

Economía del nitrógeno en maíces de siembra temprana y tardía

*Tesis presentada para optar al título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires, Área
Ciencias Agropecuarias*

Nicolás Elías Maltese

Ingeniero agrónomo - Universidad Nacional de La Plata - 2013

Lugar de trabajo: EEA INTA Paraná – FCA Universidad Nacional de Entre Ríos



FAUBA Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano



Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires

COMITÉ CONSEJERO

Director

Octavio Pedro Caviglia

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional de Entre Ríos)

Dr. en Ciencias Agrarias (Universidad Nacional de Mar del Plata)

Co-director

Gustavo Ángel Maddonni

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

Dr. en Ciencias Agropecuarias (Universidad de Buenos Aires)

Consejero de estudios

Ricardo José Miguel Melchiori

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional de Entre Ríos)

Magister en Producción Vegetal (Universidad Nacional de Mar del Plata)

JURADO DE TESIS

JURADO

Lucas Borrás

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

Dr. en Ciencias Agropecuarias (Universidad de Buenos Aires)

JURADO

Hernán Eduardo Echeverría

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional de Mar del Plata)

Magister en Producción Vegetal (Universidad Nacional de Mar del Plata)

JURADO

Fernando Salvagiotti

Ingeniero agrónomo (Universidad Nacional de Córdoba)

Master Science en Producción Vegetal (Universidad de Buenos Aires 2004)

Dr. en Ciencias del Suelo y Agua (University of Nebraska-Lincoln USA)

Fecha de defensa de la tesis: 23 de Abril de 2020

Dedicatoria

A mi familia, Cristina, Humberto, Matías e Ivon

Por su apoyo incondicional y los valores transmitidos.

A mis amigos, Lucas, Milton, Rodrigo, Gabriela, Estefanía, Alfonsina, José, Pedro

Por su compañía y brindarme siempre su amistad y contención.

*A mis compañeros de trabajo de la EEA INTA Paraná y FCA - UNER, Ricardo, Octavio,
Gustavo, Leonardo, Alejandra, César, Armando, Stefanía, Jorge, Claudio, Gustavo,
Carolina*

*Por su amistad, compañerismo y contribución en los numerosos momentos de trabajo
compartido.*

A mi novia, Pamela

Por su amor, apoyo incondicional y compañerismo en cada proyecto que he emprendido.

Agradecimientos

En principio quiero agradecer a todas las personas que hicieron posible la realización de ésta tesis.

A Octavio Caviglia, por su predisposición e incansable contribución a mi formación en el ámbito académico y de la investigación, también por sus numerosos consejos a la hora de desarrollar ésta tesis.

A Ricardo Melchiori, por su compañerismo y al valioso tiempo invertido en discusiones agronómicas vinculadas al tópico de la tesis, por su colaboración en los ensayos de campo, también por guiarme en el camino de la investigación y el desarrollo de nuevos conocimientos.

A Gustavo Maddonni, por su contribución y valiosos aportes a la tesis y trabajos derivados de la misma, también por su gran apoyo como compañero de trabajo, atendiendo siempre bien predispuesto a todas mis inquietudes a lo largo de mi carrera de doctorado e incluyéndome siempre en sus proyectos.

A mis compañeros de la EEA INTA Paraná, quienes colaboraron desinteresadamente en la conducción de los experimentos y el procesamiento de muestras correspondientes a la tesis.

A mis compañeros de la Cátedra de Climatología Agrícola de la FCA – UNER, quienes siempre me brindaron su apoyo y contribuyeron a la formación del equipo de trabajo.

A la EPG- FAUBA y EEA INTA Paraná por brindar sus recursos e instalaciones que hicieron posible la realización de esta tesis.

Declaración

Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra institución.

Ing. Agr. Nicolás Elías Maltese

Publicaciones derivadas de la Tesis

Maltese, N.E., Melchiori, R.J.M., Maddonni, G.A., Ferreyra, J.M., Caviglia, O.P. 2019. Nitrogen economy of early and late-sown maize crops. *Field Crops Res.* 231, 40-50.

Índice general

Índice de cuadros	XI
Índice de figuras	XIII
Abreviaturas	XVIII
Resumen	XX
Abstract	XXI
Capítulo 1: Introducción General	1
1.1. Introducción	2
1.1.1. Contexto productivo	2
1.1.2. Ambientes para fechas de siembra tempranas y tardías en maíz.....	2
1.1.3. Economía del N en fechas de siembra tardías para maíz: aproximación a nivel de cultivo.....	3
1.1.4. Economía del N en fechas de siembra tardías para maíz: aproximación a nivel de planta individual	5
1.2. Hipótesis y Objetivos.....	7
1.2.1. Hipótesis	7
1.2.2. Objetivo general	7
1.2.3. Objetivos específicos	7
1.3. Secuencia de presentación correspondiente a los resultados obtenidos	7
Capítulo 2: Economía del N en maíces de siembra temprana y tardía⁰	9
2.1. Introducción	10
2.2. Materiales y Métodos	11
2.2.1. Experimentos y manejo del cultivo.....	11
2.2.2. Mediciones sobre el cultivo y muestreo de suelo	12
2.2.3. Cálculos	12
2.2.4. Análisis estadístico	13
2.3. Resultados	14
2.3.1. Condiciones climáticas.....	14
2.3.2. Disponibilidad de N y Rto de grano	16
2.3.3. Absorción total de N, N_{abspre} , $N_{abspost}$, N_{remAP} , ICN y concentración de N en grano.....	18
2.3.4. Eficiencia de uso del N, componentes y su correlación con las condiciones ambientales	22
2.3.5. Relaciones entre la EUN_g y sus componentes	26
2.3.6. Fuentes de N y B post-floración por grano	29

