

Manual del Cultivo del Trigo



Instituto Internacional de Nutrición de Plantas
Programa Latinoamérica Cono Sur
<http://lacs.ipni.net>

Manual del cultivo de trigo / Bernardette Abadia ... [et al.]; compilado por
Guillermo A. Divito; Fernando Oscar García; editado por Guillermo A. Divito; Fernando Oscar García. -
1a ed. compendiada. - Acassuso: International Plant Nutrition Institute, 2017.
224 p.; 28 x 19 cm.

ISBN 978-987-46277-3-5

1. Agricultura. 2. Cultivo Agrícola. 3. Manuales. I. Abadia, Bernardette II. Divito, Guillermo A., comp. III.
García, Fernando Oscar, comp. IV. Divito, Guillermo A., ed. V. García, Fernando Oscar, ed.
CDD 633

Este libro no podrá ser reproducido, ni total ni parcialmente, sin el previo permiso de los editores.

1ra edición Octubre 2017

Impreso en Argentina

ISBN 978-987-46277-3-5



Presentación

La creciente demanda global de alimentos, forrajes, fibras, biocombustibles y biomateriales genera desafíos, oportunidades y amenazas para los sistemas de producción agrícola. Esta demanda requiere de sistemas que provean productos en cantidad y calidad mejorando la vida de las personas y preservando el ambiente. El crecimiento en producción y productividad registrado en los últimos 50 años ha generado costos y externalidades negativas a nivel económico, social y ambiental. Así, el desafío para la humanidad es reducir el impacto de estos costos y externalidades y evitar que los mismos se amplifiquen y/o que se sumen nuevos a los ya existentes.

En este marco, la expansión de la agricultura hacia áreas aún no explotadas a través de la deforestación e incorporación de ecosistemas más frágiles constituye una severa amenaza a la sostenibilidad de los sistemas, por lo que, entre las alternativas propuestas, impulsar el crecimiento de la productividad en las tierras actualmente en uso ha sido considerada prioritaria. En Argentina, se han estimado brechas entre los rendimientos actuales y los alcanzables en secano del orden del 32%, 41% y 41% para soja, maíz y trigo, respectivamente (ver Capítulo 1 de esta publicación).

El cultivo de trigo ha sido una de las principales producciones agrícolas en los países del Cono Sur de Latinoamérica y actualmente incluye aproximadamente 6 millones de ha en Argentina, Bolivia, Chile, Paraguay y Uruguay. Su importancia dentro de la economía de estas naciones, su relevante participación como proveedor de alimento para sus poblaciones y, desde el punto de vista agronómico, su rol en las rotaciones de cultivos anuales, han sido destacados y ampliamente discutidos en numerosas publicaciones.

Este manual trata de cubrir los temas más relevantes de la producción, industrialización y comercialización de trigo, con énfasis en los sistemas de la región triguera argentina. A través de catorce capítulos y una serie de anexos se revisan aspectos relacionados al crecimiento y la fenología; la ecofisiología y la generación de rendimiento; las nuevas variedades; la importancia del manejo del cultivo para calidad; la nutrición y las mejores prácticas de manejo de la fertilización; la identificación y manejo de malezas, enfermedades y plagas más relevantes; el manejo de cultivo en distintas regiones; la cosecha y el almacenamiento de granos; la molienda y la panificación; y el mercado actual.

Como editores queremos dejar expreso nuestro más sincero agradecimiento al trabajo, dedicación y paciencia que han demostrado los autores de los distintos capítulos. Estos destacados científicos y profesionales son referentes insoslayables en las distintas temáticas abordadas y es un honor contar con su contribución en este manual.

Guillermo A. Divito
Fernando O. García

EDITORES

Guillermo A. Divito

Ingeniero Agrónomo, Magister Scientiae y Doctor en Ciencias Agrarias. Actualmente se desempeña como asesor privado y Asistente Técnico de la Regional Necochea de Aapresid. Es especialista en manejo de cultivos agrícolas. Ha dirigido y asesorado tesis de grado y posgrado. Ha publicado trabajos en revistas científicas nacionales e internacionales con referato y de divulgación.

Fernando O. García

Ingeniero Agrónomo, Magister Scientiae y Ph.D. en Agronomía. Actualmente es Director Regional del International Plant Nutrition Institute (IPNI) Programa Cono Sur de Latinoamérica. Es especialista en fertilidad de suelos y nutrición de cultivos. Ha dirigido y asesorado tesis de grado y posgrado. Ha publicado numerosos trabajos en revistas científicas nacionales e internacionales con referato y de divulgación.

AUTORES

Bernadette Abadía

Unidad Integrada Balcarce. EEA INTA-FCA UNMP, Buenos Aires, Argentina.
abadia.maria@inta.gov.ar

Pablo E. Abbate

Unidad Integrada Balcarce. EEA INTA-FCA UNMP, Buenos Aires, Argentina.
abbate.pablo@inta.gov.ar

Cristian Álvarez

INTA Gral. Pico, La Pampa, Argentina.
alvarez.cristian@inta.gov.ar

Fernando Aramburu Merlos

Unidad Integrada Balcarce. EEA INTA-FCA UNMP, Buenos Aires, Argentina.
aramburumerlos.f@inta.gov.ar

Mirian Barraco

INTA Gral. Villegas, Buenos Aires, Argentina.
barraco.miriam@inta.gov.ar

Ricardo Bartosik

Unidad Integrada Balcarce. EEA INTA-FCA UNMP, Buenos Aires, Argentina.
bartosik.ricardo@inta.gov.ar

Javier Bujan

Kimei Cereales S.A. y Cámara Arbitral Bolsa de Cereales de Buenos Aires
bujan@kimei.com.ar

Leda E. Campaña

Molino Campodónico, La Plata, Buenos Aires, Argentina.
laboratorio@molinocampodonico.com.ar

Miguel J. Cardoso

Molino Campodónico, La Plata, Buenos Aires, Argentina.
laboratorio@molinocampodonico.com.ar

Leandro Cardoso

Unidad Integrada Balcarce. EEA INTA-FCA UNMP, Buenos Aires, Argentina.
cardoso.marcelo@inta.gov.ar

Dora Carmona

Unidad Integrada Balcarce. EEA INTA-FCA UNMP, Buenos Aires, Argentina.
carmona.dora@inta.gov.ar

Marcelo Carmona

Facultad de Agronomía - UBA, Buenos Aires, Argentina
carmonam@agro.uba.ar

Pablo Calviño

Asesor y director técnico. Tandil, Buenos Aires, Argentina.
calvinopabloa@gmail.com

Adrián A. Correndo

Instituto Internacional de Nutrición de Plantas (IPNI), Latinoamérica-Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.

acorrendo@ipni.net

Diego de la Torre

Unidad Integrada Balcarce. EEA INTA-FCA UNMP, Balcarce, Buenos Aires, Argentina.

delatorre.diego@inta.gob.ar

Guillermo A. Divito

Asesor Privado. AAPRESID, Asistente Técnico Regional Necochea. Buenos Aires, Argentina.

guillermodivito@yahoo.com.ar

Oswaldo Ernst

EEMAC, Facultad de Agronomía, Universidad de la República. Paysandú, Uruguay.

oernst@fagro.edu.uy

Ariel Jesús Faberi

Unidad Integrada Balcarce. EEA INTA-FCA UNMP, Balcarce, Buenos Aires, Argentina.

faberi.ariel@inta.gob.ar

Jorge A. Fraschina

EEA INTA Marcos Juárez, Córdoba, Argentina.

fraschina.jorge@inta.gob.ar

Fernando O. García

Instituto Internacional de Nutrición de Plantas (IPNI), Latinoamérica-Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.

fgarcia@ipni.net

Lisardo González

Buck Semillas. La Dulce, Buenos Aires, Argentina.

lgonzalez@bucksemillas.com.ar

Esteban Hoffman

EEMAC, Facultad de Agronomía, Universidad de la Republica. Paysandú, Uruguay.

tato@fagro.edu.uy

María I. Leaden

Facultad de Ciencias Agrarias, UNMP, Balcarce, Buenos Aires, Argentina.

mileaden@hotmail.com

Gisele Maciel

Unidad Integrada Balcarce. EEA INTA-Facultad de Ciencias Agrarias, UNMP, Balcarce, Buenos Aires, Argentina.

maciel.gisel@inta.gob.ar

Pablo Manetti

Unidad Integrada Balcarce. EEA INTA-Facultad de Ciencias Agrarias, UNMP, Balcarce, Buenos Aires, Argentina.

manetti.pablo@inta.gob.ar

Juan Pablo Monzon

Unidad Integrada Balcarce. EEA INTA-Facultad de Ciencias Agrarias, UNMP, Balcarce, Buenos Aires, Argentina.

monzon.juanpablo@inta.gob.ar

Carla Salvio

Unidad Integrada Balcarce. EEA INTA-Facultad de Ciencias Agrarias, UNMP, Balcarce, Buenos Aires, Argentina.

salvio.carla@inta.gob.ar

Francisco Sautua

Facultad de Agronomía - UBA, Buenos Aires, Argentina

sautuaensayo@gmail.com

Santiago Néstor Tourn

Unidad Integrada Balcarce. EEA INTA-Facultad de Ciencias Agrarias, UNMP, Balcarce, Buenos Aires, Argentina.

tourn.santiago@inta.gob.ar

María Celia Tulli

Unidad Integrada Balcarce. EEA INTA-Facultad de Ciencias Agrarias, UNMP, Balcarce, Buenos Aires, Argentina.

