato y de materia orgánica del suelo fueron las principales variables de suelo evaluadas. Actualmente, la recomendación de fertilización nitrogenada para el cultivo del trigo en Brasil utiliza el contenido de materia orgánica del suelo, el cultivo antecesor (leguminosa o gramínea) y el rendimiento esperado (expectativa de rendimiento de granos) para determinación de la dosis total de N a ser aplicada (Bredhemeier, 2010). Sin embargo, Poletto (2004) consideró insuficiente este método para estimar con precisión la cantidad de N suplida por el suelo. Muchos factores están involucrados en el proceso de mineralización del nitrógeno orgánico, incluyendo humedad y pH del suelo, temperatura, textura, estructura, aireación, biomasa y actividad microbiana, además de la constitución química del substrato (Ringuelet & Bachmeier, 2002, Drury et al., 2003). Con la existencia de variabilidad espacial y temporal de estas variables en labranzas comerciales, generalmente se opta por aplicar mayores dosis de N para garantizar elevados rendimientos (Poletto, 2004).

Basado en lo expuesto, la condición de desarrollo y nutrición de las plantas no es tomada en cuenta en la determinación de las dosis de N que serán aplicadas en cobertura. De esta forma, las dosis recomendadas, la mayoría de las veces, no son precisas, o sea, las reales necesidades de la planta no son suplidas, llevando a la aplicación de dosis sobre o bajo la exigencia real en cada situación específica. De esta manera, sin la evaluación del estado nutricional y del "status de N" del cultivo, la determinación de dosis de N a ser aplicada queda sujeta a errores sistemáticos y que puede variar entre los diferentes profesionales responsables de esta decisión, cuando estos criterios subjetivos son considerados.

El resultado de esta decisión, que está basada en la aplicación de una cantidad fija de N en toda la labranza, es la aplicación en exceso o en deficiencia de nitrógeno. En otras situaciones, en las cuales la dosis media de N adoptada sea correcta, ocurrirá la aplicación de sobre o subdosis en el área, pues es normal la ocurrencia de variabilidad espacial en el desarrollo de las plantas y de la exigencia de N dentro de una misma área. El resultado es la ocurrencia de pérdidas del fertilizante aplicado, reducción de la eficiencia de uso de N y el no aprovechamiento de todo el potencial productivo del cultivo.

Además de lo expuesto, existe aún la preocupación ambiental, que también es un asunto que se viene discutiendo frecuentemente, una vez que la eficiencia del uso de N para producción de cereales en el mundo es de sólo 33%, según estimativa realizada por Raun & Johnson (1999). Considerando que 67% del N aplicado no es aprovechado, se produce una serie de impactos negativos al ambiente.

Este problema puede ser minimizado con la aplicación de N en tasa variable, o sea, por la variación de la dosis de nitrógeno aplicada de acuerdo a la variabilidad espacial existente.

Aumento de la eficiencia de uso del nitrógeno en sistemas de producción subtropicales

Un factor importante que contribuye para la baja eficiencia de uso del nitrógeno está relacionado con la estrategia actual de aplicación de tasas uniformes de

fertilizantes nitrogenados en áreas espacialmente variables, a pesar de numerosos estudios de campo indicaren una justificación económica y ambiental para aplicaciones en tasa variable de N en muchas situaciones, o sea, aplicaciones de dosis variables en consonancia con la variabilidad espacial (Mamo et al., 2003; Koch et al., 2004; Scharf et al., 2006; Shahandeh et al., 2005; Lambert et al., 2006; Hong et al., 2007).

Aplicaciones uniformes a campo, o sea, aplicaciones de una dosis única en toda el área, no consideran el suministro de N por el suelo para los cultivos, la absorción y la diferente respuesta del cultivo al nitrógeno aplicado, las cuales son espacialmente variables (Inman et al., 2005). Sin las herramientas para evaluar los parámetros espacialmente variables, los agricultores tienden a aplicar N en cantidad suficiente, a tasas uniformes, para atender a las necesidades del cultivo en las áreas más exigentes de N en el campo, resultando en mayor riesgo de pérdida de nitrógeno en las áreas que necesitan menores cantidades de fertilizante nitrogenado (Hong et al., 2007). Así, el nitrógeno aplicado de manera uniforme ignora las diferencias espaciales y es un riesgo considerable para el medioambiente, en función de la lixiviación de nitrato para aguas superficiales y subterráneas (Shanahan et al., 2008).

Con el advenimiento de la agricultura de precisión en la práctica de la producción agrícola, se comenzó a estudiar la variabilidad espacial de la disponibilidad de nutrientes en los suelos. La colecta de muestras de suelo georreferenciadas posibilita la corrección localizada de cada nutriente, los cuales son aplicados en tasa variable, en consonancia con los niveles diagnosticados en los muestreos de suelo y que posibiliten desarrollo adecuado de las plantas.

En el caso del nitrógeno, es necesario cuantificar el estado nutricional de la planta para la determinación más precisa de las dosis que deben ser aplicadas en cobertura.

Varios métodos no destructivos fueron propuestos para estimar la necesidad de nitrógeno por la planta, como evaluación de la coloración de las hojas, medidores de clorofila o de fluorescencia de la clorofila (Singh et al., 2002). Singh et al. (2002) propusieron el uso del medidor de clorofila SPAD (Minolta, Ramsey, NJ) para auxiliar en las recomendaciones de dosis de nitrógeno de los cultivos de arroz y trigo. Esos procedimientos, se enfocan en hojas individuales y, por lo tanto, presentan dificultad en reflejar la situación de la comunidad de plantas de una área (Feng et al., 2008).

La utilización de otras variables en la recomendación de la cantidad de fertilización nitrogenada, como la cantidad de nitrógeno acumulado en el dosel y la producción de materia seca de la parte aérea, a pesar de ser indicadores eficientes de la respuesta a la aplicación de fertilizantes nitrogenados, son metodologías poco empleadas, en función de la demora en el procedimiento de evaluación y por exigir análisis de laboratorio (Bredemeier, 1999).

Las plantas de trigo al final del período de macollaje ya absorbieron aproximadamente un tercio del N que será utilizado en todo el ciclo. Cuando elevadas cantidades de N son absorbidas hasta el final de esta fase, las plantas poco responderán a la adición de fertilizante nitrogenado en cobertura (Lamothe, 1994). De esa forma, la absorción de N durante el período de macollaje puede establecer el nivel de suplemento de este nutriente en que las plantas se encuentran y puede subsidiar la toma de decisión de suministro de

cantidades más coincidente con las reales necesidades de las plantas, en cada situación específica (Poletto, 2004).

Evaluaciones a campo del estado nutricional de las plantas son posibles de hacerse por la caracterización de las propiedades ópticas del dosel de plantas, que puede ser hecha por la determinación de la transmitancia, absorbancia, reflectancia y de la fluorescencia.

Evaluación de la reflectancia del dosel como herramienta auxiliar en el manejo del nitrógeno

La reflectancia es una técnica utilizada en la detección remota, como forma de elaborar la curva de acumulación de biomasa de los cultivos a lo largo del ciclo. A partir del final de la década de los 90, su medición fue adaptada para uso en nivel terrestre, con el desarrollo de sensores ópticos proximales de reflectancia, tales como “GreenSeeker”, “N-Sensor” y “Crop Circle”. La relación entre la cantidad de radiación reflejada por el dosel y por el suelo y la radiación incidente determina la reflectancia, la cual es asociada con la cantidad de biomasa y el contenido de clorofila presente en las plantas del dosel.

La detección remota de la reflectancia del dosel tiene la capacidad de evaluar una población de plantas o comunidad, en vez de plantas individuales, determinando rápidamente la variabilidad espacial de un cultivo a campo (Feng et al., 2008).

La evaluación de las propiedades ópticas de las hojas y de la comunidad, tales como transmitancia, reflectancia y fluorescencia, se constituye en formas indirectas de determinar el estado nutricional de un cultivo. Existen aplicaciones directas para estas informaciones en la agricultura de precisión, como, por ejemplo, en la evaluación del estado nutricional de las plantas en relación al nitrógeno (Jacquemoud & Ustin, 2001).

La reflectancia (ρ) es definida como la razón entre las cantidades de radiación reflejada y de radiación incidente. Es una técnica empleada en la detección remota para obtención de informaciones sobre un objeto terrestre, sin que haya contacto físico con el mismo (Molin, 2001). Los objetos terrestres absorben o reflejan la radiación incidente de modo diferente en cada uno de los rangos del espectro electromagnético. En la región del visible, la vegetación posee picos de absorción de radiación incidente decurrentes de su absorción por los pigmentos fotosintéticos, especialmente las clorofilas.

En general, la vegetación absorbe una porción significativa de radiación en el rango del visible, como fuente de energía para el proceso de la fotosíntesis. Por otro lado, esta misma vegetación refleja mucho la radiación en la región del infrarrojo próximo. La intensidad de la absorción de la radiación en la región visible del espectro electromagnético y de la reflectancia en la región del infrarrojo próximo es más acentuada cuanto mayor es el desarrollo de las plantas y la cantidad de clorofila.

El aumento en la concentración de nitrógeno en plantas de trigo produce alteraciones de reflectancia espectral que pueden ser detectadas por instrumentos de detección remota, como ha sido demostrado por varios investigadores (Feng et al., 2008, Povh et al., 2008, Grohs et al., 2009). El contenido y acumulación de N en los tejidos vegetales son dos indicadores importantes para caracterizar el estado nutricional de las plantas en relación a

este nutriente. La cantidad de nitrógeno acumulada por el dosel, como producto de la concentración de N en las plantas y de la biomasa vegetal, influye en la productividad y en la calidad de las plantas cultivadas (Wright et al., 2004).

El índice de vegetación resulta de la combinación de los valores de reflectancia en dos o más intervalos de longitud de onda y se correlaciona con la cantidad y el estado de la vegetación en una determinada área de la superficie terrestre. Por eso, una característica inherente a los índices de vegetación es la reducción en el volumen de datos a ser analizados, pues prácticamente toda la información referente a la vegetación queda resumida en solamente un valor numérico, o sea, la información registrada en algunas bandas (generalmente dos) pasa a ser contenida en sólo un índice, facilitando su inserción en modelos agrometeorológicos espectrales.

Entre los diversos índices de vegetación existentes, uno de los más utilizados es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI – “Normalized Difference Vegetation Index”). Él fue propuesto por Rouse et al. (1974) y es dado por la relación:

$$\text{NDVI} = (\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{r}}) / (\rho_{\text{nir}} + \rho_{\text{r}}),$$

donde ρ_{nir} y ρ_{r} son las reflectancias en el rojo lejano y en el rojo, respectivamente.

El valor del NDVI varía numéricamente entre -1 y +1 y será mayor tanto cuanto sea mayor la diferencia entre las reflectancias en el infrarrojo y en el rojo. Raun et al. (2005) relataron que el NDVI fue eficiente en cuantificar las cantidades de biomasa y de N absorbida por el cultivo de trigo. Por lo tanto, el índice de vegetación refleja el grado de desarrollo de la cultura y, consecuentemente, su potencial productivo (Molin, 2001).

La variación en los valores del NDVI al largo del ciclo de desarrollo en trigo cultivado en sucesión a la cultivo de maíz, en la media de cuatro genotipos, es mostrada en la Figura 1. Cada figura se refiere a la aplicación de una dosis específica de nitrógeno en el momento de emergencia de las plantas.

Las variaciones del NDVI durante el ciclo ocurren en función de acumulación de biomasa en la parte aérea durante el periodo vegetativo (Grohs et al., 2009) y de la mayor acumulación de N en los tejidos con aplicación de dosis crecientes de fertilizante nitrogenado (Wright, 2004). La mayor disponibilidad de nitrógeno aumenta la acumulación de biomasa y la cantidad de moléculas de clorofila en las hojas. Cuánto mayor la acumulación de biomasa fotosintéticamente activa, mayor es la reflectancia de la energía incidente en la porción del infrarrojo próximo (IRP) y menor es la reflectancia en el intervalo de longitud de onda correspondiente al rojo (R), habiendo aumento de la razón IRP/R (Rizzi, 2004) y, en consecuencia, aumento del valor del NDVI.

Se observó que, cuánto mayor la dosis de N aplicada en cobertura, mayores fueron los valores de NDVI detectados en las lecturas posteriores a la aplicación del fertilizante nitrogenado. Después de la aplicación del N en cobertura, o sea, después del estadio de 5-6 hojas expandidas, las plantas de trigo entran en fase de rápida absorción de nitrógeno y de acumulación de biomasa en la parte aérea.

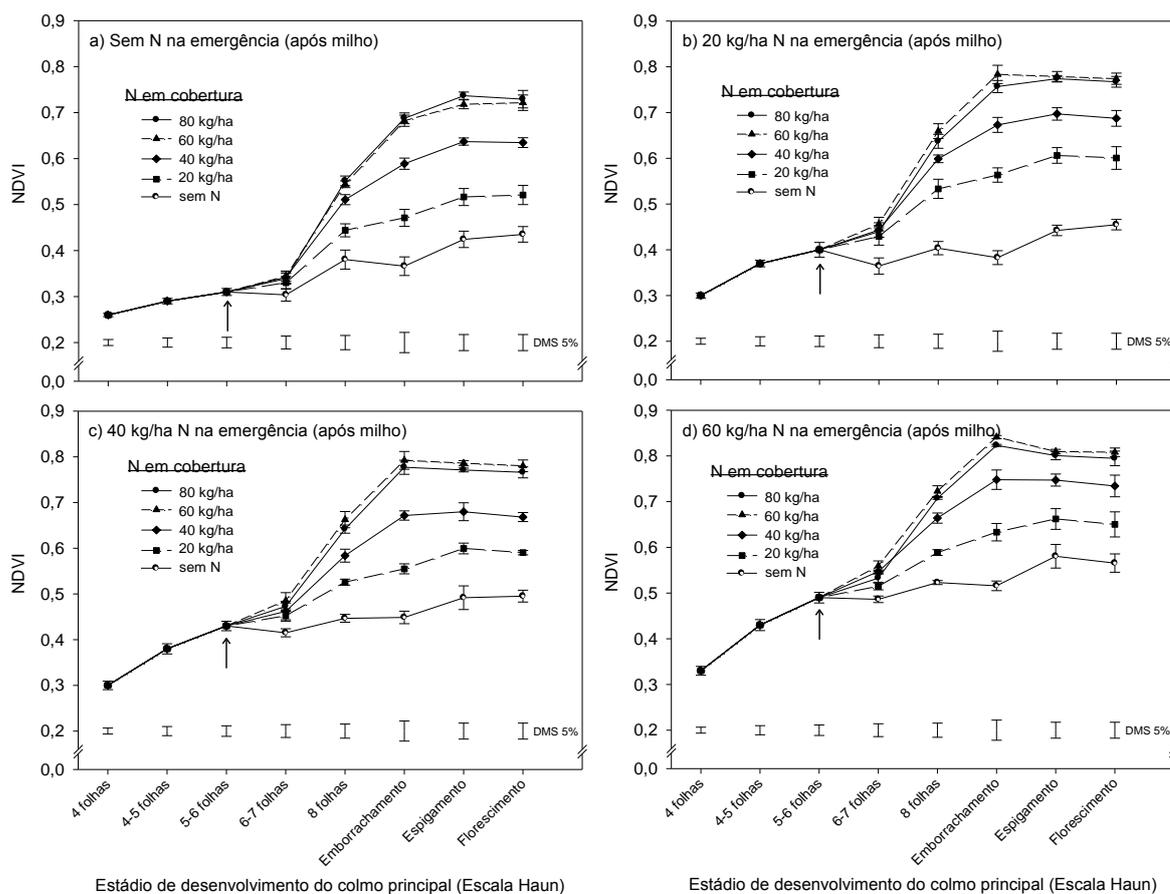


Figura 1. Variación del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en diferentes estadios de desarrollo del trigo cultivado después de maíz, en función de la disponibilidad de nitrógeno en la emergencia y en cobertura, en la media de cuatro genotipos. La flecha indica el momento de aplicación de N en cobertura. DMS=diferencia mínima significativa.

En este momento, el nitrógeno es utilizado para mantenimiento de la sincronía de desarrollo entre macollos y tallo principal, hecho que es fundamental para la supervivencia de los macollos formados y para aumentar la cantidad de espigas producidas por área. Al término del período de macollaje e inicio de la elongación de los entrenudos, cercano al estadio de ocho hojas expandidas, el N aplicado irá a contribuir a la supervivencia de los macollos, al aumento de los niveles de clorofila en las hojas y al desarrollo de los órganos vegetativos (biomasa de la parte aérea), lo que fue detectado por las lecturas del NDVI realizadas hasta la floración del cultivo.

Estos resultados muestran que la evaluación del NDVI utilizando un sensor óptico activo (GreenSeeker) es un método preciso para diferenciar, en el estadio de 5-6 hojas completamente expandidas, diferentes condiciones de desarrollo del cultivo proporcionadas por la variación en la disponibilidad de N en la emergencia.

La definición de la dosis de nitrógeno a ser aplicada en el cultivo del trigo, en función de la productividad esperada es compleja, pues el potencial de rendimiento de granos varía en función de las condiciones meteorológicas de

cada año específico y la probabilidad de que el “rendimiento esperado” estimado no se concrete es elevada.

La variabilidad espacial del rendimiento de granos en un campo puede ser elevada, todavía en áreas de alto potencial productivo. Bredemeier et al. (2007) evaluaron la variabilidad espacial de la cantidad de biomasa de la parte aérea y del rendimiento de granos en un área comercial de producción de cebada, en la cual fueron observadas variaciones del 400% en la cantidad de biomasa en el estadio de emisión de la sexta hoja del tallo principal (variación entre 1250 y 5000 kg ha⁻¹) y variaciones del 250% en el rendimiento de granos (variación entre 2500 y 6300 kg ha⁻¹). El rendimiento medio de granos en el área estudiada fue de 4200 kg ha⁻¹ (Bredemeier et al., 2007).

De esta manera, se hace fundamental el uso de herramientas que puedan estimar el potencial productivo de un área *in situ* de manera precisa, eficiente y rápida, en tiempo real, cuidando optimizar la aplicación de N en cobertura y permitir la aplicación de este nutriente en tasa variable, inclusive en campos con alto potencial productivo. Según Milani et al. (2006), la estimación del potencial productivo de los cultivos en un determinado estadio fenológico viabiliza el manejo sitio específico, como la aplicación de fertilizantes en tasa variable. En este sentido, sensores remotos para evaluación de la reflectancia y de índices de vegetación, como el NDVI, surgen como importantes herramientas para detectar la variabilidad espacial del potencial productivo de manera precisa y en tiempo real.

La Figura 2 muestra la relación entre el Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) evaluado en el estadio de 5-6 hojas completamente expandidas y en floración, y el rendimiento de granos del cultivo de trigo.

En el estadio de 5-6 hojas expandidas, los componentes del rendimiento de granos del cultivo de trigo aún no fueron definidos. Así, el número de espigas por unidad de área y el número de granos por espiga pueden ser fuertemente influenciados por la aplicación de N en cobertura en el estadio de 5-6 hojas, con miras a que, en este momento, las plantas aún están emitiendo macollos y empezando la diferenciación de las estructuras reproductivas en la inflorescencia. Con la aplicación de dosis conducentes con las reales necesidades del cultivo, se puede permitir que haya mayor supervivencia de estos macollos, así como mayor número de granos en la espiga, definido a través de la diferenciación de las espiguillas a partir de este periodo.

Las recomendaciones de dosis de fertilización nitrogenada son tradicionalmente realizadas en la presiembrada del cultivo (Bredemeier, 2010), donde se consideran criterios como el contenido de materia orgánica del suelo y el rendimiento de granos esperado, no teniendo en consideración otros factores que influyen en la disponibilidad de nitrógeno en el suelo, ni las condiciones meteorológicas ocurridas durante el periodo inicial de desarrollo de las plantas. Esta situación es aún más dramática en regiones subtropicales de producción caracterizadas por la ocurrencia de grandes volúmenes de precipitación durante la estación de crecimiento de los cereales de estación fría, como por ejemplo de la región sur de Brasil. La elevada precipitación incrementa la pérdida de N del sistema suelo-planta, haciendo el manejo de este nutriente todavía más complicado.

Algunos autores han citado situaciones que hacen que ocurran diferencias en la disponibilidad de nitrato en el suelo, como, por ejemplo, la reducción de éste en la medida en que aumenta la precipitación (Jaynes et al., 2001, Kitchen et

al., 2010). También pueden ocurrir cambios en la disponibilidad de N para los cultivos en función de los diferentes cultivos antecesores (Kitchen et al., 2010). Poletto (2004) encontró baja acumulación de N foliar cuando, en el periodo inicial de desarrollo del cultivo, el contenido de N mineral en el suelo era bajo. Por lo tanto, la ocurrencia de factores post-siembra influye en el patrón de desarrollo, que lleva a diferentes acumulaciones de biomasa y absorción de N por las plantas.

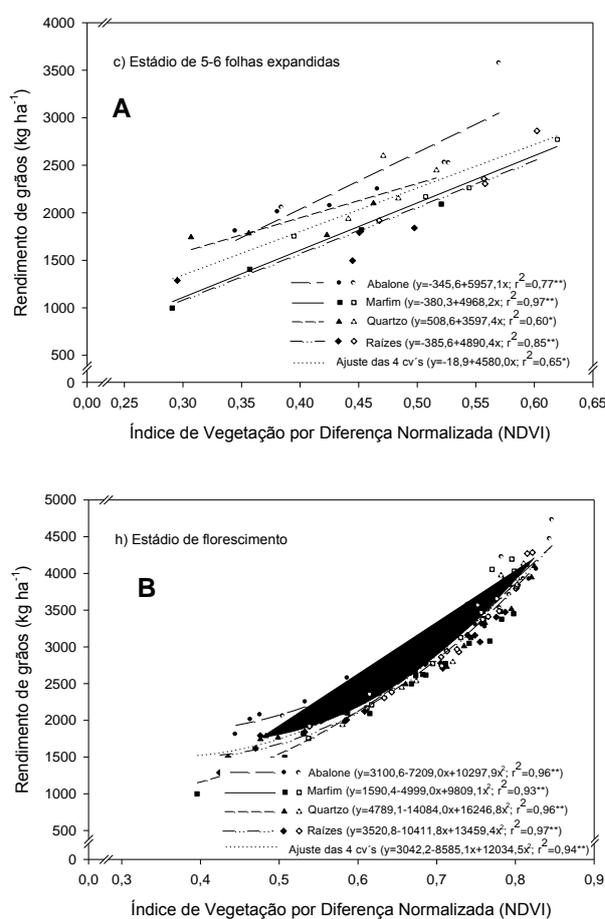


Figura 2. Relación entre rendimiento de granos e índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) evaluado en el estadio de 5-6 hojas completamente expandidas (A) y en la floración del cultivo (B), para cuatro genotipos de trigo cultivados después de maíz (símbolos llenos) y después de soja (símbolos vaciados). Eldorado do Sul, RS, 2009.

Lo que determina diferentes potenciales productivos en el momento de aplicación de nitrógeno en cobertura, en el estadio de 5-6 hojas expandidas, es el menor o mayor desarrollo del cultivo, dependientes de la nutrición nitrogenada inicial. Así, cuanto mejor sea el estado nutricional del cultivo en este momento, menor será la respuesta a la aplicación de N en cobertura.

Una vez cuantificados los valores de NDVI del cultivo de trigo, en el estadio de 5-6 hojas completamente expandidas, se podría pasar a utilizar la fertilización a una tasa variable en consonancia con el potencial productivo de cada localidad

dentro de un área agrícola. La diferenciación de desarrollo del cultivo dentro de una área, por el índice de vegetación, podría contemplar, por ejemplo, tres diferentes rangos de NDVI, que representarían diferentes potenciales de rendimiento (bajo, medio y alto). A partir de estos tres rangos, se determinarían diferentes dosis de N a ser aplicadas en cada localidad, en función de su potencial productivo estimado por los valores de NDVI.

Según Poletto (2004), la precisión en el manejo de N, además de considerar la disponibilidad de este nutriente en el suelo, debe prever las reales necesidades de N por la planta, siendo necesario, para eso, el análisis conjunto de indicadores de suelo y de características de la planta para recomendaciones más precisas y que permitan la obtención de rendimientos satisfactorios para el productor, con el mínimo de inversión en fertilizantes nitrogenados.

Para auxiliar en esta cuantificación del desarrollo del cultivo y del potencial productivo, la utilización de sensores como el Greenseeker, que hace evaluaciones en tiempo real y estimativas precisas del potencial productivo a través del NDVI, puede ser una importante herramienta en la determinación de dosis de fertilizante nitrogenado más conducentes con la real necesidad de N de las plantas. Estas cantidades de fertilizantes serán determinadas en función de la absorción inicial de N por el cultivo hasta el momento de la práctica de la fertilización nitrogenada de cobertura, en cada localidad dentro de un área.

Schmidt et al. (2011) encontraron buena eficiencia para el sensor de NDVI en la cuantificación de la necesidad de fertilizantes nitrogenados en el cultivo de maíz. El NDVI se ha correlacionado mejor con la cantidad de biomasa en la parte aérea que la cantidad de nitrato presente en el suelo en el periodo de siembra, que sería otra forma de prever las cantidades de N a ser aplicadas durante el desarrollo del cultivo.

Por otro lado, la determinación del NDVI en estadios de desarrollo más tardíos (después de emisión de la octava hoja del tallo principal) puede no tener funcionalidad sobre estrategias de manejo de la fertilización nitrogenada para el aumento de la productividad de granos. En este momento, el potencial de rendimiento ya está prácticamente establecido, especialmente el componente número de espigas por m², restando los componentes número de granos por espiga y peso del grano a ser definidos, este último con pequeño efecto sobre el rendimiento final del cultivo, por ser una característica influenciada principalmente por el genotipo.

Sin embargo, se vislumbran otros usos potenciales de las lecturas de NDVI utilizando el sensor óptico activo, realizadas a partir de floración.

En el sur de Brasil, es común la entrada en el área para realización de aplicaciones de fungicidas a partir del estadio de bota. Por lo tanto, con la asistencia de un sistema de posicionamiento global, la entrada en el área cultivada en este momento, para la aplicación de fungicidas sería un buen momento para hacer lecturas de NDVI, para la posterior utilización de estos datos en la confección de mapas de la variabilidad espacial del área, sin necesidad de hacerse una operación extra para la realización de estas lecturas con sensor óptico activo.

Así, la medición del NDVI entre el estadio de bota y floración del cultivo posibilitaría la cuantificación de la biomasa de la parte aérea. La biomasa, por su parte, tiene gran influencia sobre las condiciones de microclima para la aparición de enfermedades en el dosel del cultivo. De esta manera, se podría direccionar mayores dosis de fungicidas para las áreas en las cuales las

cantidades de biomasa son mayores, una vez que las lecturas de NDVI son positivamente correlacionadas con las cantidades de materia seca (Grohs et al., 2009).

Además de eso, cuando no hay disponibilidad de monitores de productividad, la medición georreferenciada del NDVI en la fase de floración del cultivo puede ser útil para confeccionar mapas de variabilidad espacial del potencial productivo del cultivo en una determinada área, en función de la elevada correlación observada entre los valores de NDVI en este estadio y el rendimiento de granos de trigo (Figura 2.B). Junges (2007), trabajando con NDVI obtenido a partir de sensores orbitales (satélites), utilizó los valores de NDVI en el florecimiento para estimar productividad de trigo en el estado del Rio Grande do Sul, en la región sur de Brasil.

Esos mapas también pueden ser útiles en la realización de muestreos de suelo direccionados ("*smart sampling*") a los lugares donde se detectan diferencias de desarrollo del cultivo y productividad, para que se haga la investigación de las causas y, si es posible, se proceda a la corrección necesaria para elevar el potencial productivo en localidades de bajo potencial, detectados por bajos valores de NDVI. A partir de estos mapas, es posible igualmente la identificación de lugares con mayor remoción de nutrientes por los granos, a través de los mapas de potencial productivo estimado por los valores del NDVI. Otro uso potencial para las lecturas del NDVI hechas entre los estadios de bota y floración del cultivo es la predicción del contenido de proteína en los granos de trigo, pues estas lecturas serían correlacionadas a la cantidad de biomasa en el área. El contenido de proteína presenta, de modo general, una relación indirecta con el NDVI, es decir, cuanto mayor sea el rendimiento de granos (estimado por el NDVI), menor será el contenido de proteína en el grano.

Aplicaciones tardías de N para mejorar de la calidad de granos fueron objeto de trabajos experimentales, como lo de Fuertes-Mendizábal et al. (2010), que estudiaron la calidad de granos de trigo en función de aplicaciones de dosis de nitrógeno parceladas en el período de macollaje, encañazon y surgimiento de la hoja bandera. Estos autores concluyeron que el manejo de la fertilización nitrogenada produce un significativo efecto en todos los parámetros de calidad, debido al aumento en el contenido de proteína en los granos. Dupont et al. (2006) relataron que aplicaciones de N en la antesis del cultivo mejoraron la calidad de panificación de trigo, comparativamente con los tratamientos que no recibieron aplicación de este nutriente en este estadio.

De esta forma, la utilización del NDVI medido por un sensor óptico activo para cuantificar el potencial productivo del cultivo en floración puede direccionar la aplicación de diferentes dosis de N (fertilizante en tasa variable) para mejorar de la calidad de granos. Por lo tanto, para los lugares de menor potencial productivo, las cantidades de N a ser aplicadas serían menores que para lugares de alto potencial productivo, pues en estos lugares, la elevada productividad diluye lo contenido de N en los granos, reduciendo su contenido de proteína y, consecuentemente, su calidad para panificación. Así, aplicaciones tardías de nitrógeno en la floración del cultivo, basadas en lecturas de NDVI, podrían aumentar el contenido de proteína en los granos y elevar su calidad, agregando mayor valor a los granos en el momento de su comercialización.

Otra herramienta que podría ser utilizada para medición del NDVI de un área sería el uso de imágenes de sensores remotos orbitales (satélites) o de

imágenes aéreas. A partir de estas imágenes, se podría dividir el área en zonas de manejo o rangos de mayor o menor potencial productivo y, basado en esta división, direccionar las prácticas de manejo, como la aplicación de pesticidas y fertilizantes nitrogenados o muestreos direccionados de suelo, en acuerdo con la variabilidad espacial detectada por el índice de vegetación.

Mediciones de NDVI presentaron alta correlación con el rendimiento de granos del cultivo de trigo (Figura 2) y podrían ser empleadas como una herramienta para definición de “zonas de manejo”, realizando la aplicación de fertilizantes en tasa variable. Ese método consiste en la definición y en la demarcación de divisas para sectores del campo donde serán aplicadas dosis diferenciadas de algún insumo. Este concepto subentiende, además de eso, que el tratamiento sea hecho uniformemente dentro de cada zona.

El empleo del Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) presenta potencial para ser utilizado en la detección de la variabilidad espacial causada por diferencias en el suplemento de nitrógeno y para manejo de este fertilizante en cobertura. En áreas comerciales, estas diferencias son ocasionadas, entre otros factores, por las diferentes manchas de suelo y textura encontradas en un área, que llevan a diferentes niveles de suplemento de N durante el desarrollo del cultivo, pues la fertilización de base tradicionalmente es aplicada de forma uniforme en el momento de la siembra. Por lo tanto, las diferencias de desarrollo encontradas dentro de un área se deben a la variación del potencial del suelo en suplir N para el cultivo.

Factores que determinan diferentes ofertas de N son, por ejemplo, lugares donde el cultivo anterior acumuló menor o mayor cantidad de residuos de cosecha, así como los lugares donde se acumuló mayor volumen de residuos, llevando a diferentes niveles de disponibilidad de N para el cultivo implantado en sucesión.

Una serie de trabajos de investigación ha estudiado la aplicación del NDVI en diversos cultivos. Dellinger et al. (2008) sugieren que este índice tiene potencial para ser utilizado en la recomendación de N en cobertura en el cultivo de maíz. Ya Schmidt et al. (2009) concluyeron que lecturas de reflectancia en maíz pueden ser utilizadas para recomendaciones de fertilización nitrogenada. La mayor probabilidad de detectar variabilidad espacial y temporal con el uso del NDVI hace esta posibilidad atractiva para el aumento de la eficiencia de utilización de la N en la producción de maíz (Schmidt et al., 2009).

Por lo tanto, las diferencias de biomasa de la parte aérea y la disponibilidad de N detectadas por el NDVI deberían ser consideradas cuando ocurre la fertilización con N en cobertura en trigo. Esto evitaría la aplicación de una dosis única en áreas donde hay variabilidad espacial, lo que puede llevar a problemas relacionados a la sub o sobrefertilización en determinadas partes de el área, o sea, dosis menores o mayores que la demanda real de las plantas.

Sin embargo, para utilizar algoritmos en la determinación de dosis de N en cobertura a partir de valores de NDVI es conveniente establecer un modelo patrón que pueda ser empleado en los más diversos genotipos de trigo disponibles en el mercado.