2.4.	Discusión.....	31
2.5.	Conclusiones.....	33
2.6.	Relación de los resultados con las hipótesis planteadas	34
2.7.	Relación con los siguientes capítulos	34
Capítulo 3: Optimización de la densidad de plantas, dosis de nitrógeno y la elección del genotipo en maíces tardíos, para alcanzar una alta eficiencia de uso del nitrógeno		
.....		35
3.1.	Introducción.....	36
3.2.	Materiales y Métodos	37
3.2.1.	Experimentos y manejo del cultivo.....	37
3.2.2.	Mediciones sobre el cultivo y muestreo de suelo	37
3.2.3.	Cálculos	37
3.2.4.	Análisis estadístico	37
3.3.	Resultados	38
3.3.1.	Fenología y condiciones climáticas	38
3.3.2.	Producción total de biomasa y Rto de grano	38
3.3.3.	N disponible, N absorbido durante los periodos pre- y post-floración, y N absorbido total.....	39
3.3.4.	Eficiencia de uso de N para producción de grano y sus componentes	42
3.3.5.	Relaciones entre componentes de la EUN _g y sus variables asociadas	47
3.3.6.	Combinación de prácticas de manejo para optimizar Rto y EUN _g	50
3.4.	Discusión.....	51
3.5.	Conclusiones.....	53
3.6.	Relación de los resultados con las hipótesis planteadas	54
3.7.	Relación con los siguientes capítulos	54
Capítulo 4: Economía del N en maíces tempranos y tardíos, una aproximación a nivel de planta individual		
.....		55
4.1.	Introducción.....	56
4.2.	Materiales y Métodos	57
4.2.1.	Experimentos y manejo del cultivo.....	57
4.2.2.	Mediciones sobre el cultivo y muestreo de suelo	57
4.2.3.	Cálculos	58
4.2.4.	Análisis estadístico	58
4.3.	Resultados	59
4.3.1.	Condiciones climáticas.....	59

4.3.2. Número de granos por planta, tasa de crecimiento por planta alrededor de floración y estatus N por planta a R1.....	59
4.3.3. Eficiencia de fijación de granos, número de granos por planta y prolificidad bajo diferentes rangos de TCP y estatus N alrededor de floración...	62
4.3.4. Relación entre la eficiencia de uso de N para producir granos a escala de cultivo y componentes ecofisiológicos a escala de planta individual.....	65
4.4. Discusión.....	67
4.5. Conclusiones.....	69
4.6. Relación de los resultados con las hipótesis planteadas	69
Capítulo 5: Discusión general y Conclusiones	71
5.1. Análisis global de los resultados obtenidos	72
5.1.1. Conclusión general.....	74
5.2. Alcances de la información obtenida	77
5.3. Vínculo con futuras líneas de investigación	77
Bibliografía	80
Anexo.....	86

Índice de cuadros

- Cuadro 2.1.** Contenido de N-NO_3^- (0-60 cm) en el suelo a la siembra (N_s) y N mineralizado (N_{min}) desde siembra a R6 en maíces de siembra temprana y tardía en dos experimentos (2014-15 y 2015-16; Exp1 y Exp2, respectivamente) llevados a cabo en Paraná (Lat. $31,8^\circ\text{S}$), Argentina. 27
- Cuadro 2.2.** Análisis de varianza y valores medios para el total de N disponible (N_d) durante el ciclo de cultivo, Rto de grano, índice de cosecha (IC), absorción de N total (N_{abs}) durante el ciclo de cultivo, absorción de N durante el periodo pre- y post-floración (N_{abspre} y $\text{N}_{\text{abspost}}$, respectivamente), removilización aparente de N durante el período post-floración (N_{remAP}), índice de cosecha de N (ICN) y concentración de N en grano en dos experimentos (2014-15 y 2015-16; Exp1 y Exp2, respectivamente) conducidos en Paraná (Lat. $31,8^\circ\text{S}$), Argentina. En cada combinación de fechas de siembra x Exp, se evaluaron dos híbridos con tres dosis de N. 33
- Cuadro 2.3.** Análisis de varianza y valores medios para la eficiencia de uso de nitrógeno (EUN_g), la eficiencia de utilización de nitrógeno (E_{utN_g}) y la eficiencia de absorción de nitrógeno (E_{absN}) en dos experimentos (2014-15 y 2015-16; Exp1 y Exp2, respectivamente) que fueron conducidos en Paraná (Lat. $31,8^\circ\text{S}$), Argentina. En cada combinación de fechas de siembra x Exp, se evaluaron dos híbridos con tres dosis de N. 36
- Cuadro 2.4.** Los valores de los auto-vectores e1 y e2 resultantes del análisis de componentes principales (ACP) para las variables de clima, N del suelo y cultivo en dos experimentos (2014-15 y 2015-16; Exp1 y Exp2, respectivamente) conducidos en Paraná (Lat. $31,8^\circ\text{S}$), Argentina. En cada combinación de fechas de siembra x Exp, se evaluaron dos híbridos con tres dosis de N. 39
- Cuadro 2.5.** Análisis de varianza y valores medios para las fuentes de biomasa (B) y N por unidad de grano en dos experimentos (2014-15 y 2015-16, Exp1 y Exp2, respectivamente) realizados en Paraná (Lat. $31,8^\circ\text{S}$), Argentina. En cada combinación de fechas de siembra x Exp, se evaluaron dos híbridos con tres dosis de N. 44
- Cuadro 3.1.** Análisis de varianza y valores medios para biomasa, Rto, disponibilidad de N (N_d), absorción de N durante el período pre- y post-floración (N_{abspre} y $\text{N}_{\text{abspost}}$, respectivamente) y absorción de N total (N_{abs}) en dos experimentos (2014-15 y 2015-16; Exp1 y Exp2, respectivamente) que se llevaron a cabo en Paraná (Lat. $31,8^\circ\text{S}$), Argentina. En cada combinación de fechas de siembra x Exp, se cultivaron dos híbridos con tres densidades de plantas y tres dosis de N. 62
- Cuadro 3.2.** Análisis de varianza y valores medios para la eficiencia de uso del N (EUN_g) y sus componentes, i.e. eficiencia de absorción de N (E_{absN}), índice de cosecha (IC) y eficiencia de utilización de N para producción de biomasa (E_{utN_b}). Los experimentos (2014-15 y 2015-16, Exp1 y Exp2, respectivamente) fueron realizados en Paraná (Lat. $31,8^\circ\text{S}$), Argentina. En cada combinación de fechas de siembra x Exp, se evaluaron dos híbridos con tres densidades de plantas y tres dosis de N. 69
- Cuadro 3.3.** Valores de los auto-vectores (e1 y e2) correspondientes al análisis de componentes principales (ACP) realizado para el set de datos de maíces tempranos y tardíos, presentado en la Fig. 3.8. 73

Cuadro 4.1. Funciones discriminantes EC1 y EC2 para todas las variables incluidas en el análisis discriminante (AD) en fechas de siembra temprana y tardía correspondiente a la Fig. 4.6. Los experimentos (2014-15 y 2015-16; Exp1 y Exp2, respectivamente) fueron realizados en Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina. 99