tulli.maria@inta.gob.ar

| Índice | Pág. |
|---|-------------|
| 1. El trigo, su difusión, importancia como alimento y consumo _____ | 7 |
| Pablo E. Abbate, Miguel J. Cardos y Leda E. Campaña | |
| Brechas de rendimiento de trigo en Argentina _____ | 20 |
| Fernando Aramburu Merlos y Juan Pablo Monzon | |
| 2. Como crece y se desarrolla el cultivo de trigo _____ | 22 |
| Pablo E. Abbate y Guillermo A. Divito | |
| 3. Ecofisiología y manejo del cultivo de trigo _____ | 33 |
| Pablo E. Abbate | |
| 4. Cambios recientes y venideros en las variedades de mayor difusión en Argentina ____ | 53 |
| Lisardo González | |
| 5. ¿Por qué es importante la calidad del trigo? _____ | 57 |
| Jorge A. Fraschina | |
| 6. La nutrición del cultivo de trigo _____ | 67 |
| Guillermo A. Divito, Adrián A. Correndo y Fernando O. García | |
| 7. Identificación y manejo de malezas _____ | 85 |
| María I. Leaden | |
| 8. Criterios para el manejo integrado de las enfermedades _____ | 93 |
| Marcelo Carmona y Francisco Sautua | |
| 9. Caracterización y manejo de plagas animales _____ | 109 |
| Dora Carmona, Pablo Manetti, María C. Tulli, Carla Salvio y Ariel J. Faberi | |
| 10. Manejo del cultivo de trigo en distintas regiones _____ | 123 |
| 10.a Región Pampeana Central | |
| Jorge A. Fraschina | |
| 10.b Región Sudeste de Buenos Aires | |
| Pablo Calviño y Guillermo A. Divito | |
| 10.c Noroeste de Buenos Aires y Este de La Pampa | |
| Cristian Álvarez y Mirian Barraco | |
| 10.d Uruguay | |
| Esteban Hoffman y Oswaldo Ernst | |
| 11. Eficiencia en la cosecha de trigo _____ | 143 |
| Santiago N. Tourn | |
| 12. Almacenamiento y acondicionamiento de trigo _____ | 152 |
| Ricardo Bartosik, Bernadette Abadía, Leandro Cardoso, Diego de la Torre y Gisele Maciel | |
| 13. Calidad, molienda y panificación de trigos _____ | 172 |
| Miguel J. Cardos, Leda E. Campaña y Pablo E. Abbate | |
| 14. ¿Y tranqueras afuera? Consideraciones para la comercialización _____ | 194 |
| Javier Bujan | |
| Anexos _____ | 198 |

Capítulo III: Bases ecofisiológicas del manejo del cultivo de trigo en la región pampeana

Pablo E. Abbate

Unidad Integrada Balcarce. EEA INTA-FCA UNMP, Buenos Aires, Argentina.

En este capítulo se analiza el crecimiento del cultivo y la generación del rendimiento, prestándole especial atención a las particularidades de la región triguera argentina. En primer lugar, se analizan la producción de peso seco y la de grano por unidad de superficie en ambientes potenciales, es decir en ausencia de limitaciones de agua, nutrientes y adversidades climáticas y sanitarias. Luego se considera cuáles son las prácticas de manejo adecuadas (fecha y densidad de siembra) y los requerimientos de nutrientes y agua que permiten alcanzar el rendimiento potencial (RTO_p en $kg\ ha^{-1}$) de cada ambiente, y el efecto de las deficiencias de estos recursos. Las variaciones de rendimiento dentro de la región pampeana argentina se analizan comparando los cuatro megambientes climáticos más característicos en temperatura y disponibilidad de agua durante el cultivo de trigo: Balcarce (fresco y húmedo), Bordenave (fresco y seco), Pergamino (templado y húmedo) y Manfredi (templado y seco). Este trabajo es una actualización de Abbate et al. (1994); Abbate (2004) y Abbate y Lázaro (2010). A través de todos estos análisis se priorizó la presentación de información local y la mínima presentación de referencias bibliográficas. Se espera que este análisis contribuya lograr un manejo del cultivo más racional y eficiente.

CRECIMIENTO DEL CULTIVO

El análisis cuantitativo del crecimiento de un cultivo (Monteith, 1972), considera a la “tasa de crecimiento del cultivo” (TCC en $g\ m^{-2}\ d^{-1}$; e.d. el aumento del peso seco aéreo del cultivo por unidad de superficie y de tiempo) como el producto entre:

- La “radiación fotosintéticamente activa” que incide sobre el cultivo (RFA en $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$), e.d. la radiación solar capaz de generar actividad fotosintética, la cual equivale aproximadamente al 50% de la radiación solar total.
- La “eficiencia de intercepción” de la radiación incidente (EIR en $MJ\ MJ^{-1}$), e.d. la proporción de la RFA incidente que es interceptada por el cultivo.
- La “eficiencia de uso de la radiación” (EUR en $g\ MJ^{-1}$), e.d. la cantidad de peso seco que el cultivo produce por unidad de radiación interceptada.

Así,

$$(1) TCC = RFA \cdot EIR \cdot EUR$$

A su vez, la EIR habitualmente se describe por medio de una función exponencial de dos parámetros basada en la Ley de Beer-Lambert de transmisión de la luz (Monsi y Saeki, 1953):

$$(2) EIR = 1 - e^{-k \cdot IAV}$$

donde $e=2,72$ es la base de los logaritmos naturales, IAV (m^2 de hojas m^{-2} de suelo) es el índice de área verde y k es un coeficiente de extinción lumínica adimensional.

La RFA tiene una fuente de variación geográfica, otra anual y otra estacional. Por su parte, en ambientes potenciales, la EUR de trigo no presenta variaciones mayores al 15%, aumentado con cultivares de bajo k y al disminuir el déficit de presión de vapor (DPV en kPa). El DPV es la diferencia entre la presión de saturación del vapor de agua de la atmósfera y su presión parcial en un momento considerado. El DPV se relaciona positivamente con la temperatura y negativamente con la humedad relativa del aire. Variaciones en el k de cultivares argentinos entre 0.42 y 0.53 son habituales. En consecuencia, es de esperar variaciones de la EUR ente 2.7 a 2,3 g MJ⁻¹ a través de los ambientes potenciales de la región pampeana, correspondiendo los mayores valores a localidades frescas y húmedas como Barcarce y los menores a localidades con clima contrastante como Manfredi.

Dado que la relación entre la EIR y el IAV es curvilínea, el aumento de la EIR resulta despreciable cuando ésta alcanza un valor de 90% medido al mediodía. El mínimo valor de IAV que permite alcanzar esa proporción de radiación interceptada y cerrar totalmente el surco, se denomina "IAV crítico" (IAVc). Se puede calcular que el IAVc, correspondiente a los k mencionados (0.42 a 0,52) va de 4.3 a 5.5.

Para una dada localidad, la principal fuente de variación de la **TCC** es el **IAV**, cuando su valor está por debajo del crítico. A valores de **IAV** mayores, la **RFA** incidente suele ser el factor más limitante del crecimiento del cultivo. Por su parte, la **EUR** solo suele presentar reducciones importantes, en situaciones no potenciales.

Generación del rendimiento potencial

El RTO_p puede considerarse como el producto entre dos componentes principales: (i) el número de granos potencial por unidad de superficie (NG_p en granos m⁻²) y el peso potencial por grano (o peso potencial de mil granos 10⁻³, PG_p en mg),

$$(3) \quad RTO_p = NG_p \cdot PG_p$$

El crecimiento a lo largo de ciclo del cultivo de trigo contribuye de distinta manera con el rendimiento y sus componentes. Recopilando información de varios experimentos, Fischer (1985) identificó que el "período de crecimiento de las espigas" previo al inicio del llenado del grano, es el más crítico para la determinación NG_p y el RTO_p en trigo. La gran sensibilidad del NG_p a las variaciones del crecimiento del cultivo durante el período de crecimiento de las espigas, se debe a que durante esa etapa es limitante la asignación de carbohidratos a las espigas para sostener el crecimiento de las flores generadas (Fischer, 1985). Siguiendo este enfoque, se puede dividir el ciclo del cultivo en tres etapas o períodos (Abbate y Lázaro, 1998 y 2001) (**Figura 1**):

- i) Período de generación del área verde.
- ii) Período de crecimiento de las espigas.
- iii) Período de llenado del grano.

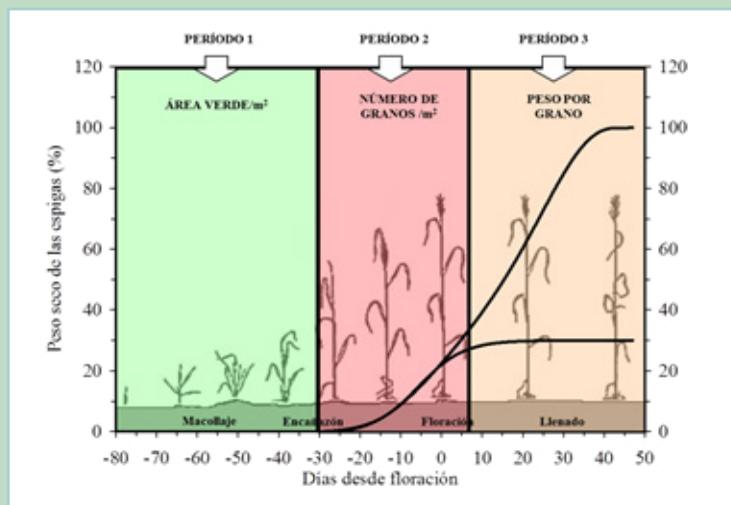


Figura 1. Esquema que muestra los tres períodos de generación del rendimiento a lo largo del ciclo de trigo. Las curvas representan la evolución idealizada del peso seco de las espigas (la inferior sin grano, la superior con grano) para un cultivo creciendo en condiciones potenciales (tomado de Abbate y Lázaro, 1998 y 2001).

Período de generación del área verde

Esta fase comienza con la emergencia del cultivo y termina cuando se inicia el crecimiento de las espigas, abarcando el macollaje y la mitad de la encañazón (**Figura 1**). Si bien durante esta etapa se diferencia la espiga, su crecimiento es despreciable en comparación con el resto del cultivo.

El fenómeno más importante que ocurre durante este período es el crecimiento del área verde del cultivo, constituido por la superficie de todos los órganos con clorofila (inicialmente láminas y vainas, posteriormente tallos y espigas), necesaria para interceptar la **RFA** disponible en las etapas posteriores de generación del rendimiento.