Observaciones finales

La práctica de la fertilización nitrogenada en tasa variable permitirá racionalizar la utilización del nitrógeno en los principales cultivos de invierno en la región subtropical del sur del Brasil. Ese nutriente, además de tener alto costo energético para su obtención y consecuente emisión de CO₂ para la atmósfera (gas con mayor contribución al efecto invernadero), cuando está presente en exceso en el suelo pasa en mayor parte a la forma de nitrato, que, por su parte, puede ser lixiviado y transformarse en un importante contaminante de la capa freática.

La medición de variables del dosel durante el desarrollo del cultivo, como el NDVI, es una oportunidad para aumentar el rendimiento y la calidad de granos, por la aplicación localizada y variable de fertilizantes nitrogenados. Variables importantes en este contexto son el área foliar, la biomasa total y los contenidos de clorofila y nitrógeno en la planta, las cuales son indicadores de la necesidad de nitrógeno por los cultivos. Las variaciones espaciales y temporales de estas variables deben ser determinadas para que la cantidad de N aplicado corresponda con las exigencias del cultivo cuanto sea posible (Hansen & Schjoerring, 2003).

La principal ventaja del uso de sensores de reflectancia del dosel es la posibilidad de realización de un gran número de muestreos no destructivos y rápidos, permitiendo la lectura en tiempo real de diversos puntos del área cultivada. Estos sensores viabilizan el proceso de fertilización a tasas variables de aplicación de N, posibilitando el aumento en la eficiencia de la fertilización nitrogenada en cobertura en el cultivo de trigo.

El empleo de este tipo de tecnología puede llevar a la reducción de costos con la fertilización nitrogenada, por la reducción de dosis aplicadas en lugares en que las plantas estén más bien nutridas en el momento de la aplicación. Esta práctica reduciría pérdidas de nitrato y contribuiría para la reducción de la contaminación de la capa freática, una vez que la N no absorbido queda susceptible de ser lixiviado. Todavía, sería posible manejar las áreas en que las plantas estén con menor desarrollo, aumentándose las dosis de N aplicadas, pues estas áreas presentarán mayor respuesta al N aplicado en cobertura.

Esta forma de manejar el N lleva a la reducción en la aplicación de insumos en lugares donde el potencial productivo es alto, donde las plantas están bien suplidas y no habría respuesta a altas dosis de N aplicadas, sin embargo sin comprometer la productividad, y reduciendo la lixiviación de nitrato en el suelo. Según Lamothe (1994), cuando elevadas cantidades de N son absorbidas hasta el final del macollaje, las plantas poco responderán a la adición de fertilizante nitrogenado en cobertura. Ya en lugares donde los valores de NDVI son intermedios, se utilizarían dosis mayores de N, con el objetivo de elevar el potencial productivo de estos lugares, una vez que puede haber ocurrido menor desarrollo del cultivo por la menor disponibilidad de la N en el suelo, lo que podría ser corregido en el momento de aplicación de N en cobertura.

Comparativamente a la forma tradicional de aplicación de dosis uniformes en toda área, en la cual generalmente se adoptan dosis mayores para alcanzarse máximos rendimientos, este método llevaría a la reducción del costo de este insumo, sin reducciones de productividad y, aún, contribuyendo para que no ocurran daños al ambiente y aumentando la eficiencia de uso del N aplicado. Es posible, todavía, que se consigan incrementos de productividad en

situaciones donde las dosis empleadas son inferiores a las que el cultivo podría responder en productividad, cuando esta sea manejada para alcanzar elevadas productividades.

Referencias

Anghinoni, I., 1986. Adubação nitrogenada nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. In: M.B.M. Santana, SANTANA, M.B.M., Adubação nitrogenada no Brasil. CEPLAC/SBCS, Ilhéus, pp. 1-18.

Bergamaschi, H., Guadagnin, M.R., Cardoso, L.S., Silva, M.I.G., 2003. Clima da Estação Experimental da UFRGS e região de abrangência. UFRGS, Porto Alegre.

Bredemeier, C. Predição da necessidade de nitrogênio em cobertura em trigo e aveia. 1999. 101 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

Bredemeier, C., Grohs, D.S., Poletto, N., Mundstock, C.M., 2007. Variabilidade espacial de atributos de planta em lavouras de cevada e adubação nitrogenada em taxa variável. In: Reunião Nacional de Pesquisa de Cevada, 26., 2007, Passo Fundo, RS. Anais... Passo Fundo, EMBRAPA, pp. 129-138.

Bredemeier, C., Mundstock, C.M., 2001. Estádios fenológicos do trigo para adubação nitrogenada em cobertura. *Brasilian J. Soil Sci.* 25, 317-323.

Cassman, K.G., Dobermann, A., Walters, D.T., 2002. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. *J. Human Environ.* 31, 132-140.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento de safra brasileira: grãos, quarto levantamento, janeiro/2011. Brasília, 2011.

Dellinger, A.E., Schmidt, J.P., Beegle, D.B., 2008. Developing nitrogen fertilizer recommendations for corn using an active sensor. *Agron. J.* 100, 1546-1552.

Drury, C.F., Zhang, T.Q., Kay, B.D., 2003. The non-limiting and least limiting water ranges for soil nitrogen mineralization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67, 1388-1404.

Dupont, F.M., Hurkman, W.J., Vensel, W.H., Tanaka, C., Kothari, K.M., Chung, O.K., Altenbach, S.B., 2006. Protein accumulation and composition in wheat grains: Effects of mineral nutrients and high temperature. *Eur. J. Agron.* 25, 96-107.

Feng, W., Yao, X., Zhu, Y., Tian, Y.C., Cao, W.X., 2008. Monitoring leaf nitrogen status with hyperspectral reflectance in wheat. *Eur. J. Agron.* 28, 394-404.

Fuertes-Mendizábal, T., Aizpurua, A., González-Moro, M.B., Estavillo J.M., 2010. Improving wheat breadmaking quality by splitting the N fertilizer rate. *Eur. J. Agron.* 33, 52–61.

Grohs, D.S., Bredemeier, C., Mundstock, C.M., Poletto, N., 2009. Modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada por meio do sensor Greenseeker. *Eng. Agric.* 29, 101-112.

Hansen, P.M., Schjoerring, J.K., 2003. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression. *Remote Sens. Environ.* 86, 542-553.

Harper, J.E., 1994. Nitrogen metabolism. In: K.J. Boote, J.M. Bennett, T.R. Sinclair, *Physiology and Determination of Crop Yield*, Madison, ASA/CSSA/SSSA, pp.285-302.

Hong, S.D., Schepers, J.S., Francis, D.D., Schlemmer, M.R., 2007. Comparison of ground-based remote sensors for evaluation of corn biomass affected by nitrogen stress. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 38, 2209-2226.

Inman, D., Khosla, R., Westfall, D.G., Reich, R., 2005. Nitrogen uptake across site specific management zones in irrigated corn production systems. *Agron. J.* 97, 169-176.

Jacquemoud, S., Ustin, S.L., 2001. Leaf optical properties: a state of the art. In: *International Symposium Physical Measurements & Signatures in Remote Sensing*, 8., 2001, Aussois. [Proceedings...] Aussois, pp.223-232.

Jaynes, D.B., Colvin, T.S., Karlen, D.L., Cambardella, C.A., Meek, D.W., 2001. Nitrate loss in subsurface drainage as affected by nitrogen fertilizer rate. *J. Environ. Qual.* 30, 1305-1314.

Junges, A.H. Modelo agrometeorológico-espectral de estimativa de rendimento de grãos de trigo no Rio Grande do Sul. 2007. 137f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

Kitchen, N.R., Sudduth, K.A., Drummond, S.T., Scharf, P.C., Palm, H.L., Roberts, D.F., Vories, E.D., 2010. Ground-based canopy reflectance sensing for variable-rate nitrogen corn fertilization. *Agron. J.* 102, 71-84.

Koch, B., Khosla, R., Frasier, W.M., Westfall, D.G., Inman, D., 2004. Economic feasibility of variable-rate nitrogen application utilizing site-specific management zones. *Agron. J.* 96, 1572-1580.

Lambert, D.M., Deboer, J.L., Malzer, G.L., 2006. Economic analysis of spatial-temporal patterns in corn and soybean response to nitrogen and phosphorus. *Agron. J.* 98, 43-54.

Lamothe, A.G., 1994. Manejo del nitrógeno para aumentar productividad en trigo. INIA, Montevideo, *Série Técnica* 54.

Mamo, M., Malzer, G.L., Mulla, D.J., Huggins, D.R., Strock, J., 2003. Spatial and temporal variation in economically optimum nitrogen rate for corn. *Agron. J.* 95, 958-964.

Milani, L., Souza, E.G., Uribe-Opazo, M.A., Gabriel Filho, A., Johann, J.A., Pereira, J.O., 2006. Unidades de manejo a partir de dados de produtividade. *Acta Sci. Agron.* 28, 591-598.

- Molin, J.P., 2001. Agricultura de precisão - o gerenciamento da variabilidade. ESALQ, Piracicaba.
- Mundstock, C.M., Bredemeier, C., 2001. Disponibilidade de nitrogênio e sua relação com o afilhamento e o rendimento de grãos de aveia. *Ciência Rural* 31, 205-211.
- Poletto, N. Disponibilidade de nitrogênio no solo e sua relação com o manejo da adubação nitrogenada. 2004. 119f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- Povh, F.P., Molin, J.P., Gimenez, L.M., Pauletti, V., Molin, R., Salvi, J.V., 2008. Comportamento do NDVI obtido por sensor ótico ativo em cereais. *Pesq. Agropec. Bras.* 43, 1075-1083.
- Raun, W.R., Johnson, G.V., 1999. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. *Agron. J.* 91, 357-363.
- Raun, W.R., Solie, J.B., Stone, M.L., Martin, K.L., Freeman, K.W., Mullen, R.W., Zhang, H., Schepers, J.S., Johnson, G.V., 2005. Optical sensor-based algorithm for crop nitrogen fertilization. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 36, 2759-2781.
- Reunião da Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale, 2010. Informações técnicas para trigo e triticale – safra 2011. COODETEC, Cascavel.
- Ringuelet, A., Bachmeier, O.A., 2002. Kinetics of soil nitrogen mineralization from undisturbed and disturbed soil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 33, 3703-3721.
- Rizzi, R. Geotecnologias em um sistema de estimativa da produção de soja: estudo de caso no Rio Grande do Sul. 2004. 214 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2004.
- Rouse, J.W., Hass, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: *THIRD Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*. NASA, Washington, D.C.
- Sala, V.M.R., Freitas, S.S., Donzeli, V.P., Freitas, J.G., Gallo, P.B., Silveira, A.P.D., 2005. Ocorrência e efeito de bactérias diazotróficas em genótipos de trigo. *Bras. J. Soil Sci.* 29, 345-352.
- Scharf, P.C., Brouder, S.M., Hoeft, R.G., 2006. Chlorophyll meter readings can predict nitrogen need and yield response of corn in the north-central USA. *Agron. J.* 98, 655-665.
- Schmidt, J.P., Beegle, D.B., Zhu, Q., Sripada, R., 2011. Improving in-season nitrogen recommendations for maize using an active sensor. *Field Crop. Res.* 120, 94-101.
- Schmidt, J.P., Dellinger, A.E., Beegle, D.B., 2009. Nitrogen recommendations for corn: an on-the-go sensor compared with current recommendation methods. *Agron. J.* 101, 916-924.

Shahandeh, H., Wright, A.L., Hons, F.M., Lascano, R.J., 2005. Spatial and temporal variation of soil nitrogen parameters related to soil texture and corn yield. *Agron. J.* 97, 772-782.

Shanahan, J.F., Kitchen, N.R., Raun, W.R., Schepers, J.S., 2008. Responsive in-season nitrogen management for cereals. *Comp. Electronics Agric.* 61, 51-62.

Singh, B., Singh, Y., Ladha, J.K., Bronson, K.F., Balasubramanian, V., Singh, J., Khind, C.S., 2002. Chlorophyll meter-and leaf color chart-based nitrogen management for rice and wheat in northwestern India. *Agron. J.* 94, 821-829.

Wamser, A.F., Mundstock, C.M., 2007. Adubação nitrogenada em estádios fenológicos em cevada, cultivar "MN 698". *Ciênc. Rural* 37, 942-948.

Wright, D.L., Rasmussen, V.P., Ramsey, R.D., Baker, D.J., 2004. Canopy reflectance estimation of wheat nitrogen content for grain protein management. *GIS Sci. Remote Sens.* 41, 287-300.

Determinantes genéticas del ciclo de cebada y los desafíos impuestos por la intensificación agrícola

Ariel Castro¹, Esteban Hoffman¹, Luis Viega²

¹ Dpto. de Producción Vegetal, Facultad de Agronomía, UdelaR

² Dpto. de Biología Vegetal, Facultad de Agronomía, UdelaR

Resumen

En los sistemas agrícolas del Uruguay durante el período 1980-2005 la cebada fue ocupando un lugar dentro del sistema coherente con la obtención de los máximos potenciales de rendimiento: mejores condiciones de chacra y siembras de junio y principios de julio. En los últimos años, las modificaciones experimentadas por el sistema (intensificación, predominancia de la soja, inferior adaptación comercial de la cebada, predominancia de trigo en invierno y corrimiento de zona agrícola a regiones marginales) fuerzan a la cebada a ocupar un lugar menos adaptado a sus características e imponen al manejo y mejoramiento el objetivo de desarrollar un paquete para dos condiciones: siembras más tempranas y siembras más tardías. En el presente trabajo discutimos los factores fisiológicos y genéticos a considerar así como la disponibilidad real de variabilidad en la especie para los objetivos planteados, haciendo énfasis en los factores genéticos que afectan la fenología del cultivo en las condiciones de Uruguay y su impacto en los resultados productivos.

La cebada en el sistema agrícola uruguayo

La cebada cervecera ha sido históricamente el segundo cultivo de invierno en importancia en Uruguay. El incremento de la participación relativa de la cebada en la superficie agrícola a partir de la década del ochenta, en el siglo pasado, significó cambios en su forma de producción. En particular en lo que refiere a los dos factores más trascendentes en definir el nivel de rendimiento en cultivos de invierno: época de siembra e historia de chacra. La cebada pasó a sembrarse en mejores chacras (en general insertas en sistemas de rotación con pasturas) y en fechas más tempranas. Esto se tradujo en una mejora del aporte de nitrógeno al cultivo con los riesgos asociados de incremento en los niveles de proteína del grano, una de las principales variables de calidad, y de vuelco. La demanda a nivel de producción en ese momento fue hacer compatible el cultivo con los sistemas de mayor potencial agrícola.

El cultivo de cebada en el Uruguay no presenta limitaciones para la producción de altos niveles de biomasa aérea (13000 Kg./ha base seca) (Hoffman et al., 1995a), pero sí para la concreción de dicha biomasa en rendimiento. Castro y Kemanian (1999) establecían que para el logro de rendimientos en el entorno de los 6000 Kg./ha, con un nivel de producción biomasa total de 12000 Kg./ha o más, deben obtenerse índices de cosecha cercanos a 0.50, para lo cual se requiere de una comprensión ajustada de los atributos de la planta y el cultivo que conduzcan a la obtención de altos IC con dichos niveles de biomasa.

La fecha de espigazón de un genotipo es crítica para determinar su potencial de rendimiento en Uruguay (Castro et al., 1997) en gran medida porque determina el momento del llenado de grano. Los cultivares utilizados en el país son de hábito

primaveral, sin requerimientos de vernalización y con distintos grados de respuesta al fotoperíodo (Germán et al., 1996). Cuando un cultivo alcanza la antesis a fines de setiembre o principios de octubre su llenado de grano se da en las mejores condiciones climáticas. Antesis más tardía significa llenado de grano a fines de octubre y noviembre, con mayor temperatura promedio, lo que reduce el rendimiento y la calidad del grano (Kemanian y Viega, 1998). La caracterización de una amplia muestra de germoplasma ha mostrado que la combinación de ciclo corto a antesis y período de llenado de grano largo se asociaron a mayor potencial de rendimiento y mayor estabilidad de dicho rendimiento (Castro, 1999; Castro et al., 1997). Por otra parte estudios utilizando una población segregante biparental mostraron una clara asociación entre momento de floración con tamaño y peso de grano, siendo los mismos alelos los que determinaban floración temprana y mayor peso de grano (Castro et al., 2009).

Sin embargo el período siembra antesis no puede ser tan corto que comprometa la definición de un alto número de granos por espiga, lo que se asocia a una mayor duración de la subfase de iniciación de primordios de espiguillas en el meristemo apical (Viega et al., 2006). Una antesis más temprana puede conducir a otro problema: una mayor probabilidad de ocurrencia de daño de heladas lo que también afecta el rendimiento y la calidad del grano. Genotipos con una respuesta adecuada al fotoperíodo pueden evitar ambos problemas mediante ajuste de la fecha de antesis a partir de la fecha de menor probabilidad de heladas tardías (Germán et al., 2000).

Considerando todos los factores, el genotipo buscado para la cebada en Uruguay debería tener respuesta al fotoperíodo, antesis temprana y período de llenado de grano largo (Castro y Kemanian, 1999; Germán et al., 2000).

La investigación en el cultivo en Uruguay durante el periodo 1991-2002 permitió no solo determinar un fenotipo adecuado para el logro de altos potenciales sino un paquete de medidas de manejo ajustadas por variedad para el logro de dicho potencial. Ajustes del manejo de la fertilización (Hoffman y Ernst.1996; Hoffman et al.; 2001) o la población permitieron que la cebada pudiera ser manejada como una alternativa viable en zonas de suelos con alto potencial de aporte de nutrientes, donde hasta fines de los años ochenta se consideraba imposible su incorporación.

Con el comienzo del nuevo siglo el cultivo experimentó cambios sustantivos en la forma de producción al imponerse la siembra directa y consolidarse la expansión agrícola centrada en el cultivo de soja y en la irrupción de empresas agrícolas especializadas y de gran escala. Estos cambios estructurales se pueden sintetizar en los siguientes aspectos (Arbeleche et al.; 2010):

- Cambios drásticos del régimen de tenencia de la tierra destinada a la agricultura (en el año 2000 un 25% del área sembrada estaba bajo régimen de arrendamiento, y en el año 2009 este valor ascendió a casi el 50%).
- Los cultivos de verano pasaron a tener preponderancia en el esquema agrícola (se pasó en los últimos 10 años de una relación cultivo de invierno/cultivo de verano 60-40, a una relación inversa de 40-60)
- Incremento del área de cereales de invierno (en los ultimo 10 años el área sembrada se multiplico por 2.5)
- Aumento de la relación trigo/cebada (1:1 a inicios del año 2000 a 4.5:1 en los últimos 3 años)
- Cambió en forma relativa la ubicación geográfica del área agrícola: desde fines de la década del noventa en donde mas del 95 % del área sembrada se ubicaba en el litoral agrícola (sur - noroeste del país), a mas del 35 % del área actual sembrada fuera de la zona tradicional agrícola

- Se abandona el sistema de agricultura en rotación con pasturas con laboreo, y se evoluciona a un sistema de agricultura continua sin pasturas en siembra directa. Al fin de la década del noventa con 400.000 has en agricultura (300.000 has correspondientes a cultivos de invierno), se instalaban en forma asociada 100.000 has de nuevas pasturas por año. En la actualidad, con más de 1.200.000 ha en agricultura, y casi 2.000.000 ha/año de cultivos anuales sembrados (muchas chacras se siembran con más de un cultivo por año), las nuevas áreas sembradas con pasturas no alcanzan las 50.000 ha/año.
- Cambios tecnológicos relevantes en el manejo de los cultivos de invierno: (i) adelantamiento de la fecha de siembra hacia los meses de mayo, (ii) incorporación de una mayor proporción de cultivares de ciclo medio-largo y largo y (iii) una fuerte tendencia al establecimiento de diferencias en prioridad de siembra y aptitud de chacras entre cultivos (los mejores suelos y chacras, en las siembras más tempranas, son para el cultivo de trigo).

Si consideramos además que las empresas de tipo gerenciadoras, muestran menos interés por la siembra de cebadas malteras, en los últimos años la proporción del total del área de cebada sembrada tardíamente se ha incrementado en respuesta al cambio de prioridades. Por otra parte las dificultades de siembra en junio debido a problemas relacionados con el régimen de precipitaciones en las últimas zafras, han contribuido a la tendencia mencionada.

Los resultados recientes (desde el 2007 a 2010) en lo que refiere al rendimiento en grano han sido extremadamente desfavorables para las siembras posteriores a fines del mes de junio, tanto para trigo como para cebada, pero afectando especialmente a este último cultivo. Existen varias razones que explican la situación. En primer lugar en las zafras mencionadas las siembras tardías se han caracterizado por fuertes condiciones de estrés hídrico: en dos casos debido a exceso hídrico (2007 y 2009) y en dos debido al déficit hídrico (2008 y 2010). Por otra parte las siembras tardías se han realizado con una alta proporción de cultivares de ciclo largo debido a la baja disponibilidad de ciclo medios y medios cortos (a mitad de la década del 2000, la disponibilidad de ciclos medios y medio-cortos representaba el 67 % del total, mientras que el año 2010 y 2011, solo alcanza el 18%). Dichos cultivares presentan una adaptación diferencial negativa a las fechas de siembra mencionadas.

Disponibilidad de germoplasma

Como resultado de los cambios anteriormente mencionados, tanto por iniciativa del sector industrial, como por la demanda del sector productivo, se incrementa la intención de siembra temprana de cebada (mayo). Los resultados productivos anteriormente analizados son una de las razones de ese incremento y también una estrategia adoptada de parte del sector productivo para permitir a la cebada competir en los mejores ambientes y fechas de siembra.

Un indicador de esta tendencia son las características de los cultivares de cebada enviados por los criaderos nacionales al Programa de Caracterización de Cultivares de Invierno de la Facultad de Agronomía. Dichos cultivares son los que cuentan con mayores posibilidades de ingresar al área de producción. En 1998 los genotipos de ciclo largo correspondían a un 14% del total, mientras que en los últimos años son un 100% de los cultivares caracterizados (Figura 1).

Es importante tomar en cuenta que la duración del ciclo *per se* no es la única causa de esta tendencia. La mayor calidad maltera promedio de muchos de los materiales

caracterizados es otra de las razones de la tendencia mencionada. El material de origen europeo de alta calidad maltera, de gran importancia para la industria, es en general de ciclo largo (debido a su adaptación a las primaveras europeas) sin que ello tenga una relación causal. Varios de los cultivares recientemente caracterizados presentan un alto potencial de rendimiento en condiciones ideales de producción lo que sin duda aumenta su atractivo (ver resultados de la evaluación nacional de cultivares en www.inase.org.uy).

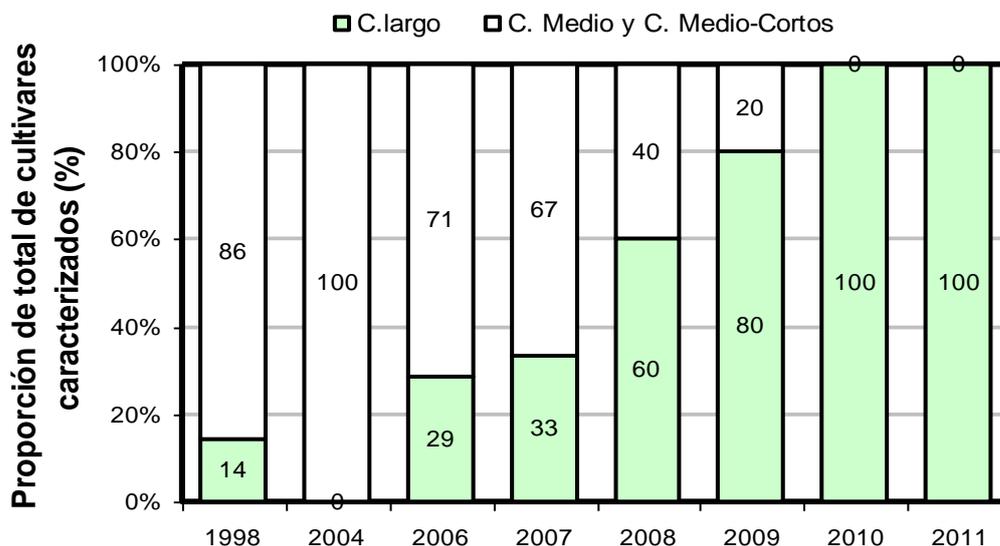


Figura 1. Evolución de la proporción de cultivares de ciclo largo en relación a medios y medios cortos de cebada de dos hileras caracterizados en el Programa de Caracterización de Cultivares de Cebada de la Facultad de Agronomía.

Esta situación en lo que refiere a cultivares de ciclo largo con interés productivo no es nueva. La caracterización del germoplasma en uso por parte del mejoramiento genético en la década de los noventa en Uruguay (Castro et al., 1997), permitió detectar grupos de materiales que superaban el rendimiento de los mejores testigos mediante un aumento en la producción de biomasa, en condiciones climáticas no limitantes para la expresión del potencial de rendimiento. En general dichos genotipos presentaban ciclos a antesis más largos que los cultivares utilizados en producción. Sin embargo cuando las condiciones ambientales eran limitantes los genotipos identificados no mantenían su comportamiento superior, en particular en lo que refiere a la calidad física del grano (peso y diámetro), mostrando dificultades para lograr un porcentaje mayor al 85% (criterio de comercialización) de granos con un diámetro superior a 2.5 mm. El retraso en el llenado de grano asociado a los ciclos largos de este tipo de materiales fue señalado por los autores (Castro et al., 1997) como una de las causas de dicho problema. La caracterización de la colección nacional de cebada permitió el análisis de una base aún más amplia de genotipos (más de 500 en 1992 y 356 en 1993). Los resultados obtenidos fueron similares a los anteriores, correlacionándose negativamente el rendimiento con el ciclo a floración y positivamente con la duración del llenado de grano, y presentando amplia variación en la mayoría de las variables (Castro, 1999). En resumen, la información nacional es consistente en indicar los riesgos de genotipos de ciclo largo en condiciones limitantes o frente a atrasos en la fecha de siembra. Su mayor sensibilidad a la temperatura en llenado de grano, prácticamente los excluía de integrar los planes de siembras en una gran zona de producción de cebada (litoral noroeste) y los posicionaba como cultivares

de alto riesgo de no obtener niveles apropiados de clasificación para la industria. La ausencia de respuesta al fotoperíodo en estos genotipos (en general de origen europeo) limita la flexibilidad de su uso.

Factores genéticos que controlan la fenología

La antesis en cebada es determinada por tres mecanismos, todos controlados genéticamente: la respuesta a la vernalización (Takahashi y Yasuda, 1970), la respuesta al fotoperíodo (Roberts et al., 1988) y la precocidad *per se* (Gallagher et al., 1991). Esta última es definida por Ellis et al. (1989) en términos de genes sensibles a la temperatura o a determinados rangos de temperatura o a otros factores de ambiente aun no identificados (Laurie et al., 2004). Laurie et al. (1995) cartografiaron genéticamente varios de los genes mayores que controlan esas características y numerosos QTL también han sido identificados en un importante número de poblaciones de mapeo (Hayes et al., 2003).

El ciclo de desarrollo siembra- antesis, en cebada como en otros cereales, se puede subdividir en tres subfases de acuerdo a los eventos que ocurren en el ápice meristemático: iniciación de hojas (IH) (siembra a inicio de macollaje, Z20-Z21), iniciación de espiguillas (IE) (macollaje e inicio de encañado, Z21- Z33) y crecimiento de espiguillas (CE) (encañado hasta antesis, Z33 – Z49) (Appleyard et al. 1982). La duración de cada una de estas subfases es controlada en forma diferencial por el fotoperíodo y la temperatura. Según Ellis et al. (1989) las subfases IH y CE serían reguladas exclusivamente por la temperatura, mientras que la subfase IE o subfase inductiva por la interacción de fotoperíodo y temperatura. Otros autores han reportado también influencia del fotoperíodo en la subfase CE, existiendo amplia variabilidad en su duración tanto en trigo como en cebada (Slafer, 2003). Este último aspecto no pudo ser comprobado por González y Xavier (2000) en ocho cultivares y dos épocas de siembra en Uruguay.

Recientemente Borrás et al. (2010) trabajando con la población Henni/Meltan, y Castro et al. (2010) trabajando con la población BCD47/Baronesse, reportan control genético independiente de las distintas subfases del período emergencia-floración. En el primer caso las fases estudiadas fueron emergencia-comienzo de la elongación y elongación-antesis, mientras que en el segundo se estudiaron los períodos emergencia-Z20, Z20-Z30 y Z30-antesis. Dicho control independiente explica la completa aditividad de los QTL controlando la fecha de antesis en la población BCD47/Baronesse detectados por Castro et al. (2008).

Perspectivas

Los cambios en las demandas del sistema agrícola predominante en Uruguay referentes al cultivo de cebada implican aumento de potencial de rendimiento y ajuste a un periodo de siembra más amplio y con énfasis en fechas extremas (tardías y tempranas). Los resultados más recientes en lo que refiere al control genético de la fenología abren la posibilidad, debido al control independiente de las subfases emergencia-antesis, de un diseño específico de los nuevos cultivares que permitiría una mejor adaptación específica a las condiciones de producción nacionales.

Para las condiciones de Uruguay cualquier incremento de la duración de las subfases del desarrollo implica un retraso del período de llenado de grano con el consecuente efecto, ya mencionado, en el peso y clasificación del grano. Inversamente, una

reducción de cualquier subfase se asocia en general a una antesis más temprana y mejores condiciones para el crecimiento del grano.

Los efectos favorables de un cambio en la duración de una subfase difieren según la etapa considerada y de acuerdo a los principales eventos fisiológicos que en ella ocurren. Un incremento en la duración del periodo emergencia – inicio de macollaje (aparición de doble arruga) no aparece como asociado a ningún beneficio, siendo en general la que muestra menor variación entre genotipos y épocas de siembra (González y Xavier, 2000). En el caso del período de macollaje (Z20 – Z30) (coincidente con la subfase de diferenciación de primordios de espiguillas a nivel del ápice), un incremento en su duración se asocia a un mayor número de macollos (que en las condiciones de Uruguay no es una limitante) y un mayor número de primordios de espiguillas por espiga (lo que si afecta el potencial en las condiciones de Uruguay). Por último el incremento del período de encañazón se asocia con un incremento de la fertilidad de tallos y de las espiguillas por espiga, siendo para cebada en las condiciones de Uruguay la etapa crítica en la concreción del número de granos por unidad de superficie (Viega et al, 2006)(Figura 2).

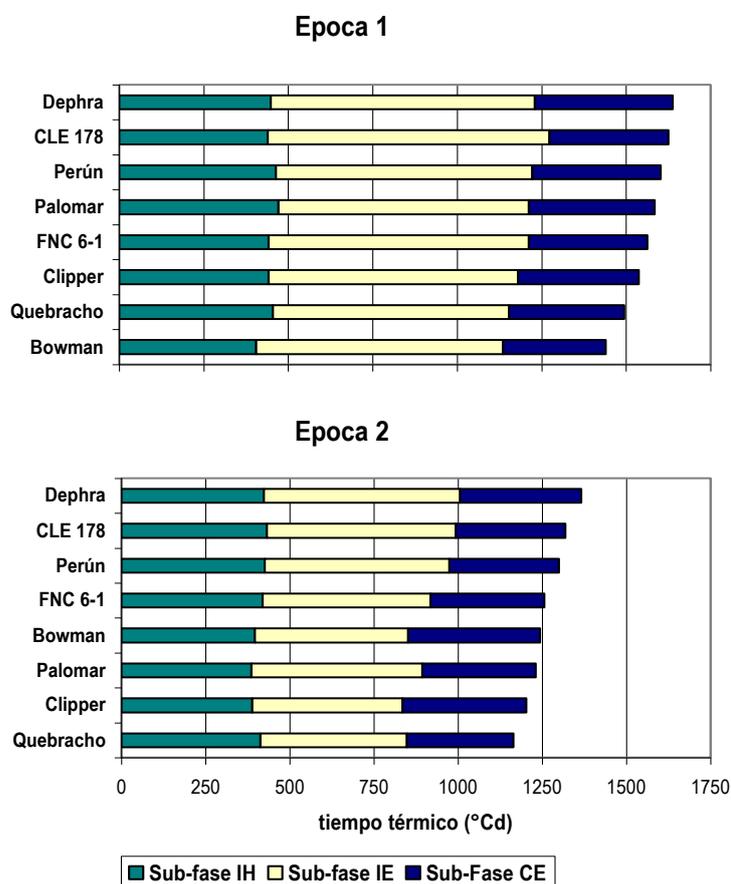


Figura 2. Duración del ciclo siembra floración y de las sub-fases iniciación de hojas (IH), iniciación de espiguillas (IE) y crecimiento de espiguillas (CE), según cultivar y época de siembra (adaptado de González y Xavier, 2000).