Índice de figuras

- Fig. 2.1.** Precipitación acumulada y ET₀ (evapotranspiración potencial), precipitación diaria, 25
datos históricos de precipitación, balance de agua mensual aparente (BHAp) (a, b),
temperatura máxima y mínima del aire (c, d) y radiación solar global (e, f) en dos
experimentos (2014-15 y 2015-16; Exp1 y Exp2, respectivamente) realizados en Paraná (Lat.
31,8° S). Los segmentos negros representan los ciclos de cultivo correspondientes a maíces
tempranos y tardíos. Los cuadrados identifican la fecha de siembra (S), la floración (R1) y la
madurez fisiológica (R6).
- Fig. 2.2.** Interacción de Exp x FS (a), Exp x N (b) y FS x N (c) sobre el rendimiento de grano. 28
Los experimentos (2014-15 y 2015-16, Exp1 y Exp2, respectivamente) se llevaron a cabo en
Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina. En cada combinación de FS x Exp, se cultivaron dos
híbridos con tres dosis de N.
- Fig. 2.3.** Interacción de FS x N x H sobre el N total absorbido. Las fechas de siembra se 29
presentan divididas (a. FS Temprana; b. FS Tardía). Los experimentos (2014-15 y 2015-16,
Exp1 y Exp2, respectivamente) se llevaron a cabo en Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina. En
cada combinación de FS x Exp, se cultivaron dos híbridos con tres dosis de N.
- Fig. 2.4.** Interacción de FS x N (a) y Exp x N x H (b) sobre el N absorbido en pre-floración 30
(N_{abspre}). Las fechas de siembra se presentan divididas (a. FS Temprana; b. FS Tardía). Los
experimentos (2014-15 y 2015-16, Exp1 y Exp2, respectivamente) se llevaron a cabo en
Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina. En cada combinación de FS x Exp, se cultivaron dos
híbridos con tres dosis de N.
- Fig. 2.5.** Interacción de FS x N x H sobre el índice de cosecha de N (ICN). Las fechas de 31
siembra se presentan divididas (a. FS Temprana; b. FS Tardía). Los experimentos (2014-15 y
2015-16, Exp1 y Exp2, respectivamente) se llevaron a cabo en Paraná (Lat. 31,8° S),
Argentina. En cada combinación de FS x Exp, se cultivaron dos híbridos con tres dosis de N.
- Fig. 2.6.** Interacción de FS x N x H sobre la eficiencia de utilización de N para producir 35
granos (E_{ut}N_g). Las fechas de siembra se presentan divididas (a. FS Temprana; b. FS Tardía).
Los experimentos (2014-15 y 2015-16, Exp1 y Exp2, respectivamente) se llevaron a cabo en
Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina. En cada combinación de FS x Exp, se cultivaron dos
híbridos con tres dosis de N.
- Fig. 2.7.** Análisis de componentes principales (ACP). Las combinaciones de dos 38
experimentos, Exp1 (símbolos abiertos) y Exp2 (símbolos cerrados) y dos fechas de siembra,
fechas tempranas de siembra (círculos) y fechas tardías de siembra (triángulos) se representan
de acuerdo con las variables de clima, suelo y cultivo (vectores). Los vectores de líneas de
puntos corresponden al clima [lluvia acumulada (Ac PP), ET₀ (Ac ET₀), radiación global (Ac
R_g), temperatura media (T_m) y balance de agua aparente (BH Ap) en vegetativo (V), crítico
(CP) y períodos reproductivos (R)] y variables N del suelo [disponibilidad de N en la siembra
(N_s) y mineralización de N durante el ciclo de cultivo (N_{min})]. Los vectores de línea continua
corresponden a las variables de cultivo [eficiencia de uso del N (EUN_g), eficiencia de
utilización del N (E_{ut}N_g), eficiencia de absorción del N (E_{abs}N), absorción de N durante el
ciclo de cultivo (N_{abs}) y el R_{to} (R_{to})].
- Fig. 2.8.** Eficiencia de uso del N (EUN_g) en función de la eficiencia de absorción de nitrógeno 40
(E_{abs}N) (a) y la eficiencia de utilización de nitrógeno (E_{ut}N_g) (b) de maíces tempranos
(símbolos cerrados) y tardíos (símbolos abiertos), en dos experimentos (2014-15 y 2015-16;

Exp1 y Exp2, respectivamente) llevados a cabo en Paraná (Lat. 31,8°S), Argentina.

Fig. 2.9. Eficiencia de absorción de nitrógeno (E_{absN}) en función de la absorción de nitrógeno durante el periodo pre-floración (N_{abspre}) (a) y el período post-floración ($N_{abspost}$) (b) para dos dosis de N, 0N (círculo) y 270N (cuadrados) y maíces tempranos (símbolos cerrados) y tardíos (símbolos abiertos), en dos experimentos (2014-15 y 2015-16; Exp1 y Exp2, respectivamente) que se llevaron a cabo en Paraná (Lat. 31,8°S), Argentina. Las líneas continuas y de puntos representan las funciones lineales que se ajustan al set de datos de los maíces tempranos ($n = 12$) y tardíos ($n = 12$), respectivamente. El set de datos correspondiente a 90N no se incluyó en la figura para describir mejor las diferencias entre dosis de N contrastantes. 41

Fig. 2.10. Eficiencia de utilización del nitrógeno (E_{utN_g}) en función del índice de cosecha de nitrógeno (ICN) (a) y la concentración de N en grano (b) de cultivos de maíz tempranos (símbolos cerrados) y tardíos (símbolos abiertos) en dos experimentos (2014-15 y 2015-16, Exp1 y Exp2) realizados en Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina. Las líneas continuas representan la función lineal ajustada a todo el set de datos ($n=24$). 42

Fig. 2.11. Interacción de Exp x FS x H sobre la fuente de biomasa (B) post-floración por grano. Las fechas de siembra se presentan divididas (a. Exp1; b. Exp2). Los experimentos (2014-15 y 2015-16, Exp1 y Exp2, respectivamente) se llevaron a cabo en Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina. En cada combinación de FS x Exp, se cultivaron dos híbridos con tres dosis de N. 42

Fig. 2.12. Interacción de Exp x FS sobre la fuente de N post-floración por grano. Los experimentos (2014-15 y 2015-16, Exp1 y Exp2, respectivamente) se llevaron a cabo en Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina. En cada combinación de FS x Exp, se cultivaron dos híbridos con tres dosis de N. 43

Fig. 2.13. Fuente de biomasa (B) post-floración por grano (a) concentración de N en grano y (b) eficiencia de utilización de nitrógeno (E_{utN_g}) (c) en función de la fuente de N post-floración por grano de maíces tempranos (símbolos cerrados) y tardíos (símbolos abiertos), en dos experimentos (2014-15 y 2015-16; Exp1 y Exp2, respectivamente) realizados en Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina. Las líneas negras continuas representan la función ajustada al set de datos completo ($n=24$). 45