Si bien el área verde, y por lo tanto el **IAV**, suele aumentar hasta 10-15 días antes de anthesis, al final de este primer período es de esperar que el cultivo alcance el **IAVc**. La duración de este período aumenta con el ciclo del cultivo, el cual es el resultado del cultivar, la temperatura y el fotoperíodo, siendo estas dos últimas variables controladas por la fecha de siembra y las particularidades climáticas de cada localidad. La **Figura 2** muestra que al aumentar la duración del ciclo del cultivo tanto entre localidades (**Figura 2a**) como a través de cultivares (**Figura 2b**), aumenta consistentemente la duración del período de generación de área verde.

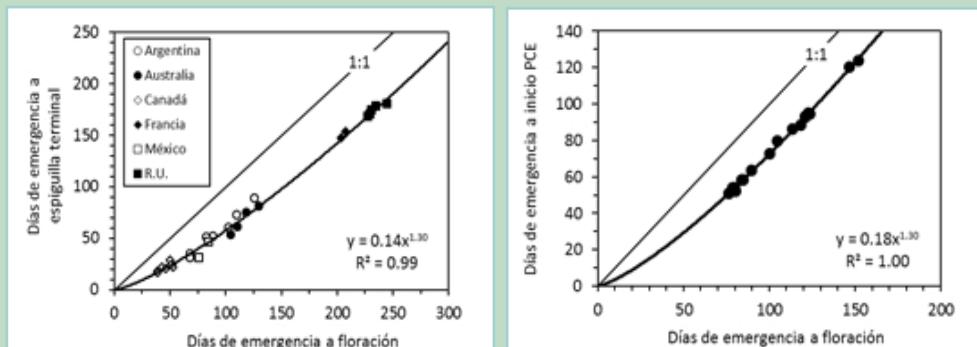


Figura 2. (a) Días entre emergencia y formación de espiguilla terminal (estado próximo al inicio del período de crecimiento de las espigas) en función del ciclo del cultivo (expresado en días entre emergencia y floración), para la fecha de siembra normal de algunas localidades trigueras del mundo (adaptado de Abbate et al., 1997). (b) Días entre emergencia e inicio del período de crecimiento de las espigas para 17 cultivares de ciclo contrastante creciendo en Balcarce, Buenos Aires, Argentina (datos no publicados de P.E. Abbate).

Período de crecimiento de las espigas

Este segundo período del ciclo del cultivo (**Figura 1**) corresponde al de acumulación del peso seco de las espigas (**PSE** en $g\ m^{-2}$), previo al inicio del llenado de sus granos. Las espigas inician su crecimiento envueltas por las vainas de las hojas, entre 20 y 30 días antes de antesis, alrededor de mediados de encañazón, en coincidencia con la expansión de la anteúltima hoja y la elongación del tercer entrenudo en el vástago principal. El centro de esta etapa coincide con la espigazón y el final con el inicio del llenado de los granos, una semana después de antesis. En la **Figura 2** puede observarse que la duración de esta etapa (representada por la cantidad de días entre la recta 1:1 y curva de regresión, medida en el eje de ordenadas) es una mayor proporción del ciclo del cultivo cuando el ciclo se acorta. Al finalizar esta etapa, queda definido el **NG** del cultivo.

Cuando mayor sea la cantidad de **RFA** interceptada durante este período, mayor será la **TCC** y la tasa de crecimiento de las espigas, favoreciendo un mayor **PSE** y **NG_p**.

Las temperaturas frescas (no heladoras) y un menor fotoperíodo (en cultivares susceptibles al fotoperíodo) favorecen un mayor **PSE**, ya que aumentan la cantidad de días que las espigas tienen para crecer. El **PSE** al final de este período es una medida de la cantidad de carbohidratos que el cultivo destina para sostener el crecimiento de las flores. En consecuencia, en condiciones potenciales de crecimiento, el **PSE** guarda una fuerte asociación positiva con el **NG_p**.

Para alcanzar un alto **NG_p**, el cultivo debe acumular un alto **PSE**; éste puede estar indistintamente conformado por muchas espigas m^{-2} de bajo peso individual o por pocas espigas de alto peso.

En ausencia de limitaciones bióticas y abióticas, las diferencias en el **NG_p** entre cultivares se pueden originar en la proporción de la **TCC** que se destina a las espigas (partición a espigas) y/o en el **NG_p** producido por unidad de **PSE** (fertilidad de espiga). Entonces, para un cultivar dado, el **NG_p** será función de:

- i) La RFA interceptada por el cultivo, la cual controlará la tasa de crecimiento de las espigas.
- ii) La temperatura, la cual controlará la duración del período del crecimiento de las espigas.

En consecuencia, el NG_p de trigo puede estimarse por medio del **cociente fototermal** (Q en $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}\ ^\circ C^{-1}$), que se define como:

$$(4) Q=(R/2)/(T-4.5)$$

donde R (en $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$) es la radiación total media, T (en $^\circ C$) es la temperatura media (ambas variables promediadas entre los 20 días previos y los 10 posteriores a antesis o los 15 días posteriores a espigazón) y $4.5\ ^\circ C$ es la temperatura base de desarrollo. Basándose en datos obtenidos en 21 experimentos y 20 referencias bibliográficas, Lázaro y Abbate (2012) propusieron una relación entre el NG_p de un cultivar genérico (NG_o) y el Q ,

$$(5) NG_o=(4+13\cdot Q)\cdot 10^3$$

y una relación específica para un cultivar en particular,

$$(6) NG_p=(NG_o+CCV)\cdot 10^3$$

La Ecuación (5) permite estimar el efecto de las variaciones ambientales tales como la fecha de siembra, el año, la localidad, etc., sobre el NG_p de un cultivar genérico. Por su parte, la Ec. (6) incluye un coeficiente aditivo (CCV en 10^3 granos m^{-2}), específico para un cultivar (o grupo de cultivares) que permite corregir la diferencia entre el NG_p de un cultivar en particular y el NG_o del cultivar genérico. El CCV puede calcularse a partir de datos de NG_p y Q conocidos como $CCV = NG_p - NG_o$.

Período de llenado de los granos

Durante el tercer período del ciclo del cultivo, el crecimiento de las espigas resulta despreciable y el grano gana la mayor parte de su peso seco (**Figura 1**). Este período comienza unos pocos días después de floración y finaliza con la madurez del grano, quedando definido el peso por grano (o peso de mil granos 10^{-3} , PG en mg) y el rendimiento.

El PG no sólo depende del crecimiento del cultivo durante el llenado del grano, sino también del balance entre (i) los carbohidratos producidos por el cultivo antes y durante el llenado del grano (“fuente”) y (ii) la capacidad de los granos (“destinos”) para almacenarlos. Se puede considerar al PG como el producto entre el PG_p y el grado de limitación por destinos (GLD) (Abbate et al., 2001, 2005b):

$$(7) PG=PG_p\cdot GLD$$

El PG_p es el peso que puede alcanzar un grano sin competencia por carbohidratos para su llenado. En la práctica éste puede evaluarse midiendo el PG alcanzado en plantas a las que se les reduce la competencia por luz, agua y nutrientes durante el llenado, eliminando (raleando) las plantas vecinas. Por otro lado, el GLD puede cuantificarse por medio del cociente PG/PG_p . Un $GLD = 100\%$ (equivalente a 0% de limitación por fuente) indica que los granos disponen de suficientes asimilados para alcanzar el PG_p . Si la fuente disponible es baja en relación con los destinos a llenar, ya sea porque el crecimiento del cultivo es reducido o porque la cantidad de granos a llenar es mayor que la habitual, el grano alcanzará un peso menor al PG_p ($GLD < 100\%$).

Un bajo **PG** puede deberse a una escasa fuente para el llenado del grano o a un bajo **PG_p**.

En un relevamiento realizado en localidades representativas de cuatro subregiones trigueras argentinas (**Figura 3a**), se confirmó que el grado de limitación por fuente para el llenado del grano no superó el 10% en parcelas creciendo sin riego, con nivel de fertilización normal para la zona, con aplicación de funguicida y rendimientos entre 3.6 y 5.6 t ha⁻¹. Por otra parte, la asociación entre el **PG** y el **PG_p** ($R^2=0.91$; $gl=18$) fue mucho mayor que la asociación entre el **PG** y el **GLD** ($R^2=0.01$; $gl=18$), poniendo de manifiesto la importancia del **PG_p** en la determinación del **PG**. Por otra parte, en ensayos de Balcarce y Azul (**Figura 3b**), la caída del **PG** fue menor al 10% cuando el rendimiento no superó las 8.0 t ha⁻¹ y, por arriba de ese rendimiento, el **PG** cayó entre 10 y 20%. En definitiva, en ausencia de limitaciones bióticas y abióticas severas, puede considerarse que el **PG** del cultivo de trigo corresponde al **PG_p**, al menos cuando el rendimiento no supera las 8.0 t ha⁻¹.

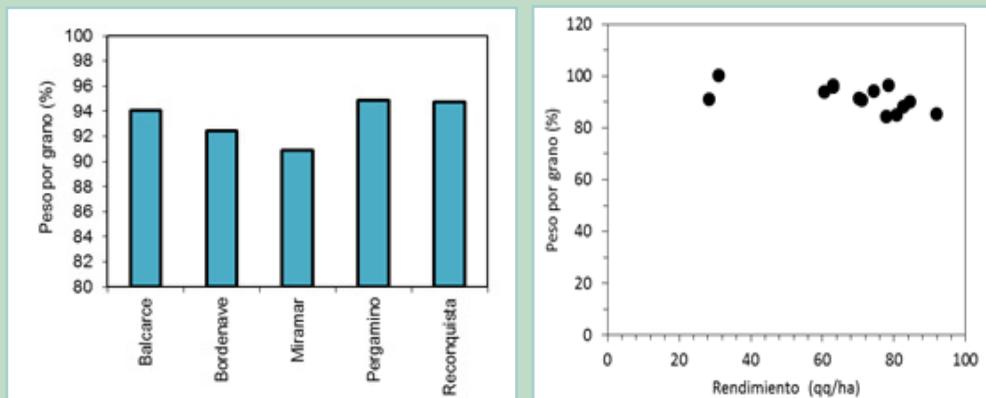


Figura 3. Peso por grano expresado como porcentaje de su peso potencial (e.d. el grado de limitación por destinos para el llenado de los granos) en función de: (a) localidades representativas de las subregiones trigueras argentinas: IV, VS, IV, IIS y I, respectivamente. Datos promedio de cuatro cultivares de ciclo corto, creciendo en condición sub-potencial (e.d. sin riego, con nivel de fertilización normal para la zona y con aplicación de funguicida) (Abbate et al., 2008), y (b) el rendimiento (humedad 14%), para dos cultivares de trigo, creciendo sin limitaciones hídricas, nutricionales ni sanitarias, en Balcarce y Azul (Buenos Aires, Argentina) (datos no publicados de Abbate P.E. y Lázaro L.).