Por lo expuesto la posibilidad de reducción de la etapa siembra-antesis aparece como una alternativa que asegura un adecuado crecimiento del grano. Sin embargo, dicha reducción no debería ser a expensas de una reducción en el número de granos por

superficie. De acortarse la subfase de iniciación de primordios de espiguillas, se podría reducir el número máximo de primordios de espiguillas. Incrementar la subfase de crecimiento de espiguillas permitiría aumentar la fertilidad de las mismas, en la medida que las condiciones ambientales sean propicias para lograr altas tasas de crecimiento en el período de encañado. Los antecedentes sugieren que existe más de una forma de lograr mayor tamaño de espigas, aumentando el número máximo de primordios, disminuyendo el porcentaje de aborto de los mismos o ambas en paralelo (Viega et al., 2006). En dichos trabajos la importancia relativa de ambos parámetros en la definición del número de granos por espiga fue mayor en el caso del porcentaje de aborto (del orden del 60%), existiendo una mayor pérdida de fertilidad en espigas de tamaños potenciales mayores.

La fase siembra-antesis esta fuertemente asociada a las variaciones de la subfase de iniciación de espiguillas, dado que es la que muestra clara respuesta al fotoperíodo. Dicha respuesta se debería interpretar como un alargamiento de la subfase de iniciación de espiguillas en siembras tempranas o un acortamiento de dicha subfase en siembras tardías. En el primer caso se podría aumentar el tamaño de espiga conjuntamente con el tamaño de grano. En el segundo caso, el riesgo es disminuir el rendimiento vía el menor número de granos por superficie, aunque se aseguraría un tamaño de grano apropiado.

No parece posible mantener altos rendimientos en condiciones no apropiadas como las siembras tardías, en la medida que inevitablemente el número de espigas por superficie desciende y posiblemente se comprometa el número de granos por espiga. Si bien para estas fechas de siembras tardías en las condiciones de Uruguay (con un periodo efectivo de macollaje reducido), aun se puede lograr un número no limitantes de tallos por unidad de superficie, cuando ello ocurre el incremento en la tasa de mortalidad de tallos lleva a la reducción en el número de espigas, que tiende a ser mayor aún en cultivares de ciclo largo (Hoffman et al., 1995b). En primaveras calidas, en donde se incrementa aún mas la probabilidad de obtener un bajo número de espigas, las posibilidades de mantener el número de granos por unidad de superficie de la mano de la compensación, son aun mas bajas en la medida que también se reduce el número de granos por espiga (Ernst et al., 1995), como resultado de un menor número máximo de primordios y un incremento en su tasa de mortalidad (González y Xavier, 2000). Por tanto si el sistema de producción requiere de la siembra del cultivo en fechas relativamente tardías (posteriores al 1 de julio en el norte o al 15 de julio en el sur) es necesario asumir que se trabajará sobre menores potenciales de rendimiento, más allá de la adaptación específica del cultivar sobre el que se trabaje. Probablemente el problema sea aún más marcado en el caso de otros cultivos de invierno.

Por otra parte la duración del periodo de llenado de grano *per se* aparece como otro factor que favorece la adaptación del genotipo en forma independiente de la fecha de siembra considerada. Existe evidencia de variación entre cultivares respecto a la duración de dicho periodo (Castro et al., 1997) pero no se dispone de resultados consistentes respecto al control genético.

Dadas las condiciones prevalentes de mayores temperaturas en las zonas centro y norte del país, hoy no se dispone de un solo cultivar de ciclo medio a corto que pueda paliar la situación de una siembra tardía en esas zonas de mayor riesgo. Frente a un año de condición hídrica desfavorable (déficit o exceso hídrico) y la necesidad de retrasar la época de siembra, es de esperar mayor flexibilidad por parte de cultivares de duración de ciclo menor a los prevalentes en este momento y que puedan tolerar rangos de temperaturas superiores durante el llenado de grano.

Consideraciones finales

El fenotipo “ideal” para el cultivo de cebada bajo las condiciones productivas de Uruguay parece asociado a la mayor duración del período de llenado de grano, una ubicación de dicho período en el mes de octubre, y un balance entre la duración de las fases Z20-Z30 y Z30-antesis que permita un alto potencial de rendimiento. La inclusión de respuestas al fotoperíodo puede incorporar flexibilidad en lo que refiere a la época de siembra ideal.

Las condiciones contrastantes entre las épocas extremas en las que el sistema productivo predominante en Uruguay ha ubicado el cultivo hacen necesario el desarrollo de cultivares específicos para cada condición que, dentro del potencial de cada ambiente, permitan la obtención del mayor rendimiento. Avances en el conocimiento del control genético de la fenología del cultivo así como de la variabilidad existente son necesarios para el desarrollo de las estrategias de mejoramiento adecuadas. Con dicho objetivo, los QTLs y genes presentes en el germoplasma utilizado en Uruguay así como su efecto específico en el potencial de rendimiento y la calidad física de grano están siendo analizados utilizando técnicas de análisis genómico como análisis de QTL y análisis por desequilibrio de ligamiento a lo largo del genoma.

Referencias

- Appleyard, M.; Kirby, E.J.M. and Fellowes, G. 1982. Relationships between the duration of phases in the pre – antesis life cycle of spring barley. *Aust. J. Agric. Res.*, 33, 917-925.
- Arbeleche P, Ernst O y Hoffman, E. 2010. Capítulo 1. La Agricultura en Uruguay y su Evolución. In. *Intensificación Agrícola: oportunidades y amenazas para un país productivo y natural*. García. F; Ernst. O; Arbeleche. P, Pérez . M, Pritsch. C, Ferenzi. A y Rivas. M. (Eds), Fondo Universitario para contribuir a la comprensión Pública de Temas de Interés General. UDELAR-CSIC. ISBN: 978-9974-0-0707-9
- Borras-Geloncha G, Slafer GA, Casas AM, van Eeuwijk F, Romagosa I, 2010. Genetic control of pre-heading phases and other traits related to development in a double-haploid barley (*Hordeum vulgare* L.) population. *Field Crop Res.* 119: 36-47
- Castro A., Ernst O., Hoffman E. y Bentancur O., 1997. Caracterización mediante variables agronómicas y de calidad del germoplasma de cebada en Uruguay. *Agrociencia* 1, p 80-87.
- Castro A., 1999. Análisis del potencial de nuevos genotipos del programa de la Facultad de Agronomía en variables agronómicas y de calidad. In: Beratto E. (ed.) *II Congreso de cebadas malteras*, INIA Carillán, Temuco, Chile (3-6 diciembre, 1996). FAO, INIA. Pag .105-113.
- Castro A. y Kemanian A., 1999. Aproximación a un modelo optimizado de desarrollo de la planta de cebada en el ambiente de producción agrícola uruguayo. In: *III Congreso de cebadas malteras*, Bastión del carmen, Colonia, Uruguay. FAO, Mesa de la cebada.
- Castro A., P. Hayes, L. Viega and I. Vales, 2008. Transgressive segregation for phenological traits in barley explained by two major QTL alleles with additivity. *Plant Breeding* 127: 561-568

Castro A, Benitez A, Gonzalez O, Hayes P, Locatelli A, Medina A, Pieroni S, Silveira M, 2009. QTL analysis of agronomic traits in the BCD47/Baronesse mapping population shows a high concentration of QTLs coincident with regions determining crop phenology. In: 14th Australian Barley Technical Symposium, 2009, Sunshine Coast, QLD.

Castro A, González O, Hayes PM, Locatelli A, Mosqueira J, Silveira M, Viega L, 2010. Additivity of anthesis date QTLs is explained by individual QTLs operative at different periods within the crop growth cycle. In: Ceccarelli, S. and Grando, S. (eds.), Proceedings of the 10th International Barley Genetics Symposium, 5-10 April 2008, Alexandria, Egypt. pp. 105-109.

Ellis R. H., Summerfield R. J., Roberts E. H., Cooper J. P., 1989. Environmental control of flowering in barley. III. Analysis of potential vernalization responses, and methods of screening germoplasm for sensitivity to photoperiod and temperature. *Annals of Botany*, 63, 687-704

Ernst O, Hoffman E, Mailhos M, Urruty F, 1995. Efecto del manejo sobre el rendimiento y calidad de grano en cebada cervecera.. In: III^a Reunión Nacional de Investigadores de Cebada, Minas, mayo de 1992. Mesa de la Cebada (ISBN 9974-556-60-0). p 108-116

Gallagher L.W., K.M. Solliman, H. Vivar, 1991. Interactions among loci conferring photoperiod insensitivity for heading time in spring barley. *Crop Science* 31: 256-261

Germán, S., R. Romero, C. Tojo, 1996. Control de floración en cebada en el Uruguay: respuesta a temperature y fotoperíodo. In: V^a Reunión nacional de investigadores de cebada, Colonia, Uruguay, junio de 1994. Mesa de la Cebada (ISBN 9974-0-0030-0). p 116-122.

Germán, S.; Arbelbide, M.; Abadie, T.; Romero, R.; Peculio, A. 2000. Characterization of photoperiod response of barley genotypes from diverse origin. International Barley Genetics Symposium (8., 2000, Adelaide, South Australia). Ed. S. Logue. Barley Genetics VIII: Vol. III - Contributed Papers. Glen Osmond, Adelaide University. p. 212-214.

González, Santiago y Xavier, Artigas. 2000. Definición del número de hojas por tallo y del número de granos por espiga en cebada cervecera (*Hordeum vulgare* L.). Tesis de grado Ingeniero Agrónomo. Facultad de Agronomía, Montevideo, Uruguay. 69 p.

Hayes P.M., A. Castro, L. Marquez-Cedillo, A. Corey, C. Henson, B.L. Jones, J. Kling, D. Mather, I. Matus, C. Rossi, and K. Sato, 2003. Genetic Diversity for Quantitatively Inherited Agronomic and Malting Quality Traits. In: R. VonBothmer, R. and K. Sato (ed.). Diversity in Barley, p.201-226. Elsevier Science B.V., Amsterdam, The Netherlands.

Hoffman E., Ernst O. y Castro A., 1995a. Rendimiento en grano y sus componentes. I.- Bases fisiológicas y evolución histórica a nivel mundial. In: IV^a Reunión Nacional de investigadores de cebada. Palmar, junio de 1993. Mesa de la Cebada (ISBN 9974-0-0034-3)Pag.52-59.

Hoffman E, Siri G, Ernst O, 1995b. Posibilidades de predecir el comportamiento de los nuevos cultivares en función de la caracterización de su crecimiento inicial en condiciones de invernáculo. In: V^a Reunión de Investigadores de Cebada cervecera, Bastion del Carmen, Colonia, junio de 1994. Mesa de la Cebada (ISBN 9974-0-0030-0). p 116-122

Hoffman E, Ernst O, 1996. Refertilización en cebada cervecera. In: VI^a Reunión de Investigadores de Cebada cervecera, Montevideo, junio de 1995. Mesa de la Cebada (ISBN 9974-0-0038-6). p 58-68

Hoffman, E.; Perdomo, C.; Ernst, O.; Bordolli, M.; Pastorini, M.; Pons, C.; Borghi, E. 2001. Propuesta de manejo de la fertilización nitrogenada para cultivos de invierno en Uruguay. In: Seminario Nacional de discusión técnica. Junio del 2001. Paysandú-Uruguay. EEMAC-FAGRO-UDELAR (edición en CD).

Kermanian A. y L. Viega, 1998. Determinantes del peso de grano en cebada cervecera. Actas XXII Reunión Argentina de Fisiología Vegetal. Mar del Plata, Argentina. p 246-247.

Laurie D.A., Pratchett N., Bezant J.H., Snape J.W., 1995. RFLP mapping of five major genes and eight quantitative trait loci controlling flowering time in a winter x spring barley (*Hordeum vulgare* L) cross. *Genome* 38: 575-585.

Laurie, D.A., Griffiths, S., Dunford, R.P., Chistodoulou, V., Taylor, S.A., Cockram, J., Beales, J. and Turner, A. (2004) Comparative genetic approaches to the identification of flowering time genes in temperate cereales. *Field Crops Research* 90: 87-100.

Roberts E.H., R.J. Summerfeld, J.P. Cooper, R.H. Ellis, 1988. Environmental control of flowering in barley (*H. vulgare* L.) I. Photoperiod limits to long day responses, photoperiod-insensitivity phases and the effect of low temperature and short day vernalization. *Annals of Botany* 62: 127-144

Slafer G., 2003. Genetic basis of yield as viewed from a crop physiologist's perspective. *Annals of applied biology*, 142, 117-128.

Takahashi R., S. Yasuda, 1970. Genetics of earliness of growth habit in barley. In: Nilan R (ed) *Barley Genetics II*, Washington State University Press, Pullman, pp 388-408.

Viega, L.; Hoffman, E.; González, S. y Olivo, N., 2006. Definición del número de granos por espiga en cebada cervecera. Facultad de Agronomía, Notas técnica N° 52, pp 20. 2006.

SESIÓN DE PÓSTERS

La sección que se detalla a continuación corresponde a los resúmenes extendidos de los pósters expuestos en el Taller. Ellos están asociados en diferentes grados a los temas expuestos en los capítulos previos, es así que los trabajos serán ordenados en función de los capítulos a los cuales se asocien sus resultados, principalmente desde el punto de vista del ambiente en el cual se desarrollen los experimentos.

Los trabajos de García et al., González et al., Terrile y González, Santangelo et al. y, San Celedonio et al. muestran diversos aspectos del desarrollo y crecimiento en los sistemas de producción de trigo y cebada en Argentina (Capítulo 4), pasando por atributos ecofisiológicos hasta estreses abióticos.

En cambio los trabajos de Hernández-Rodríguez et al. muestran resultados en trigo asociados a cambios e la fertilización nitrogenada en ambientes relacionados con los valles altos de México (Capítulo 5).

Los ambientes de alto potencial de rendimiento del sur de Chile (Capítulo 6) están representados en los trabajos de Bustos et al., Bustos y Calderini y, Harcha y Calderini. Además, Campillo et al. muestra resultados asociados a restricciones edáficas dentro de estos ambientes (capítulo 7).

Por último, el trabajo de Bredemeier et al. que evalúa el efecto de la fertilización nitrogenada en la calidad de los granos de trigo, está estrechamente asociado al Capítulo 8 desarrollado en sistemas de producción en regiones subtropicales.

Rendimiento potencial en trigo: Identificación de atributos ecofisiológicos favorables en líneas doble haploide

Guillermo A. García, Fernanda G. González, Gustavo A. Slafer y
Daniel J. Miralles

Introducción

La fisiología del rendimiento potencial provee una estructura sólida de conocimiento que puede servir para complementar al mejoramiento empírico tradicional y, de esta forma, incrementar el rendimiento potencial y, por ende, la producción (Fischer, 2007; Foulkes et al., 2011). Si bien el rendimiento potencial en trigo ha sido exitosamente incrementado en el pasado mediante la selección empírica por rendimiento *per se*, la disminución de la tasa de mejora que se evidencia en la actualidad muestra como insuficientes a las estrategias de mejoramiento convencional (Miralles and Slafer, 2007).

En este sentido, la utilización de atributos ecofisiológicos como criterio de selección indirecta podría incrementar la eficiencia de mejora, especialmente en un cultivo como trigo que ya ha sido sujeto a un intenso proceso de selección (Shorter et al., 1991). Sin embargo, esta estrategia tiene que atravesar dos etapas fundamentales antes de ser adoptada en un programa de mejora: i) la identificación de los atributos ecofisiológicos, los cuales deben resultar simples y funcionalmente asociados con el rendimiento, y ii) la comprensión de sus bases genéticas a fin de poder manipularlos y/o predecir su respuesta a la selección (Reynolds et al., 2001; Slafer, 2003). El actual “cuello de botella” para llevar adelante estas etapas es la caracterización fenotípica de poblaciones genéticas (Snape and Moore, 2007; Richards et al., 2010), lo cual, al combinarse con las herramientas moleculares actualmente disponibles, permitiría establecer un modelo más completo de la relación genotipo-fenotipo y de la interacción genotipo-ambiente (Edmeades et al., 2004).

En este contexto, el objetivo del trabajo fue i) caracterizar fenotípicamente una población de líneas doble haploide (DH) de trigo, obtenida a partir de cultivares que generan alto rendimiento potencial a través de una combinación diferente de número de granos por unidad de área (NG) y peso de esos granos (PG), e ii) identificar atributos ecofisiológicos funcionalmente ligados con el rendimiento. Una correcta caracterización fenotípica debe basarse en modelos ecofisiológicos, lo cual sirve como base para identificar cuál o cuáles de los atributos con potencial beneficio sobre el rendimiento deben ser priorizados en un programa de mejora (Reynolds et al., 2001). Por lo tanto, para decidir que atributos del cultivo evaluar, se consideraron aproximaciones ecofisiológicas propuestas en la literatura para analizar la generación del rendimiento y la determinación del NG en trigo.

Materiales y métodos

Se utilizó una población de líneas DH (105) de trigo y sus respectivos parentales, Bacanora (alto NG y bajo PG) y Weebil (bajo NG y alto PG), la cual ha sido obtenida en el CIMMYT y caracterizada molecularmente en el John Innes Centre. Las evaluaciones se realizaron en dos ambientes contrastantes bajo condiciones potenciales de campo, Buenos Aires 2009 (BA-09) y Ciudad Obregón 2009/10 (CO-09/10). Se utilizó esta población de líneas DH por considerarla con genuinas posibilidades de ofrecer evidencias de valor real para la mejora, ya que las líneas parentales difieren en características tan relevantes como los dos principales componentes del rendimiento. Igualmente, debido a la variabilidad transgresiva detectada, se decidió realizar un paso previo que permita ganar en significancia biológica de los resultados. Esto consistió en uniformar el tiempo a floración y la altura de planta de los materiales evaluados, seleccionando líneas DH similares en estos atributos dentro de cada ambiente (40 líneas DH y los 2 parentales en cada caso). Los sets seleccionados tuvieron un rango de variación de 4 días en ciclo a antesis y de menos de 12 cm en altura de planta en los dos ambientes, y ca. el 50% de los materiales seleccionados en BA-09 también lo fue en CO-09/10. De esta forma, se trató de evitar confusiones frecuentes en la literatura en la identificación de mecanismos finos ligados al rendimiento, cuando se genera variación al explorar diferentes condiciones ambientales durante el período crítico o por medio de un patrón diferente de partición de asimilados debido a diferencias en altura de planta, lo cual resulta inútil en términos de transferencia a programas que intentan mejorar los materiales de alto rendimiento potencial ya existentes (Reynolds et al., 2001; Reynolds et al., 2009).

La caracterización fenotípica consideró: i) dos aproximaciones comúnmente utilizadas (i.e. rendimiento = biomasa x índice de cosecha -IC-, y rendimiento = NG x PG), las cuales permiten, de una manera sencilla, tener una primera impresión de que características del cultivo se deberían intentar manipular para incrementar el rendimiento (Slafer et al., 1994), y ii) una aproximación más completa desde el punto de vista ecofisiológico, como la propuesta por Fischer (1983) para analizar la determinación del NG, cuyos componentes principales son el peso seco de espigas a floración (PSE) y el coeficiente de fertilidad de espiga (CFE). Por lo cual, se tomaron mediciones de fenología, acumulación y partición de biomasa, y rendimiento y componentes numéricos.

Resultados y discusión

Una de las principales vías para mejorar el rendimiento potencial en trigo es incrementar la producción de biomasa del cultivo, manteniendo los actuales IC (Foulkes et al., 2007; Miralles and Slafer, 2007; Reynolds et al., 2009). Los sets de materiales evaluados mostraron, en los dos ambientes, una robusta relación ($r^2 > 0.80$, $p < 0.01$) entre la producción de biomasa durante el ciclo y el rendimiento (Figura 1). El IC, por su parte, fue un atributo más conservado, con valores entre 0.40 y 0.50. Si bien el límite teórico propuesto es un 20% superior (ca. 0.60 Austin et al., 1980), los cultivares modernos de trigo primaveral difícilmente superan estos valores (Fischer, 2007). Considerando los componentes fisiológicos que determinan la producción de biomasa, la

eficiencia en el uso de la radiación (EUR) explicó mejor que la captura de radiación las diferencias en producción de biomasa (Figura 2), lo cual justifica los intentos de mejorar la eficiencia fotosintética a nivel de cultivo (Reynolds et al., 2000; Parry et al., 2011).

Para que las mejoras en la EUR resulten en incrementos del rendimiento, es necesario particionar a grano los asimilados extras, ya sea a través de un mayor NG y/o un mayor PG potencial (Foulkes et al., 2011). En línea con lo comúnmente reportado (e.g. Magrin et al., 1993; Calderini et al., 1999), el NG tuvo un mayor impacto sobre la generación del rendimiento, aunque el PG tendió a asociarse positivamente con el rendimiento cuando éste último (y el NG) fue mayor. De este modo, si no existe una compensación competitiva entre ambos componentes, el PG podría mantenerse e incluso mejorarse junto con el NG. Un gran número de factores podrían influir sobre la relación finalmente establecida entre el NG y el PG, incluso en dicha relación podría estar actuando un control evolutivo interno (Sadras, 2007). En CO-09/10, estos dos componentes se asociaron negativamente, en línea con lo comúnmente descrito en la literatura (Slafer and Andrade, 1989; Feil, 1992; Slafer and Andrade, 1993), y los materiales de mayor rendimiento mostraron reducciones en el PG menos que proporcionales a los aumentos en el NG. En BA-09, en cambio, no se observó ninguna asociación entre estos componentes, pudiendo encontrarse una importante variación en PG para un NG similar, y viceversa.

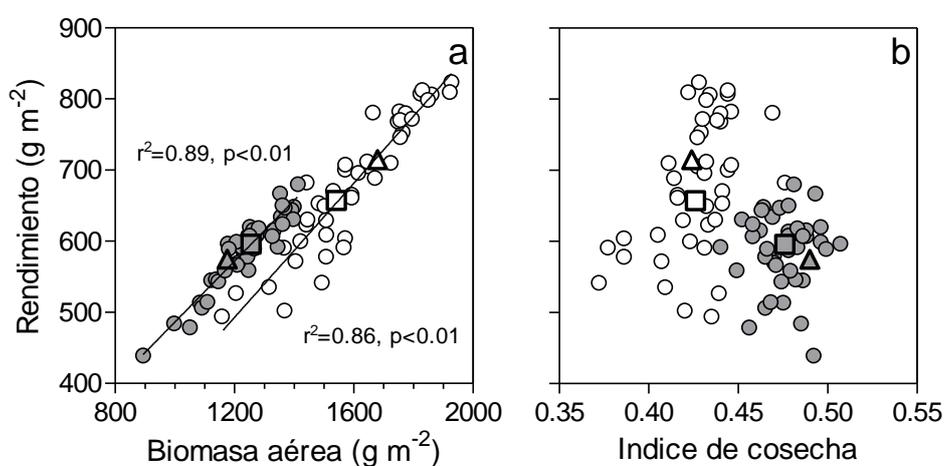


Figura 1. Rendimiento en función de (a) la biomasa aérea en madurez fisiológica y de (b) el índice de cosecha, en los set de líneas doble haploide seleccionados (círculos) y en los parentales (Bacanora, triángulos, y Weebil, cuadrados), en Buenos Aires 2009 (símbolos blancos) y en Ciudad Obregón 2009/10 (símbolos grises). Se indican ajustes por regresión lineal y el coeficiente de regresión.

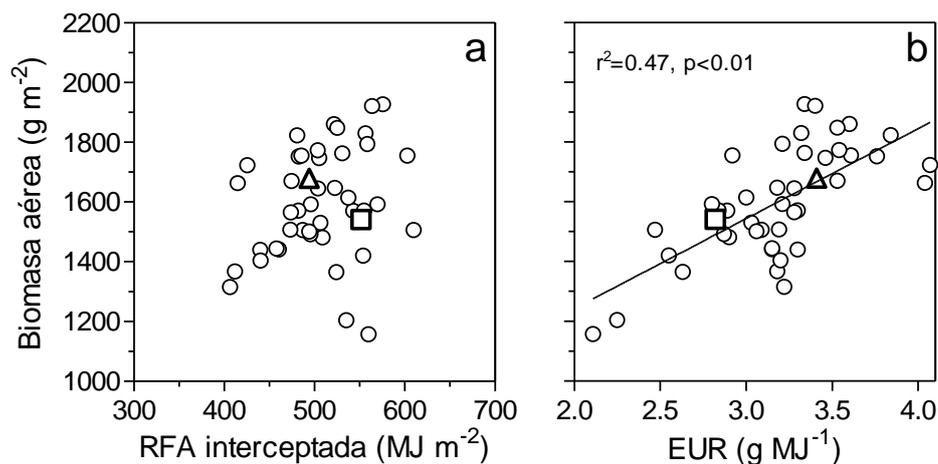


Figura 2. Biomasa aérea en madurez fisiológica en función de (a) la radiación fotosintéticamente activa (RFA) interceptada y acumulada por el canopeo durante todo el ciclo, y de (b) la eficiencia en el uso de esa radiación (EUR), en el set de líneas doble haploide (DH) seleccionado (círculos) y en los parentales (Bacanora, triángulos, y Weebil, cuadrados), en Buenos Aires 2009. Se indica el ajuste por regresión lineal y el coeficiente de regresión.

En lo que respecta a los componentes ecofisiológicos de la determinación del NG, a diferencia de lo comúnmente descrito en la literatura (e.g. Siddique et al., 1989; Abbate et al., 1997; González et al., 2003), las diferencias en PSE explicaron solo en parte los cambios en el NG en los materiales evaluados, teniendo un rol más importante el CFE (Figura 3). Estos resultados fueron similares a otras evidencias de la literatura donde se realizaron comparaciones de cultivares modernos de alto rendimiento bajo condiciones de crecimiento (i.e. radiación, agua, nutrientes) similares (e.g. Abbate et al., 1998; González et al., 2011). En los dos ambientes, la asociación negativa entre el PSE y el CFE, estadísticamente significativa, no parece ser competitiva cuando se analizan materiales de similar NG; y además existió una importante variabilidad fenotípica en los dos atributos, lo cual permitió identificar materiales con diferente CFE para un PSE similar, y viceversa (Figura 3).

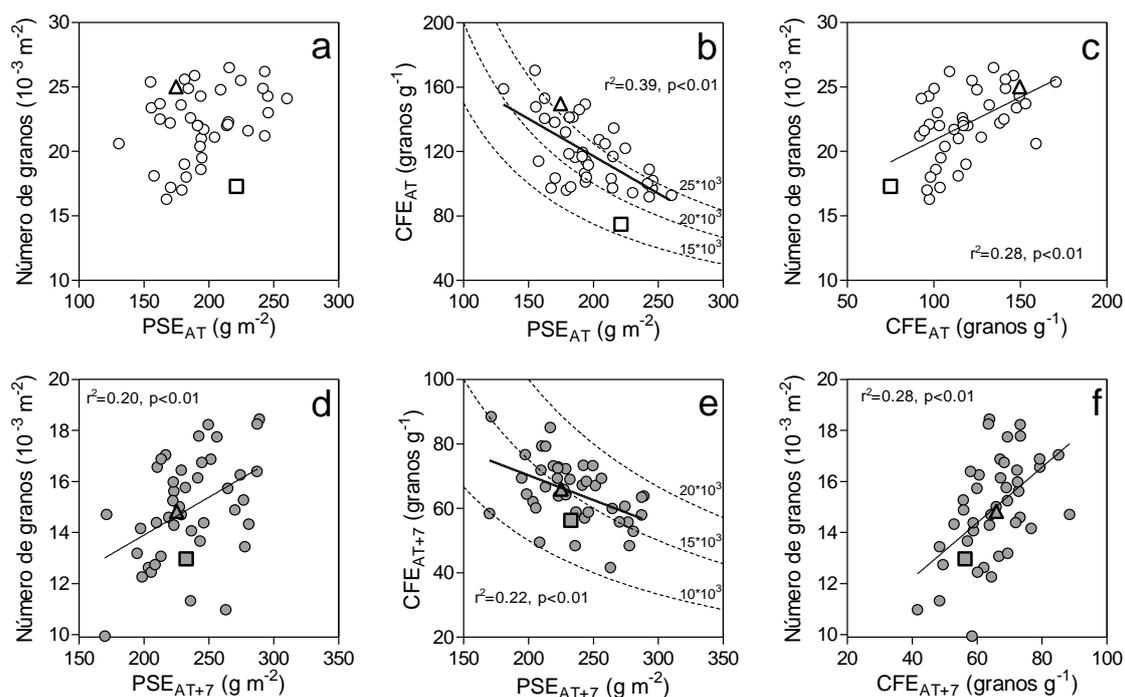


Figura 3. Número de granos (NG) en función de (a, d) el peso seco de espiga (PSE) y (c, f) el CFE en antesis (AT) o una semana post-antesis (AT+7), en Buenos Aires 2009 (símbolos blancos) o Ciudad Obregón 2009/10 (símbolos grises) respectivamente, en los set de líneas doble haploide seleccionados (círculos) y en los parentales (Bacanora, triángulos, y Weebil, cuadrados); y (b, e) relación entre estos dos componentes ecofisiológicos del NG. Se indican ajustes por regresión lineal (líneas continuas) y su coeficiente de regresión, y líneas (discontinuas) de iso-NG.

El CFE es un atributo complejo que incluye: i) la partición de asimilados dentro de la espiga (i.e. partición hacia grano o hacia otras estructuras como por ejemplo el raquis), ii) el desarrollo y la supervivencia floral, y iii) el cuaje de los granos (González et al., 2011). Entonces, este atributo puede influir no solo sobre la determinación del NG, sino también en la definición del PG potencial, ya que son atributos que superponen temporalmente su determinación (Calderini et al., 2001), y que conforman de esta manera el “destino” potencial que genera el cultivo. En este sentido, en los materiales evaluados no se evidenció relación competitiva en el CFE y el PG, existiendo variación en PG para un CFE similar (al igual que para NG), y viceversa.

Observaciones finales

El éxito que pueda llegar a tener las diferentes propuestas basadas en atributos ecofisiológicos que actualmente se manejan para incrementar la tasa de mejora en trigo depende, en gran parte, del conocimiento adquirido en estos aspectos. En este sentido, el presente trabajo generó información fenotípica detallada para posteriores evaluaciones. Los puntos relevantes de la caracterización realizada fueron: i) la utilización de materiales (i.e. población de líneas DH) provenientes de germoplasma elite, Bacanora y Weebil, siendo estos materiales comerciales de CIMMYT de alto rendimiento potencial (Reynolds et al., 2009); ii) la uniformidad en tiempo a floración y altura de planta para

minimizar factores que puedan confundir los datos obtenidos (Reynolds et al., 2001; Reynolds et al., 2009); y iii) el testeo empírico de hipótesis basadas en modelos conceptuales que incorporan el actual conocimiento ecofisiológico (Reynolds et al., 2001). Entre los resultados, se destaca la prueba empírica de que es factible obtener incrementos en producción de biomasa que se traduzcan en mayores rendimientos potenciales, siendo la EUR el aspecto a mejorar, y el CFE un atributo que requiere más estudio dado su importante impacto en la determinación del “destino”.

Referencias

- Abbate, P.E., Andrade, F.H., Culot, J.P., Bindraban, P.S., 1997. Grain yield in wheat: effects of radiation during spike growth period *Field Crops Res.* 54, 245-257.
- Abbate, P.E., Andrade, F.H., Lázaro, L., Bariffi, J.H., Berardocco, H.G., Inza, V.H., Marturano, F., 1998. Grain yield increase in recent argentine wheat cultivars. *Crop Sci.* 38, 1203-1209.
- Austin, R.B., Bingham, J., Blackwella, R.D., Evans, L.T., Ford, M.A., Morgana, C.L., Taylor, M., 1980. Genetic improvements in winter wheat yields since 1900 and associated physiological changes. *J. Agric. Sci.* 94, 675-689.
- Calderini, D.F., Reynolds, M.P., Slafer, G.A., 1999. Genetic gains in wheat yield and associated physiological changes during the twentieth century. In: Satorre, E.H., Slafer, G.A. (Eds.), *Wheat: ecology and physiology of yield determination*. Food Products Press, New York, USA, pp. 351-377.
- Calderini, D.F., Savin, R., Abeledo, L.G., Reynolds, M.P., Slafer, G.A., 2001. The importance of the period immediately preceding anthesis for grain weight determination in wheat. *Euphytica* 119, 199-204.
- Edmeades, G.O., McMaster, G.S., White, J.W., Campos, H., 2004. Genomics and the physiologist: bridging the gap between genes and crop response. *Field Crops Res.* 90, 5-18.
- Feil, B., 1992. Breeding Progress in Small Grain Cereals — A Comparison of Old and Modern Cultivars. *Plant Breed.* 108, 1-11.
- Fischer, R.A., 1983. Wheat. In: Smith, W.H., J., B.S. (Eds.), *Symposium on potential productivity of field crops under different environments* IRRI, Los Baños, Philippines, pp. 129-154.
- Fischer, R.A., 2007. Understanding the physiological basis of yield potential in wheat. *J. Agric. Sci.* 145, 99-113.
- Foulkes, M.J., Snape, J.W., Shearman, V.J., Reynolds, M.P., Gaju, O., Sylvester-Bradley, R., 2007. Genetic progress in yield potential in wheat: recent advances and future prospects. *J. Agric. Sci.* 145, 17-29.
- Foulkes, M.J., Slafer, G.A., Davies, W.J., Berry, P.M., Sylvester-Bradley, R., Martre, P., Calderini, D.F., Griffiths, S., Reynolds, M.P., 2011. Raising yield potential of wheat. III. Optimizing partitioning to grain while maintaining lodging resistance. *J. Exp. Bot.* 62, 469-486.
- González, F.G., Slafer, G.A., Miralles, D.J., 2003. Grain and floret number in response to photoperiod during stem elongation in fully and slightly vernalized wheats. *Field Crops Res.* 81, 17-27.