Fig. 3.1. Interacción de FS x N x H (A) y D x H (B) sobre la biomasa a madurez (R_6). Los experimentos (2014-15 y 2015-16, Exp1 y Exp2, respectivamente) se llevaron a cabo en Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina. En cada combinación de FS x Exp, se cultivaron dos híbridos con tres densidades de plantas y tres dosis de N. 58

Fig. 3.2. Interacción de FS x N x H (A) y FS x D x H (B) sobre el rendimiento de grano. Los experimentos (2014-15 y 2015-16, Exp1 y Exp2, respectivamente) se llevaron a cabo en Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina. En cada combinación de FS x Exp, se cultivaron dos híbridos con tres densidades de plantas y tres dosis de N. 59

Fig. 3.3. Interacción de FS x N x H (A) y FS x D x H (B) sobre la eficiencia de uso del N para producir granos (EUN_g). Los experimentos (2014-15 y 2015-16, Exp1 y Exp2, respectivamente) se llevaron a cabo en Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina. En cada combinación de FS x Exp, se cultivaron dos híbridos con tres densidades de plantas y tres dosis de N. 64

Fig. 3.4. Interacción de FS x N x H sobre la eficiencia de absorción de N (E_{absN}). Los 65

experimentos (2014-15 y 2015-16, Exp1 y Exp2, respectivamente) se llevaron a cabo en Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina. En cada combinación de FS x Exp, se cultivaron dos híbridos con tres densidades de plantas y tres dosis de N.

Fig. 3.5. Interacción de FS x D x N x H sobre la eficiencia de utilización del N para producir biomasa ($E_{ut}N_b$). Las fechas de siembra se presentan divididas (A. FS Temprana; B. FS Tardía). Los experimentos (2014-15 y 2015-16, Exp1 y Exp2, respectivamente) se llevaron a cabo en Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina. En cada combinación de FS x Exp, se cultivaron dos híbridos con tres densidades de plantas y tres dosis de N. 66

Fig. 3.6. Interacción de FS x D x H sobre el índice de cosecha (IC). Los experimentos (2014-15 y 2015-16, Exp1 y Exp2, respectivamente) se llevaron a cabo en Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina. En cada combinación de FS x Exp, se cultivaron dos híbridos con tres densidades de plantas y tres dosis de N. 68

Fig. 3.7. Valores medios de eficiencia de uso de nitrógeno (EUN_g) (A, B) y sus componentes, *i.e.* eficiencia de absorción de nitrógeno ($E_{abs}N$) (C, D), eficiencia de utilización de nitrógeno para producción de biomasa ($E_{ut}N_b$) (E, F) e índice de cosecha (IC) (G, H). En cada fecha de siembra, las letras mayúsculas indican diferencias significativas entre densidades y las letras minúsculas representan diferencias significativas entre las dosis de N dentro de cada densidad de plantas ($P < 0,05$). Los valores son el promedio de dos híbridos en dos experimentos de campo 2014-15 y 2015-16 que se llevaron a cabo en Paraná (Lat. 31,8 °S), Argentina. 70

Fig. 3.8. Análisis de componentes principales (ACP) para el set de datos correspondiente a maíces tempranos (A y C) y tardíos (B y D) y para los híbridos DK 70-10 VT3P (A y B) y DK 73-10 VT3P (C y D) en dos experimentos a campo [2014-15 (símbolos grandes) y 2015-16 (símbolos pequeños)] cultivados con tres densidades de plantas [5 (círculos), 7 (diamantes) y 9 pl m⁻² (cuadrados)] y tres dosis de N [0N (símbolos blancos), 90N (símbolos grises) y 270N (símbolos negros)]. El análisis incluyó la eficiencia del uso de nitrógeno (EUN_g) y sus componentes (representados por vectores), *i.e.* Rto de grano (Rto), absorción de N total (N_{abs}), absorción de N durante el período pre- y post-floración (N_{abspre} y $N_{abspost}$, respectivamente), Índice de cosecha (IC), biomasa en R6 (Biomasa), eficiencia de absorción de nitrógeno ($E_{abs}N$) y eficiencia de utilización de nitrógeno para producción de biomasa ($E_{ut}N_b$). 72

Fig. 3.9. Simplificación de la Fig. 3.8, en donde se muestra el análisis de componentes principales (ACP) para el set de datos correspondiente a maíces tempranos (A y C) y tardíos (B y D) y para los híbridos DK 70-10 VT3P (A y B) y DK 73-10 VT3P (C y D) en dos experimentos a campo [2014-15 (símbolos grandes) y 2015-16 (símbolos pequeños)] cultivados con tres densidades de plantas [5 (círculos), 7 (diamantes) y 9 pl m⁻² (cuadrados)] y tres dosis de N [0N (símbolos blancos), 90N (símbolos grises) y 270N (símbolos negros)]. La combinación óptima de tratamientos (dosis de N y densidad de plantas) que maximizan el Rto (Rto) y la eficiencia de uso de nitrógeno (EUN_g) en cada fecha de siembra, híbrido y Exp están representadas por las proyecciones perpendiculares (líneas punteadas rojas) a los vectores correspondientes. Las líneas punteadas negras representan las proyecciones negativas para los vectores de Rto y EUN_g . 74

Fig. 4.1. Número de granos por planta (NGP) en función de la tasa de crecimiento por planta alrededor de floración ($R1 \pm 15d$; TCP_{pc}) para individuos sembrados en fecha temprana (símbolos cerrados) y tardía (símbolos abiertos). Los símbolos cuadrados representan los individuos que fijaron granos en espigas secundarias en ambas fechas de siembra (llenos temprana, vacíos tardía). La línea continua verde representa la función ajustada a los granos de la espiga primaria en ambas fechas de siembra. Se muestra el set de datos completo en dos 89

experimentos (2014-15 y 2015-16; Exp1 y Exp2, respectivamente) realizados en Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina.