Cabe preguntarse entonces, qué factores definen el **PG_p**:

El principal factor ambiental que se ha identificado como determinante del **PG_p** es la temperatura a partir de espigazón.

A partir de datos de la provincia de Buenos Aires, obtenidos con buena disponibilidad hídrica y de nutrientes, y en ausencia de enfermedades foliares, Abbate y Lázaro (2010) encontraron una relación negativa entre el **PG_p** (mg) y la temperatura media durante los 35 días posteriores a espigazón (**TLL**, rango: 12.5-21.5 °C),

$$(8) \text{ PG}_p = 51.84 - 1.15 \cdot T_{LL} \quad (R^2 = 0.65; \text{gl} = 56)$$

Según esta relación, es de esperar una caída de 1.15 mg en el PG_p por cada 1°C de aumento de la temperatura media; sin embargo, datos de otros autores muestran caídas de 1,6 y 2,0 mg por cada 1°C de aumento, con períodos cortos de temperatura entre 32 y 40°C. Por otro lado, a una temperatura dada durante el llenado de los granos, pueden presentarse diferencias importantes en el PG_p entre cultivares; de hecho, Abbate (datos no publicados) encontró diferencias en el PG_p entre cultivares del orden del 25% (rango: 38-50 mg), al comparar 15 cultivares creciendo en condiciones potenciales en Balcarce. Estas diferencias afectarían el término independiente y tal vez la pendiente de la **Ec. (8)**.

El PG_p depende del cultivar y de las condiciones de temperatura durante el llenado. Un PG deprimido puede no solo afectar el rendimiento, sino también, el valor comercial del grano.

Las caídas del PG debido a limitaciones de fuente (o bajo GLD , **Ec (7)**), son propias de situaciones sub-potenciales, la cuales se analizan más abajo. Estas situaciones además de reducir el PG , suelen deprimir la calidad comercial a través de un bajo peso hectolítrico o un mayor porcentaje de grano chuzo. Por el contrario, cuando las caídas del PG se originaron en un bajo PG_p , no es de esperar que se afecte el valor comercial del grano.

Variaciones del rendimiento potencial

Para analizar las variaciones del RTO_p y sus requerimientos de nutrientes y agua, se consideró una localidad representativas de los cuatro megambientes climáticos más característicos de la región pampeana Argentina. Estas localidades se describen en **Tabla 2, Figura 4 y Figura 8**.

Fecha de espigazón óptima

La **Figura 4** permite evaluar el cambio estacional de las variables climáticas más relevantes para la determinación del RTO_p . En las cuatro localidades de referencia, la radiación aumenta desde el invierno hacia el verano favoreciendo un mayor RTO_p en fechas de floración tardías (**Figura 4**). Por su parte, el aumento de la temperatura hacia el verano favorece el aumento del RTO_p en fechas de espigazón tempranas. En definitiva, no es posible estimar a priori, el efecto combinado de la variación estacional de radiación y la temperatura sobre el RTO_p . Tal estimación requiere cuantificar el efecto de esas variables por medio de modelos como los presentados en las **Ec. (4) a (8)**. En las cuatro localidades de referencia, el RTO_p estimado por medio de esas ecuaciones resulta máximo con espigazón a fines de julio y decrece al retrasar la espigazón hacia el verano (**Figura 4**). No obstante, intentar alcanzar el máximo RTO_p estimado resulta poco realista ya que para la fecha de espigazón requerida el riesgo de daño por heladas resulta del 100%, e.d. todos los años el cultivo sería dañado por temperaturas $\leq 0^\circ\text{C}$ (medida en abrigo meteorológico), acontecidas a partir de espigazón. Asumiendo una frecuencia de heladas menor al 10% (un año con helada en floración de cada 10 años) como riesgo razonable, la espigazón no debería ocurrir antes del 25/oct, 15/nov, 5/oct y 15/oct en Balcarce, Bordenave, Pergamino y Manfredi, respectivamente (**Tabla 1 y puntos de Figura 4**). Con fechas de espigazón más tardías, el riesgo de heladas es menor, pero el RTO_p cae en promedio, a razón de 44 kg ha⁻¹ por cada día de retraso en la fecha de floración, a causa del aumento de la temperatura.

El compromiso entre un alto RTO_p y un bajo riesgo de heladas es lo que determina la fecha de espigazón óptima de cada localidad.

Sin embargo, en localidades del norte de la región pampeana donde la probabilidad de heladas es muy baja (p.ej. Paraná y Pte. Roque Sáenz Peña), no es posible definir una fecha de espigazón óptima. Esto se debe a que con espigazón a fines de invierno (septiembre) se alcanza el RTO_p máximo sin que continúe aumentando con el adelanto de la fecha de espigazón, si bien al retrasar la espigazón el RTO_p cae al igual que en las localidades tradicionales.

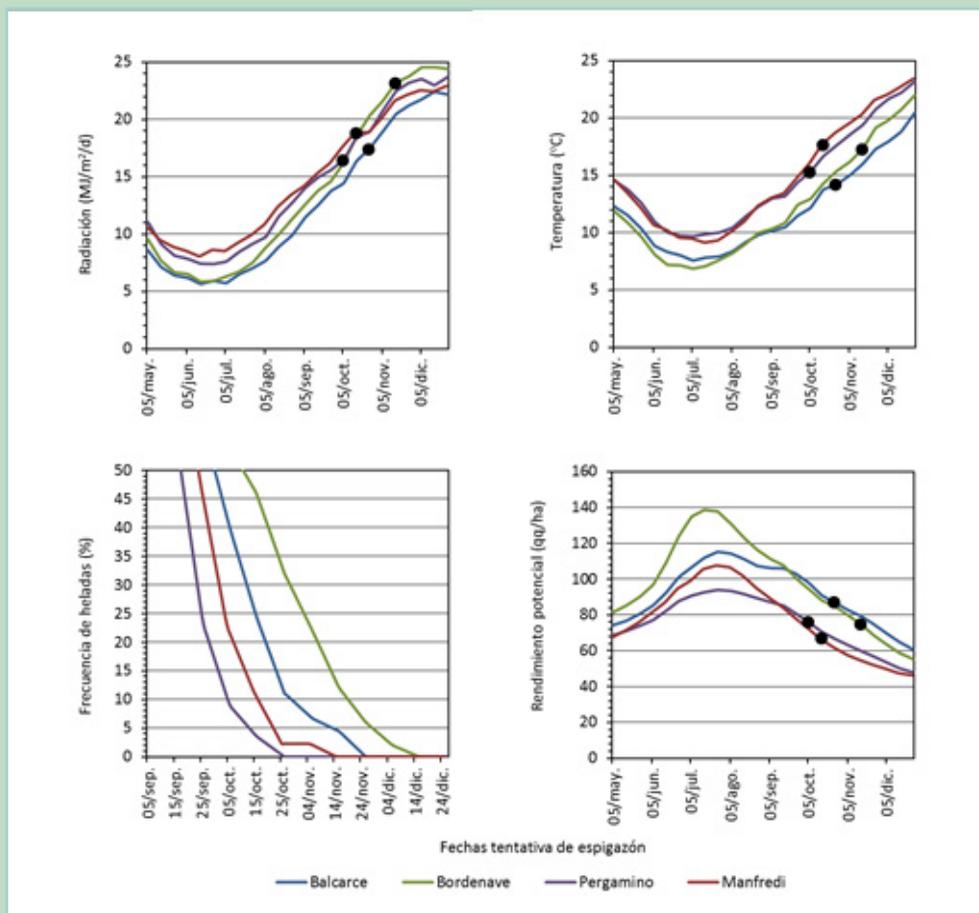


Figura 4. Radiación y temperatura media, frecuencia de últimas heladas (proporción de años con temperaturas mínimas iguales o menores a 0°C medida en abrigo meteorológico, posteriores a la fecha indicada en abscisa), y el rendimiento potencial estimado (con 14% de humedad) a partir de la radiación y la temperatura y las **Ec. (4) a (8)**, para distintas fechas tentativas de espigazón, en cuatro localidad de megambientes climáticos representativos de la región pampeana. Datos basados en cálculos decádicos de las series climáticas 1970-2014 de cada localidad. Los puntos indican la fecha correspondiente a la frecuencia de heladas de 10% (ver **Tabla 1**).

Tabla 1. Ubicación, principales características climáticas (promedio de 45 años), rendimiento potencial estimado y sus componentes, para cuatro localidades de megambientes climáticos representativos de la región pampeana, suponiendo aproximadamente igual ciclo de cultivo en las cuatro localidades y que la fecha de espigazón coincida con 10% de probabilidad de heladas de cada localidad.

| | Balcarce | Bordenave | Pergamino | Manfredi |
|---|----------|-----------|-----------|----------|
| Ubicación dentro de la región pampeana | Sudeste | Sudoeste | Noreste | Noroeste |
| Subregión triguera | IV | VS | IIN | VN |
| Latitud (° sur) | 38 | 38 | 34 | 32 |
| Longitud (° oeste) | 58 | 63 | 61 | 64 |
| Fecha de siembra a | 01/jul | 15/jul | 10/jun | 15/jun |
| Fecha de espigazón = 10% prob. helada ^b | 25/oct | 15/nov | 05/oct | 15/oct |
| Fecha de madurez | 11/dic | 23/dic | 17/nov | 22/nov |
| Ciclo total del cultivo ^(d) | 163 | 161 | 160 | 160 |
| Radiación incidente durante el | | | | |
| PCE (MJ m ⁻² d ⁻¹) ^{b, c} | 17 | 22 | 16 | 18 |
| Temperatura media durante el PCE (°C) ^{b, c} | 14 | 17 | 15 | 17 |
| Cociente fototermal (MJ m ⁻² d ⁻¹ °C ⁻¹) ^c | 0.9 | 0.9 | 0.8 | 0.7 |
| Temperatura media durante llenado (°C) ^{b, d} | 15 | 19 | 17 | 19 |
| Número de granos estimados (1000 granos m ⁻²) | 19 | 19 | 17 | 17 |
| Peso por grano estimado (mg, 14% humedad) | 45 | 38 | 41 | 38 |
| Rendimiento potencial estimado (t ha ⁻¹ , 14% hum.) ^e | 8.6 | 7.2 | 7.2 | 6.4 |

^a a los fines del análisis presentado, la fecha de siembra entre localidades se modificó para mantener igual ciclo.