- González, F.G., Terrile, I.I., Falcón, M.O., 2011. Spike fertility and duration of stem elongation as promising traits to improve potential grain number (and yield): variation in modern Argentinean wheats. *Crop Sci.* 51.
- Magrin, G.O., Hall, A.J., Baldy, C., Grondona, M.O., 1993. Spatial and interannual variations in the photothermal quotient: implications for the potential kernel number of wheat crops in Argentina. *Agric. For. Meteorol.* 67, 29-41.
- Miralles, D.J., Slafer, G.A., 2007. Sink limitations to yield in wheat: how could it be reduced? *J. Agric. Sci.* 145, 139-149.
- Parry, M.A.J., Reynolds, M., Salvucci, M.E., Raines, C., Andralojc, P.J., Zhu, X.-G., Price, G.D., Condon, A.G., Furbank, R.T., 2011. Raising yield potential of wheat. II. Increasing photosynthetic capacity and efficiency. *J. Exp. Bot.* 62, 453-467.
- Reynolds, M.P., van Ginkel, M., Ribaut, J.M., 2000. Avenues for genetic modification of radiation use efficiency in wheat. *J. Exp. Bot.* 51, 459-473.
- Reynolds, M.P., Trethowan, R.M., van Ginkel, M., Rajaram, S., 2001. Application of physiology in wheat breeding. In: Reynolds, M.P., Ortiz-Monasterio, J.I., McNab, A. (Eds.), *Application of physiology in wheat breeding*. CIMMYT, Mexico, D.F.
- Reynolds, M.P., Foulkes, M.J., Slafer, G.A., Berry, P., Parry, M.A.J., Snape, J.W., Angus, W.J., 2009. Raising yield potential in wheat. *J. Exp. Bot.* 60, 1899-1918.
- Richards, R.A., Rebetzke, G.J., Watt, M., Condon, A.G., Spielmeyer, W., Dolferus, R., 2010. Breeding for improved water productivity in temperate cereals: phenotyping, quantitative trait loci, markers and the selection environment. *Funct. Plant Biol.* 37, 85-97.
- Sadras, V.O., 2007. Evolutionary aspects of the trade-off between seed size and number in crops. *Field Crops Res.* 100, 125-138.
- Shorter, R., Lawn, R.J., Hammer, G.L., 1991. Improving Genotypic Adaptation in Crops ? a Role for Breeders, Physiologists and Modellers. *Exp. Agric.* 27, 155-175.
- Siddique, K.H.M., Kirby, E.J.M., Perry, M.W., 1989. Ear:stem ratio in old and modern wheat varieties; relationship with improvement in number of grains per ear and yield. *Field Crops Res.* 21, 59-78.
- Slafer, G.A., Andrade, F.H., 1989. Genetic improvement in bread wheat (*Triticum aestivum*) yield in Argentina. *Field Crops Res.* 21, 289-296.
- Slafer, G.A., Andrade, F.H., 1993. Physiological attributes related to the generation of grain yield in bread wheat cultivars released at different eras. *Field Crops Res.* 31, 351-367.
- Slafer, G.A., Satorre, E.H., Andrade, F.H., 1994. Increases in grain yield in bread wheat from breeding and associated physiological changes. In: Slafer, G.A. (Ed.), *Genetic improvement of field crops*. Marcel Dekker, Inc., New York, USA, pp. 1-68.
- Slafer, G.A., 2003. Genetic basis of yield as viewed from a crop physiologist's perspective. *Ann. Appl. Biol.* 142, 117-128.
- Snape, J., Moore, G., 2007. Reflections and opportunities: gene discovery in the complex wheat genome. In: Buck, H.T., Nisi, J.E., Salomón, N. (Eds.), *Wheat Production in Stressed Environments*. Proceedings of the 7th International Wheat Conference. Springer, Mar del Plata (Argentina), pp. 677-684.

Peso de grano en trigo: variabilidad y grado de limitación por fuente durante el llenado en cultivares adaptados al centro de Argentina

Fernanda G. González, María L. Aldabe, Déborah P. Rondanini

Introducción

El rendimiento del cultivo de trigo esta más estrechamente asociado al número de granos logrados por unidad de superficie (NG) que al peso medio de los mismos (PG), observándose en general una relación negativa entre PG y NG (Fischer, 1985). Si bien la mayoría de los estudios indican que esta relación no sería consecuencia de una competencia por asimilados (Borrás *et al.*, 2004), algunos autores han observado cierta limitación por fuente para el llenado de los granos en cultivares y condiciones de alto rendimiento potencial (Fischer *et al.*, 2001, Abbate *et al.*, 2005). Conocer la variabilidad existente en el peso potencial de los granos y la naturaleza de la relación negativa entre PG y NG en cultivares modernos de trigo es importante para generar estrategias que permitan a futuro incrementar el rendimiento potencial de los cultivares.

Materiales y métodos

Durante los años 2007 y 2008, 39 cultivares de trigo (19 ciclo largo y 20 ciclo corto) liberados al mercado entre el 2000 y el 2008, de amplia adaptación a la región central del área triguera Argentina, fueron sembrados bajo condiciones potenciales de crecimiento (200 kg N ha^{-1} , riego suplementario y control de malezas, enfermedades y plagas). Los ciclos largos fueron sembrados a principio de Junio y los cortos a principio de Julio. Diez días post-antesis, 30 espigas/ parcela fueron desespiguilladas (remoción de la mitad de las espiguillas) y el peso de grano fue comparado contra otras 30 espigas control que se seleccionaron al mismo tiempo. También en antesis, 12 espigas/ parcela en 16 cultivares/año, fueron seleccionadas y el peso fresco y seco de 15 granos (G1+G2) de las espiguillas centrales fue medido para calcular tasa y duración de llenado (TT, $T_b=0^\circ\text{C}$), máximo contenido de agua (MCA) y máximo peso seco de grano (MPG, obtenido por ajuste de curvas bilineales). Durante el año 2008, espigas de 10 días post-antesis de cultivares que habían mostrado PG contrastante durante el 2007 fueron conservadas en alcohol 70% para conteo de células endospermáticas.

Resultados y discusión

Radiación y temperatura

Los años no presentaron grandes diferencias en RFA. Sin embargo, la temperatura media fue muy contrastante no solo durante la etapa inicial del ciclo, sino durante el llenado de granos (Fig. 1a). La antesis ocurrió entre mediados y fines de Octubre, siendo muy importante la temperatura de Noviembre para la determinación del peso de grano. La temperatura media de dicho mes fue 18.7°C durante 2007, mientras que durante 2008 fue 5°C mayor. También durante los primeros 15 días de Noviembre del 2008 la temperatura máxima alcanzo valores de 30°C (Fig. 1b). Estos dos efectos explican los bajos valores de PG observados durante el 2008.

Relación PG vs NG

Tanto en los ciclos cortos como en los largos, el PG estuvo negativamente relacionado con el NG (excepto en ciclos cortos durante el 2008) (Fig. 2). Para el mismo rango de NG explorado entre años, el PG logrado fue en promedio menor durante el 2008, debido a las elevadas temperaturas del mes de Noviembre (ver Fig. 1). Dentro de cada año, para el mismo NG hubo variación en el PG, identificándose cultivares de alto y bajo PG a pesar de la gran diferencia térmica entre años (eg. B11 -1- vs B Guatimozin -2- , BIOINTA 1005 -3- vs B Bigua -4-).

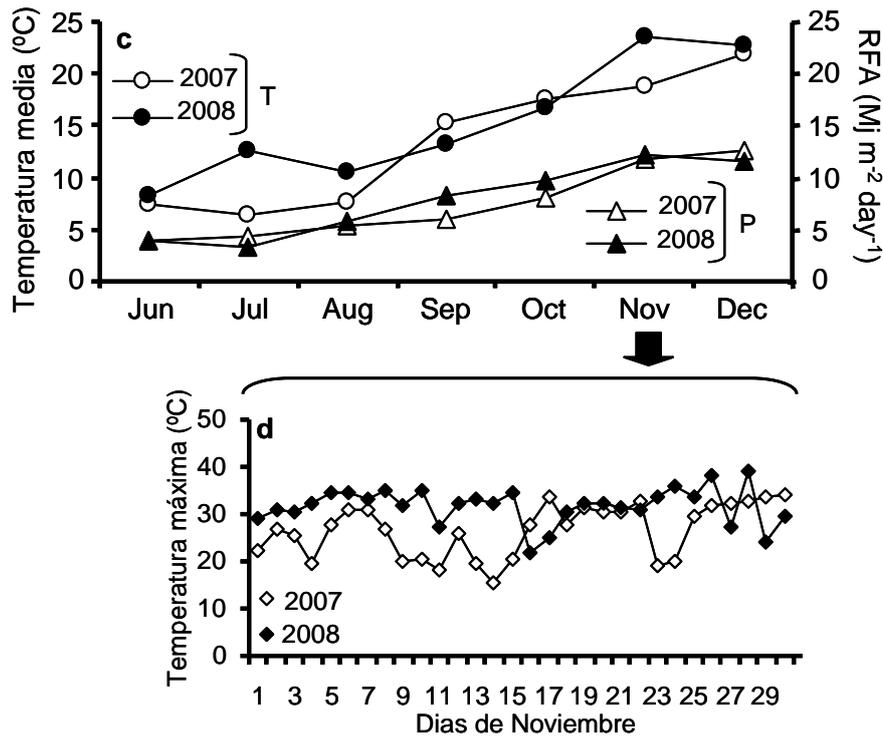


Figura 1. (a) Marcha de la radiación fotosintéticamente activa (RFA) y la temperatura media, (b) detalle de la temperatura máxima durante Noviembre.

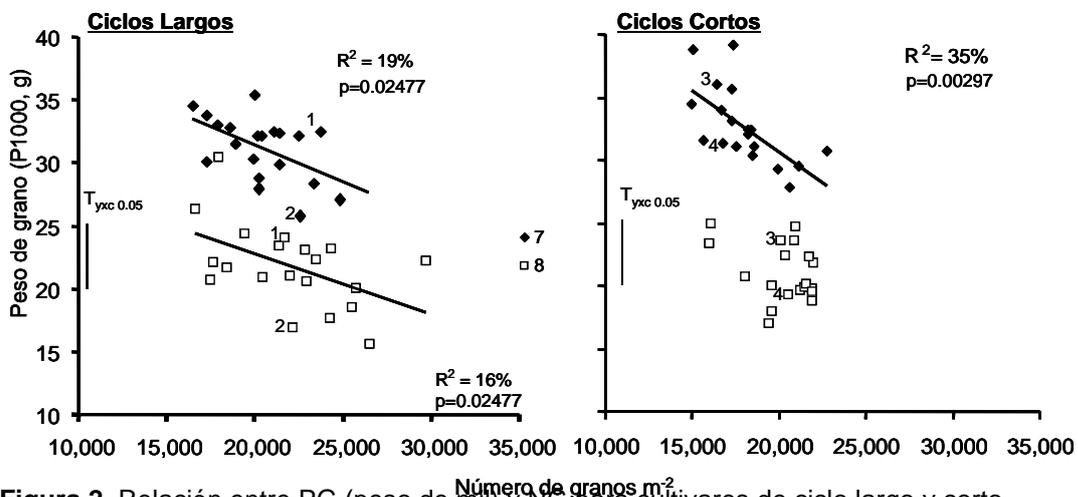


Figura 2. Relación entre PG (peso de mil) y NG para cultivares de ciclo largo y corto.

Respuesta al desespiguillado

La respuesta promedio al desespiguillado fue en general baja, presentando los ciclos cortos respuesta levemente superior (principalmente durante el 2007) (Fig. 3). Los materiales que presentaron la mayor respuesta (y estadísticamente significativa durante los dos años) fueron en general aquellos de mayor peso de grano (Fig. 3). Las máxima respuesta observadas fue de 20-25% en BIOINTA 1005 (ver inset en Fig. 3), indicando una leve limitación por fuente durante el llenado de grano.

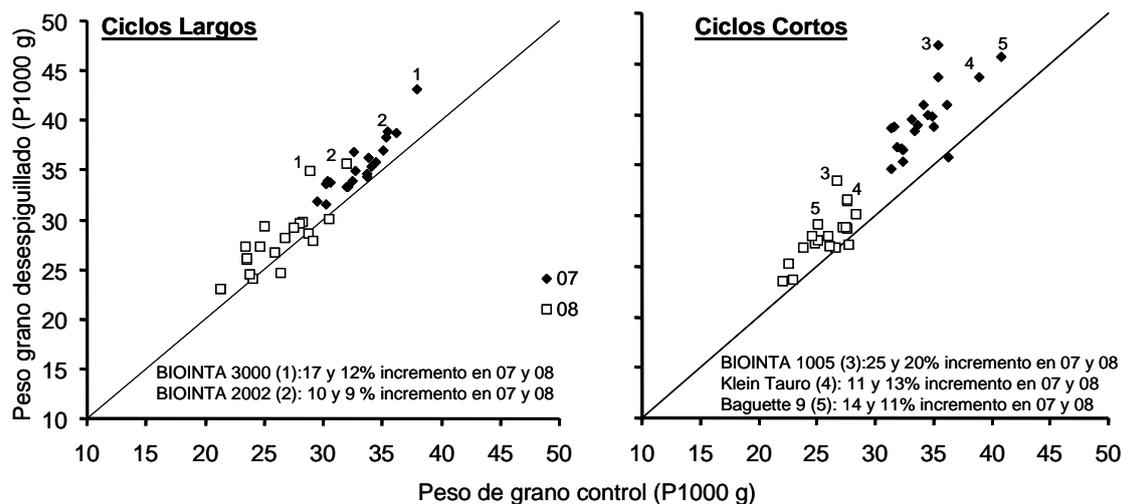


Figura 3. Relación entre PG desespiguillado y control.

Durante el año 2007, la tasa de llenado de granos explicó en mayor medida las diferencias observadas en MPG, aunque se pudieron determinar variaciones de hasta 100°Cd en la duración de llenado. Durante al año 2008, las dos características estuvieron fuertemente asociadas a las variaciones en MPG entre cultivares. Considerando los dos años la tasa de llenado explico el 47,5% ($p < 0.0001$) mientras que el duración de llenado el 85.4% ($p < 0.0001$) (Fig. 4). El impacto de la duración de llenado fue muy importante debido a las altas temperaturas durante Noviembre del 2008. La tasa y duración de llenado no estuvieron asociadas, indicando la posibilidad de incrementar alguna de ellas sin impactos compensatorios en la otra.

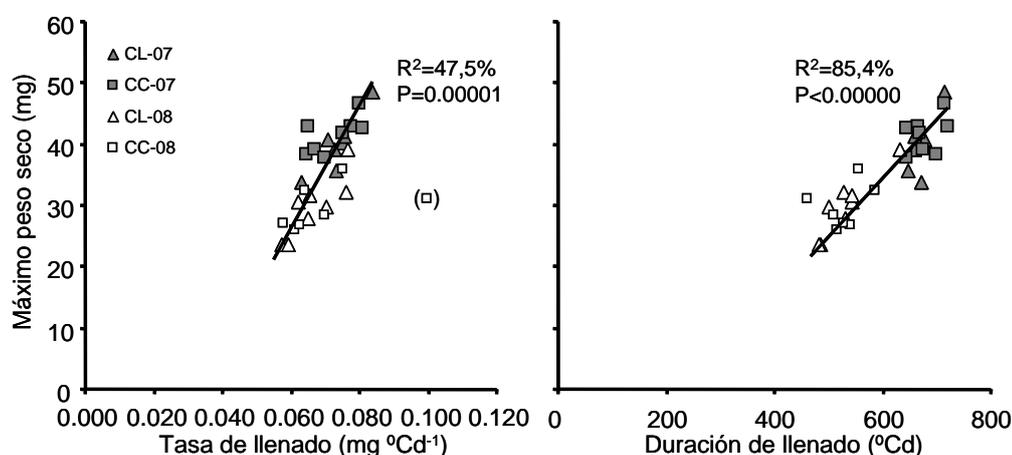


Fig. 4: Relación entre MPG y (a) tasa de llenado de grano, (b) duración de llenado de grano

Determinantes fisiológicas

El MCA explicó el 78% de las variaciones observadas en MPG considerando los dos años y 32 cultivares estudiados (Fig. 5). El número de células del endosperma explicó también parte de las diferencias observadas, principalmente entre cultivares contrastes en MPG (Fig. 6).

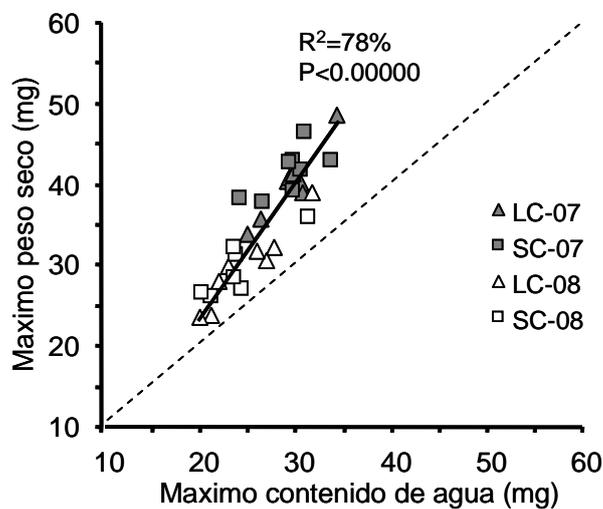


Fig. 5: Relación entre MPG y MCA

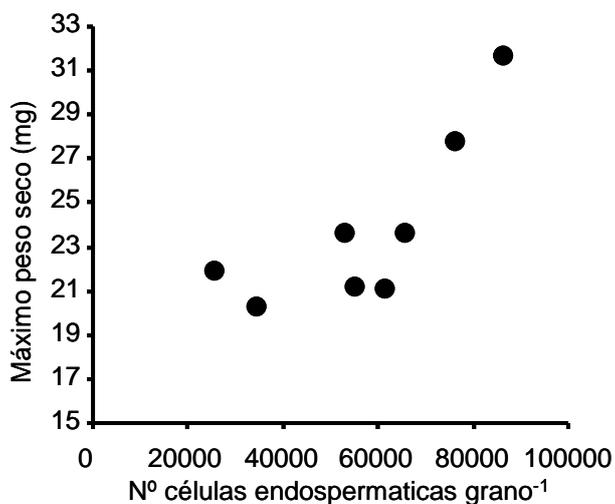


Fig. 6: Relación entre MPG y N° células endospermatias

Observaciones finales

Existe variabilidad en PG en germoplasma moderno de trigo adaptado el N de Bs As, asociado negativamente el NG, pero sin limitantes de gran magnitud para el llenado. Las determinantes fisiológicas tempranas del MPG (MCA y n° células endospermáticas merecen mayor estudio en estos genotipos.

Referencias

- Abbate, P.E., Lazaro, L., Montenegro, A.A., Bariffi, J.H., Gutheim, F., 2005. Potential yield of argentinean vs. foreign wheat cultivars. 7th International wheat conference, p. 283.
- Borrás, L., Slafer, G.A., Otegui, M.E., 2004. Seed dry weight response to source-sink manipulations in wheat, maize and soybean: a quantitative reappraisal. *Field Crops Res.* 86, 131-146.
- Fischer, R.A., 1985. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *J. Agric. Sci.* 100, 447-461.
- Fischer, R.A., 2001. Selection traits for improving yield potential. En: MP Reynolds, JI Ortiz-Monasterio & A McNab (eds.). *Application of physiology in wheat breeding*, CIMMYT, Mexico, DF, pp.148-159.

Respuesta del coeficiente de fertilidad de la espiga en trigo a diferentes condiciones de cultivo

Ignacio I. Terrile, Fernanda G. González

Introducción

Satisfacer el incremento de la demanda mundial de trigo en las próximas décadas requerirá un aumento considerable en la producción del cultivo. Dicho aumento deberá sustentarse en mayores rendimientos reales obtenidos a campo, los cuales suelen estar asociados a mayores rendimientos potenciales bajo condiciones óptimas y sub-óptimas de cultivo (Fischer, 1984, Calderini y Slafer, 1998, Fischer, 2007, Reynolds *et al.*, 2009, Fischer y Edmeades, 2010). El estudio de atributos ecofisiológicos más simples que el rendimiento *per se*, pero funcionalmente asociados al rendimiento, permitiría su utilización como herramienta de selección en programas de mejoramiento. El objetivo del trabajo fue estudiar la estabilidad bajo distintos ambientes del coeficiente de fertilidad de espiga (CFEc, nºgranos/gramo de espiga no-grano a cosecha), atributo fuertemente asociado al rendimiento potencial en cultivares de trigo recientemente liberados al mercado en Argentina (González *et al.*, 2011).

Materiales y métodos

Tres cultivares contrastantes para CFec (Baguette 11 –B11-, Baguette 19 –B19- ambos de alto CFec vs. BioINTA 2002 –B2002- bajo CFec, González *et al.* 2011) fueron sembrados bajo tres dosis de Nitrógeno (Ni, 130 y 200 kg N ha⁻¹), dos condiciones de radiación incidente durante el período de encañazón: control y sombreado (ambos 200 kg N ha⁻¹) y en dos fechas de siembra (ppio de Junio y ppio Julio 2010). En todos los casos las lluvias fueron suplementadas con riego. Las parcelas fueron de 5m de largo y 7 surcos sembrados a 0.20m. Se utilizó un diseño en bloques completos al azar, con tres repeticiones. En cosecha, el rendimiento y número y peso de granos fue estimado. El CFec se calculó como la relación entre el NG producidos m⁻² y el peso seco del chaff de espigas m⁻² (peso de espiga no grano) a cosecha.

Resultados y discusión

Rendimiento: Número (NG) y peso de grano (PG)

Las variaciones en rendimiento, tanto para tratamientos dentro de cultivares como entre cultivares, estuvieron asociadas a diferencias en el NG generados (R^2 : 74%, $p < 0.001$, todos datos) más que a variaciones en el peso medio de los mismos (Fig. 1a y b). Sin embargo, la aparente estabilización del rendimiento con $NG > 15000$, se debe a diferencias en el PG entre cultivares. En general B2002 tuvo mayores PG, seguido por B11 y B19 con el PG más bajo (Fig. 1b).

Número de grano (NG) y coeficiente de fertilidad de la espiga (CFec)

El coeficiente de fertilidad de espiga estuvo positivamente asociado a la generación del NG (Fig. 2) entre tratamientos dentro de cultivares y entre

cultivares considerando B19 y B2002 (R^2 : 76%, $p < 0.001$). EL cultivar B11, para la primer fecha de siembra, presento también una relación positiva entre NG y CFEc (R^2 : 95%, $p < 0.0001$), pero desplazada del resto de los cultivares. Es decir, con espigas mas eficientes no generó muchos más granos que los otros cultivares. Esto podría estar asociado a la baja partición de materia seca a espiga que generalmente presenta B11 en relación a los otros cultivares (González *et al.*, 2011).

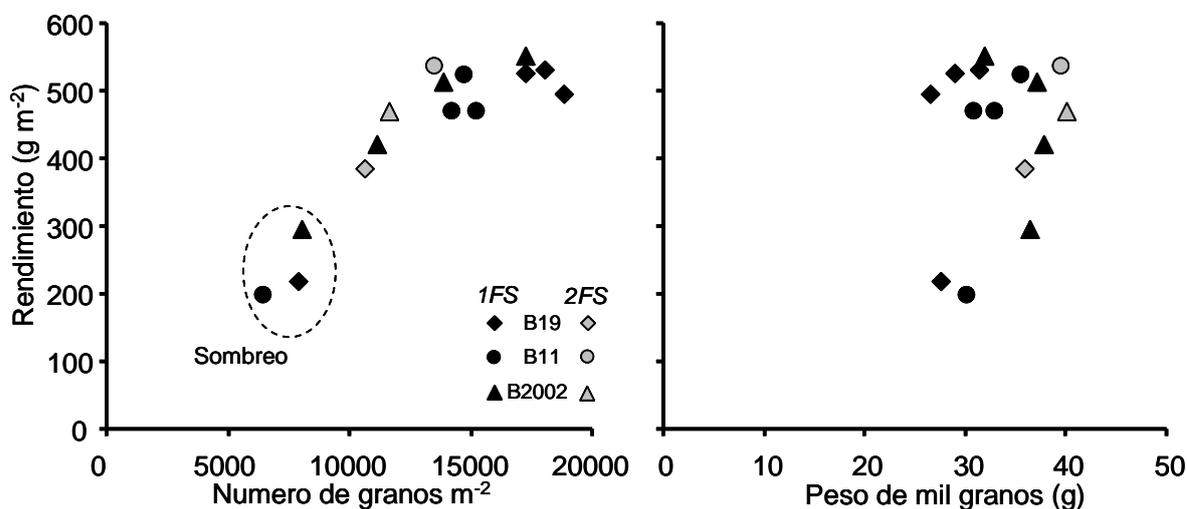


Figura 1: Relación entre rendimiento y (a) numero de granos m⁻² y (b) peso medio de mil granos.

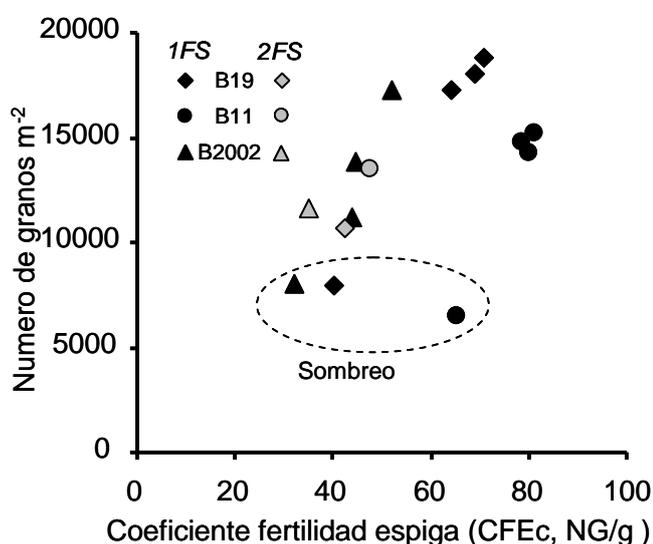


Figura 2: Relación entre NG y CFEc.

Peso de grano (PG) y coeficiente de fertilidad de la espiga (CFEc)

Algunos trabajos han reportado relación negativa entre estos dos componentes, cuestionando el posible uso del CFE para mejorar le rendimiento potencial (Fischer, 2008). En el presente trabajo se pudo observar una leve

relación negativa entre estos dos componentes (R^2 : 13%, $p < 0.005$), mas pronunciada para B19 que B11 (Fig. 3).

Estabilidad del coeficiente de fertilidad de la espiga (CFEc)

El CFec ha sido generalmente pensado como una característica que responde principalmente al genotipo con baja influencia del ambiente (Fischer, 1984). En el presente trabajo, el CFec fue estable para cada cultivar ante variaciones del nitrógeno disponible, pero disminuyó en forma significativa cuando se sombreó durante encañazón o cuando se atrasó la fecha de siembra, en todos los cultivares (salvo B11 que sólo disminuyó ante atraso en fecha de siembra). Esto indicaría que ante una disminución de la radiación o cambios en el ambiente fototérmico se afecta más la partición dentro de la espiga hacia los carpelo y/o granos en formación en relación al chaff. Sin embargo, el ranking de los cultivares se mantuvo en todas las condiciones de cultivo, señalando el fuerte impacto del cultivar en su determinación.

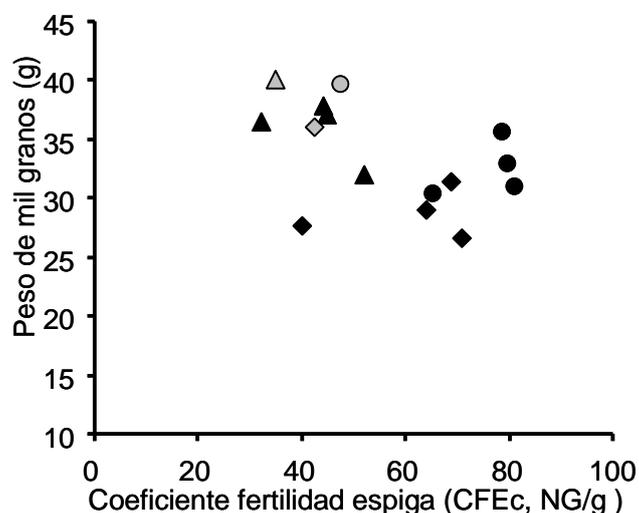


Figura 3 Peso de mil granos vs CFec.

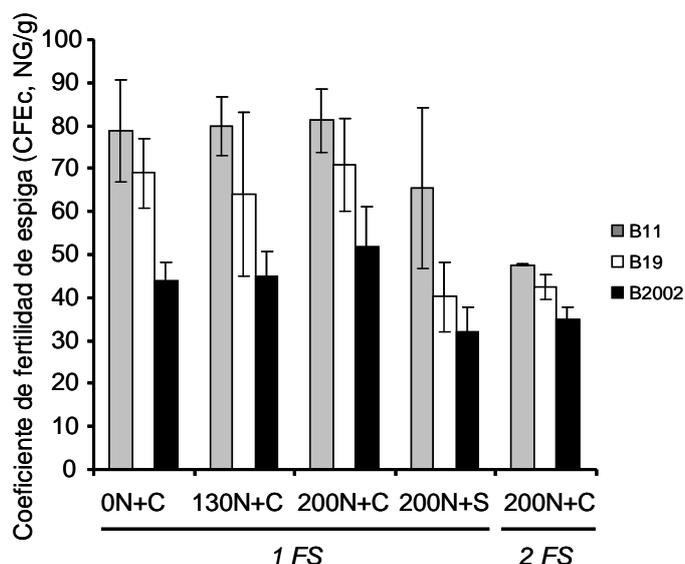


Figura 4: Estabilidad el coeficiente de fertilidad de la espiga.

Observaciones finales

Tal como se esperaba el CFec estuvo fuertemente asociado a la generación de NG. Si bien el valor del CFec fue modificado por algunas condiciones de cultivo (sombreo durante encañazón y cambio en fecha de siembra), el ranking de los cultivares se mantuvo (aunque la diferencia entre ellos se minimizó), indicando una baja interacción genotipo x ambiente. Determinar las bases fisiológicas y genéticas de la diferencia del CFec entre cultivares ayudaría a su utilización futura en planes de mejora para incrementar el NG en diversos ambientes. La relación negativa entre PG y CFec merece mayores estudios para determinar la posibilidad de contrabalanceo entre estos dos componentes.

Referencias

- Calderini, D.F., Slafer, G.A., 1998. Changes in yield and yield stability in wheat during the 20th century. *Field Crops Res.* 57, 335-347.
- Fischer, R.A., 1984. Wheat. In: Smith, W.H., J., B.S. (Eds.), *Symposium on potential productivity of field crops under different environments* IRRI, Los Baños, Philippines, pp. 129-154.
- Fischer, R.A., 2007. Understanding the physiological basis of yield potential in wheat. *J. Agric. Sci.* 145, 99-113.
- Fischer, R.A., 2008. The importance of grain or kernel number in wheat: a reply to Sinclair and Jamieson. *Field Crops Res.* 105, 15-21.
- Fischer, R.A., Edmeades, G.O., 2010. Breeding and cereal yield progress. *Crop Sci.* 50, S-85-98.
- González, F.G., Terrile, I.I., Falcon, M.O., 2011. Spike fertility and duration of stem elongation as promising traits to improve potential grain number (and yield): variation in modern Argentinean wheats. *Crop Science*, 51:4, 1693-1702 (ISSN 1435-0653 online, ISSN 0011-183x print)
- Reynolds, M.P., Foulkes, M.J., Slafer, G.A., Berry, P., Parry, M.A.J., Snape, J.W., Angus, W.J., 2009. Raising yield potential in wheat. *J. Exp. Bot.* 60, 1899-1918.