Fig. 4.2. Tasa de crecimiento por planta alrededor de floración ($R1 \pm 15d$; TCP_{pc}) (a) y número de granos por planta (NGP) (b) en función de las lecturas SPAD en hoja 12 a R1 para individuos sembrados en fechas tempranas (símbolos cerrados) y tardías (símbolos abiertos). Las líneas cortadas roja y azul representan la función ajustada al set de datos de las plantas en siembras tempranas y tardías, respectivamente. La línea continua verde representa la función ajustada al número de granos de la espiga primaria para ambas fechas de siembra. Los símbolos cuadrados representan los individuos que fijaron granos en espigas secundarias en ambas fechas de siembra (llenos temprana, vacíos tardía). Se muestra el set de datos completo en dos experimentos (2014-15 y 2015-16; Exp1 y Exp2, respectivamente) realizados en Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina. 91

Fig. 4.3. Eficiencia de fijación de granos (a) y unidades SPAD en hoja 12 a R1 (b) en función de rangos de baja ($<0,20 \text{ g } ^\circ\text{Cd}^{-1}$), intermedia ($0,20-0,28 \text{ g } ^\circ\text{Cd}^{-1}$) y alta ($>0,28 \text{ g } ^\circ\text{Cd}^{-1}$) tasa de crecimiento por planta alrededor de floración ($R1 \pm 15$ días) en fechas de siembra temprana y tardía. Los experimentos (2014-15 y 2015-16; Exp1 y Exp2, respectivamente) fueron realizados en Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina. 92

Fig. 4.4. Frecuencia relativa del número de granos por planta (NGP) en función de rangos de baja ($<0,20 \text{ g } ^\circ\text{Cd}^{-1}$) (a-b), intermedia ($0,20-0,28 \text{ g } ^\circ\text{Cd}^{-1}$) (c-d) y alta ($>0,28 \text{ g } ^\circ\text{Cd}^{-1}$) (e-f) tasa de crecimiento por planta alrededor de floración ($R1 \pm 15d$; TCP_{pc}), en fechas de siembra temprana (a-c-e) y tardía (b-d-f) y rangos de bajo (lectura SPAD a $R1 < 45$; BEN), intermedio (lectura SPAD a R1 entre 45 y 52,4; IEN) y alto (lectura SPAD a $R1 > 52,4$; AEN) estatus N de la planta. Los cuadros anidados en cada combinación de fecha de siembra y rango de TCP_{pc} muestran las frecuencias relativas correspondientes a los tratamientos evaluados en función de rangos de bajo, intermedio y alto estatus N (lectura SPAD en hoja 12 a R1) de la planta. Los experimentos (2014-15 y 2015-16; Exp1 y Exp2, respectivamente) fueron realizados en Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina. 94

Fig. 4.5. Plantas prolíficas (%) en función de rangos de baja ($<0,20 \text{ g } ^\circ\text{Cd}^{-1}$), intermedia ($0,20-0,28 \text{ g } ^\circ\text{Cd}^{-1}$) y alta ($>0,28 \text{ g } ^\circ\text{Cd}^{-1}$) tasa de crecimiento por planta alrededor de floración ($R1 \pm 15d$; TCP_{pc}), en fechas de siembra temprana y tardía y rangos de bajo (lectura SPAD a $R1 < 45$), intermedio (lectura SPAD a R1 entre 45 y 52,4) y alto (lectura SPAD a $R1 > 52,4$) estatus N de la planta. Los experimentos (2014-15 y 2015-16; Exp1 y Exp2, respectivamente) fueron realizados en Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina. 95

Fig. 4.6. Análisis discriminante (AD) para diferentes rangos de bajo (lectura SPAD a $R1 < 45,6$), intermedio (lectura SPAD a R1 entre 45,6 y 52,1) y alto (lectura SPAD a $R1 > 52,1$) estatus N de la planta en siembras tempranas (a) y tardías (b) de maíz. Los vectores con líneas punteadas representan variables eco-fisiológicas a escala de planta [número de granos por planta (NGP), tasa de crecimiento por planta en periodo crítico (TCP_{pc}), eficiencia de fijación de granos por planta (EF_g) y porcentaje de individuos prolíficos (Prolif.)] y el vector con línea continua representa la variable a escala de cultivo [eficiencia de uso de N para producir granos (EUN_g)]. Los experimentos (2014-15 y 2015-16; Exp1 y Exp2, respectivamente) fueron realizados en Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina. 98

Fig. 5.1. Resumen general de los resultados obtenidos describiendo el marco de análisis en torno a la economía del N abordado en la tesis. Las cajas verde y naranja representan las 115

escalas de estudio a escala de cultivo (Capítulos 2 y 3) y a escala de planta (Capítulo 4), respectivamente. Las líneas negras continuas representan relaciones directas entre las variables, mientras que las líneas cortadas indican relación entre variables a diferentes escalas de análisis. Las cajas llenas con fondo azul representan las variables que tuvieron valores medios mayores en siembras tempranas, mientras que las cajas llenas con fondo rojo las variables que mostraron valores medios mayores en siembras tardías. Las cajas vacías representan variables que no difirieron en sus valores medios para ambas fechas de siembra. Los experimentos (2014-15 y 2015-16; Exp1 y Exp2, respectivamente) fueron realizados en Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina.

Abreviaturas

ACP	Análisis de componentes principales
AD	Análisis discriminante
BHAp	Balance hídrico aparente
CP1	Eje del componente principal 1
CP2	Eje del componente principal 2
D	Densidad de plantas
E_{absN}	Eficiencia de absorción de N
EF_g	Eficiencia de fijación de granos ($NGP\ TCP_{pc}^{-1}$)
ET0	Evapotranspiración potencial
ET0Ac	Evapotranspiración potencial acumulada
EUN_g	Eficiencia de uso de N para producción de granos
E_{utN_b}	Eficiencia de utilización de N para producción de biomasa
E_{utN_g}	Eficiencia de utilización de N para producción de granos
Exp	Experimento
FS	Fecha de siembra
H	Híbrido
IC	Índice de cosecha
ICN	Índice de cosecha de N
$\%N_c$	Concentración de N crítica en biomasa
N_{abs}	N absorbido total
$N_{abspost}$	N absorbido durante el periodo post-floración

N_{abspre}	N absorbido durante el periodo pre-floración
N_d	N disponible en el suelo durante el ciclo de cultivo
NGP	Número de granos por planta
N_{min}	N mineralizado del suelo durante el ciclo de cultivo
N_{remAP}	N removilizado aparente durante el periodo post-floración
N_s	N en el suelo a la siembra
PC	Periodo crítico
PPAc	Precipitaciones acumuladas
R	Periodo reproductivo
Rto	Rto de granos
RgAc	Radiación solar global acumulada
TCP_{pc}	Tasa de crecimiento por planta alrededor de floración ($R \pm 15d$)
T_m	Temperatura media
V	Periodo vegetativo