^b ver detalle en **Figura 4**. ^c promedio durante el **PCE** (período de crecimiento de las espigas, **Figura 1**) computado desde 20 d antes a 15 d después de espigazón. ^d promedio durante los 35 d posteriores a espigazón (aprox. tercera etapa de **Figura 1**). ^e rendimiento potencial estimado a partir de la radiación y la temperatura y la **Ec. (4) a (8)**.

Fecha de siembra óptima

La fecha de espigazón óptima es independiente del ciclo del cultivar, por lo tanto, el modo apropiado de establecer la fecha de siembra óptima es definiendo primero la fecha de espigazón y luego, conociendo el ciclo de siembra a espigazón de los cultivares disponibles, calcular la fecha de siembra de cada cultivar.

Por medio de la elección de cultivares de ciclo apropiado se puede escalonar la siembra, o evitar sembrar en épocas en que el suelo esté demasiado seco (p.ej. invierno en el oeste pampeano) o demasiado húmedo (p.ej. otoño en el este pampeano).

El ciclo de un cultivar dependerá de su sensibilidad a la temperatura y al fotoperíodo, y de los eventuales requerimientos de vernalización. En una dada localidad, si los requerimientos de vernalización son satisfechos, y la temperatura y el fotoperíodo son crecientes (e.d. entre invierno y verano), suele presentarse una asociación positiva entre los días a espigazón y la fecha de emergencia (o de siembra) para una dada localidad, tal como lo ejemplifica la **Figura 5**. Existen herramientas de programación que permiten calcular la fecha de siembra apropiada para una fecha de floración deseada con suficiente precisión para los fines prácticos como el **Programador de Siembra de Trigo** (Di Rienzo et al., 2005).

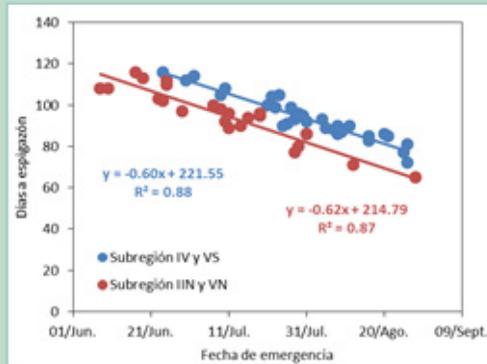


Figura 5. Ejemplo de la relación entre los días a espigazón y la fecha de emergencia de un mismo cultivar en subregiones trigueras del norte y sur de la región pampeana, basado en datos de la RET (Red Nacional de Evaluación de cultivares de Trigo pan, coordinada por el INASE, Argentina). Las rectas de regresión se ajustaron usando en número de día del año (1=1-ene) como variable independiente.

Densidad de siembra óptima

La densidad de siembra óptima (**Do** en número de semillas viables o plantas logradas/m²) será aquella que le permita al cultivo alcanzar el **IAVc**, al inicio del período de crecimiento de las espigas (**Figura 1**).

Sin limitaciones de agua y nutrientes, el **IAV** al inicio del período de crecimiento de las espigas, aumentará al aumentar la duración del período de generación de área verde y la densidad de siembra. A partir de datos de cultivos nacionales y extranjeros sin limitaciones de agua y nutrientes, Abbate (2004) obtuvo una buena asociación entre la **Do** y el ciclo del cultivo (**LC**) expresado como los días entre emergencia y floración (rango: 65-150 d),

$$(9) \quad Do = 4754 \cdot e^{(-0,032 \cdot LC)} \quad (R^2 = 0,95; \text{gl} = 8)$$

donde $e = 2.72...$ es la base de los logaritmos naturales. Fijando como fecha de espigazón deseable la correspondiente al 10% de riesgo de heladas, por medio de la **Ec. (9)** se puede calcular la **Do** en función de la fecha de emergencia (**Figura 6**). Si bien para una misma fecha de siembra, la **Do** es mayor en las localidades del norte que en las del sur, a un mismo largo de ciclo las **Do** tienden a igualarse debido a que la fecha de siembra óptima en las localidades del norte es aproximadamente un mes más temprano que las del sur. A modo de ejemplo, en la **Tabla 2** se presenta la **Do** estimada, para cultivos de igual ciclo creciendo en cada una de las localidades de referencia.

Nótese que la **Figura 6** propone densidades por debajo de 150 plantas m⁻² para siembras tempranas. Esto es así porque la **Ec. (9)** está basada en densidades logradas manualmente. No obstante, si se trabaja con sembradoras convencionales no conviene disminuir la densidad de siembra por debajo del valor indicado. Otro aspecto a tener en cuenta es que:

En trigo, densidades distintas a las óptimas no generan grandes cambios de rendimiento.

Por ejemplo, promediando resultados de seis ensayos conducidos en el sur de la provincia de Buenos Aires, el rendimiento cayó en promedio 12% al reducir la densidad de siembra al 50% de la **Do** (P.E. Abbate, datos no publicados).

Las diferencias en la **Do** entre cultivares puede deberse a diferencias en:

- i) En el ciclo.
- ii) La capacidad de macollaje.
- iii) El coeficiente de extinción (k, Ec. (2)).

Ocasionalmente se observan cultivares pre-comerciales con **Do** mayor o menor a la sugerida por la **Ec. (9)**. Sin embargo, rara vez tal diferencia se da entre los cultivares difundidos ya que a los productores no les resultan convenientes cultivares que requieran aumentar la densidad de siembra y los semilleros no están interesados en promover cultivares con **Do** por debajo de las usuales.

Conociendo la fecha de floración deseada y el ciclo del cultivo, es posible estimar la densidad de siembra óptima. Un cultivo tendrá una **Do** menor si el ciclo del cultivar es largo y la fecha de siembra es temprana.

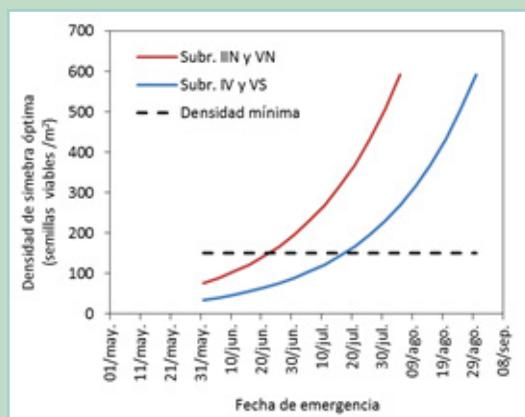


Figura 6. Relación calculada por medio de la **Ec. (9)** entre la densidad de siembra óptima y la fecha de siembra para cultivos sin limitaciones de agua y nutrientes, en subregiones trigueras del norte y sur de la región pampeana, fijando la fecha de espigazón al 10-oct y 4-nov, respectivamente. La línea punteada indica la mínima densidad de siembra recomendable cuando se utilizan sembradoras convencionales.

Variaciones del rendimiento potencial entre localidades

Si bien en las cuatro localidades de referencia la radiación y la temperatura aumentan de invierno a verano, las diferencias a una misma fecha calendario no se corresponde con las diferencias en la fecha de espigazón óptima. Así, al ubicar la fecha de espigazón en la fecha correspondiente al 10% de probabilidad de daño por heladas de cada localidad (puntos marcados en la **Figura 4**), la radiación durante período de crecimiento de las espigas resulta más alta, y por lo tanto más favorable, en las localidades del oeste (Bordenave y Manfredi) que en las del este (Balcarce y Pergamino). Por su parte, la temperatura durante el período de crecimiento de las espigas y el llenado de los granos resulta más baja y por lo tanto más favorable, en las localidades del este (Balcarce y Pergamino) que en las de oeste (Bordenave y Manfredi). La **Tabla 1** resume las diferencias entre localidades. El mayor **RTO_p** corresponde a Balcarce, el de Bordenave y Pergamino resulta intermedio, y el de Manfredi el más bajo.

El **RTO_p** estimado, tiende a reducirse hacia el norte y el oeste de la región pampeana.

Sin embargo, la tendencia general que impone el clima al RTO_p puede no cumplirse ante:

- i) Alteraciones del relieve tales como sierras y espejos o cursos de agua.
- ii) Diferentes posiciones en el relieve.
- iii) Diferentes orientaciones del terreno.

Requerimientos de nutrientes y efecto de sus deficiencias

Nitrógeno

Requerimientos y eficiencia de uso del nitrógeno

Aplicando al nitrógeno (N) un enfoque basado en su eficiencia de uso, el RTO puede expresarse como:

$$(10) \quad RTO = EUN \cdot NT$$

donde NT (en kg N ha^{-1}) es el N total absorbido por el cultivo a madurez por unidad de superficie y EUN (en t grano/kg N) es la “eficiencia de utilización” o “eficiencia fisiológica” para producir RTO , e.d. el cociente entre RTO y NT . Sin embargo, comúnmente se prefiere utilizar un enfoque basado en la inversa de la EUN , la cual representa los “requerimientos relativos de N” (RRN en kg N t^{-1}), e.d. la cantidad de N que el cultivo tiene que absorber a madurez por unidad de RTO . Entonces, los “requerimientos totales”, e.d. la cantidad de N por unidad de superficie que el cultivo deberá absorber para alcanzar el RTO_p esperado, se puede estimar como,

$$(11) \quad NT = RRN \cdot RTO_p$$

La ventaja de la **Ec. (11)** radica en que los RRN para alcanzar el RTO_p son menos variables que el NT y el RTO_p . No obstante, varían en función de la concentración de proteína del grano ($PROT$, en porcentaje) y el nivel de RTO_p esperado, pero esa variación puede ser estimada. La **Figura 7** presenta los RRN y cantidades de NT para un rango de RTO_p esperado y de $PROT$ deseada, válidos para un cultivar promedio argentino, calculados por el método propuesto por Abbate y Andrade (2005) (expresando todas las variables con 14% de humedad en el grano):

$$(12) \quad RRN = (PROT/5.7 - 7.5/RTO_p) / 0.7$$

Puede observarse (**Figura 7a**) que para un dado RTO_p , los RRN se incrementan consistentemente con el nivel de $PROT$. Por el contrario, para un dado nivel de $PROT$, los RRN aumentan levemente con el RTO_p y si bien este cambio no es muy marcado, no se lo debería despreciar cuando las variaciones de RTO_p son importantes.