Fertilización nitrogenada y eficiencia en el uso del nitrógeno en cebada cervecera en el norte de la provincia de Buenos Aires: rendimiento y calidad

Miguel Santangelo Luis Ventimiglia, Antonio Aguinaga, Fernanda G.González

Introducción

La superficie dedicada al cultivo de cebada cervecera en Argentina ha crecido en forma importante durante los últimos años (>50% en el último decenio). La Provincia de Buenos Aires aporta el 90% de la producción y si bien tradicionalmente el sur bonaerense ha sido la zona típica de cultivo (40% de la producción), durante los últimos años se ha producido una expansión hacia el centro-norte de la provincia de Buenos Aires (actualmente aporta el 15% de la producción nacional), siendo los partidos con mayor superficie sembrada Junín y Gral. Arenales (12-24.000 ha), seguidos por Pehuajo, C Casares, 9 de Julio, 25 de Mayo y Rojas (1000-6000 c/u), finalizando con Leandro N Alem (1500-3000 ha) y Pergamino (>1500 ha) (<http://ww.sagpya.mecon.gov.ar>). Esta expansión ha generado una demanda creciente de estudios que permitan optimizar el manejo para la obtención de altos rendimientos y adecuada calidad comercial (i.e. (i) la distribución de tamaño de los granos (calibre), donde >85% granos deben quedar retenidos en la zaranda de 2,5mm, y (ii) el porcentaje de proteína de los mismos que debe oscilar entre 12 y 10%, con tolerancia hasta 13% dependiendo del año y del contrato particular con la maltería). Todos aquellos factores, ya sea ambientales (lluvias, temperaturas, suelo) como de manejo (e.g. cultivar, fechas de siembra, fertilización N) que modifiquen el rendimiento y el peso y porcentaje de proteína resultarán en variaciones en la calidad de los granos de cebada cervecera. En un estudio reciente sobre la calidad de cebada cervecera en la zona productora típica de Argentina (Aguinaga, 2004), trabajando con un cultivar (Quilmes Palomar) y una combinación de sitios (6-8) x años (3) x tratamientos de nitrógeno (8), se pudo establecer que las “precipitaciones totales del mes de noviembre”, las “temperaturas medias de principio de llenado de grano” y la “amplitud térmica entre principio y fin de llenado de grano”, fueron las variables que mejor explicaron la variabilidad en la calidad de malta entre localidades y años (Aguinaga, 2004). La disponibilidad de este tipo de estudios para el centro-norte de la provincia de Buenos Aires es escasa. Por ello, el objetivo del trabajo es estudiar la interacción cultivar x sitio x año x fertilización nitrogenada para rendimiento y calidad y la EUN en el norte de la provincia de Buenos Aires, generando datos zonales que permitan en el futuro validar modelos de simulación (Ceres-Barley) que asistan al productor en la toma de decisiones. En el presente trabajo se presentan los resultados preliminares del primer año de estudio.

Materiales y métodos

Durante 2010 se realizó un ensayo en tres localidades (9 de Julio -9J, Pergamino -PE y Portela -PO) del norte en la provincia de Buenos Aires. Los cultivares Scarlett (SC) y Carsima (CA) fueron sembrados bajo 4 niveles de nitrógeno disponible a la siembra –NS (Ni, 110, 150 y 180 kg N ha⁻¹ en 9J y Ni,

80, 110 y 150 kg N ha⁻¹ en PE y PO, de 0-60 cm profundidad) y en hoja bandera se aplicaron 120 L ha⁻¹ de Foliar SolU (NF, 26.4 kg N ha⁻¹). En la Tabla 1 se pueden observar las particularidades de cada localidad. Los ensayos se condujeron bajo siembra directa utilizando sembradoras con 31 a 27 cuerpos distanciados a 0.17 m. Se trabajo en franjas de 160m largo (2 franjas/cultivar, ie. dos repeticiones), donde se aplicaron los tratamientos de Ns (cada unidad experimental de 40m largo y al ancho de una maquina), las cuales fueron cruzadas con la aplicación del foliar (cada unidad experimental de 2.1m x 40m). A madurez se cosecharon 2.5m² por repetición (en dos submuestras) en forma manual para estimar el rendimiento y sus componentes. La determinación del calibre se realizó con zaranda Sortimat-Pfeuffer (www.pfeuffer.com) y el porcentaje de proteína con NIR. Para las determinaciones de contenido de N en material vegetal se utilizo el método de Kjeldhal.

Resultados y discusión

Datos climáticos

Las localidades no tuvieron grandes diferencias en temperatura media (oscilando entre 5 y 25°C, entre inicio y fin de ciclo), aunque 9J presento más amplitud térmica (con mayor nº de días con t<-5°C al inicio del ciclo y t>30°C al final del ciclo). En relación a las lluvias acumuladas durante el ciclo (Julio a Noviembre) 9J presento 183 mm mientras que PE y PO llegaron a 205 y 216 mm.

Tabla 1: Descripción de condiciones edáficas y siembra en cada localidad.

		PE	PO	9J
Análisis de suelo pre-siembra	N-NO ₃ (0-20) ppm	8.5	10.5	17.7
	N-NO ₃ (20-40) ppm	5.1	4.3	10.3
	N-NO ₃ (40-60) ppm	5.7	3.2	3.5
	P ₍₀₋₂₀₎ ppm	61.4	14.4	5.2
	P ₍₂₀₋₄₀₎ ppm	26.5	4.3	3.0
	P ₍₄₀₋₆₀₎ ppm	4.3	2.0	1.8
	S-SO ₄ (0-20) ppm	7.6	8.9	7.4
	S-SO ₄ (20-40) ppm	7.5	11.8	7.6
	S-SO ₄ (40-60) ppm	7.3	12.8	7.5
	MO ₍₀₋₂₀₎ %	3.26	3.12	2.06
	pH ₍₀₋₂₀₎	5.7	6.5	6.0
Fertilizante siembra		115 kg ha ⁻¹ (6N-36P-6S-11Ca)	120 kg ha ⁻¹ (7N-40P-5S)	130 kg ha ⁻¹ (6N-36P-6S-11Ca)
N disponible Siembra ₍₀₋₆₀₎ kg/ha	Nsuelo+ Fert. siembra	56.2	54.2	86.6
kg ha ⁻¹ semilla		145	142	110 (SC) 135 (CA)
Fecha siembra		30/06	25/06	26/06

Respuesta del rendimiento al nitrógeno disponible

El rendimiento alcanzado y la respuesta a NS dependieron de la localidad, sin impacto del cultivar. Si bien en todas las localidades hubo una tendencia positiva del rendimiento, la única que presento respuesta significativa fue PO, estabilizándose en 114±7 kg N ha⁻¹, valor acorde al generalmente reportado en

esta zona bajo secano (130 kg N ha^{-1} , Ferraris *et al.*, 2006, Ferraris *et al.*, 2008). En dicha localidad, la EUN fue de $32 \pm 3.5 \text{ kg grano/kgNS}$. Llamativamente, en esta localidad la aplicación de NF impactó también en el rendimiento, generando una curva por encima de la respuesta observada en condiciones de no aplicación del foliar (SF) (Fig. 1). La respuesta del rendimiento a la aplicación de NS y las diferencias entre localidades estuvieron asociadas a variaciones en el n° espigas m^{-2} y NG m^{-2} , si bien hubo diferencias en el PG entre localidades ($\text{PO} > \text{PE} > 9\text{J}$) y cultivares ($\text{CA} > \text{SC}$).

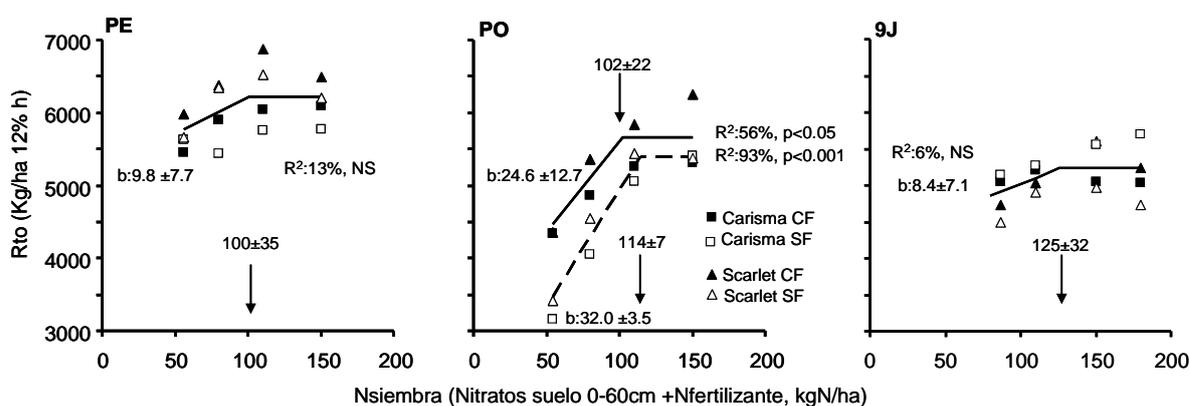


Figura 1. Relación entre rendimiento y NS (disponible a la siembra) y NF (aplicación nitrógeno foliar).

Respuesta del porcentaje de proteína y calibre al Nitrógeno disponible

La respuesta del porcentaje de proteína al NS dependió de la respuesta del rendimiento. En 9J y PE donde la respuesta del rendimiento fue baja, a medida que aumentó el NS aumentó el porcentaje de proteína. En cambio en PO, donde la respuesta al rendimiento fue mayor, el porcentaje de proteína no presentó respuesta al NS. La aplicación de NF en general aumentó el porcentaje de proteína en todas las localidades, dosis de NS y cultivares (salvo en Scarlett 9J) (Fig. 2). Los valores de calibre fueron altos en todas las localidades (>90 , salvo Scarlett 9J), y no se observó una respuesta consistente ni a la NS ni al NF (salvo en 9J Carisma, donde CF aumentó ca. 3 puntos de calibre). En general Carisma presentó iguales o mayores calibres que Scarlett en todas las condiciones.

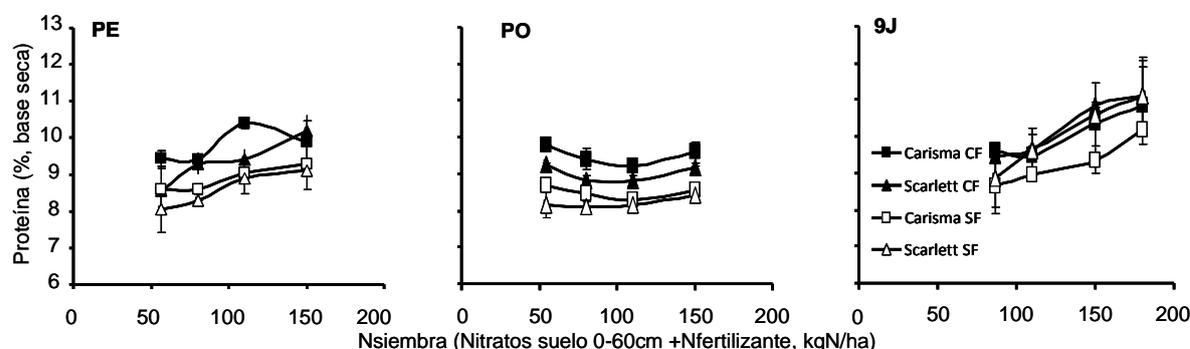


Figura 2. Respuesta del porcentaje de proteína al NS y NF

Respuesta del rendimiento y porcentaje de proteína al Nitrógeno absorbido

La respuesta del rendimiento al Nabs a madurez fue significativa en todas las localidades y cultivares (Fig. 3a). La EUN (kg grano/kg Nabs) fue máxima en PO (51.9 ± 3.8) y similar en PE y 9J (24.3 ± 5.5 y 17.1 ± 5.9 , respectivamente). Las diferencias observadas entre PE y PO en rendimiento con NS cercano a 50 kgN/ha (ver Fig. 1) no fueron detectadas al observar el Nabs. La respuesta del porcentaje de proteína dependió de la respuesta observada en rendimiento (fue nula en PO, 0.044 ± 0.009 y 0.067 ± 0.011 %/kg Nabs en PE y 9J, resp.), independientemente del cultivar. En general la aplicación de NF incrementó el Nabs y el porcentaje de proteína, incluso en PO (Fig. 3b).

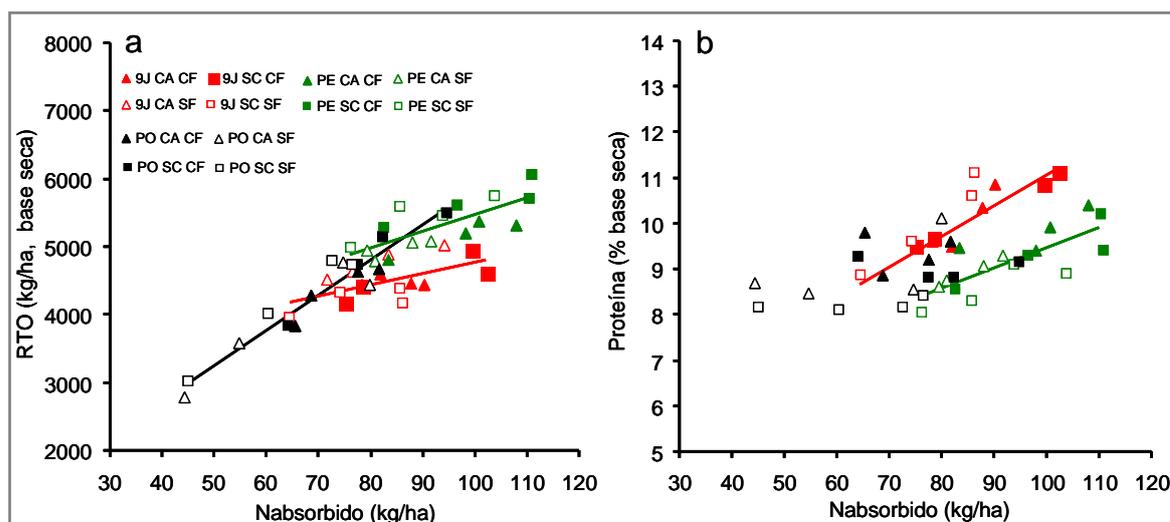


Figura 3. Respuesta del rendimiento (a) y del porcentaje de proteína (b) al Nitrógeno absorbido a madurez.

Observaciones finales

El rendimiento respondió hasta aprox 110 kg N ha^{-1} , independientemente del cultivar. Sin embargo, el porcentaje de proteína mostró incrementos con los sucesivos aumentos de N por encima de dicho valor. La aplicación de N foliar incrementó en general los valores de proteína en grano, sin impacto importante en el calibre de los mismos.

Referencias

- Aguinaga, 2004. Análisis de la relación entre proteínas de reserva, calidad maltera y ambiente de cultivo en cebada cervecera. Tesis de Magister en Producción Vegetal. Universidad Nacional del Sur.
- Ferraris, G., Prystupa, P., Gutiérrez Boem, F.H., Couretot, R., Falconi, R., Traficante, P., 2006. Efecto de la fertilización con N, P y S sobre la secuencia cebada-soja en el centro norte de la provincia de Buenos Aires.
- Ferraris, G., Couretot, L., Falconi, R., Gutiérrez Boem, F.H., Prystupa, P., 2008. Efectos de la fertilización de cebada sobre la productividad de la secuencia cebada-soja y cebada-maíz en el noroeste de la Provincia de Buenos Aires. Trigo y cebada en SD. Revista Aapresid, 133-139.

Anegamiento en trigo y cebada y su efecto sobre el rendimiento y sus componentes

Romina de San Celedonio, L. Gabriela Abeledo y Daniel J. Miralles

Introducción

El anegamiento produce reducciones en el rendimiento de los cultivos cuya magnitud depende de la especie, de la duración del período de anegamiento (Malik *et al.*, 2002) y del estado de desarrollo del cultivo al momento de producirse dicho evento (Setter y Waters, 2003). En general, las pérdidas de rendimiento por efecto del anegamiento suelen ser menores en trigo que en cebada (Cannell *et al.*, 1984). Sin embargo, no se conocen con exactitud los momentos críticos en los que el anegamiento produce los mayores daños y los mecanismos de respuesta de estas especies para tolerar en mayor o menor medida el estrés por anegamiento.

El objetivo general de este trabajo fue identificar los períodos críticos de reducción de rendimiento y analizar los mecanismos ecofisiológicos involucrados en la reducción del rendimiento ante condiciones de anegamiento en los cultivos de trigo (*Triticum aestivum* L.) y cebada cervecera (*Hordeum vulgare* L.).

Materiales y métodos

Diseño. En el Campo Experimental FAUBA (34° 35´S, 58° 29´W), se realizaron dos ensayos bajo condiciones semi-controladas utilizando macetas de 10 litros rellenas con una mezcla en proporción 3:1 de arena y suelo fértil (2,1% de MO, 44 ppm de NO₃⁻) en dos fechas de siembra, una fecha óptima (fines de junio; invernáculo; F1) y una fecha tardía (septiembre; campo; F2). Dentro de cada fecha de siembra se utilizó un diseño experimental completamente aleatorizado (DCA) con cuatro repeticiones por tratamiento. Los tratamientos correspondieron a la combinación de los siguientes factores:

Cultivar: Un cultivar de trigo (Baguette 13; Tr) y uno de cebada cervecera (Scarlett; Cb), ambos de alto potencial de rendimiento y fenología semejante.

Anegamiento: Dos disponibilidades hídricas contrastantes en distintos momentos ontogénicos: (i) CONTROL: 80% de capacidad de campo durante todo el ciclo del cultivo y (ii) ANEGADO: 2 cm de agua sobre el nivel del suelo durante distintos estadios ontogénicos del cultivo: (ii.1) 1 a 4 hojas aparecidas (**H1-4**), (ii.2) 4 a 7 hojas aparecidas (**H4-7**), (ii.3) 7 a 10 hojas aparecidas (**H7-10**), (ii.4) 10 hojas aparecidas a Antesis (**H10-At**), (ii.5) Antesis a Madurez Fisiológica (**At-MF**). La duración de los eventos de anegamiento fue de 20 días para la fecha temprana y 15 días para la fecha tardía.

El ensayo fue conducido con alta disponibilidad nitrogenada (150 kg N ha⁻¹ a siembra) y control de adversidades bióticas. La densidad de siembra fue de 6 plantas por maceta (equivalente a 190 plantas m⁻²).

Determinaciones: Biomasa total a Madurez, Rendimiento y sus componentes numéricos e índice de cosecha.

Resultados y discusión

El rendimiento de trigo y cebada disminuyó debido a los tratamientos de anegamiento. Las pérdidas fueron entre 0 y 74% para cebada y 2 y 94% para trigo, dependiendo del momento de ocurrencia del anegamiento y la fecha de siembra (Fig. 1). Las mayores pérdidas se dieron en los tratamientos previos a floración en ambas especies, mientras que los tratamientos más tempranos (H1-H4 y H4-H7) no tuvieron efectos significativos en el rendimiento ($p < 0,05$). Estos resultados confirman lo que fue sugerido por Setter y Waters (2003), en un trabajo de revisión, indicando al período centrado en floración como el más sensible a eventos de anegamiento en ambas especies.

El atraso de la fecha de siembra (F2) redujo el rendimiento, comparado con la fecha temprana, pero a su vez, en esta fecha tardía el efecto negativo del anegamiento fue más marcado, alcanzándose pérdidas del 94 % en trigo y 74% en cebada en el tratamiento H10-At, mientras que en la F1 las pérdidas de rendimiento no superaron el 40% en ninguna de las especies. Sin embargo, los momentos de mayor sensibilidad fueron los mismos, independientemente de la fecha de siembra.

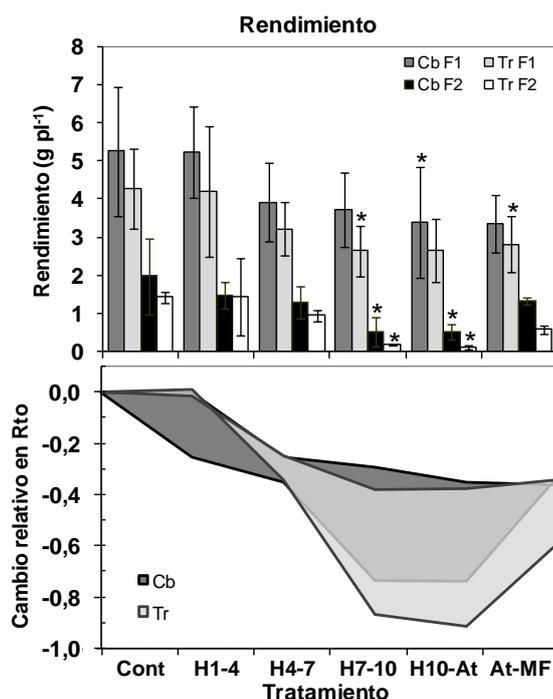


Figura 1. Rendimiento en valores absolutos (panel superior) y expresado como cambios relativos respecto del control sin anegar (panel inferior) de trigo (Tr) y cebada (Cb) para distintos momentos de anegamiento (control sin anegar, Cont; anegado de 1 a 4 hojas aparecidas, H1-4; de 4 a 7 hojas aparecidas, H4-7; de 7 a 10 hojas aparecidas, H7-10; de 10 hojas aparecidas a Antes de Ate, H10-At; y de antes de a madurez Fisiológica, At-MF) para fechas de siembra temprana (F1) y tardía (F2). En el panel superior, los asteriscos (*) indican diferencias significativas con el tratamiento control ($p < 0,05$). En el panel inferior, el límite superior del área corresponde al valor de la fecha temprana (F1) y el límite inferior corresponde al de la fecha tardía (F2).

El rendimiento puede ser explicado, en términos de biomasa, como el producto entre la biomasa total producida a madurez (BT) y la proporción de esta que es

particionada a los órganos reproductivos (IC) (i.e. **Rendimiento (g pl^{-1}) = Biomasa (g pl^{-1}) x Índice de Cosecha**). En base a este análisis, la principal causa en la caída del rendimiento de cebada se debió a pérdidas en la BT acentuándose la pérdida de biomasa con eventos de anegamiento en estados avanzados del ciclo y con retrasos en la fecha de siembra (Fig. 2), encontrándose caídas de más del 80% en la F2. Los valores son consistentes con los obtenidos por Pang *et al.* (2004) para seis genotipos de cebada expuestos a anegamiento. El Índice de Cosecha (IC), también se vió afectado, principalmente en la F2, pero en promedio en mucha menor magnitud que las pérdidas observadas en la biomasa aérea (Fig. 2).

En el caso de trigo las mayores pérdidas de biomasa se produjeron en el tratamiento H7-H10, alcanzando un 27% en la F1 y un 93% en la F2. A su vez, las pérdidas de IC fueron más marcadas cuanto más tarde, durante el periodo de pre-antesis, fue aplicado el anegamiento, superando el 80% en el tratamiento H10-At (F2) (Fig. 2).

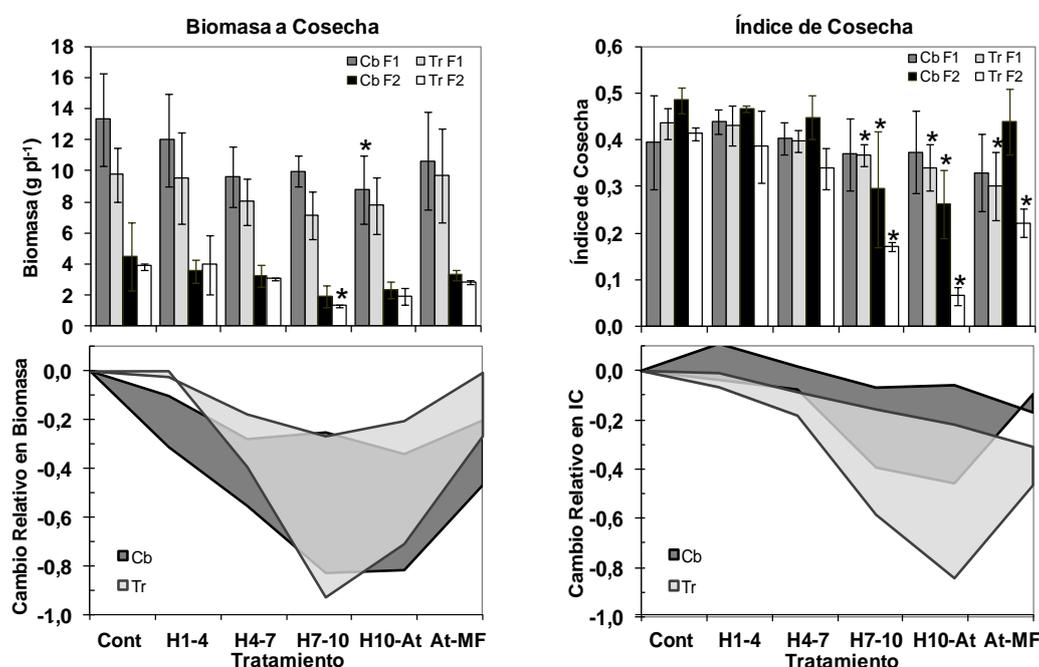


Figura 2. Biomasa aérea a cosecha (panel izquierdo) e índice de cosecha (panel derecho) en valores absolutos (paneles superiores) y relativos expresados como cambios relativos respecto del control sin anegar (paneles inferiores) de trigo (Tr) y cebada (Cb) para distintos momentos de anegamiento (ver referencias en Fig. 1) para una fecha de siembra temprana (F1) y tardía (F2) (panel superior). En el panel superior, los asteriscos (*) indican diferencias significativas con el tratamiento control ($p < 0,05$). En el panel inferior, el límite superior del área corresponde al valor de la fecha temprana (F1) y el límite inferior corresponde a la fecha tardía (F2).

Otra forma de expresar el rendimiento es a través de sus principales componentes numéricos (i.e. número de granos (NG) y peso de granos (PG)). A su vez, el NG puede ser expresado como el producto entre el número de espigas pl^{-1} y el número de granos espiga $^{-1}$. Trigo y cebada mostraron diferentes estrategias al generar el número de granos pl^{-1} (Tabla 1). En cebada hubo una merma en el número de espigas pl^{-1} con anegamientos durante el período H10-At (F1), sin embargo, ninguno de los tratamientos modificó el

número de granos espiga⁻¹. Si bien el NG por planta no presentó diferencias significativas entre tratamientos, se observó una clara tendencia a reducir dicho componente en el tratamiento H10-At, siguiendo el patrón observado en el número de espigas por planta. A diferencia de cebada, en trigo, el anegamiento produjo reducciones significativas en el número de granos espiga⁻¹ (hasta un 65% de pérdida respecto del control en el tratamiento H7-10), reflejándose esa caída en el NG por planta. Estos resultados confirman las distintas estrategias para generar rendimiento en ambas especies, sosteniendo cebada el NG por planta a través de cambios en el número de espigas por planta, mientras que trigo consolida dicho componente del rendimiento a través del número de granos por espiga. Así, condiciones desfavorables como por ejemplo anegamientos temporarios, que afecten dichos componentes (espigas por planta en cebada y granos por espiga en trigo) determinarán los mayores impactos negativos en el rendimiento en cada una de las especies. Finalmente, el peso de los granos también se afectó, tanto con anegamientos inmediatamente previos a floración como durante el período de llenado de granos en ambas especies. Esto indicaría que hubo un efecto del anegamiento sobre el peso potencial de los granos (Calderini *et al.*, 2001).

Tabla 1. Componentes numéricos del rendimiento en trigo (Tr) y cebada (Cb) para distintos momentos de anegamiento (ver referencias en Fig. 1) para una fecha de siembra temprana y una fecha tardía. Para cada columna, dentro de cada fecha de siembra, letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

Fecha	Tratamiento	Espigas pl ⁻¹		NG espiga ⁻¹		NG pl ⁻¹		PG (mg)	
		Cebada	Trigo	Cebada	Trigo	Cebada	Trigo	Cebada	Trigo
Temprana	Control	7,4 a	2,6 a	16,7 a	44,1 a	122 a	113 ab	40,9 a	35,7 ab
	H1-4	6,5 ab	2,6 a	18,7 a	41,2 ab	122 a	107 ab	43,0 a	37,4 a
	H4-7	6,3 ab	2,6 a	16,0 a	34,2 b	101 a	87 ab	38,7 a	36,6 ab
	H7-10	5,8 ab	2,3 a	16,6 a	34,0 b	95 a	79 b	38,7 a	30,8 bc
	H10-At	4,8 b	2,3 a	17,6 a	40,6 ab	86 a	98 ab	39,0 a	25,7 cd
	At-MF	5,9 ab	2,8 a	18,8 a	45,3 a	110 a	121 a	30,5 b	21,1 d
Tardía	Control	3,9 a	2,7 a	14,6 a	25,2 ab	59 a	67 a	33,6 a	21,7 a
	H1-4	3,7 a	2,9 a	12,6 a	22,4 ab	47 a	65 a	31,5 a	21,2 a
	H4-7	3,5 a	2,3 a	12,3 a	20,4 ab	43 a	46 ab	29,8 ab	20,4 a
	H7-10	2,1 a	2,1 a	9,3 a	8,7 c	22 a	18 b	23,5 b	10,5 b
	H10-At	2,3 a	2,4 a	14,3 a	13,2 bc	33 a	32 ab	15,4 c	3,6 c
	At-MF	3,7 a	1,9 a	12,9 a	27,9 a	47 a	51 ab	28,6 ab	11,7 b

Observaciones finales

El anegamiento afectó en forma negativa el rendimiento de trigo y cebada y sus componentes, tanto numéricos (espigas, número de granos y peso de granos), como de biomasa (biomasa final e índice de cosecha). No se encontraron diferencias importantes entre trigo y cebada en su respuesta a los tratamientos de anegamiento, (considerando los cultivares utilizados) aunque si en los componentes del rendimiento que fueron afectados. En ambas especies las mayores pérdidas en el rendimiento se dieron con anegamientos centrados en floración, aunque el impacto sobre los componentes de rendimiento fue diferente dependiendo de la especie. Al exponer a las plantas a condiciones más estresantes, atrasando la fecha de siembra, aumentó la magnitud del daño producido sin modificarse el momento identificado como de mayor sensibilidad.

Referencias

- Calderini, D.F., Savin, R., Abeledo, L.G., Reynolds, M.P., Slafer, G.A., 2001. The importance of the period immediately preceding anthesis for grain weight determination in wheat. *Euphytica* 119, 199-204.
- Cannell, R.Q., Belford, R.K., Gales, K., Thomson, R.J., Webster, C.P., 1984. Effect of waterlogging and drought on winter wheat and winter barley grown on clay and sandy loam soil. *Plant Soil* 80, 53-66.
- Malik, A.I., Colmer, T.D., Lmabers, H., Setter, T., Schortemeyer, M., 2002. Short -term waterlogging has long -term effects on the growth and physiology of wheat. *New Phyt.* 153, 236-255.
- Pang, J., Zhou, M., Mendham, N., Shabala, S., 2004. Growth and physiological responses of six barley genotypes to waterlogging and subsequent recovery. *Austr. J. Agric. Res.* 55, 895-906.
- Setter, T.L., Waters, I., 2003. Review of prospects for germplasm improvement for waterlogging tolerance in wheat, barley and oats. *Plant Soil* 253, 1-34.

Cambios en la duración de las etapas pre-antesis en trigo en respuesta a la fertilización nitrogenada

Esther Hernández-Rodríguez, Gaspar Estrada-Campuzano, Carlos G. Martínez-Rueda, Edgard J. Morales-Rosales

Introducción

Un apropiado ciclo de cultivo y en especial aquel a floración es un determinante crítico de la adaptabilidad de un cultivo (Worland, 1996, Slafer and Whitechurch, 2001), el cual es modificado por diversos factores tanto internos como externos. Se sabe que los principales factores ambientales que determinan la tasa de desarrollo son la temperatura y el fotoperiodo (ver Slafer y Rawson, 1994; y referencias ahí), sin embargo, también se ha reportado que la disponibilidad de agua y nutrientes pueden modificar la tasa de desarrollo y en consecuencia el tiempo a floración (Longnecker et al., 1993; Grieve et al., 1994; Arisnabarreta y Miralles, 2004, Salvagiotti y Miralles., 2007; Estrada-Campuzano et al., 2008). Los efectos de la disponibilidad de nitrógeno sobre la tasa de desarrollo en trigo (Bauer et al., 1984) y sobre la expansión foliar (Langer and Liew, 1973) han sido estudiados ampliamente en diversas partes del mundo. Un mejor entendimiento de la sensibilidad del tiempo a floración en las variedades de trigo de los valles altos de México en respuesta a la fertilización nitrogenada podría ser de utilidad para caracterizar mejor el germoplasma utilizado en la región y definir mejores estrategias de manejo tendientes a incrementar los rendimientos obtenibles por los productores. De acuerdo con lo anterior, los objetivos de esta investigación fueron: i) estudiar la variabilidad en la duración del tiempo antesis en un conjunto de cultivares de trigo cultivados en los valles altos de México y ii) estudiar la sensibilidad del tiempo a antesis y la duración relativa de las etapas que la componen en respuesta a la fertilización nitrogenada.