Resumen

Economía del nitrógeno en maíces tempranos y tardíos

El maíz en siembra tardía en la región templada húmeda Argentina logra mayor estabilidad y menor rendimiento potencial de grano (R_{to}), respecto a siembras de inicios de primavera. Los maíces tardíos cuentan con más nitrógeno disponible (N_d), mayor temperatura y radiación solar durante el periodo vegetativo. Sin embargo, el empobrecimiento del ambiente foto-termal y un balance hídrico más equilibrado durante el periodo reproductivo respecto a siembras tempranas, pueden afectar la eficiencia en el uso del N (EUN_g). El objetivo de esta tesis fue generar conocimientos sobre la economía del N en maíces de siembra temprana y tardía, a escala de cultivo y de planta. Se realizaron experimentos en la EEA Paraná ($31^{\circ}50'S$; $60^{\circ}32'O$) del INTA, utilizando dos híbridos de maíz con diferencias en la eficiencia de absorción de N ($E_{abs}N$) (DK73-10VT3P y DK70-10VT3P), sembrados en fechas temprana y tardía, con diferentes densidades (5, 7 y 9 pl m^{-2}) y dosis de fertilización (0, 90 y 270 kg N ha^{-1}). A escala de cultivo, la EUN_g disminuyó en maíces tardíos (ca. 32 a 26 kg de grano $kg N_d^{-1}$), mediada por menores R_{tos} y mayor N_d . DK 73-10 VT3P exhibió mayor EUN_g y eficiencia de utilización de N ($E_{ut}N_g$). La $E_{abs}N$ se relacionó con la EUN_g ($P < 0,0001$; $R^2 = 0,72$) en forma más estrecha que la $E_{ut}N_g$, especialmente en maíces tardíos. El N absorbido hasta pre-floración (N_{abspre}) mejoró la $E_{abs}N$, que disminuyó más con la dosis de N en maíces tardíos. La menor $E_{ut}N_g$ en maíces tardíos se relacionó con mayor fuente de N post-floración por grano. La disminución en la EUN_g se atenuó con 9 pl m^{-2} y con 7 pl m^{-2} en maíces tempranos y tardíos, respectivamente (interacción FS x D x N, $P < 0,01$). En siembras tardías, la mayor EUN_g se registró para DK73-10VT3P. A escala de planta, en rangos de baja tasa de crecimiento por planta en periodo crítico (TCP_{pc}) los maíces tardíos tuvieron mayor eficiencia de fijación de granos (EF_g) y estatus N, mientras que los maíces tempranos tuvieron mayores EF_g en rangos de TCP_{pc} superiores, lo que se asoció con mayor número de granos por planta (NGP) dado por una mayor prolificidad. En ambas fechas, la EUN_g se asoció positivamente con la TCP_{pc} y la EF_g ; sin embargo, plantas de intermedio y alto estatus N caracterizaron a siembras tempranas, mientras que en fecha tardía la EUN_g tuvo una mayor asociación con plantas de intermedio estatus N. Los resultados de esta tesis evidencian que es factible mejorar la economía de N y estabilizar la EUN_g en siembra tardía incrementando la densidad de plantas para aumentar el N_{abspre} y sostener la EUN_g . Asimismo, la elección de genotipos con alta $E_{ut}N_g$, y EF_g aparece como una estrategia válida para mitigar la reducción de EUN_g , promovida por el ambiente de siembras tardías.

Palabras clave: *Eficiencia de uso de nitrógeno; Fecha de siembra; Zea mays L.*

Abstract

Nitrogen economy of early and late-sown maize crops

In the humid temperate region of Argentina, late sowing dates of maize achieve greater stability and lower potential grain yield (GY), as compared with traditional sowing dates of early spring. The environment during vegetative period in late-sown crops is characterized by higher temperature, solar radiation and nitrogen availability (N_{av}) as compared with early-sown crops. While during the reproductive period both temperature and solar radiation levels decrease, but under a more balanced water balance. These environmental differences may affect the N use efficiency (NUE_g). The aim of this thesis was to generate knowledge about the N economy in early- and late-sown maize crops, at the crop and plant level. Experiments were carried-out in the EEA Paraná (31° 50' S; 60° 32' O) of INTA, using two hybrids with differences in the N uptake efficiency (N_{upE}) (DK73-10VT3P and DK70-10VT3P), in early and late sowing dates with different densities (5, 7 and 9 pl m⁻²) and fertilization rate (0, 90 and 270 kg N ha⁻¹). At crop level, NUE_g decreased in late crops (ca. 32 to 26 kg grain kg N_{av}^{-1}); driven by lower GY and higher N_{av} . DK73-10VT3P exhibited greater NUE_g and N utilization efficiency (N_{utE_g}). N_{upE} was related with NUE_g ($P < 0.0001$; $R^2 = 0.72$) more closely than N_{utE_g} , especially in late-sown crops. N uptake during pre-flowering ($N_{up,pre}$) improved N_{upE} , which decreased further with N rate, particularly in late crops. The lower N_{utE_g} of late crops was related to a higher N source post-flowering per grain. The decrease in NUE_g was attenuated with 9 pl m⁻² and with 7 pl m⁻² in early and late crops, respectively (SD x D x N interaction, $P < 0.01$). In late crops, the highest NUE_g was recorded in DK73-10VT3P. At the plant level, in low plant growth rate in critical period (PGR_{pc}) ranges, late crops had higher grain setting efficiency (SE_g) and N status, while the early crops had higher SE_g in higher PGR_{pc} ranges, which was associated with a higher number of grains per plant (NGP) given by a higher prolificacy. In both sowing dates, NUE_g was positively related with PGR_{pc} and SE_g ; however, intermediate and high N status plants characterized to early crops, while in late crops, NUE_g had a greater association with plants of intermediate N status. The results of this thesis show that the N economy can be improved in late crops by increasing plant density to increase $N_{up,pre}$ and sustain NUE_g . Likewise, the choice of genotypes with high N_{utE_g} , and SE_g appears as a strategy in order to mitigate NUE_g reductions, promoted by late sowing date environment.

Keywords: *Nitrogen use efficiency, Sowing date, Zea mays L.*

Capítulo 1: Introducción General

1.1. Introducción

1.1.1. Contexto productivo

El cultivo de maíz en Argentina representa el 12% del área total cosechada, mientras que la producción media del cultivo en los últimos 10 años ronda los 20 millones de tn, representando un 25% de la producción total de granos, constituyéndose como el segundo cultivo en importancia a nivel país luego de la soja. La incorporación de híbridos simples en la década del 1990 y las mejoras en las prácticas de manejo agronómico han promovido un incremento del rendimiento (Rto) a una tasa anual de *ca.* 140 kg ha⁻¹ año⁻¹, determinando un Rto nacional promedio los últimos 10 años de *ca.* 6700 kg ha⁻¹ (FAOSTAT, 2016). Sin embargo, el Rto medio actual de maíz en Argentina se encuentra fuertemente condicionado por la disponibilidad de nitrógeno (N) (Andrade y Ferreiro, 1996; Caviglia et al., 2014; Maltese et al., 2019) y de agua (Aramburu et al., 2015).