Los RRN para obtener 11% de $PROT$ (valor de referencia para la comercialización de trigo en Argentina) aumentan de 24 a 26 kg N t^{-1} cuando el rendimiento sube de 3.0 a 8.0 t ha^{-1} (**Figura 7a**).

Las diferencias en el índice de cosecha de N (ICN , e.d. el cociente entre el N del grano y el NT) entre cultivares pueden modificar las asociaciones de la **Figura 7**; sin embargo, esas diferencias son poco comunes. En un estudio que abarcó 33 cultivares comerciales creciendo en Balcarce (Abbate et al., 2007), se encontraron diferencias sustanciales en la EUN entre cultivares, pero no en el ICN .

Según la **Ec.(10)**, a igual cantidad de **NT** es de esperar que cultivares con mayor **EUN** produzcan más rendimiento. Tal situación, que se visualiza en la **Figura 7b** como una recta paralela a las abscisas, generará la conocida relación negativa entre **PROT** y rendimiento. La **Figura 7b** permite visualizar que esa asociación puede alterarse manejando el **NT** a través de la disponibilidad de N. Altos porcentajes de **PROT** implican altos **RRN** y baja eficiencia, ya que $EUN=1/RRN$. En consecuencia:

Existe una situación de compromiso entre alta **PROT** y alta **EUN** por lo cual la **EUN** puede optimizarse pero no maximizarse y su óptimo será función del nivel de **PROT** deseada.

El nivel de **PROT** deseable en el grano de trigo responde a razones comerciales y/o sociales que escapan al alcance de este trabajo. Independientemente de cuál sea la pauta para definir la **PROT** deseada, ese valor debe estar contemplado en los **RRN** al aplicar la **Ec. (11)** y **Ec. (12)**. Si se suministra al cultivo la cantidad de **NT** necesaria para alcanzar la **PROT** de referencia de la Argentina (11%), la **EUN** rondará entre 38 y 42 kg kg N⁻¹ (**Ec. (12)**). Si se suministra al cultivo una cantidad de N menor, la **EUN** puede aumentar a aproximadamente 54 kg kg N⁻¹ cuando el rendimiento cae al 75% del **RTO_p**, o aumentar a 64 kg kg N⁻¹ cuando el rendimiento cae al 50%, pero estos aumentos de **EUN** son siempre a costa de perder **PROT** y/o rendimiento. Por el contrario, si el suministro de N es mayor al óptimo, se reducirá la **EUN** sin ninguna ventaja comercial.

El análisis presentado se basó en el **RTO_p** y en el **NT**, no obstante, es válido para alcanzar rendimientos esperados sin limitaciones de N aunque estos no sean potenciales debido al efecto de limitaciones de agua, otros nutrientes o factores sanitarios. En todo caso, el problema en tales situaciones es estimar cual será el rendimiento al momento de tomar decisiones sobre del manejo del N del cultivo. Respetto del **NT**, este es una fracción del N disponible para el cultivo, que no suele superar el 80% de la suma entre el N presente en el suelo y el del fertilizante (Abbate P.E., datos no publicados). Los detalles relacionados con la absorción del N del suelo se tratan en el **Capítulo 6**.

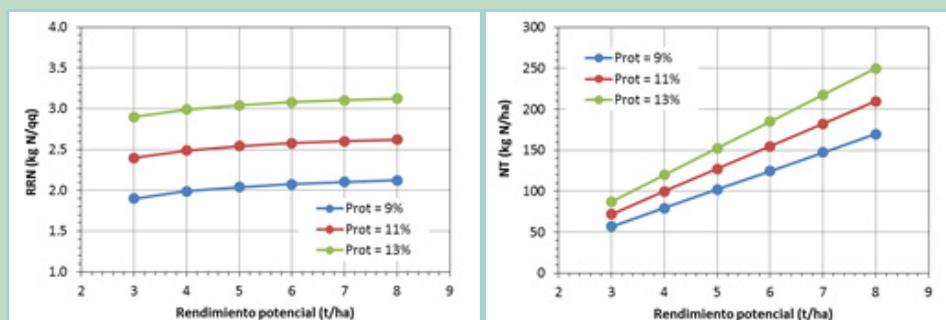


Figura 7. (a) Requerimientos relativos de N (**RRN**) necesarios para alcanzar distintos rendimientos potenciales (**RTO_p**), con distintos niveles de concentración de proteína en el grano (**PROT**). **(b)** Cantidad total de N absorbido por el cultivo a madurez (**NT**) requerida para alcanzar distintos **RTO_p**, con distintos niveles de **PROT**. Datos calculados medio de la **Ec. (12)**. Todas las variables expresadas con 14% de humedad en el grano.

Deficiencia de nitrógeno

Ante una deficiencia de N durante el período de generación del área verde, el cultivo disminuirá su **TCC (Ec. (1))**, debido a que no podrá generar ni mantener un **IAV (Ec. (2))** por arriba del valor crítico y porque muchas de sus hojas presentarán clorosis disminuyendo la EUR. Esto afectará al **NG** y al rendimiento a través de una menor **TCC** durante el período de crecimiento de las espigas. Además, una deficiencia de N en esta etapa reduce la fertilidad de las espigas (número de granos por unidad de peso de espigas), contribuyendo a una mayor caída del **NG** y en definitiva del rendimiento. Por otro lado:

Si una deficiencia de N afecta solamente la etapa temprana del cultivo, no es de esperar que el rendimiento se afecte si el cultivo recupera la fertilidad (p. ej. a través de una fertilización) y alcanza a generar el **IAVc** al inicio del período de crecimiento de las espigas.

Las deficiencias de N tienden a adelantar la fecha de floración acortando la duración del período de crecimiento de las espigas, pero este efecto se da solamente cuando el crecimiento del cultivo está sumamente afectado. Si bien las limitaciones de N reducen la fuente para el llenado de los granos, también reduce el número granos a llenar, manteniendo estable el **GLD (Ec. (7))**. En consecuencia:

Rara vez la baja disponibilidad de N por sí sola afecta el PG, no obstante, disminuye la **PROT**, lo cual reduce el precio del grano.

Fósforo

Los criterios más utilizados para definir los requerimientos fósforo (P) se basan en (i) la determinación química del P extractable del suelo, y (ii) la reposición del P exportado con el grano cosechado (ver **Capítulo 6**). Independientemente del criterio utilizado, los requerimientos totales de P (en kg P ha⁻¹) aumentarán al aumentar al **RTO_p** esperado (**Tabla 2**). Al comparar la exportación de P de 66 cultivares argentinos (Lázaro et al., 2012), se encontraron diferencias independientes del nivel de rendimiento. Estas diferencias representaron en promedio 3.5% del rendimiento respecto un cultivar promedio. Si bien la importancia práctica de este ahorro no resultaría relevante para un productor individual, a nivel país representaría un ahorro promedio de 24 millones de dólares anuales.

El principal efecto de las deficiencias de P es reducir la generación del **IAV** y, en consecuencia, la radiación interceptada. Resumidamente, su efecto es similar a lo considerado para el N, excepto que ante deficiencias de P no se ha observado reducción de la fertilidad de las espigas. Esto se puede deber a que las deficiencias de P suelen producirse desde comienzos del ciclo del cultivo y van reduciendo su intensidad hacia floración. Por el contrario, las de N se acentúan durante el período de crecimiento de las espigas. Tanto las deficiencias de P como las de N suelen operar a través del **NG**, solamente deficiencias de nutrientes severas llegan a afectar el **PG**. Por otro lado, la alta concentración de P en el grano no constituye una ventaja comercial.

Requerimientos, Eficiencia de Uso y Deficiencia de Agua

Requerimientos y eficiencia de uso del agua

Desde el punto de vista del agua, el RTO_p suele analizarse como:

$$(13) \quad RTO_p = EUA \cdot ET_c$$

donde ET_c (en mm) es la evapotranspiración potencial del cultivo y EUA (en $kg \text{ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) es la eficiencia de uso de agua para producir RTO_p . La EUA para producir biomasa aumenta cuando disminuye el DPV y, como ya se lo señaló, esto ocurre cuando decrece la temperatura y aumenta la humedad relativa del aire. En la región pampeana, el DPV aumenta de invierno a verano y para una misma fecha, predomina el aumento de sur a norte y de este a oeste (**Figura 8**). Sin embargo, al considerar la fecha de espigazón correspondiente al 10% de probabilidad de daño por heladas de cada localidad, Balcarce presenta el DPV más favorable, Bordenave y Manfredi presentan el más desfavorable, y Pergamino un valor intermedio (**Tabla 2** y puntos marcados en la **Figura 8**). Estas diferencias del DPV determinan diferencias en la EUA entre localidades y entre fechas de espigazón dentro de cada localidad que pueden ser estimadas por medio de la ecuación (**Figura 9**):

$$(14) \quad EUA = 24.2 / DPV$$

La ETC (**Ec. (13)**) representa los requerimientos de agua necesarios para que el cultivo alcance el RTO_p . El método actualmente preferido para estimar la ETC es conocido como FAO-56 (Allen et al. 1998; donde el sufijo 56 corresponde al número de publicación de la serie), según el cual,

$$(15) \quad ET_c = K_c \cdot ET_o$$

y

$$(16) \quad K_c = KC_B + K_E$$

donde KC es el "coeficiente de cultivo", KC_B es el "coeficiente de evapotranspiración basal" específico para cada estado de desarrollo del cultivo, K_E es el "coeficiente de evaporación del suelo" y es ET_o es la evapotranspiración potencial calculada por un método de referencia, siendo el método de FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998) el más usual. Para cultivos del mismo ciclo (160-163 días de siembra a madurez en la **Figura 8** y la **Tabla 2**) puede estimarse que la ET_c de la región pampeana sigue un comportamiento similar al del DPV , e.d. aumenta de invierno a verano, y para una misma fecha predomina el aumento de sur a norte y de este a oeste (**Figura 8**). Sin embargo, al considerar la fecha de espigazón establecida por la probabilidad de 10% de daño por heladas de cada localidad (puntos marcados en la **Figura 8**), predomina el aumento de la ET_c de este a oeste siguiendo a la temperatura (**Figura 4** y **Tabla 1**).