Materiales y métodos

El experimento se estableció durante el ciclo otoño-invierno del año 2010-2011, bajo condiciones de riego en el campo experimental de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México. Se utilizaron nueve cultivares de trigo liberados en diferentes momentos y representativos de la zona de estudio (Maya, Eneida, Urbina, Cortazar, Barcenas, Saturno, Salamanca, Tollocan y Rebecca) y cuatro niveles de nitrógeno (0, 100, 200 y 300 kg N ha⁻¹). La densidad de siembra fue de 336 semillas por m², en parcelas de 6 surcos de 3 m de largo y 0.20 m de separación. El arreglo experimental consistió de un diseño de bloques completos al azar, donde cada dosis de nitrógeno consistió en un experimento independiente. Las etapas fenológicas del cultivo (doble lomo, espiguilla terminal, antesis y madurez fisiológica) se expresaron en tiempo térmico utilizando como temperatura base de 0°C (Gallagher, 1979, Baker et al., 1980). La madurez fisiológica se estimó mediante una regresión bilineal entre el peso seco del grano (obtenido dos veces por semana desde antesis) y el tiempo térmico desde antesis (ver Miralles y Slafer, 1995). El número final de hojas utilizando la metodología de

Haun (1973) y el filocrono fueron estimados, midiendo la dos veces por semana cuatro plantas por parcela.

Resultados y discusión

La disponibilidad de nitrógeno provocó cambios en la duración del ciclo total de los cultivares de trigo evaluados (Fig. 1), observándose una tendencia a incrementar la duración del ciclo total en dosis de 0 kg N ha⁻¹, mientras que a medida que se incrementa la disponibilidad de nitrógeno existe un acortamiento del ciclo, debido a que la disponibilidad del nitrógeno acelera la tasa de desarrollo, lo cual coincide con las evidencias en la literatura en este cultivo (Frank y Bauer, 1984, Longnecker, et al., 1993). La disponibilidad de nitrógeno no afectó la duración del periodo vegetativo lo cual coincide con Frank y Bauer (1982) quienes mencionan que la etapa temprana vegetativa y el desarrollo del ápice son más sensibles a la temperatura que a la fertilización nitrogenada.

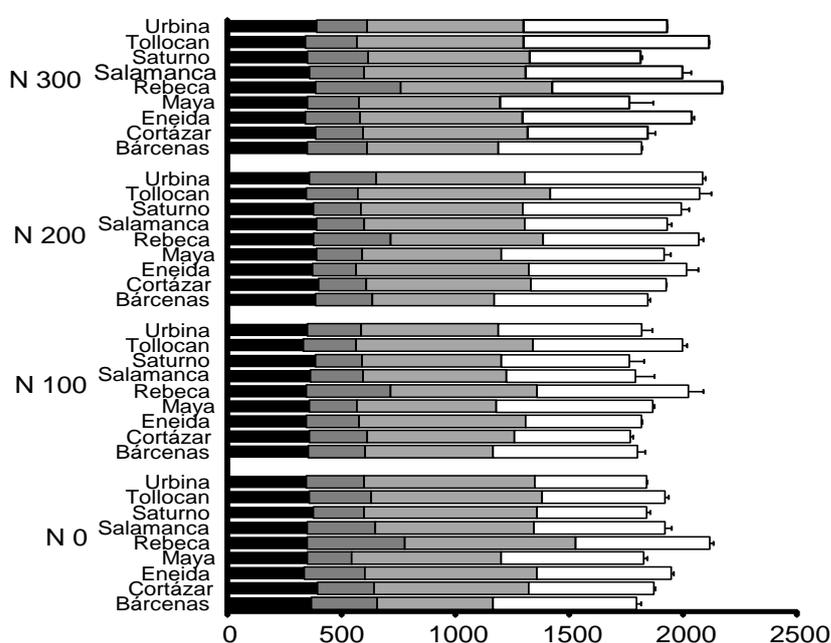


Figura 1. Duración desde emergencia a doble lomo (■), desde doble lomo a iniciación de espiguilla terminal (■), iniciación de espiguilla terminal a antesis (■) y desde antesis a madurez fisiológica (□), para nueve cultivares de trigo crecidos en 4 niveles de nitrógeno en Toluca, México.

Los cultivares difirieron marcadamente en su duración de tiempo total a antesis (Fig. 2). Con la dosis más alta de nitrógeno se pudo apreciar una amplia variabilidad genotípica en la duración del tiempo térmico a antesis y sus respectivas sub-fases. La duración del periodo EM-ANT en los cultivares más sensibles fue más largo cuando el nitrógeno fue limitante (promediando entre cultivares la diferencia estuvo alrededor de ca. 40 °Cd). Estas diferencias por efecto de la disponibilidad de nitrógeno fueron pequeñas, lo cual contrasta con la gran diferencia en disponibilidad de este elemento muy similar a lo encontrado en otros estudios (Frank y Bauer, 1982; Bauer et al., 1984; Prystupa et al., 2003). Se sabe que una amplia variación genotípica en el tiempo a antesis puede ser exitosamente utilizada para mejorar la adaptabilidad

a ambientes específicos (Brouwer, 1977; Giunta et al., 2001). En términos generales, los cultivares pudieron ser agrupados en función de su duración a antesis en precoces, intermedios y tardíos. El cultivar más tardío cuando se compararon ambas condiciones fue Rebeca, mientras que los más precoces fueron Barcenas y Maya. Las diferencias observadas en este periodo, fueron debidas tanto a diferencias en el número final de hojas como al filocrono, lo cual concuerda con Giunta et al. (2001) quien determinó que la variabilidad observada en tiempo a antesis estuvo asociada al número final de hojas. Esto último, debido a cambios en la tasa de aparición de hojas. Resultados similares se han encontrado cuando la disponibilidad de agua es el factor que limita el crecimiento del cultivo (Estrada-Campuzano et al., 2008).

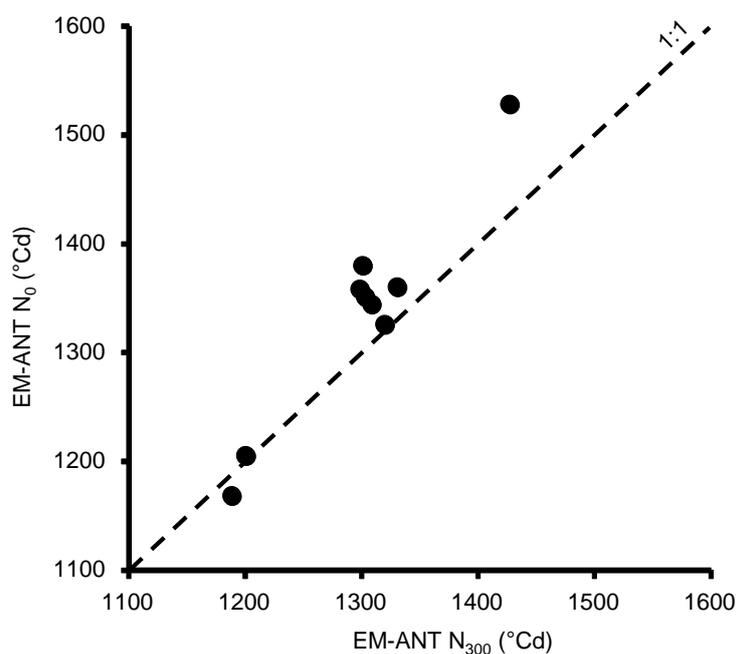


Figura 2. Relación entre el tiempo térmico desde emergencia (EM) a antesis (ANT) en N_0 y N_{300} para 9 cultivares de trigo. Línea discontinua representa la relación 1:1.

La variabilidad en la duración de las etapas pre-antesis puede ser muy importante, debido a que la duración correspondiente a la etapa de elongación del tallo puede ser un determinante fisiológico para el número de granos por espiga y por unidad de área (Slafer et al., 2001, Miralles et al., 2000, González et al., 2003). En el presente trabajo, no existió relación entre la duración de la fase de elongación del tallo (ET-ANT) y la etapa que va desde emergencia a iniciación de espiguilla terminal (EM-ET). De tal forma que fue posible identificar cultivares en los cuales para una misma duración del periodo desde emergencia a antesis, la duración del periodo desde espiguilla terminal a antesis difirió significativamente (Fig. 3). Algunos ejemplos para ilustrar dicha variabilidad se describen a continuación. En N_0 Maya y Bárcenas mostraron virtualmente la misma duración a antesis, sin embargo, el primero mostró un periodo ET-ANT más largo que el segundo. La identificación de variabilidad en la fase de elongación del tallo es el primer paso para seleccionar líneas parentales con una mayor duración de esta fase para ser usada en cruzamientos para obtener genotipos con similar duración a antesis (lo cual es crítico en términos de adaptabilidad), pero diferente duración relativa de las

etapas pre-antesis (Miralles y Slafer, 2007). Los cultivares de trigo mostraron una sensibilidad diferencial a la disponibilidad de nitrógeno de las etapas previas y posteriores a espiguilla terminal. Algunos cultivares fueron grandemente sensibles a la disponibilidad de nitrógeno la fase desde EM-ET y no lo fueron en la fase ET-ANT y viceversa. Cuando el nitrógeno no fue limitante los cultivares Tollocan, Eneida, Urbina y Salamanca mostraron casi la misma duración a antesis pero la duración desde espiguilla terminal fue más larga en Salamanca, respecto de Eneida, sin embargo, en esta ultima la duración desde EM-ET fue más larga respecto a Salamanca. De los resultados anteriores es claro que en los valles altos de México existe suficiente variabilidad genética en la duración del tiempo a antesis y en aquellas fases que ocurren antes y después de espiguilla terminal, lo cual podría ser explotado en los programas de mejoramiento genético de la región con fines a seleccionar genotipos con mejor ajuste fenológico.

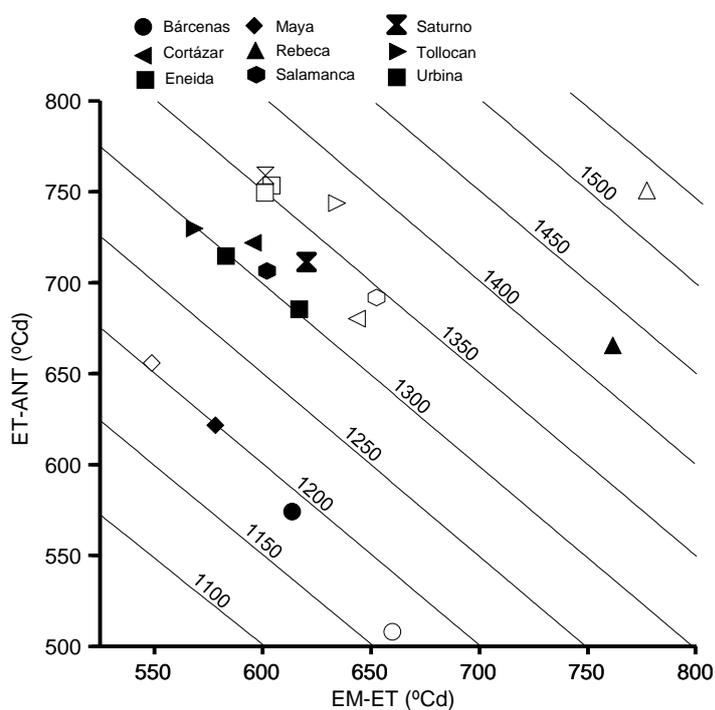


Figura 3. Duración de la fase desde espiguilla terminal a antesis (ET-ANT) vs la duración de la fase desde emergencia a espiguilla terminal (EM-ET) para nueve cultivares de trigo crecidos en baja (símbolos vacíos) y alta (símbolos llenos) disponibilidad de nitrógeno en Toluca, México.

Referencias

- Arisnabarreta, S., Miralles, D.J., 2004. The influence of fertilizer nitrogen application on development and number of reproductive primordia in field-grown two- and six-rowed barleys. *Aust. J. Agric. Res.* 55, 357–366.
- Baker, C.K., Gallagher, J.N., Monteith, J.L., 1980. Estimation of spring wheat leaf growth rates and anthesis from air temperature. *Agron. J.* 76, 829-835.
- Bauer, A., Frank, A.B., Black, A.L., 1984. Estimation of spring wheat leaf growth rates and anthesis from air temperature. *Agron. J.* 76, 829-835.

- Brouwer, J.B., 1977. Developmental responses of different hexaploid triticales to temperature and photoperiod. *Aust. J. Exp. Agric. Anim. Husbandry* 17, 826–831.
- Estrada Campuzano, G., Miralles, D.J., Slafer, G.A., 2008. Genotypic variability and response to water stress of pre- and post-anthesis phases in triticales. *Eur. J. Agron.* 28, 171-177.
- Frank, A.B., Bauer, A., 1982. Effect of temperature and fertilizer N on apex development in spring wheat. *Agron. J.* 74, 504–509.
- Frank, A.B., Bauer, A., 1984. Cultivar, nitrogen and water effects on apex development in spring wheat. *Agron. J.* 76, 656-660.
- Gallagher, J.N., 1979. Field studies of cereals leaf growth: I. Initiation and expansion in relation to temperature and ontogeny. *J. Exp. Bot.* 30, 625-636.
- Giunta, F., Motzo, R., Viridis, A., 2001. Development of durum wheat and triticales cultivars as affected by thermo-photoperiodic conditions. *Aust. J. Agric. Res.* 52, 387–396.
- González, F.G., Slafer, G.A., Miralles, D.J., 2003. Grain and floret number in response to photoperiod during stem elongation in fully and slightly vernalized wheats. *Field Crops Res.* 80, 17–27.
- Grieve, C.M., Francois, L.E., Maas, E.V., 1994. Salinity affects the timing of phasic development in spring wheat. *Crop Sci.* 34, 1544–1549.
- Haun, J.R., 1973. Visual quantification of wheat development. *Agron. J.* 65, 116–119.
- Langer, R.H.M., Liew, F.K.Y., 1973. Effects of varying nitrogen supply at different stages of the reproductive phase on spikelet and grain production and on grain nitrogen in wheat. *Aust. J. Agric. Res.* 24, 647-656.
- Longnecker, N., Kirby, E.J.M., Robson, A., 1993. Leaf Emergence, tiller growth and apical development of nitrogen-deficient spring wheat. *Crop Sci.* 33, 154–160.
- Miralles, D.J., Richard, R.A., Slafer, G.A., 2000. Duration of the stem elongation period influences the number of fertile florets in wheat and barley. *Aust. J. Plant Physiol.* 27, 931–940.
- Miralles, D.J., Slafer, G.A., 1995. Individual grain weight responses to genetic reduction in culm length in wheat as affected by source-sink manipulations. *Field Crops Res.* 43, 55–66.
- Miralles, D.J., Slafer, G.A., 2007. Sink limitations to yield in wheat: how could it be reduced? *J. Agric. Sci.* 145, 1–11.
- Prystupa, P., Slafer, G.A., Savin, R., 2003. Leaf appearance, tillering and their coordination in response to N×P fertilization in barley. *Plant Soil* 255, 587–594.
- Salvagiotti, F., Miralles, D.J., 2007. Wheat development as affected by nitrogen and sulfur nutrition. *Aust. J. Agric. Res.* 58, 39–45.
- Slafer, G.A., Rawson, H.M., 1994. Sensitivity of wheat phasic development to major environmental factors: A re-examination of some assumptions made by physiologists and modellers. *Aust. J. Plant Physiol.* 21, 393-426.
- Slafer, G.A., Abeledo, L.G., Miralles, D.J., Gonzalez, F.G., Whitechurch, E.M., 2001. Photoperiod sensitivity during stem elongation as an avenue to raise potential yield in wheat. *Euphytica* 119 (1–2), 191–197.
- Slafer, G.A., Whitechurch, E.M., 2001. Manipulating wheat development to improve adaptation and to research for alternative opportunities to increase

yield potential. In: Reynolds, M.P., Ortiz-Monasterio, J.L., McNab, A. (Eds.), *Application of Physiology to Wheat Breeding*. CIMMYT, Mexico, DF, pp. 160–170.

Worland, A.J., 1996. The influence of flowering time genes on environmental adaptability in European wheats. *Euphytica* 89, 49–57.

Producción de biomasa, radiación interceptada y eficiencia en el uso de la radiación en cultivares de trigo ante cambios en la fertilización nitrogenada.

Esther Hernández-Rodríguez, Gaspar Estrada-Campuzano, Carlos G. Martínez-Rueda, Edgard J. Morales-Rosales

Introducción

El rendimiento de grano (RG) en trigo y en otros cereales puede ser visualizado como el producto entre la biomasa total acumulada durante el ciclo de cultivo (BT) por el índice de cosecha (IC), el cual representa la proporción del peso seco total que se acumula en los granos cosechados ($IC=RG/BT$). La BT es el resultado de la producción, transporte y acumulación de fotoasimilados y nutrientes por el cultivo, mientras que el IC refleja la asignación de fotoasimilados hacia los granos (Cárcova et al., 2003). La BT está determinada por la cantidad de radiación incidente durante la estación de crecimiento (Q), la fracción de la radiación que es interceptada por el cultivo (RI) y la eficiencia con la que el cultivo es capaz de transformar la radiación solar interceptada en materia seca (EUR) (Slafer et al., 1999). Para identificar aquellos atributos fisiológicos relacionados con el avance genético para mayor potencial de rendimiento en trigo en México, se han realizado diferentes trabajos enfocados a la evaluación de series históricas de variedades de trigo (Sayre et al., 1997, Ortiz-Monasterio et al., 1997). Estos estudios se han conducido principalmente en condiciones de riego en zonas de alto potencial de rendimiento (e.g. región noreste de México) sin que se haya documentado hasta la fecha los avances logrado en la región de los valles altos de México. En el presente trabajo se estudió la generación del RG mediante el análisis de sus componentes fisiológicos en nueve variedades de trigo liberadas en las últimas décadas en la región de los valles altos de México.

Materiales y métodos

El experimento se estableció durante el ciclo invierno-primavera de 2010-2011, bajo condiciones de riego en Toluca, México (99° 41' 30"O y 19° 24' 34"N; 2,607 m.s.n.m.). La densidad de siembra fue de 336 semillas por m², en parcelas de 6 surcos de 3 m de largo y 0.20 m de separación. Se evaluaron 9 cultivares de trigo liberados en diferentes momentos y representativos de la zona de estudio (Maya, Eneida, Urbina, Cortázar, Bárcenas, Saturno, Salamanca, Tollocan y Rebeca) bajo cuatro dosis de fertilización nitrogenada (0, 100, 200 y 300 kg N ha⁻¹) en una serie de 4 experimentos en bloques completos al azar con tres repeticiones (para cada una de las cuatro dosis de N se estableció un experimento de la serie). En dos surcos de 30 cm de longitud (0.12 m²) dentro de la parcela útil se determinó la producción de biomasa aérea mediante muestreos destructivos (espiguilla terminal, hoja bandera, anthesis, y madurez fisiológica). Durante el ciclo de crecimiento se estimó la radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAI) y la eficiencia en el uso de la radiación (EUR). Para determinar los componentes del rendimiento se cosechó un metro lineal de cada parcela y se procedió a separar el grano de vástagos

principales y macollos y con esto se determinó el rendimiento de grano por unidad de superficie, el número de granos, el peso individual de grano, el número de granos por espiga y el número de espigas por m².

Resultados y discusión

Se observó variación significativa ($p < 0.01$) en RG y sus componentes fisiológicos BT e IC en los cultivares de trigo evaluados a través de las cuatro dosis de fertilización nitrogenada. Conforme se incrementó la dosis de N se incrementó el RG y la BT, sin que se afectara en forma significativa el IC. El RG estuvo asociado positiva y significativamente ($R^2 = 0.74$; $p < 0.01$) con la BT (Fig. 1A) sin que hubiera una relación definida con el IC (Fig. 1B). Siguiendo con el esquema de generación del rendimiento, donde la producción de BT es el resultado de la radiación interceptada y la eficiencia con la cual dicha radiación es transformada en materia seca, en la Figura 2A se aprecia que la BT acumulada en la etapa de antesis estuvo directamente relacionada con la EUR ($R^2 = 0.71$; $p < 0.01$) existiendo un marcado incremento en la EUR y en la cantidad de radiación interceptada al aumentar la disponibilidad de N en el suelo (Fig. 2B). En la Figura 3 se observa que la EUR tuvo una respuesta cuadrática a la disponibilidad de N en el suelo ($R^2 = 0.98$; $p < 0.01$). Lo cual se ve corroborado por Ferrise et al. (2010), donde se demuestra que la disponibilidad de N afecta la capacidad fotosintética del cultivo.

El análisis de los componentes numéricos del RG indica que el número de granos por unidad de superficie estuvo asociado positiva y significativamente con el RG ($R^2 = 0.74$; $p < 0.01$) sin que hubiera una relación lineal entre el RG y el peso individual de los granos, existiendo en ambos componentes numéricos una respuesta positiva a la dosis de N (Fig. 4). Estos resultados concuerdan con aquellos reportados en la literatura, en donde el rendimiento de los cereales de grano es explicado principalmente por cambios en el número de granos más que por el peso de los mismos (Fischer, 2008), y que el número de granos está en función de la disponibilidad de N, también reportado por Ferrise et al. (2010).

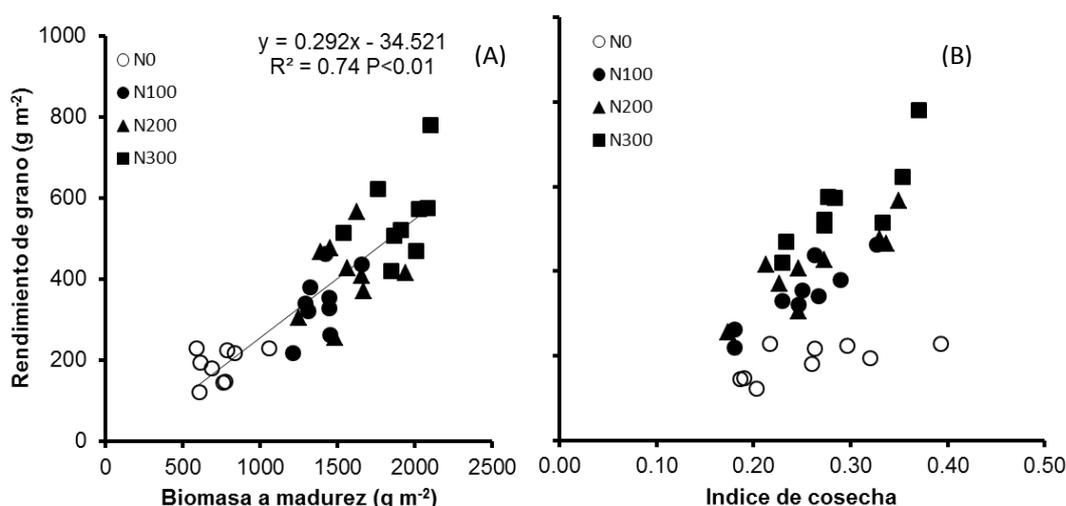


Figura 1. Relaciones entre el rendimiento de grano con la biomasa total a madurez fisiológica (A) y con el índice de cosecha (B) en 9 cultivares de trigo evaluados bajo cuatro dosis de fertilización nitrogenada.

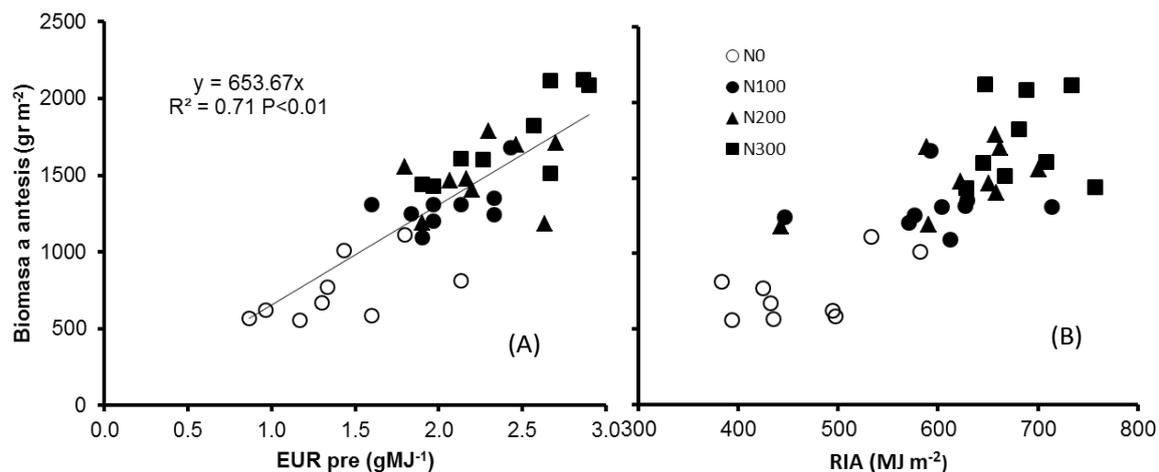


Figura 2. Relaciones entre la biomasa a antesis con la eficiencia en el uso de la radiación preantesis (A) y con la radiación interceptada a antesis (B) en nueve cultivares de trigo evaluados bajo cuatro dosis de fertilización nitrogenada.

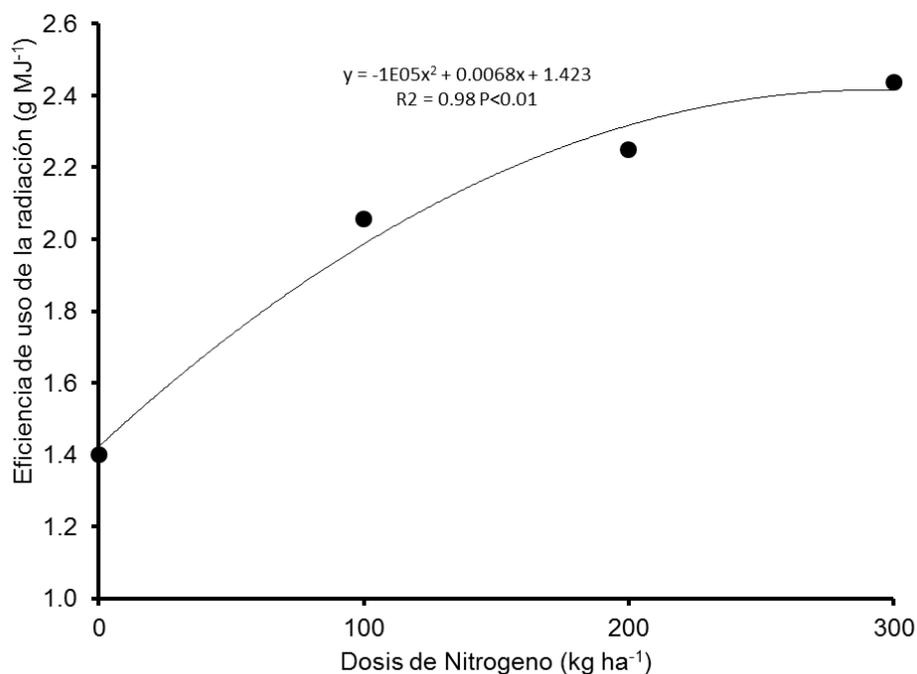


Figura 3. Relación entre la dosis de nitrógeno en el suelo y la eficiencia en el uso de la radiación.

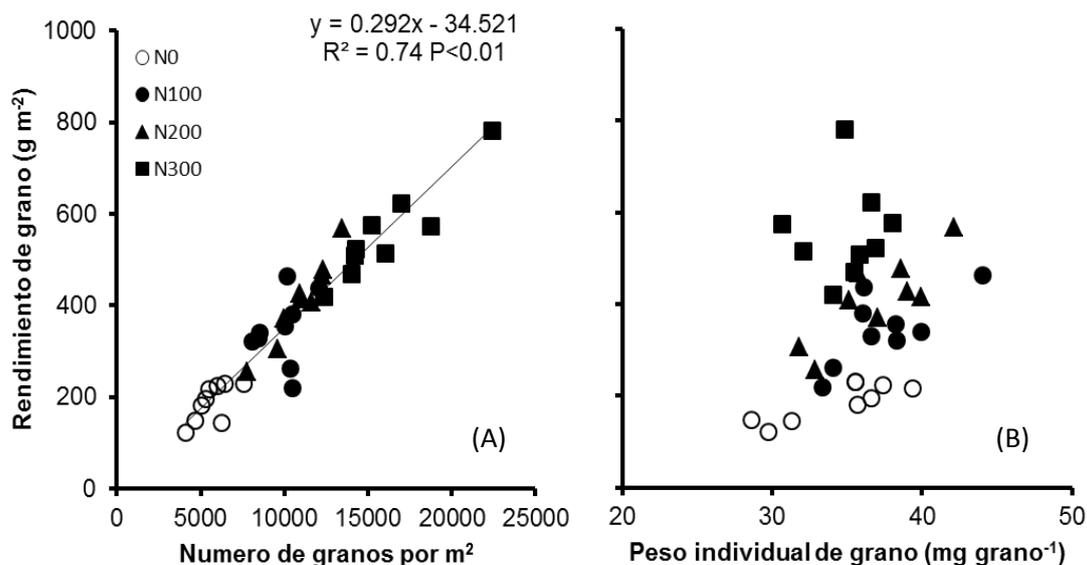


Figura 4. Relaciones entre el rendimiento de grano con el número de granos (A) y el peso individual de grano (B) de nueve cultivares de trigo evaluados bajo cuatro dosis de fertilización nitrogenada.

Referencias

- Cárcova, J., Abeledo, G., López Pereira, M., 2003. Análisis de la generación del rendimiento: crecimiento, partición y componentes. In: Producción de Granos. Bases funcionales para su manejo. Satorre et al. (eds.) Editorial Facultad de Agronomía Universidad de Buenos Aires, Argentina p: 75-95.
- Ferrise, R., Triossi, A., Stratonovitch, P., Bindi, M., Martre, P., 2010 Sowing date and nitrogen fertilisation effects on dry matter and nitrogen dynamics for durum wheat: an experimental and simulation study. *Field Crops Res.* 117,245-257
- Fischer, R.A., 2008. Improvements in wheat yield: Farrer, physiology and functional genomics. *Agric. Sci. NS* 1/08:6–18.
- Ortiz-Monasterio, J.I., Sayre, K.D., Rajaram, S., McMahon, M., 1997. Genetic progress in wheat yield and nitrogen use efficiency under four nitrogen rates. *Crop Sci.* 37, 898–904.
- Sayre, K.D., Rajaram, S., Fischer, R.A., 1997. Yield potential progress in short bread wheats in northwest Mexico. *Crop Sci.* 37, 36–42.
- Slafer G. A., J.L. Araus, R.A. Richards. 1999. Physiological traits that increase the yield potential of wheat. In: E.H. Satorre and G.A. Slafer (eds.) *Wheat. Ecology and Physiology of Yield Determination.* The Haworth Press. Inc. p: 379-401.

Estrategias de generación de rendimiento en líneas doble haploides de trigo seleccionadas para superar las 15 t ha⁻¹ de rendimiento

Daniela Bustos, Ahmed Hasan y Daniel Calderini

Introducción

La relación negativa entre número de granos y su peso sugiere que futuros aumentos del primero serían parcialmente compensados por reducciones en el segundo debido a que los granos más distales en la espiguilla tienen menor peso que los proximales (Duggan and Fowler, 2006). Sin embargo, no se han observado reducciones consistentes en el peso de granos proximales al aumentar el número de granos (Acreche y Slafer, 2006). Por lo tanto, si el peso de grano en posiciones específicas no es afectado por aumentos en el número de granos, la estrategia de cruzar genotipos con alto número de granos con otros de alto peso resulta válida para aumentar el rendimiento.

Objetivos

(i) Evaluar el rendimiento de grano de líneas dobles haploides (DH) derivadas de una cruce entre cultivares de alto número y alto peso de grano e (ii) identificar caracteres fisiológicos que expliquen las diferencias en rendimiento.

Materiales y métodos

Se realizaron dos experimentos a campo en la Estación Experimental de la Universidad Austral de Chile (39° 47' S, 73° 14' W, 19 m s.n.m.).

Experimento 1. (2008-2009, S1 y 2009 y 2010, S2): Se sembraron 106 líneas DH junto a sus parentales Bacanora y Weebill, registrándose los componentes fisiológicos y numéricos del rendimiento.

Experimento 2. (2010-2011): Se compararon las dos líneas de mayor rendimiento con Pandora e Invento, cultivares chilenos de alto potencial.

Resultados y discusión

El peso y el número de granos presentaron una leve relación negativa (Fig. 1), menor a la previamente reportada (Acreche y Slafer, 2006).