En la región templada húmeda de la Argentina, la siembra de maíz se realiza tradicionalmente a inicios de la primavera (Septiembre-Octubre), lo que permite lograr altos Rtos (Otegui et al., 1995) y reducir la incidencia de algunas adversidades bióticas de mayor prevalencia en los meses estivales (*e.g.* barrenador del tallo, gusano cogollero, tizón foliar). Sin embargo, para esta misma región, bajo escenarios de déficit hídrico, las siembras tempranas presentan mayor riesgo productivo por un mayor desbalance hídrico durante floración y el cuajado-llenado de grano (Maddonni, 2012), penalizando el resultado económico y limitando la aplicación de tecnología (*e.g.* ajuste en la densidad de siembra y aplicaciones de fertilizante). En contraposición, para estos mismos escenarios, las fechas de siembra de fines de primavera-principios de verano (tardías) alcanzan una mayor estabilidad de los Rtos principalmente debido a una mejora en el balance hídrico alrededor de floración, aunque a expensas de un menor Rto potencial (Maddonni, 2012; Mercau y Otegui, 2014). Estas fechas tardías son actualmente posibles gracias a la introducción de híbridos con eventos biotecnológicos de protección contra insectos (Shi et al., 2013). Este cambio en el escenario productivo para la producción del cultivo de maíz, mediado por la posibilidad de siembra en fechas más tardías, requiere investigar cómo implementar ajustes en las prácticas de manejo del cultivo, entre ellos en el aspecto nutricional y sus interacciones con otras prácticas de manejo, *e.g.* densidad de siembra y selección de genotipos mejor adaptados a estos ambientes.

1.1.2. Ambientes para fechas de siembra tempranas y tardías en maíz

El Rto potencial está definido como el Rto de un genotipo creciendo en un ambiente al cual está adaptado sin limitaciones de agua y nutrientes con un control efectivo de adversidades bióticas y evitando el vuelco (Evans y Fischer, 1999). Bajo estas condiciones, el Rto está principalmente afectado por la radiación solar incidente y la temperatura durante el periodo crítico. En la región templado-húmeda Argentina, la siembra de maíces en fechas tradicionales (septiembre-octubre), permite ubicar el período crítico del cultivo para la definición del Rto durante el mes de diciembre, mes caracterizado por una alta radiación solar incidente y temperaturas óptimas para el crecimiento del cultivo, que se traducen en altos valores de Rtos potenciales (Otegui et al., 1995; Maddonni, 2012). En esta misma región los maíces sembrados en fechas tardías (principios de diciembre hasta mediados de enero), ubican el período crítico en el mes de febrero, buscando un mejor balance hídrico para este período que permita estabilizar los Rtos (Mercau y Otegui, 2014). No obstante, las

mayores temperaturas registradas a inicios de siembras tardías acortan el período vegetativo, mientras que el período reproductivo transcurre con niveles de radiación solar y temperatura declinantes, resultando en un menor Rto potencial respecto a siembras tempranas (Maddonni, 2012).

Por otro lado, las condiciones térmicas durante el período vegetativo de los maíces tardíos conducen a una mayor tasa de crecimiento del cultivo que en fecha temprana, debido al acelerado ritmo de cobertura (*i.e.* incremento diario de la eficiencia de interceptación) y a los mayores registros diarios de radiación solar incidente (Cirilo y Andrade, 1994; Maddonni y Otegui, 1996). En consecuencia, las condiciones más favorables para el crecimiento vegetativo en relación al crecimiento reproductivo de los maíces tardíos (Cirilo y Andrade, 1994) determinarían un menor índice de cosecha (IC) comparado con siembras tempranas. Sin embargo, Otegui et al. (1995) y más recientemente Caviglia et al. (2014) no encontraron reducciones significativas del IC ante el atraso de la fecha de siembra, lo que demuestra cierta estabilidad en este carácter. Aun así, la selección de genotipos con mayor partición de biomasa hacia los granos podría contribuir a estabilizar el Rto entre fechas de siembra.

En general, la mejora en el balance hídrico alrededor de floración para los maíces tardíos permite lograr alto número de destinos reproductivos (Otegui et al., 1995) en comparación con fechas de siembra tempranas. Sin embargo, las condiciones declinantes en la radiación solar incidente durante el llenado de granos limitan la fuente fotosintética (Cirilo y Andrade, 1996) determinando menores relaciones fuente:destino respecto a siembras tempranas.

1.1.3. Economía del N en fechas de siembra tardías para maíz: aproximación a escala de cultivo

El retraso en la fecha de siembra de maíz extiende la duración del barbecho durante un período más cálido y normalmente más húmedo que el de fechas tempranas (Maddonni, 2012) lo cual puede incrementar la disponibilidad de agua y de N (N_d) a la siembra del cultivo (Caviglia et al., 2014; Díaz Valdez et al., 2014). En consecuencia, resulta de interés poder cuantificar el uso de la mayor oferta de N por los maíces de siembra tardía a través de la eficiencia de uso del N ($\text{kg grano kg } N_d^{-1}$; EUN_g), la que podría verse negativamente afectada por el menor crecimiento reproductivo respecto a maíces de siembra tempranas.

La mejora en la disponibilidad de N en los cultivos de maíz, cobra central relevancia considerando que el manejo inadecuado de la fertilización nitrogenada, tanto por excesos como por déficit, ocasiona pérdidas económicas debido al aumento de los costos por insumos externos, o por una baja productividad respectivamente. Los cuidados ambientales en lo referente al uso de fertilizantes nitrogenados han merecido mayor atención en los últimos tiempos, en especial los efectos que causan las emisiones gaseosas de N (Snyder et al., 2009) y las pérdidas de N por escurrimiento o lixiviación (Albarenque et al., 2016). Sin embargo, la adecuada combinación de prácticas de manejo agronómicas como la densidad de siembra, la optimización de la dosis de fertilización con N y la elección de genotipos podría resultar una herramienta promisorio para mejorar la EUN_g , particularmente en maíces de siembra tardía (Gambín et al., 2016), los cuales transcurren su periodo reproductivo bajo limitaciones de fuente y con mayores niveles de N_d .