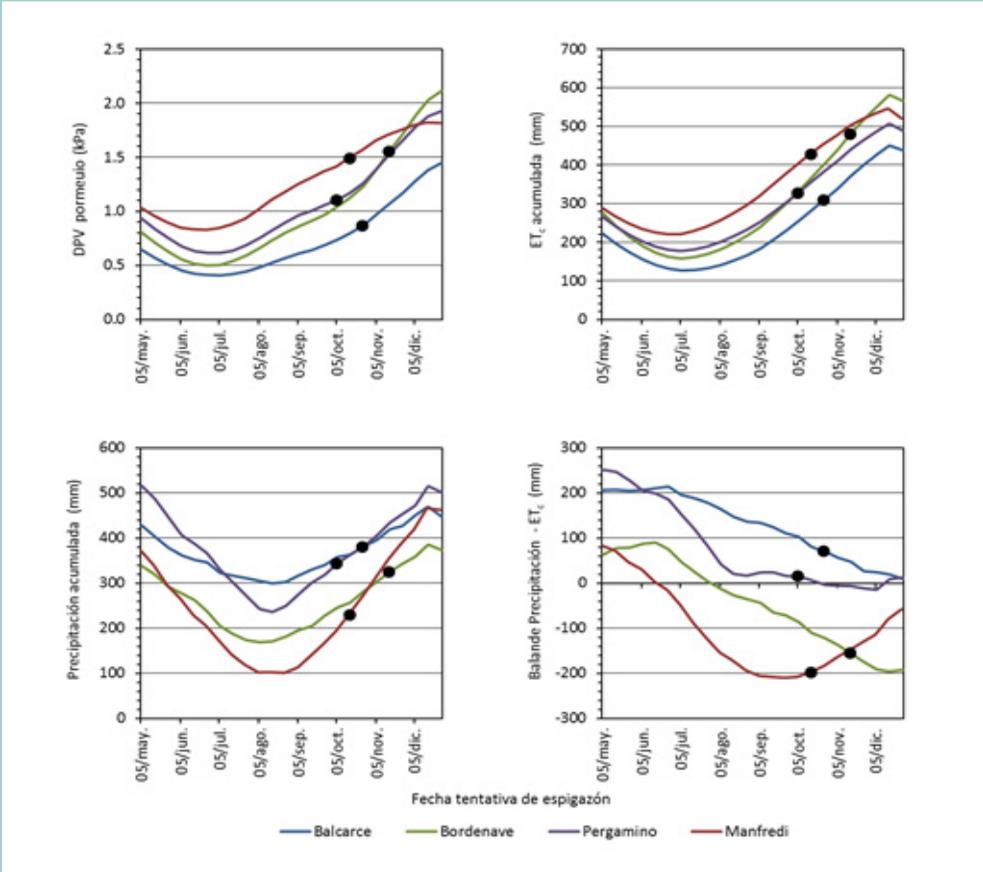


Figura 8. Déficit de presión de vapor (DPV) desde 15 días antes a 35 días después de espigazón, evapotranspiración potencial del cultivo en siembra directa (ET_c , **Ec. (15)**, Allen et al. 1998), precipitación acumuladas durante el ciclo de un cultivo de 160 días (**Tabla 2**), y balance entre precipitación y ET_c , para distintas fechas tentativas de espigazón, en cuatro localidades de megambientes climáticos representativos de la región pampeana. Datos basados cálculos decádicos de las series climáticas 1970-2014 de cada localidad. Los puntos indican la fecha correspondiente a la frecuencia de heladas de 10% (ver **Tabla 1**).

Tabla 2. Estimación de la densidad de siembra óptima, los requerimientos relativos y totales de nitrógeno, y la demanda, balance global y eficiencia de uso de agua, para cuatro localidades de megambientes climáticos representativos de la región pampeana (ver otras características de estas localidades en la **Tabla 1**).

| | Balcarce | Bordenave | Pergamino | Manfredi |
|--|----------|-----------|-----------|----------|
| Rendimiento potencial estimado (t ha ⁻¹ , 14% hum.) ^a | 8.6 | 7.2 | 7.2 | 6.4 |
| Ciclo total del cultivo (d) | 163 | 161 | 160 | 160 |
| Densidad óptima estimada (pl. m ⁻²) ^b | 188 | 150 | 182 | 155 |
| Requerimientos relativos de N, proteína=11% (kg N t ⁻¹) ^c | 26 | 26 | 26 | 26 |
| Requerimientos totales de N absorbido (kg N ha ⁻¹) | 227 | 187 | 188 | 165 |
| Exportación de P relativa (kg P t ⁻¹) | 3.6 | 3.6 | 3.6 | 3.6 |
| | Balcarce | Bordenave | Pergamino | Manfredi |
| Exportación total de P (kg P ha ⁻¹) | 31 | 26 | 26 | 23 |
| Demanda de agua hasta madurez (mm) ^d | 323 | 469 | 332 | 417 |
| Demanda de agua diaria (mm d ⁻¹) | 2.0 | 2.9 | 2.1 | 2.6 |
| Lluvia hasta madurez (mm) ^{e, f} | 397 | 317 | 349 | 218 |
| Diferencia = Lluvia - Demanda (mm) | 74 | -152 | 16 | -199 |
| Déficit de presión de vapor promedio (kPa) desde 15 días antes a 35 días después de espigazón ^f | 0.57 | 0.97 | 0.75 | 1.00 |
| Eficiencia de uso del agua para rendimiento calculada (kg ha ⁻¹ mm ⁻¹ , 14% humedad) | 27 | 15 | 22 | 15 |

^a ver detalles en la **Tabla 1**.

^b para cultivos sin limitaciones de agua ni nutrientes, según **Ec. (9)**.

^c según **Ec. (13)**.

^d promedio histórico, en siembra directa (**Ec. (15)**, Allen et al. 1998).

^e promedio histórico para cada localidad.

^f ver detalle en **Figura 8**.

La disponibilidad de agua proveniente de las precipitaciones aumenta de invierno a verano y de oeste a este, incluso al considerar la fecha establecida por la probabilidad de 10% de daño heladas de cada localidad, ese patrón geográfico no se pierde (**Figura 8, Tabla 2**). Lo mismo ocurre con el balance entre las precipitaciones y el **ETC** (**Figura 8, Tabla 2**). Debido a que hacia el oeste el balance se torna más negativo, la cantidad de agua almacenada en el suelo a la siembra puede tener un valor estratégico fundamental. Este es el caso de los suelos profundos de la Subregión VN donde muchos productores pueden llegar a desistir de sembrar trigo si en el suelo no se acumuló a la siembra una cantidad de agua que permita alcanzar un rendimiento mínimo esperado. Hacia el sur (Subregión VS), la acumulación de agua en el suelo a la siembra es frecuentemente limitada por la profundidad de los suelos debido a la presencia de un horizonte de tosca.

Una característica de la región pampeana es que, desde el punto de vista de las precipitaciones, la estación más seca es el invierno, sin embargo, el balance entre las precipitaciones y la **ETC**, disminuye de invierno a verano (**Figura 8**).

Con el adelanto de la fecha de espigazón es de esperar un menor déficit hídrico junto con una mayor **EUA**. No obstante, cabe preguntarse si en localidades como Manfredi, donde el balance entre precipitaciones y **ET_c** mejora luego de alcanzar un valor mínimo al inicio de la primavera, no sería ventajoso retrasar la fecha de espigazón. Tales situaciones requieren de un análisis puntual que contemple, además del balance entre precipitaciones y **ET_c**, el efecto modulador del consumo de agua que genera el suelo a través de su capacidad de almacenaje, la cantidad de agua acumulada en el suelo a la siembra, la retención de agua del suelo al disminuir su contenido y la disminución de la

EUA al retrasar la fecha de espigazón. Si bien puede haber localidades como Manfredi, en las que el retraso de fecha de espigazón puede resultar neutro o incluso ventajoso, para la mayor parte de la región pampeana, tanto al considerar la economía del agua del cultivo como desde el punto de vista del rendimiento potencial, resulta conveniente ubicar la fecha de espigazón lo más temprano que lo permitan las heladas tardías. En definitiva, las fechas de espigazón óptimas presentadas en el **Tabla 1**, mantienen su validez para la mayoría de las situaciones sin riego.

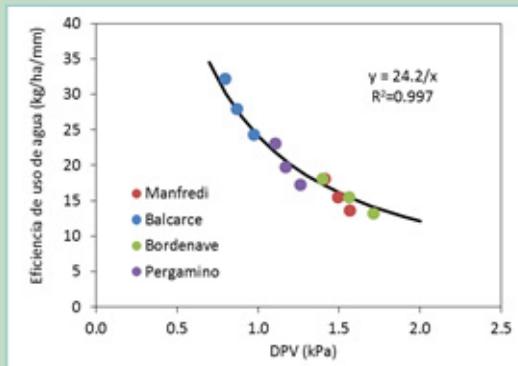


Figura 9. Efecto del déficit de presión de vapor (DPV) promedio desde 15 días antes a 35 días después de espigazón, sobre la eficiencia de uso del agua de trigo para producir rendimiento (cociente entre el rendimiento potencial y el consumo potencial de agua de siembra a madurez, ver **Tabla 2**), correspondiente a tres fechas de espigazón (óptima, adelanto y retraso de 10 días), para cuatro localidades de megambientes climáticos representativos de la región pampeana.