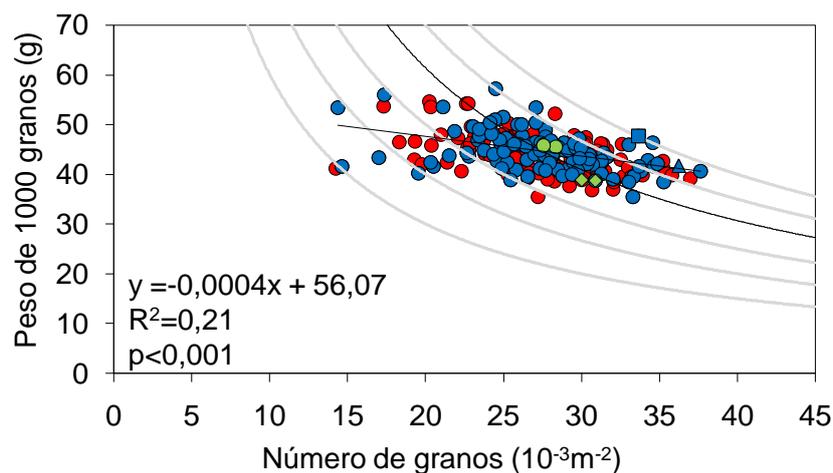


Figura 1. Relación entre el peso de 1000 granos y el número de granos para 106 líneas DH en S1 (círculos rojos) y S2 (círculos azules). Las líneas de mayor rendimiento se representan por un triángulo azul (S1) y un cuadrado azul (S2), las líneas parentales Bacanora y Weebill se muestran en rombos y círculos verdes para S1 y S2 respectivamente. Las isolíneas gris muestran rendimientos de 600, 800, 1000, 1400 y 1600 kg ha⁻¹. La isolínea negra representa 1127 kg ha⁻¹ (promedio de los parentales).

Las líneas DH de mayor rendimiento mostraron en un 23 y 31% mayor rendimiento que los parentales (dependiendo del año) y un promedio 41% mayor que los controles. Estos pueden ser explicados por aumentos de biomasa y número de granos (Tabla 1). A pesar del aumento de este último, no se observaron reducciones consistentes en el peso de 1000 granos.

Tabla 1. Rendimiento, biomasa, índice de cosecha (IC), número de granos (NG) y peso de 1000 granos (PMG) de las líneas de mayor y menor rendimiento en ambos años y valores promedio calculados para las líneas DH o los parentales.

Siembra	Gentipo	Rendimiento (g m ⁻²)	Biomasa (g m ⁻²)	IC (%)	NG (granos m ⁻²)	PMG (g)
S1	DH más alta	1506 a	2780 a	54 a	36224 a	41.6 ab
	DH más baja	589 c	1697 c	34 b	14239 c	41.2 b
	Promedio DH	1191 b	2399 b	50 a	27148 b	44.2 a
	Promedio cvs	1227 b	2335 b	53 a	29179 b	42.2 ab
S2	DH más alta	1607 a	3103 a	52 a	33634 a	47.7 a
	DH más baja	607 c	1664 c	37 b	14639 c	41.5 c
	Promedio DH	1214 b	2514 b	48 a	27301 b	44.7 b
	Promedio cvs	1227 b	2519 b	49 a	29240 ab	42.2 bc
	Genotipo (G)	***	***	***	***	***
	Temporada (S)	ns	***	***	ns	***
	GxS	ns	ns	ns	ns	***
	S.E.M.	75	102	2	1631	0.2

Tabla 2. Rendimiento, biomasa, índice de cosecha (IC), número de granos (NG) y peso de 1000 granos (PMG) para los genotipos seleccionados en Exp. 1 y para los controles Pandora e Invento.

Genotipo	Rendimiento (g m ⁻²)	Biomasa (g m ⁻²)	IC (%)	NG (granos m ⁻²)	PMG (g)
DH 28	1656 a	3573 a	47 ab	38829 a	42.7 b
DH 18	1524 a	2990 b	51 a	33502 a	45.5 ab
Pandora	1116 b	2684 b	41 c	23656 b	47.2 b
Invento	1075 b	2516 b	43 bc	20876 b	51.5 a
Genotipo (G)	**	*	**	***	**
S.E.M.	844	142	0.01	2338	1.1

Las líneas DH seleccionadas mostraron mayor rendimiento que los controles nacionales, i.e. en promedio 41% mayor que el promedio de los controles (Tabla 2) y mayor número de granos por espiga y EUR (Tabla 3).

Tabla 3. Espigas m⁻², granos espiga⁻¹, granos por unidad de MS espigas, radiación interceptada acumulada (IPARa) y eficiencia de uso de la radiación (EUR) para los genotipos seleccionados en Exp. 1 y para los controles Pandora e Invento.

Genotipo	Espigas m ⁻²	Granos espiga ⁻¹	Granos MS espiga ⁻¹ (g)	IPARa (MJ m ⁻²)	EUR (g MJ ⁻¹)
DH 28	702 a	56 a	136 a	915	4.0 a
DH 18	560 b	60 a	129 a	832	3.6 b
Pandora	587 ab	40 b	90 b	887	3.1 c
Invento	591 ab	35 b	86 b	932	2.8 c
Genotipo (G)	*	***	*	ns	*
S.E.M.	22	3	8	15	0.2

Consideraciones finales

El peso y el número de granos presentaron una leve relación negativa, menor a la previamente reportada. Las líneas DH de mayor rendimiento mostraron en un 23 y 31% mayor rendimiento que los parentales (dependiendo del año) y un promedio 41% mayor que los controles, explicados por aumentos de biomasa, EUR, número de granos y número de granos por unidad de biomasa en antesis.

Referencias

- Acreche, M.M., Slafer, G.A., 2006. Grain weight response to increases in number of grains in wheat in a Mediterranean area. *Field Crop Res.* 98,52-59.
- Duggan, B.L., Fowler, D.B., 2006. Yield structure and kernel potential of winter wheat on the Canadian prairies. *Crop Sci.* 46,1479-1487.

Respuesta del rendimiento de trigo a la baja densidad de siembra: Compensaciones entre los componentes del rendimiento

Daniela Bustos y Daniel Calderini

Introducción

El mejoramiento en trigo ha aumentado el índice de cosecha (IC) y el número de granos, mientras que la biomasa y el peso de granos han mostrado ser más estables (Fischer, 1985; Slafer et al., 1990; Slafer and Andrade, 1993; Calderini et al., 1999). El HI aún puede ser mejorado si se acepta un límite de 0.62 (Austin et al., 1980), considerando que los mejores genotipos muestran IC cercanos a 0.5 (Fischer, 2007; Acreche et al., 2009). Por lo tanto, incrementos de rendimiento asociados a mayores IC aún son posibles, pero podrían ser más difíciles de alcanzar que en el pasado (Gaju et al., 2009). Por esta razón, se espera que futuros aumentos en rendimiento estén más asociados a otros caracteres tales como biomasa o eficiencia de uso de la radiación, EUR (Calderini et al., 1997; Pedro et al., 2011), como se ha observado en las últimas décadas (Sadras and Lawson, 2011). Sin embargo, dado que la selección de genotipos en etapas tempranas en programas de mejoramiento se realiza a densidades inferiores a las utilizadas en siembras comerciales, la disponibilidad de recursos es distinta a la de siembras convencionales. Por lo tanto, es necesario estudiar si los caracteres fisiológicos que confieren mayor rendimiento son conservados entre densidades de planta para ser utilizados como indicadores de selección de genotipos promisorios.

Objetivos

(i) Caracterizar la respuesta del rendimiento y sus componentes a bajas densidades de siembra y (ii) determinar si existen compensaciones parciales o totales entre los componentes del rendimiento.

Materiales y métodos

Se realizó un experimento a campo en la Estación Experimental de la Universidad Austral de Chile (39° 47' S, 73° 14' W, 19 m s.n.m.).

Los tratamientos consistieron en cuatro genotipos de trigo primaveral: dos líneas doble haploides (DH 18 y DH 28), seleccionadas de una población originada a partir de un parental de alto peso y otro de bajo peso de granos; dos variedades Pandora-INIA e Invento-BAER, que corresponden a cultivares chilenos de alto potencial de rendimiento; dos densidades de siembra, 350 y 44 plantas m⁻², la primera con arreglo espacial convencional y la segunda con arreglo espacial cuadrado.

Se evaluaron los componentes numéricos del rendimiento y los determinantes fisiológicos del rendimiento (intercepción de radiación, IPARa y EUR).

Resultados y discusión

No se observaron efectos sobre el rendimiento ni sobre el número de granos m^{-2} (Tabla 1), aunque la biomasa se redujo ($p < 0.01$) y el IC aumenta ($p < 0.01$) en baja densidad.

La falta de respuesta del número de granos m^{-2} puede ser explicado porque las plantas en baja densidad presentaron mayor número de granos por espiga ($p < 0.001$) y mayor número de granos por unidad de biomasa de espigas en anthesis ($p < 0.001$), lo cual compensó la reducción en el número de espigas m^{-2} ($p < 0.001$, Tabla 2).

Tabla 1. Rendimiento y sus componentes para los genotipos DH 28, DH 18, Invento y Pandora, sembrados a 350 y 44 plantas m^{-2} .

Densidad	Genotipo	Rendimiento ($g\ m^{-2}$)	Biomasa ($g\ m^{-2}$)	IC (%)	NG (granos m^{-2})	PMG (g)
350	DH 28	1656 a	3573 a	47 cd	38829 a	42.6 d
	DH 18	1524 ab	2990 ab	51 ab	33502 ab	45.5 cd
	Pandora	1116 cd	2684 bc	41 de	23656 cd	47.1 bc
	Invento	1075 d	2516 bc	43 de	20876 d	51.5 a
44	DH 28	1440 abc	2767 b	52 ab	32027 b	44.9 cd
	DH 18	1327 bcd	2504 bc	53 a	30119 bc	43.9 cd
	Pandora	1048 d	2141 c	49 bc	22447 d	46.7 c
	Invento	1182 cd	2585 bc	46 cd	23533 d	50.2 ab
Densidad (D)		ns	**	**	ns	ns
Genotipo (G)		**	*	*	***	**
DxG		ns	ns	ns	ns	ns

Tabla 2. Granos MS espigas $^{-1}$, granos espiga $^{-1}$, espigas m^{-2} y EUR para DH 28, DH 18, Pandora e Invento, sembrados a 350 y 44 plantas m^{-2} .

Densidad	Genotipo	Granos MS espiga $^{-1}$ (g)	Granos espiga $^{-1}$	Espigas m^{-2}	EUR ($g\ MJ^{-1}$)
350	DH 28	129 b	56 cd	702 a	4.0 b
	DH 18	136 b	60 bcd	560 bc	3.6 bc
	Pandora	90 b	40 f	587 b	3.1 cd
	Invento	86 b	35 f	591 b	2.8 d
44	DH 28	248 a	73 a	442 d	4.8 a
	DH 18	220 a	70 ab	427 de	4.8 a
	Pandora	116 b	66 abc	341 e	3.4 cd
	Invento	125 b	50 de	472 cd	4.1 b
Densidad (D)		***	***	***	***
Genotipo (G)		***	**	*	**
DxG		ns	ns	ns	ns

Las plantas a baja densidad mostraron menor intercepción de radiación, alcanzando intercepción completa en forma más tardía o en otros casos, sin

llegar a intercepción completa (Fig. 1). Por otra parte, la EUR aumentó ($p < 0.001$) en baja densidad (Tabla 2). No se observó interacción entre densidad de siembra y genotipo para ninguna de las variables evaluadas.

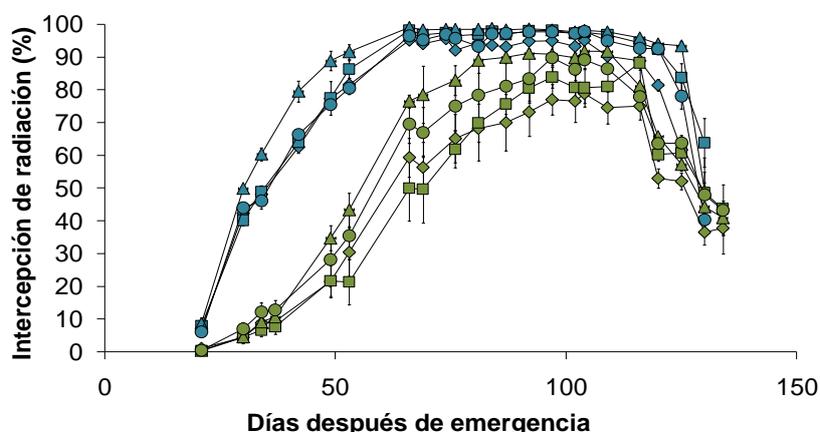


Figura 1. Intercepción de radiación durante el ciclo de cultivo para los genotipos DH 28 (cuadrados), DH 18 (rombos), Invento (triángulos) y Pandora (círculos). Símbolos cerrados azules representan 350 plantas m^{-2} y los verdes representan 44 plantas m^{-2} .

Consideraciones finales

La reducción de la densidad de siembra no afectó el rendimiento ni el número de granos. En tanto que la biomasa se redujo y aumentó el IC. Las plantas a baja densidad mostraron mayor EUR. No se observó interacción entre densidad de siembra y genotipo para ninguna de las variables evaluadas, sugiriendo que la selección por mayor rendimiento, biomasa, IC, EUR y número de granos en etapas tempranas es una estrategia eficiente para identificar las líneas con mejor comportamiento.

Referencias

- Acreche, M.M., Briceno-Felix, G., Sanchez, J.A.M., Slafer, G.A., 2009. Radiation interception and use efficiency as affected by breeding in Mediterranean wheat. *Field Crops Res.* 110, 91-97.
- Austin, R.B., Bingham, J., Blackwell, R.D., Evans, L.T., Ford, M.A., Morgan, C.L., Taylor, M., 1980. Genetic improvements in winter wheat yields since 1900 and associated physiological changes. *J. Agric. Sci.* 94, 675-689.
- Calderini, D.F., Dreccer, M.F., Slafer, G.A., 1997. Consequences of breeding on biomass, radiation interception and radiation-use efficiency in wheat. *Field Crops Res.* 52, 271-281.
- Calderini, D.F., Reynolds, M.P., Slafer, G.A., 1999. Genetic Gains in Wheat Yield and Associated Physiological Changes During the Twentieth Century. In: Satorre, E., Slafer, G. (ed.). *Wheat: ecology and physiology of yield determination* The Haworth Press Inc. NY., 503
- Fischer, R.A., 1985. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *J. Agric. Sci.* 105, 447-461.
- Fischer, R.A., 2007. Paper presented at international workshop on increasing wheat yield potential, CIMMYT, Obregon, Mexico, 20-24 March 2006. Understanding the physiological basis of yield potential in wheat. *J. Agric. Sci.* 145, 99-113.

- Gaju, O., Reynolds, M.P., Sparkes, D.L., Foulkes, M.J., 2009. Relationships between Large-Spike Phenotype, Grain Number, and Yield Potential in Spring Wheat. *Crop Sci.* 49, 961-973.
- Pedro, A., Savin, R., Habash, D., Slafer, G., 2011. Physiological attributes associated with yield and stability in selected lines of a durum wheat population. *Euphytica* 180, 195-208.
- Sadras, V.O., Lawson, C., 2011. Genetic gain in yield and associated changes in phenotype, trait plasticity and competitive ability of South Australian wheat varieties released between 1958 and 2007. *Crop and Pasture Sci.* 62, 533-549.
- Slafer, G.A., Andrade, F.H., 1993. Physiological attributes related to the generation of grain-yield in bread wheat cultivars released at different eras. *Field Crops Res.* 31, 351-367.
- Slafer, G.A., Andrade, F.H., Satorre, E.H., 1990. Genetic-improvement effects on pre-anthesis physiological attributes related to wheat grain-yield. *Field Crops Res.* 23, 255-263.

Dinámica del agua y la materia seca de los granos de trigo y lupino en respuesta a reducciones de fuente en diferentes momentos durante el llenado de granos

Claudia I. Harcha y Daniel F. Calderini

Introducción

Las dinámicas del agua y la materia seca de los granos han mostrado diferencias entre cereales y leguminosas de grano (Saini y Westgate, 2000, Munier-Jolain et al., 1997). Se ha hipotetizado que estas diferencias podrían explicar las respuestas del peso de los granos a distintas relaciones fuente-destino durante el llenado de los granos entre estos grupos de cultivos (Borrás et al., 2004). Esta hipótesis tiene como supuesto fisiológico subyacente que la determinación del peso del grano se asociaría con el máximo contenido hídrico del grano (Sofield et al., 1977, Swank et al., 1987).

Objetivos

(i) Evaluar la sensibilidad de peso del grano (PG) frente a reducciones de la fuente, sombreando el canopeo, en diferentes momentos durante el llenado del grano de trigo y lupino y (ii) evaluar la relación entre peso del grano y máximo contenido hídrico (MCH) del grano en estos cultivos

Materiales y métodos

En dos experimentos (2004/5, Exp. 1 y 2005/6, Exp. 2) se evaluó dos trigos primaverales (Otto y Huayun) y dos lupinos de hoja angosta (Belara y Quilinoch) en el Campo Experimental de Universidad de Austral Chile en Valdivia (39° 47' S, 73° 14' W, 19 m s.n.m.). En el Exp. 1 los trigos fueron sembrados el 25 de Agosto y los lupinos el 27 de Julio. En el Exp. 2 las siembras de trigo fueron el 26 de Septiembre y las de lupino el 24 de agosto. Los desfases en las fechas de siembra entre trigo y lupino fueron para superponer los períodos de llenado de granos de los cultivos para evitar contrastantes condiciones ambientales durante los tratamientos, considerando que el ciclo de cultivo de lupino es más largo que el de trigo.

En Exp. 1 los tratamientos consistieron en dos relaciones fuente-destino: control sin modificar la relación fuente-destino (C); baja relación fuente-destino durante todo el llenado de granos (S_{All}). En Exp. 2 se evaluó cuatro tratamientos de relación fuente-destino, los mismos del Exp. 1 más dos nuevos tratamientos: reducción fuente-destino desde el inicio hasta la mitad del período de llenado de granos (S_{1st}) y desde la mitad del llenado de granos hasta madurez (S_{2nd}). Las reducciones fuente-destino se hicieron sombreando las parcelas con redes negras que interceptaban el 90% de la radiación incidente.

Durante el llenado de granos se midió peso seco y fresco de los granos para determinar peso seco (PG) y contenido hídrico de los granos (MCH).

Resultados y discusión

Los tratamientos fuente-destino redujeron el PG ($p \leq 0.05$) en ambos cultivos. Dependiendo del Exp. el PG de trigo se redujo entre un 50 y un 66% en el S_{All} ; mientras que en lupino este tratamiento redujo el PG entre un 55 y un 93% (Fig. 1). En el tratamiento S_{1st} el PG de trigo se redujo c.a. 45% en ambos cultivares; mientras que el PG de lupino disminuyó 90% y 24% en Quilinock y Belara, respectivamente. En S_{2nd} las reducciones del PG fueron 13 y 28% en trigo y lupino, respectivamente (Fig. 1).

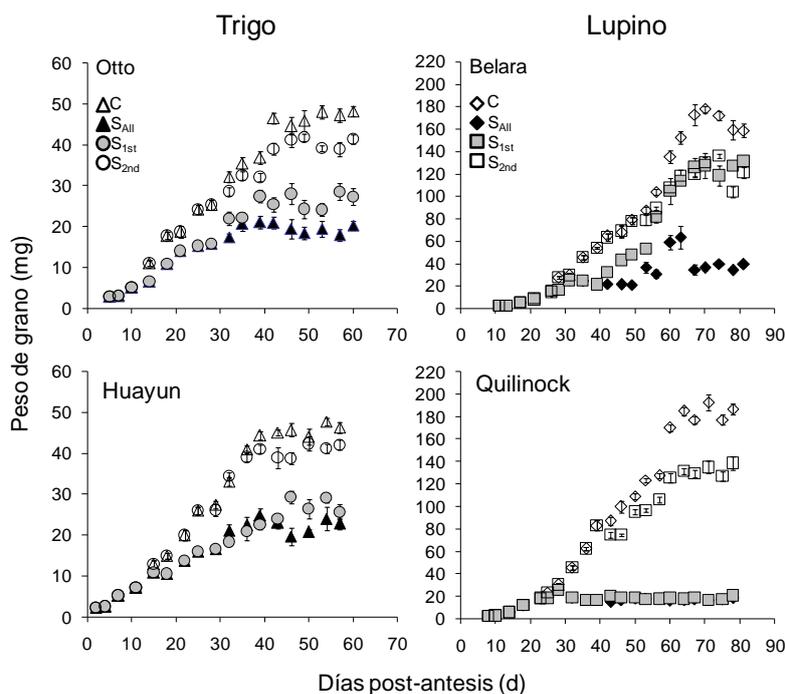


Figura 1. Peso de granos durante el período de llenado de granos (días post-antesis) en los tratamientos C (Δ , \diamond), S_{All} (\blacktriangle , \blacklozenge), S_{1st} (\odot , \blacksquare) y S_{2nd} (\circ , \square) en dos cultivares de trigo y lupino durante el Exp. 2.

Al igual que en la dinámica del PG (Fig. 1), los tratamientos fuente-destino afectaron la dinámica de agua de los granos en trigo y lupino (Fig. 2) y el MCH ($p \leq 0.001$). En ambos cultivos, en S_{All} y S_{1st} no se mantuvo la dinámica del agua y la materia seca de los granos mostrada en los testigos.

El MCH en trigo y lupino se alcanzó cuando se había acumulado un 29 y 31%, respectivamente, del PG.

En madurez fisiológica el contenido hídrico de los granos de lupino (63%) fue mayor que el de los granos de trigo (41%).

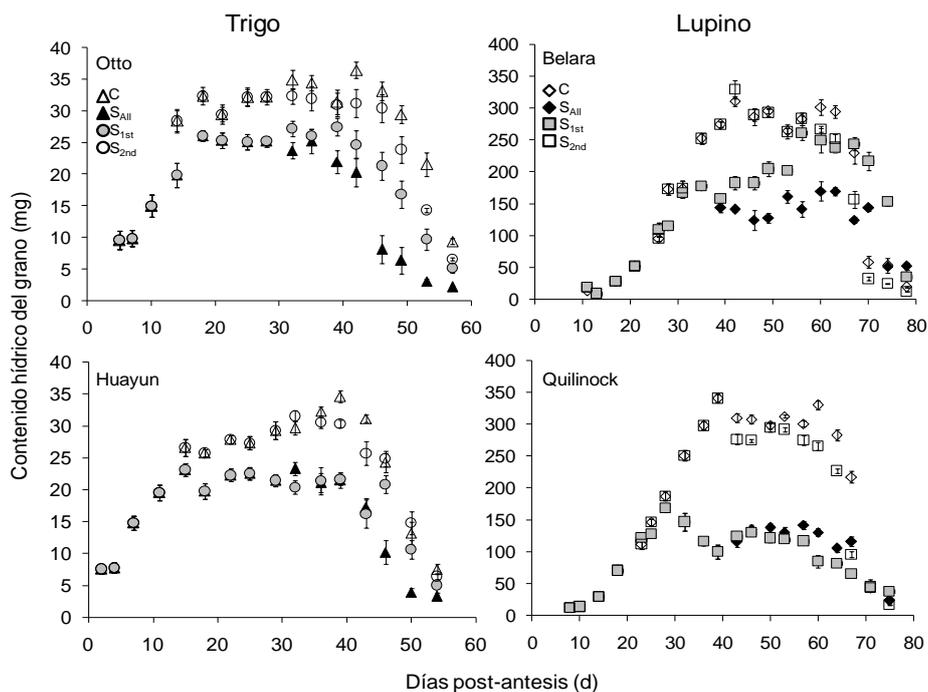


Figura 2. Contenido hídrico de los granos durante el llenado de granos (días post-antesis) en los tratamientos C (Δ , \diamond), S_{All} (\blacktriangle , \blacklozenge), S_{1st} (\odot , \blacksquare) y S_{2nd} (\circ , \square) en dos cultivares de trigo y lupino durante el Exp. 2.

El PG de trigo fue explicado por el MCH en el tratamiento control y en S_{2nd}. En los tratamientos S_{All} y S_{1st} esta relación no se mantuvo (Fig. 3); mientras que en lupino el PG y el MCH mostraron una fuerte asociación a través de todos los tratamientos de relación fuente-destino evaluados (Fig. 3).

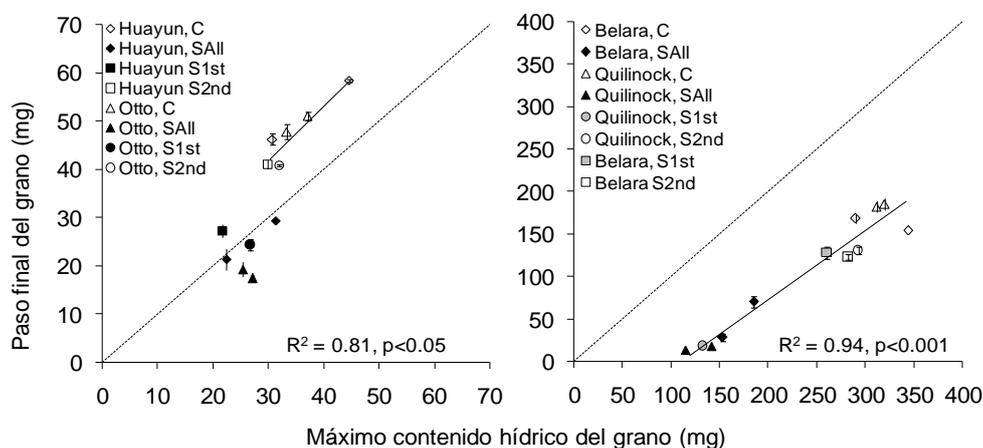


Figura 3. Peso final de granos en función del máximo contenido hídrico de los granos a través de los tratamientos C (Δ , \diamond), S_{All} (\blacktriangle , \blacklozenge), S_{1st} (\odot , \blacksquare) y S_{2nd} (\circ , \square) en dos cultivares de trigo (fig. izquierda) y lupino (fig. derecha) durante los Exps. 1 y 2.

Consideraciones finales

El PG de lupino fue más sensible que el PG de trigo frente a distintas relaciones fuente-destino.

Las mayores disminuciones en el PG de trigo y lupino se observaron cuando la relación fuente-destino se redujo temprano durante el llenado de granos, i.e.

desde el inicio del período de llenado de granos hasta madurez (S_{All}) y hasta la primera mitad del llenado de granos (S_{1st}).

La sensibilidad del PG de trigo a diferentes reducciones de fuente durante el llenado de granos fue similar entre cultivares, mientras que en lupino dependió del cultivar evaluado. Por ejemplo, en S_{1st} , Otto y Huayun para trigo y Belara para lupino mostraron habilidad para recuperar el PG al mejorar la disponibilidad de asimilados.

No se mantuvieron las dinámicas del agua y la materia seca de los granos de trigo y lupino cuando la relación fuente-destino disminuyó en etapas tempranas del período de llenado de granos, por lo que el MCH no fue un buen estimador del PG bajo este tipo de estrés.

Agradecimientos

A Marcelo Labra, Luis Vargas (Q.E.P.D.), Manuel Muñoz, Patricio Sandaña y al personal del Laboratorio de Cultivos de Tejidos (IPSVE-UACH) por el soporte técnico.

A Fundación Andes por el aporte económico para los experimentos y beca de mantención para Claudia I. Harcha.

Referencias

- Borrás, L., Slafer, G.A., Otegui, M.E., 2004. Seed dry weight response to source-sink manipulations in wheat, maize and soybean: a quantitative reappraisal. *Field Crop Res.* 86, 131-146.
- Munier-Jolain, N.M., Ney, B., Duthion, C., 1997. Analysis of sequential reproductive development in white lupin cv. Lublanc. *Aust. J. Agr. Res.* 48, 913-922.
- Saini, H.S., Westgate, M.E., 2000. Reproductive development in grain crops during drought. *Adv. Agron.* 68, 58-96.
- Sofield, I., Evans, L.T., Cook, M.G., Wardlaw, I.F., 1977. Factors influencing the rate and duration of grain filling in wheat. *Aust. J. Plant Physiol.* 4, 785-797.
- Swank, J.C., Egli, D.B., Pfeiffer, T.W., 1987. Seed growth characteristics of soybean genotypes differing in duration of seed fill. *Crop Sci.* 27, 85-89.

Optimización de dosis de enmienda calcárea y efectos sobre el rendimiento y calidad de grano de triticale invernal cv. Faraón-INIA en Andisoles de la Región de la Araucanía

Ricardo Campillo, Claudio Jobet y Carlos Toro

Introducción

Existen varios factores que condicionan la magnitud e intensidad del proceso de acidificación de los suelos, pero la principal ha sido el uso cada vez más prolongado de fertilizantes de reacción ácida en el suelo, especialmente los amoniacales, que afectan tanto el pH del suelo como la pérdida de cationes básicos. La intensidad de la acidificación está regulada por la cantidad de fertilizante aplicado y por el manejo del suelo. La decisión de encalar dependerá de las características del suelo y de la especie o variedad de cultivo. Los objetivos de este estudio fueron: i.) Evaluar el efecto de dosis de CaCO_3 sobre el rendimiento y calidad de grano de triticale en un Andisol acidificado y ii.) Estimar las dosis óptimas físicas (DOF) y económicas (DOE) de enmienda calcárea para la producción de triticale en un Andisol sometido a una rotación de cultivos anuales.

Materiales y métodos

El experimento se realizó en la temporada 2010-2011, bajo condiciones de secano, en un Andisol serie Vilcún, sector de San Carlos, comuna de Vilcún, provincia de Cautín. Se utilizó el cv. de triticale Faraón-INIA, sembrado en una dosis de 200 kg ha^{-1} y a una distancia de 20 cm entre hileras, el 30 de junio de 2010. La cosecha del experimento se realizó el 11 de febrero de 2011. La semilla utilizada fue desinfectada con Benlate (300 g) y Azomark (250 cc) por 100 kg. Previo al establecimiento del experimento se colectaron muestras de suelo a 0-20 cm de profundidad para su caracterización química.

Se utilizó un diseño de bloques al azar con tres repeticiones, con parcelas de 2 por 5 m. Los tratamientos evaluados fueron dosis equivalentes a: 0, 500, 1000, 2000 y 3000 kg ha^{-1} de CaCO_3 puro, como cal Soprocal. La enmienda fue aplicada con las labores de siembra el 11 de mayo de 2010.

A la siembra del experimento, los tratamientos recibieron una fertilización base de 20 kg ha^{-1} de N como nitromag, 120 kg ha^{-1} de P_2O_5 , a la forma de superfosfato triple, 1 kg ha^{-1} de boro como boronatrocalcita y 2 kg ha^{-1} de Zn como sulfato de zinc, todos localizados en el surco. También se aplicó al voleo 100 kg ha^{-1} de K_2O (KCl), 50 kg ha^{-1} de S y 40 kg ha^{-1} de MgO como sulpomag.

El 28 de julio (Z_{20}), se complementó la fertilización base anual con 50 kg ha^{-1} de K_2O (muriato de potasio) en todos los tratamientos. También se aplicó 90 kg ha^{-1} de N como urea. Finalmente, en el estado de fines de macolla (Z_{28}) se complementó la parcialización de N con 110 kg ha^{-1} de N como urea. De esta manera, el cultivo recibió una dosis anual de 220 kg ha^{-1} de N.

Inmediatamente después de la siembra, se controlaron malezas gramíneas de preemergencia. El 15 de octubre (Z_{30}), se aplicó el regulador de crecimiento

Cycocel (3 l ha⁻¹). El 25 de octubre (Z₃₁), se controlaron preventivamente enfermedades foliares.

A la cosecha (11 de febrero de 2011), se determinó el rendimiento de grano (14% de humedad). Los datos de rendimiento y peso hectolitro se sometieron al análisis de varianza (ANDEVA) y las medias de tratamientos al test de Tukey ($P \leq 0,05$) en los casos en que correspondía (SAS Institute, 1990).

Mediante el ajuste de un polinomio de segundo grado a los resultados de rendimientos de grano del triticale Faraón-INIA, fue posible establecer las dosis óptimas físicas (DOF) de encalado derivadas del experimento y su correspondiente rendimiento máximo de producción de grano (Rebolledo, 1999, Campillo et al., 2011). Asumiendo el costo por unidad de cal y el valor por tonelada de triticale, se calculó la relación de precios insumo/producto y fue posible estimar las dosis óptimas económicas (DOE) de cal y su respectivo rendimiento óptimo económico para producción de grano. Se utilizó el criterio económico de capital ilimitado con la restricción de una tasa de retorno mínimo de 50% (Volke, 1982).

Resultados y discusión

La caracterización química del suelo del experimento indica un adecuado nivel de P disponible, y fuertes limitaciones de acidificación de acuerdo a los parámetros de acidez (pH agua: 5.5, Al intercambio: 0.85 cmol_c kg⁻¹, saturación de Aluminio: 14 %). El precultivo del suelo fue avena para grano y el suelo se ha manejado con una rotación intensiva de cultivos con uso mayoritario de fertilizantes de reacción ácida como urea.

El ANDEVA mostró efecto significativo de la dosis de encalado sobre el rendimiento de grano del triticale Faraón-INIA, con un bajo coeficiente de variación (C.V.) de 2.9 %. Los rendimientos de grano de la temporada (Tabla 1), fueron crecientes en función de la dosis de encalado y fluctuaron entre 103 qqm ha⁻¹ (Testigo sin cal) y 118.8 qqm ha⁻¹ (2000 kg ha⁻¹ de cal). De acuerdo al test de Tukey, la aplicación de 2000 kg ha⁻¹ de cal es superior solamente al tratamiento testigo sin cal, sin detectar efecto de dosis de cal, a pesar del diferencial de rendimiento observado.

La forma correcta de comparar niveles cuantitativos de una variable es a través del ajuste de una función de respuesta. Para establecer las dosis óptimas físicas y económicas derivadas del experimento, se ajustó un polinomio de segundo grado a los resultados de rendimientos de grano del triticale Faraón-INIA: $Y = a + bX + cX^2$ donde Y es el rendimiento en qqm ha⁻¹; X es la dosis de CaCO₃ kg ha⁻¹ y a, b y c son parámetros de la regresión.

En la Tabla 1 se presentan los valores de rendimiento del experimento y los valores ajustados a un modelo de regresión cuadrático. La ecuación ajustada fue:

$$Y = 103.56 + 17.6227X - 4.63646X^2 \quad (R^2 = 0.9723)$$

De esta manera, fue posible estimar la dosis óptima física (DOF) de producción de triticale. De acuerdo a este ajuste cuadrático, la DOF fue de 1.9 ton ha⁻¹ de CaCO₃, alcanzando un rendimiento máximo de 120.3 qqm ha⁻¹.

Asumiendo un costo por unidad de cal (Soprocal) de \$50 y un valor de \$16000 por qqm de triticale, fue posible determinar la dosis óptima económica (DOE) de producción de triticale. Se utilizó el criterio económico de capital ilimitado. En este caso, la DOE estimada fue de 1.39 ton ha⁻¹ de CaCO₃, alcanzando un rendimiento máximo de 119.1 qqm ha⁻¹.

También se realizó un ajuste cuadrático de la variación de la saturación de Al por efecto de la aplicación de la enmienda calcárea (Tabla 2). Así fue posible establecer las dosis de cal que optimizan la respuesta productiva del trigo. La ecuación ajustada en este caso fue:

$$Y = 22.67 - 7.3904 X + 0.7479744 X^2 \quad (R^2 = 0.9987)$$

Tabla 1. Efecto del encalado en el rendimiento de grano del triticale cv. Faraón-INIA. San Carlos, 2010-2011.

Tratamiento	Dosis N Kg ha ⁻¹	Dosis P ₂ O ₅ Kg ha ⁻¹	Dosis CaCO ₃ Kg ha ⁻¹	Rendimiento qqm ha ⁻¹	Rendimiento qqm ha ⁻¹ *
1	220	120	0	103.1c	103.5
2	220	120	500	111.4abc	111.2
3	220	120	1000	117.9ab	116.6
4	220	120	2000	118.8a	120.2
5	220	120	3000	115.2ab	114.7

*: Valores según ajuste cuadrático

Medias con letras diferentes indican diferencias significativas (P < 0,05) según la Prueba de Tukey.

Tabla 2. Evolución de los parámetros químicos del suelo por efecto de la enmienda calcárea a la cosecha del triticale cv. Faraón-INIA. San Carlos, 11 de febrero de 2011.

CaCO ₃ kg ha ⁻¹	Ca interc. cmol ₊ kg ⁻¹	Al interc. cmol ₊ kg ⁻¹	CICE cmol ₊ kg ⁻¹	Saturación de Al % *	Rendimiento qqm ha ⁻¹ *
0	3.83	1.42	6.25	22.8	103.1
1000	4.60	1.05	6.75	15.6	117.9
2000	4.80	0.75	6.68	11.3	118.8
3000	6.27	0.56	7.94	7.1	115.2
DOF 1900				11.2	120.3
DOE 1390				13.6	119.1
SIRSD 3200				6.5	112.5

*: Valores según ajuste cuadrático

El encalado aplicado en los tratamientos generó cambios en los parámetros relativos a la acidez del suelo, según el muestreo realizado luego de la cosecha (Tabla 2). Se observa claramente que el pH en agua y CaCl₂, Ca de intercambio y la CICE se incrementaron en función de la dosis de CaCO₃ mientras que los valores de Al de intercambio y de saturación de Al disminuyeron en forma exponencial, llegando a valores bajos con la aplicación de 3.000 kg ha⁻¹. Cabe destacar que en esta oportunidad el tratamiento Testigo

presentó una condición de acidez superior a la inicial, lo que grafica la acidificación natural del suelo que normalmente ocurre en verano influenciada por las altas temperaturas y bajo contenido de humedad del suelo en el período de cosecha.

De acuerdo al ajuste cuadrático de los resultados de rendimientos de grano del triticale Faraón-INIA, la DOF de encalado que maximiza el rendimiento fue de 1.9 ton ha⁻¹ de CaCO₃, con un rendimiento de 120.3 qqm ha⁻¹ y una reducción de la saturación de Al a 11%, a la cosecha del cultivo.

La DOE de encalado que maximiza la producción de triticale fue de 1.39 ton ha⁻¹ de CaCO₃, con un rendimiento de 119.1 qqm ha⁻¹. Ello corresponde aproximadamente a 13.6% de saturación de Al en el período de cosecha. En caso que se considere como nivel crítico de selección del efecto corrector de la enmienda calcárea una saturación de Al de 6.5% (criterio cercano al SIRSD-Sustentable), el encalado debería ser de 3.2 ton ha⁻¹ de CaCO₃, con una producción de 112.5 qqm ha⁻¹. No fue posible usar el criterio de 5 % de saturación de Al puesto que genera un requerimiento de encalado que supera el rango de la curva de cal evaluada.

La eficiencia de uso del encalado (qqm de grano por ton de CaCO₃ aplicada), correspondiente a la DOE (1.39 ton ha⁻¹) estimada en el experimento (Cuadro 2), alcanzó a 11.2 qqm de grano de triticale.

Tabla 3. Efecto de dosis de enmienda en el peso hectolitro de triticale cv Faraón-INIA. San Carlos, 2010-2011.

Tratamiento	Dosis P ₂ O ₅ Kg ha ⁻¹	Dosis CaCO ₃ Kg ha ⁻¹	Peso hectolitro kg hL ⁻¹
1	120	0	75.4a
2	120	500	74.9a
3	120	1000	74.9a
4	120	2000	74.6a
5	120	3000	74.1a

Medias con letras diferentes indican diferencias significativas ($P < 0,05$) según la Prueba de Tukey.

En relación al efecto del encalado sobre algunos parámetros de calidad del grano de triticale, se observó que no hubo efecto de la dosis de aplicación de enmienda calcárea sobre el peso hectolitro, bajo las condiciones del experimento de campo.

Los resultados de este experimento confirman que el cv. de triticale Faraón-INIA presenta una tolerancia importante a los problemas de acidificación de Andisoles del valle central de la Región de La Araucanía.

Literatura citada

Campillo, R., Hirzel, J. y C. Jobet., 2011. Fertilización del Cultivo de Trigo Harinero. p.11-79. In J. Hirzel (ed.). Fertilización de Cultivos en Chile. Colección Libros INIA

- Nº28. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Quilamapu, Chillán, Chile.
- Rebolledo, H., 1999. Estimación de modelos de regresión a experimentos de fertilización y obtención de dosis óptimas económicas de insumos agrícolas. 55 p. Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Suelos, Chapingo, México.
- SAS Institute, 1990. SAS/STAT user's guide: statistic. Versión 6. 4th ed. SAS Institute, Cary, North Carolina, USA.
- Volke, H.V., 1982. Optimización de insumos de la producción en la agricultura. 61 p. Colegio de Postgraduados, México D.F., México.

Optimización de dosis de enmienda calcárea y efectos sobre el rendimiento y calidad de grano de trigo invernal cv. Maxwell-INIA en Andisoles de la Región de la Araucanía

Ricardo Campillo, Claudio Jobet y Carlos Toro

Introducción

Se ha establecido que la agricultura intensiva, muy extractiva y sin reposición de bases, unido a la utilización masiva de fertilizantes de reacción ácida, ha agudizado y acelerado la manifestación de la acidificación natural en los suelos en Chile. El encalado consiste en agregar al suelo compuestos de Ca o de Ca y Mg que sean capaces de reducir la acidez e incrementar el pH. El encalado dependerá de las características del suelo y del requerimiento de la especie o variedad de cultivo. Los objetivos de este estudio fueron: i.) Evaluar el efecto de dosis de CaCO_3 sobre el rendimiento y calidad de grano de trigo en un Andisol acidificado y ii.) Estimar las dosis óptimas físicas (DOF) y económicas (DOE) de enmienda calcárea para la producción de trigo en un Andisol sometido a una rotación de cultivos anuales.

Materiales y métodos

El experimento se realizó en la temporada 2010-2011, bajo condiciones de secano, en un Andisol serie Vilcún, sector de San Carlos, comuna de Vilcún, provincia de Cautín. Se utilizó el cv. de trigo Maxwell-INIA, sembrado en una dosis de 200 kg ha^{-1} y a una distancia de 20 cm entre hileras, el 29 de junio de 2010. La cosecha del experimento se realizó el 11 de febrero de 2011. La semilla utilizada fue desinfectada con Benlate (300 g) y Azomark (250 cc) por 100 kg. Previo al establecimiento del experimento se colectaron muestras de suelo a 0-20 cm de profundidad para su caracterización química.

Se utilizó un diseño de bloques al azar con tres repeticiones, con parcelas de 2 por 5 m. Los tratamientos evaluados fueron dosis equivalentes a: 0, 500, 1.000, 2.000 y 3.000 kg ha^{-1} de CaCO_3 puro, como cal Soprocal. La enmienda fue aplicada con las labores de presembrado el 11 de mayo de 2010.

A la siembra del experimento, los tratamientos recibieron una fertilización base de 20 kg ha^{-1} de N como nitromag, 120 kg ha^{-1} de P_2O_5 , a la forma de superfosfato triple, 1 kg ha^{-1} de boro como boronatrocalcita y 2 kg ha^{-1} de Zn como sulfato de zinc, todos localizados en el surco. También se aplicó al voleo 100 kg ha^{-1} de K_2O (KCl), 50 kg ha^{-1} de S y 40 kg ha^{-1} de MgO como sulphomag.

El 28 de julio (Z_{20}), se complementó la fertilización base anual con 50 kg ha^{-1} de K_2O (muriato de potasio) en todos los tratamientos. También se aplicó 90 kg ha^{-1} de N como urea. Finalmente, en el estado de fines de macolla (Z_{28}) se complementó la parcialización de N con 110 kg ha^{-1} de N como urea. De esta manera, el cultivo recibió una dosis anual de 220 kg ha^{-1} de N.

Inmediatamente después de la siembra, se controlaron gramíneas de preemergencia. El 15 de octubre (Z_{30}), se utilizó el regulador de crecimiento Cycocel (3 L ha^{-1}). A partir de octubre (Z_{31}), se controló preventivamente enfermedades foliares.

A la cosecha (11 de febrero de 2011), se determinó el rendimiento de grano (14% de humedad). Los datos de rendimiento y peso hectolitro se sometieron al análisis de varianza (ANDEVA) y las medias de tratamientos al test de Tukey ($p \leq 0,05$) en los casos en que correspondía (SAS Institute, 1990).

Mediante el ajuste de un polinomio de segundo grado a los resultados de rendimientos de grano del trigo Maxwell-INIA, fue posible establecer las dosis óptimas físicas (DOF) de encalado derivadas del experimento y su correspondiente rendimiento máximo de producción de grano (Rebolledo, 1999, Campillo et al., 2011). Asumiendo el costo por unidad de cal y el valor por tonelada de trigo, se calculó la relación de precios insumo/producto y fue posible estimar las dosis óptimas económicas (DOE) de cal y su respectivo rendimiento óptimo económico para producción de grano. Se utilizó el criterio económico de capital ilimitado con la restricción de una tasa de retorno mínimo de 50% (Volke, 1982).

Resultados y discusión

La caracterización química del suelo del experimento indicó un adecuado nivel de P disponible Olsen (20 ppm), y fuertes limitaciones de acidificación de acuerdo a los parámetros de acidez (pH agua: 5.5, Al intercambio: 0.85 cmol₊ kg⁻¹, saturación de Aluminio: 14 %). El precultivo del suelo fue avena para grano y el suelo se ha manejado con una rotación intensiva de cultivos con uso mayoritario de fertilizantes de reacción ácida como urea.

El ANDEVA mostró efecto significativo de la dosis de encalado sobre el rendimiento de grano del trigo Maxwell-INIA, con un bajo coeficiente de variación (C.V.) de 4.4 %. Los rendimientos de grano de la temporada (Tabla 1), fluctuaron entre 85.3 qqm ha⁻¹ (Testigo sin cal) y 104.4 qqm ha⁻¹ (2000 kg ha⁻¹ de cal). De acuerdo al test de Tukey, hubo efecto de dosis de encalado, donde las mayores dosis de cal fueron superiores a las dosis bajas.

La forma correcta de comparar niveles cuantitativos de una variable es a través del ajuste de una función de respuesta. Para establecer las dosis óptimas físicas y económicas derivadas del experimento, se ajustó un polinomio de segundo grado a los resultados de rendimientos de grano del trigo Maxwell-INIA: $Y = a + bX + cX^2$ donde Y es el rendimiento en qqm ha⁻¹; X es la dosis de CaCO₃ kg ha⁻¹ y a, b y c son parámetros de la regresión.

En la tabla 1 se presentan los valores de rendimiento del experimento y los valores ajustados a un modelo de regresión cuadrático. La ecuación ajustada fue:

$$Y = 83.18 + 15.1707 X - 2.84605X^2 \quad (R^2 = 0.9303)$$

De esta manera, fue posible estimar la dosis óptima física (DOF) de producción de trigo. De acuerdo a este ajuste cuadrático, la DOF fue de 2.67 ton ha⁻¹ de CaCO₃, alcanzando un rendimiento máximo de 103.4 qqm ha⁻¹.

Asumiendo un costo por unidad de cal (Soprocal) de \$50 y un valor de \$16000 por qqm de trigo, fue posible determinar la dosis óptima económica (DOE) de producción de trigo. Se utilizó el criterio económico de capital ilimitado. En este caso, la DOE estimada fue de 1.84 ton ha⁻¹ de CaCO₃, alcanzando un rendimiento máximo de 101.5 qqm ha⁻¹.

Tabla 1. Efecto del encalado en el rendimiento de grano del trigo cv. Maxwell-INIA. San Carlos, 2010-2011.

Tratamiento	Dosis N kg ha ⁻¹	Dosis P ₂ O ₅ kg ha ⁻¹	Dosis CaCO ₃ kg ha ⁻¹	Rendimiento qqm ha ⁻¹	Rendimiento qqm ha ⁻¹ *
1	220	120	0	85.3c	83.2
2	220	120	500	86.8c	90.1
3	220	120	1000	95.5b	95.5
4	220	120	2000	104.4a	102.2
5	220	120	3000	102.2a	103.1

*: Valores según ajuste cuadrático

Medias con letras diferentes indican diferencias significativas (p < 0,05) según la Prueba de Tukey.

Tabla 2. Evolución de parámetros químicos del suelo por efecto de la enmienda calcárea a la cosecha del cv. Maxwell-INIA. San Carlos, 11 de febrero de 2011.

CaCO ₃ kg ha ⁻¹	Ca interc. cmol ₊ kg ⁻¹	Al interc. cmol ₊ kg ⁻¹	CICE cmol ₊ kg ⁻¹	Saturación de Al % *	Rendimiento qqm ha ⁻¹ *
0	4.54	1.03	7.18	14.32	83.2
1000	4.99	0.72	6.91	10.40	95.5
2000	6.77	0.55	8.76	6.23	102.2
3000	8.10	0.36	9.89	3.67	103.1
DOF 2670				4.47	103.4
DOE 1840				7.11	101.5
SIRSD 2490				5.00	103.3

*: Valores según ajuste cuadrático

También se realizó un ajuste cuadrático de la variación de la saturación de Al por efecto de la aplicación de la enmienda calcárea (Tabla 2). Así fue posible establecer las dosis de cal y niveles de saturación de Al que optimizan la respuesta productiva del trigo. La ecuación ajustada en este caso fue:

$$Y = 14.55 - 4.6355 X + 0.322174X^2 \quad (R^2 = 0.9962)$$

El encalado aplicado en los tratamientos generó cambios en los parámetros relativos a la acidez del suelo, según el muestreo realizado luego de la cosecha (Tabla 2). Se observa claramente que el Ca de intercambio y la CICE se incrementaron en función de la dosis de CaCO₃ mientras que los valores de Al de intercambio y de saturación de Al disminuyeron en forma exponencial, llegando a valores bajos con la aplicación de 3.000 kg ha⁻¹. Cabe destacar que en esta oportunidad el tratamiento Testigo presentó una condición de acidez similar a la mostrada en el muestreo de suelo inicial (Tabla 2), lo que no siempre ocurre.

De acuerdo al ajuste cuadrático de los resultados de rendimientos de grano del cv. Maxwell-INIA, la dosis óptima física (DOF) de encalado que maximiza el rendimiento fue 2670 kg ha^{-1} de CaCO_3 , con un rendimiento de $103.4 \text{ qqm ha}^{-1}$ y una reducción de la saturación de Al que llegó a 4.47 %. La dosis óptima económica (DOE) de encalado que maximiza la producción de trigo fue 1840 kg ha^{-1} de CaCO_3 , con un rendimiento de $101.5 \text{ qqm ha}^{-1}$. Ello corresponde a 7.11 % de saturación de Al en el suelo durante la cosecha. Al considerar como nivel crítico una saturación de Al de 5% (criterio definido por el SIRSD-Sustentable), el encalado debe ser de 2.490 kg ha^{-1} de CaCO_3 , con un rendimiento de $103.3 \text{ qqm ha}^{-1}$.

La eficiencia de uso del encalado (qqm de grano por ton de CaCO_3 aplicada), correspondiente a la DOE (1.84 ton ha^{-1}) estimada en el experimento (Tabla 2), alcanzó a 9.9 qqm de grano de trigo.

En relación al efecto del encalado sobre algunos parámetros de calidad del grano de trigo, se observó que no hubo efecto de la dosis de aplicación de enmienda calcárea sobre el peso hectolitro y contenido de gluten húmedo, bajo las condiciones del experimento de campo.

Tabla 3. Efecto de dosis de enmienda en parámetros de calidad de trigo cv Maxwell-INIA. San Carlos, 2010-2011.

Tratamiento	Dosis P_2O_5 kg ha^{-1}	Dosis CaCO_3 kg ha^{-1}	Peso hectolitro kg hL^{-1}	Gluten húmedo %
1	120	0	79.8 a	29.4 a
2	120	500	79.2 a	28.0 a
3	120	1.000	79.7 a	27.6 a
4	120	2.000	79.8 a	28.1 a
5	120	3.000	80.7 a	28.5 a

Medias con letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) según la prueba de Tukey.

Los resultados preliminares de este experimento indicarían que el cv. de trigo Maxwell-INIA muestra cierta sensibilidad a los problemas de acidificación de Andisoles de la Región de La Araucanía.

Referencias

- Campillo, R., Hirzel, J., Jobet, C., 2011. Fertilización del Cultivo de Trigo Harinero. p.11-79. In J. Hirzel (ed.). Fertilización de Cultivos en Chile. Colección Libros INIA N°28. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Quilamapu, Chillán, Chile.
- Rebolledo, H., 1999. Estimación de modelos de regresión a experimentos de fertilización y obtención de dosis óptimas económicas de insumos agrícolas. 55 p. Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Suelos, Chapingo, México.
- SAS Institute, 1990. SAS/STAT user's guide: statistic. Versión 6. 4th ed. SAS Institute, Cary, North Carolina, USA.
- Volke, H.V., 1982. Optimización de insumos de la producción en la agricultura. 61 p. Colegio de Postgraduados, México D.F., México.

Calidad de granos de trigo afectado por el manejo del nitrógeno

Christian Bredemeier, Danielle Almeida, Clever Variani,
Alexandre T. Rosa, Júlia Perin, Jacqueline F. Schmitz

Introducción

En Brasil, los granos de trigo se clasifican en tipos y clases. La clasificación por tipo se determina por el peso mínimo del hectólitro (PH) y el porcentaje máximo de humedad, materias extrañas e impurezas y de granos dañados. Así, el peso de hectólitro (PH) de trigo es una propiedad que tiene gran importancia en la comercialización del producto, ya que los precios consideran este parámetro como indicador de la calidad y la eficiencia en la extracción de harina (Correa et al. 2006).

El contenido de proteína en el grano puede estar implicado en la determinación de la calidad de los granos de trigo. Según Johansson et al. (2001), la concentración de proteína y la composición de subunidades de proteínas específicas influye en la calidad de panificación del trigo. Entre las prácticas agronómicas, la fertilización nitrogenada es uno de los principales factores que afectan la productividad y también se refiere a la calidad de los granos producidos. Se están realizando estudios para determinar el efecto de diferentes dosis de nitrógeno y en diferentes momentos de aplicación de este nutriente cobradora, como una práctica que se traduce en una mayor productividad y una mejor calidad de grano de trigo para la panificación.

Este estudio tuvo como objetivo evaluar la respuesta del rendimiento de grano y la calidad del grano de dos cultivares de trigo primaveral sometidos a la aplicación de diferentes fuentes de nitrógeno durante la floración del cultivo.

Material y métodos

El experimento de campo se llevó a cabo el 2010 en la Estación Experimental Agrícola de la Universidad Federal de Rio Grande do Sul (EEE / UFRGS) en Eldorado do Sul (RS), ubicado en la Depresión Central de Rio Grande do Sul, a una altitud media 46 msnm. El área experimental pertenece a la unidad de mapeo São Jerônimo, caracterizado como Argissolo vermelho distrófico típico. El clima es subtropical de verano húmedo, caliente, de tipo Cfa, de acuerdo con la clasificación de Koppen. La precipitación anual en Eldorado do Sul es de 1440 mm y la temperatura media mensual oscila entre 14 y 25 ° C, entre los meses más fríos y más cálidos. La siembra se realizó el 1 de julio de 2010, a una densidad de 300 semillas por metro cuadrado. Las variedades de trigo que se utilizaron en el experimento fueron Quartzo y Mirante, que fueron sembradas sobre rastrojos de soya.

Para evaluar el efecto de las aplicaciones de nitrógeno durante la floración del cultivo, se utilizaron dos fuentes de N, urea y super N (fuente nitrogenada de liberación lenta, que contiene un 45% de N y el inhibidor de ureasa NBPT). En el momento de la emergencia de las plantas, se aplicaron 20 kg ha⁻¹ de nitrógeno en forma de urea o super N. En el momento de emergencia de la sexta hoja del tallo principal, se aplicaron 80 kg ha⁻¹ de N, como urea o super N. Durante la floración, dos niveles de nitrógeno se utilizaron: sin N ó 40 kg ha⁻¹, en forma de urea ó super N.

El diseño experimental utilizado fue diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Cada unidad experimental fue compuesta por 12 hileras de 3 m de longitud, espaciados a 0,18 m, con una superficie de 6,5 m².

La determinación del peso de hectólitro se realizó con un equipo específico para ello, de acuerdo con la metodología descrita en el Manual de Análisis de Semillas publicado por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Abastecimiento (Brasil, 1992). La determinación del contenido de nitrógeno en el grano se llevó a cabo por el método de Kjeldahl. El contenido de proteína en el grano se estimó multiplicando el contenido de N por 5,7 (Boen et al. 2007). El rendimiento de grano se obtuvo por muestreando una superficie de 4,32 m² en cada parcela, que corresponde a las ocho hileras centrales, descontando las cuatro hileras de los bordes. Después de la trilla, se determinó el peso de granos por unidad experimental y se extrapoló para el rendimiento de grano (kg ha⁻¹), con una humedad de 13%. La incidencia de las enfermedades y malezas fueron controladas durante todo el ciclo de desarrollo de las plantas.

Los parámetros evaluados fueron analizados estadísticamente mediante el test F, y cuando hubo significancia estadística se realizaron comparaciones entre las medias mediante la prueba de Tukey, al 5% de probabilidad.

Resultados y discusión

No hubo diferencia estadística para las diferentes fuentes de N utilizadas en cualquiera de los parámetros analizados para ambas variedades de trigo. En relación con la aplicación de N en la floración, los parámetros analizados mostraron comportamientos diferentes.

Como puede verse en la Figura 1, no hubo diferencia estadística entre los tratamientos para el rendimiento de grano.

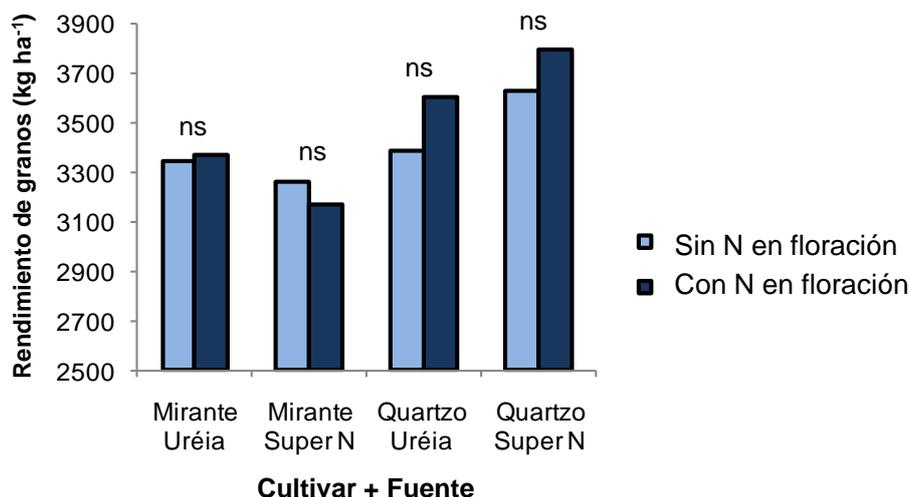


Figura 1. Efecto de la aplicación de nitrógeno durante la floración sobre el rendimiento de grano en dos cultivares de trigo y dos fuentes de nitrógeno.

En la figura 2 se puede observar que todos los tratamientos que recibieron la aplicación de nitrógeno (40 kg ha⁻¹) durante la floración mostraron mayor peso de hectólitro (PH). En Brasil, el trigo es comercializado con un valor de referencia de PH igual a 78 kg hl⁻¹. El cultivar Quartzo mostró un mayor

incremento en el valor del PH con la aplicación de N en floración, en comparación con el cultivar Mirante, proporcionando un aumento que supera el valor de referencia de 78 kg hl⁻¹.

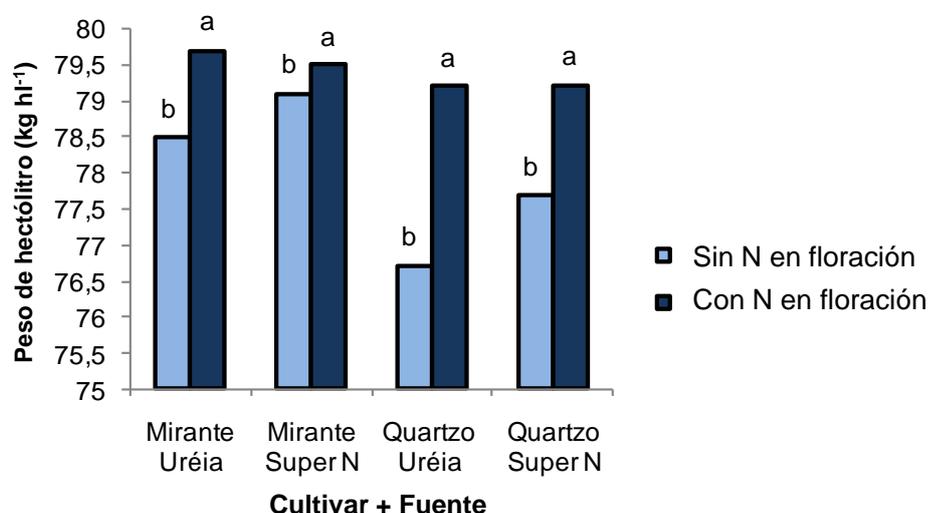


Figura 2. Efecto de la aplicación de nitrógeno durante la floración en el peso de hectólitro en dos cultivares de trigo y dos fuentes de nitrógeno diferentes.

En cuanto a las proteínas del grano, sólo los tratamientos del cultivar Mirante respondieron a la aplicación de nitrógeno durante la floración, como se puede ver en la Figura 3.

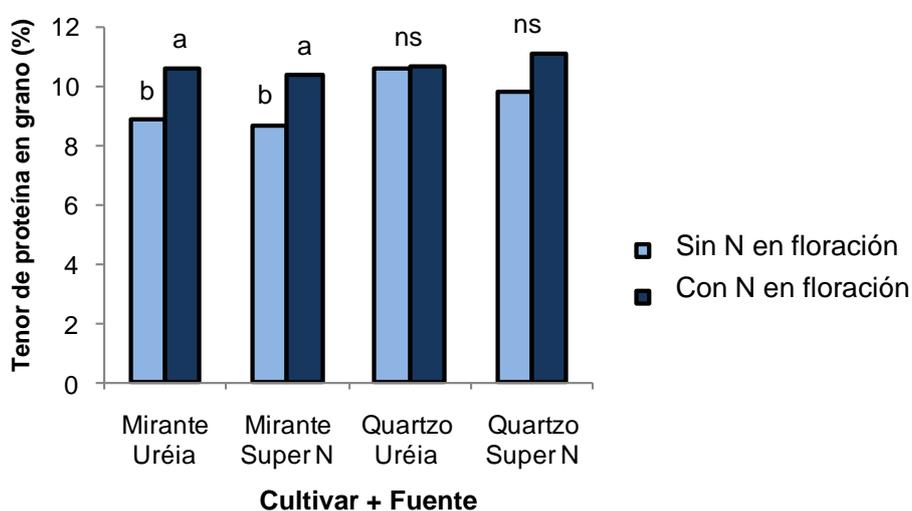


Figura 3. Efecto de la aplicación de nitrógeno durante la floración en el contenido de proteína en dos cultivares de trigo y dos fuentes de nitrógeno diferentes.

Diferentes resultados han sido descritos sobre los efectos de la fertilización de N en un mayor número de aplicaciones en todo el ciclo de cultivo. Ayoub, et al. (1994) encontraron que la parcialización de N afecta a la cantidad de proteína, pero no la calidad de los granos. Sangoi et al. (2007) no encontró efecto significativo del momento de aplicación de nitrógeno en el contenido de proteína del grano. Estas diferencias se deben probablemente a las diferentes

condiciones climáticas en las que los experimentos fueron realizados (Mendizábal-Fuertes et al., 2010). Wright et al. (2004) sugieren que se necesitan más investigaciones para asegurarse de que los tipos de proteínas aumentaron con aplicaciones de N en etapas avanzadas, como la floración del cultivo, mejorando la calidad de los granos de trigo para la panificación.

Observaciones finales

Los tratamientos que recibieron las aplicaciones de N durante la floración mostraron resultados superiores de PH para ambos cultivares de trigo. El cultivar Mirante también mostró respuesta a la aplicación de N durante la floración para el contenido de proteína. En relación con el rendimiento de grano, no hubo diferencia significativa con la aplicación de N en floración. Esta práctica puede ser una alternativa para los mejores resultados de productores de peso de prueba y contenido de proteína en grano.

Referencias

- Ayoub, M., Guertin, S., Fregeau-Reid, J., Smith, D.L., 1994. Nitrogen fertilizer on bread-making quality of hard red spring wheat in eastern Canada. *Crop Sci.* 34, 1346–1352.
- Boen, T.R., Soeiro, B.T., Filho, E.R.P., Lima-Pallone, J.A., 2007. Avaliação do teor de ferro e zinco e composição centesimal de farinhas de trigo e milho enriquecidas. *Rev. Bras. Ciênc. Farm.* 43, 589-596.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária. Regras para análise de sementes. Brasília: MAPA, 1992. 365p
- Corrêa, P.C., Ribeiro, D.M., Resende, O., Botelho, F.M., 2006. Determinação e modelagem das propriedades físicas e da contração volumétrica do trigo, durante a secagem. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient.* 10, 665-670.
- Fuertes-Mendizábal, T., Aizpurua, A., González-Moro, M.B., Estavillo J.M., 2010. Improving wheat breadmaking quality by splitting the N fertilizer rate. *Eur. J. Agron.* 33, 52–61.
- Johansson, E., Prieto-Linde, M.L., Jonsson, J.O., 2001. Effects of wheat cultivar and nitrogen application on storage protein composition and breadmaking quality. *Cereal Chem.* 78, 19–25.
- Sangoi, L., Berns, A.C., Almeida, M.L., Zanin, C.G., Schweitzer, C., 2007. Características agronômicas de cultivares de trigo em resposta à época da adubação nitrogenada de cobertura. *Ciênc. Rural* 37, 1564-1570.
- Wright, D.L., Rasmussen, V.P., Ramsey, R.D., Baker, D.J., 2004. Canopy reflectance estimation of wheat nitrogen content for grain protein management. *GIS Sci. Remote Sens.* 41, 287-300.