En las secciones previas no se consideró el efecto del ciclo del cultivar sobre el RTO_p , no obstante, resulta importante considerar el efecto del ciclo en situaciones de secano. Comparando los cultivares de ciclo largo con los de ciclo corto, evaluados en la RET de las localidades de referencia, durante las campañas 2007 a 2015, se encontró que con diferencias de ciclo de 22 a 42 días según localidad, las diferencias de rendimiento en promedio, no resultaron relevantes en ninguna localidad (157 kg ha^{-1} , equivalente a 3%). Si bien en algunos años hubo diferencias de rendimiento más importantes tanto a favor de los cultivares de ciclo largo como de los de ciclo corto, estas situaciones no son predecibles a priori y por lo tanto no es factible aprovecharlas a través del manejo del cultivo.

La **Tabla 2** resume los aspectos más relevantes de la economía del agua de las cuatro localidades de referencia, para cultivos de igual ciclo, con fecha de espigazón correspondiente al 10% de probabilidad de heladas de cada localidad. En definitiva:

A diferencia de lo que ocurre con los nutrientes, los requerimientos de agua no resultan proporcionales al RTO_p , y el clima tiene un efecto directo tanto sobre el consumo (ET_c) como sobre la eficiencia de uso del recurso.

Por ejemplo, pese a que el RTO_p de Bordenave es menor al de Balcarce, en Bordenave se necesitará más agua por unidad de rendimiento para alcanzar el RTO_p .

Las localidades con baja disponibilidad hídrica y alto **DPV** tienen una desventaja crítica para producir trigo ya que tanto el agua proveniente de las lluvias como la del riego eventual tendrán menor **EUA** que la de una localidad con bajo **DPV**.

Deficiencias de agua

Entre los factores climáticos que afectan al cultivo de trigo, la lluvia es el más variable. Una sequía puede afectar el rendimiento en cualquiera de los tres períodos de generación del rendimiento (**Figura 1**). Las sequías pueden reducir la **TCC** (**Ec. (1)**) a través de:

- i) La disminución de la **RFA** interceptada, debido a una menor exposición del **IAV** (por enrulado y acartuchado de hojas) o por muerte de hojas.
- ii) La disminución de la **EUR**. La caída de la **EUR** será más marcada cuando el **DPV** sea más alto.

Las reducciones tempranas del **IAV** no producirán caídas de rendimiento si, pasado el período de estrés, el cultivo alcanza a generar el **IAVc** antes del inicio del período de crecimiento de las espigas.

Si la deficiencia continúa, comprometiendo el período de crecimiento de las espigas, el **NG** se verá afectado, incluso aunque se restablezca la disponibilidad de agua posteriormente.

La reducción del **NG** se da a través de una menor interceptación y eficiencia de uso de la **RFA**, que reduce el peso seco de las espigas m^{-1} . Existe además un efecto depresor de la fertilidad de las espigas que reduce aún más el **NG** cuando aumenta el **DPV**. La disponibilidad de agua puede modificar la velocidad de desarrollo hasta anthesis aumentándola con deficiencias moderadas o reduciéndola con deficiencias severas. Sin embargo, la relevancia de este hecho es relativa, porque para cuando se manifiesta, el crecimiento del cultivo ya fue seriamente afectado y el rendimiento limitado.

El déficit hídrico durante el período de llenado del grano reduce la **TCC** en esta etapa y, en consecuencia, puede afectar el **PG**.

Las sequías durante el llenado son frecuentes y, en general, están acompañadas de altas temperaturas, confundiendo los efectos. Cuanto mayor sea la cantidad de granos (destinos) a llenar, mayor será el efecto depresor de la sequía sobre el **PG**, es decir, menor será el **GLD** (**Ec. (7)**). La reducción del **GLD** además de disminuir el rendimiento, puede mermar el peso hectolítrico pudiendo afectar el valor comercial del grano.

Conclusiones

- En este capítulo se describe el cultivo de trigo por medio de relaciones conceptuales y cuantitativas, prestándole especial atención a las particularidades de la región triguera argentina. La generación del rendimiento se analizó, dividiendo el ciclo del cultivo en tres períodos con distinta funcionalidad: (i) el período de generación del área verde, (ii) el período de crecimiento de las espigas y (iii) el período de llenado del grano. Las variaciones de rendimiento dentro de la región pampeana argentina se analizaron comparando los cuatro megambientes climáticos más característicos.

- El rendimiento potencial de trigo (es decir, el que se puede alcanzar con un cultivar dado sin limitaciones hídricas, nutricionales, ni sanitarias), tiende a decrecer hacia el norte y el oeste de la región pampeana argentina, debido principalmente al aumento de la temperatura. Independientemente de la localidad, el rendimiento potencial estimado disminuyó al retrasar la fecha de espigazón hacia el verano. Una fecha de espigazón lo más temprana posible, teniendo en cuenta un bajo riesgo de daño por helada, permitirá exponer al cultivo a la mejor combinación de radiación y temperatura que ofrezca cada localidad. Establecida la fecha de espigazón óptima, se podrá definir la fecha y densidad de siembra en función del ciclo del cultivar elegido.

- La cantidad de nutrientes que el cultivo deberá absorber para alcanzar el rendimiento potencial, será proporcional al nivel de rendimiento. Sin embargo, como los requerimientos de N se incrementan consistentemente con el nivel de proteína, existe una situación de compromiso entre alta calidad comercial y alta eficiencia de uso para ese nutriente. Tal situación de compromiso no se aplica al P ya que su concentración en el grano no tiene ventaja desde el punto de vista de la calidad. En este caso, lograr una alta eficiencia de uso resulta una estrategia adecuada para reducir los costos de fertilización y la exportación de P con el grano.

- A diferencia de lo que ocurre con los nutrientes, los requerimientos de agua no resultan proporcionales al rendimiento y el clima tiene un efecto directo tanto sobre el consumo como sobre la eficiencia de uso del recurso. La espigazón temprana, además de permitir maximizar el rendimiento potencial, permitirá reducir los requerimientos diarios de agua y aumentar su eficiencia de uso en la mayor parte de la región triguera argentina; en definitiva, permitirá optimizar la economía del agua del cultivo.

El autor agradece las sugerencias de Fernando García (IPNI), Alejandra Marino (FCA, UNMDP) y Guillermo Divito (AAPRESID, Regional Necochea).

Referencias

- Abbate P.E. 2004. Ecofisiología de trigo: aspectos prácticos para el manejo del cultivo. En: La hora del empowerment. Actas del 12° Congreso nacional de siembra directa. AAPRESID. Rosario, 10 al 13-ago-2004, tomo 1, 121-127.
- Abbate P.E. y Andrade F.H. 2005. Los nutrientes del suelo y la determinación del rendimiento de los cultivos de grano. En: Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Ed. Echeverría H.E. y García F.O. Ediciones INTA, Balcarce. 43-66.
- Abbate P.E. y Lázaro L. 1998. Rendimiento potencial de trigo. *Alea Informa*, 1, 11-13.
- Abbate P.E. y Lázaro L. 2001. Ecofisiología del trigo candeal. En: Manual de Trigo Candeal. Barrow, Bs. As. 23-29.
- Abbate P.E. y Lázaro L. 2010. Estimación del rendimiento potencial de trigo en Paraguay y sus requerimientos de agua y nutrientes. En: Del grano al pan. Ed. Kholi M. M., Cubilla L.E. y Cabrera G. Editorial CAPECO/INBIO, Asunción, Paraguay. 11-29.
- Abbate P.E., Andrade F.H. y Culot J.P. 1994. Determinación del rendimiento en trigo. *Boletín Técnico* 133, Estación Experimental Agropecuaria Balcarce, INTA. 17 pp.
- Abbate P.E., Brach A.M., Gutheim F., Ramón López J., González F.G. 2008. Peso potencial del grano y grado de limitación por destinos a través de la región triguera argentina. 13° Reunión Latinoamericana y 27° Reunión Argentina de Fisiología Vegetal. Rosario, Santa Fe, Argentina, 21 al 24-sep.
- Abbate P.E., Lázaro L. y Andrade F.H. 1997. ¿Es posible incrementar el número de granos por unidad de superficie en trigo? Taller Internacional Explorando Altos Rendimientos en Trigo. INIA La Estanzuela, Colonial Uruguay, 20 al 23-oct-1997.
- Abbate P.E., Lázaro L., Gutheim F. y Bariffi J.H. 2007. Nitrogen and phosphorus grain concentration and use efficiency in wheat. 1° Conferencia Internacional sobre Cereales y Productos de Cereales, Calidad e Inocuidad. ICC, Rosario, Santa Fe, 23 al 26-sep-2007.
- Abbate P.E., Lázaro L., Montenegro A.A., Bariffi J.H. y Gutheim F. 2005b. Potential yield of argentine vs. foreign wheat cultivars. 7° International Wheat Conference. Mar del Plata, Bs. As., Argentina.
- Abbate P.E., Lázaro L., Montenegro A.A., Gutheim F., Demotes-Mainard S. de Pablo M.C. y Bariffi J.H. 2001. Potencial productivo de cultivares nacionales y extranjeros. En: 18° Jornada de actualización profesional en el cultivo de trigo. INTA EEA Balcarce, FCA UNMdP, CIAM, Mar del Plata. 13-20.
- Allen R.G., Pereira L.S. Raes D., y Smith M. 1998. Referente evapotranspiration (ET₀). En: Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO, Irrigation and Drainage Paper 56, Roma, Italia. 15-86.
- Di Rienzo J., Abbate P.E., Cantarero M. 2005. El programador de siembra de trigo. <https://sites.google.com/site/progsitrigo/>
- 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.
- Lázaro L. y Abbate P.E. 2012. Cultivar effects on relationship between grain number and photothermal quotient or spike dry weight in wheat. *Journal of Agricultural Science, Cambridge*, 150, 4, 442-459.
- Monteith, J.L. 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *J. Appl. Ecol.*, 9, 747-766.
- Monsi M. y Saeke T. 1953. Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. *Jap. J. Bot.*, 14, 22-52. (*Annals of Botany* 2005, 95, 549-567, en inglés).