El marco eco-fisiológico más utilizado para estudiar la economía del N en un cultivo está centrado en la cuantificación de la EUN_g y sus componentes (Moll et al. 1982;

Dobermann, 2007), *i.e.* la eficiencia de absorción de N (E_{absN}), la eficiencia de utilización del N absorbido para producir granos (E_{utN_g}) y biomasa (E_{utN_b}) y el IC. La E_{UN_g} , definida en términos de la cantidad de grano obtenido por unidad de N disponible, es dependiente de la E_{absN} , la E_{utN_b} y el IC (Moll et al., 1982). La E_{utN_g} y la E_{utN_b} también han sido denominadas eficiencias fisiológicas de uso del N para la producción de granos y biomasa, respectivamente (Craswell y Godwin, 1984; Lemcoff y Loomis, 1986; Good et al., 2004).

La E_{UN_g} relaciona el R_{to} con el N_d para el cultivo (Ec. 1.1) considerando la cantidad de N de nitratos (NO_3^-) a la siembra del cultivo en una profundidad establecida del perfil (0-60cm), el N mineralizado entre siembra y madurez y el N aportado por fertilizantes.

$$EUNg = \frac{Rto}{Nd} \quad (1.1)$$

Un componente de interés particular es la E_{utN_g} (Ec. 1.2), resultando el N_{abs} producto de la biomasa total (b) y la concentración de N de la biomasa ($\%N_b$) (Ec. 1.3)

$$EutNg = \frac{Rto}{Nabs} \quad (1.2)$$

$$Nabs = b * \%Nb \quad (1.3)$$

Otra forma de expresar la E_{utN_g} , es a partir de la relación entre la E_{utN_b} y su capacidad de particionar el crecimiento hacia los granos, es decir el IC (Ec. 1.4).

$$EutNg = EutNb * IC \quad (1.4)$$

Al respecto, trabajos realizados por Caviglia et al. (2014) documentan una caída en los valores de la E_{utN_b} ante el atraso en la fecha de siembra que determinaría una menor E_{utN_g} (Ec. 1.4). Por otra parte, estos autores señalan al IC como un rasgo deseable en la selección de genotipos para poder mejorar la E_{utN_g} (Eq. 1.4) en maíces de siembra tardía.

Desglosando los componentes de la E_{utN_b} de la Ec. 1.4, la E_{utN_g} puede estimarse según la Ec. 1.5:

$$EutNg = \frac{b*IC}{b*\%Nb} \quad (1.5)$$

En consecuencia y simplificando los términos de biomasa, la E_{utN_g} puede ser representada mediante la relación entre el IC y el $\%N_b$, indicando que la E_{utN_g} está relacionada directamente con IC e inversamente con el $\%N_b$ (Ciampitti y Vyn, 2012).

En relación con ello, estudios realizados por Caviglia et al. (2014) han documentado un aumento en el $\%N_b$ ante el atraso de la fecha de siembra, lo que podría resultar en reducciones de la E_{utN_g} .

El segundo componente de importancia de la E_{UN_g} es la E_{absN} (Ec. 1.6).

$$EabsN = \frac{Nabs}{Nd} \quad (1.6)$$

Entonces, en función de sus componentes (Ec. 1.7), la E_{UN_g} puede aumentar por un incremento de la E_{utN_g} o por una mayor E_{absN} .

$$EUNg = \frac{Nabs}{Nd} * \frac{Rto}{Nabs} \quad (1.7)$$

Se ha avanzado en identificar los mecanismos involucrados en la mejora de la E_{UN_g} de los híbridos modernos en siembras tempranas, encontrándose que el mejoramiento genético por R_{to} ha incrementado la E_{UN_g} debido a un aumento en el N_{abs} , principalmente en post-

floración (Ciampitti y Vyn, 2011), promovido por una mayor tasa de crecimiento del cultivo al comienzo del período de llenado de granos. Esta situación puede afectar la partición del N hacia los granos debido a la intensa removilización del N desde las estructuras vegetativas.

Una medida que integra la partición del N de la biomasa total hacia los granos es el índice de cosecha de N (ICN; Ec. 1.8). Sin embargo, el ICN no permite diferenciar si el N en los granos proviene de la removilización de N o de la absorción de N post-floración.

$$ICN = \frac{N_g}{N_{abs}} \quad (1.8)$$

Donde N_g es el N total acumulado en granos.

Ciampitti et al. (2013) han logrado documentar un aumento en el índice de cosecha de N (ICN) en los híbridos modernos debido a una mayor removilización tardía del N durante el llenado de los granos (a partir de R3) por el aumento en la duración del área foliar (rasgo stay green). En consecuencia, la mejora en el N_{abs} e ICN han permitido incrementar la EUN_g en genotipos modernos (Ciampitti y Vyn, 2011) que crecen en fechas óptimas con relaciones fuente:destino post-floración equilibradas. Sin embargo, en siembras tardías es necesario dilucidar si la EUN_g puede ser sostenida utilizando los mecanismos mencionados. Al respecto, recientes trabajos realizados por Gambin et al. (2016) encontraron respuesta diferencial genotípica en híbridos de uso actual en la EUN_g dentro del sistema de producción de maíz sembrado en fechas tardías.

Se podría especular que, en fechas de siembra tardías, donde el ambiente fototermal determina una menor tasa de crecimiento del cultivo y una consecuente disminución del N_{abs} en el período post-floración, los genotipos que presenten una mayor acumulación de N a floración y sean capaces de mantener una alta removilización de N durante el llenado de granos podrían contribuir a sostener similares EUN_g que en fechas tempranas, debido a un mayor ICN. Al respecto, estudios realizados por Tsai et al. (1991) y Gallais y Coque (2005) señalan al proceso de removilización de N como una fuente importante de N para sostener el crecimiento de los granos bajo ambientes en condiciones limitantes de N.

En función de las relaciones anteriormente mencionadas, los genotipos que sean capaces de removilizar el N acumulado durante el periodo vegetativo y sostener la demanda de los destinos durante el llenado de granos en siembras tardías podrían presentar una mejora en la $E_{ut}N_g$ y por lo tanto contribuir a una mayor EUN_g respecto a siembras tempranas.

1.1.4. Economía del N en fechas de siembra tardías para maíz: aproximación a escala de planta individual

En el cultivo de maíz, el análisis a escala de planta individual permite profundizar con más detalle el estudio de los cambios producidos por el ambiente sobre la fijación de los granos. El número de granos fijados por planta (NGP) se define alrededor del período crítico de floración en función de la tasa de crecimiento por planta en dicho período (TCP_{pc}). La relación entre TCP_{pc} y NGP no es lineal, variando el tipo de función según el genotipo considerado (D'Andrea et al., 2008) y existiendo un umbral mínimo de TCP_{pc} necesario para la fijación de granos. Así, los cambios en la oferta de recursos por planta (radiación, agua, nutrientes) generados por el manejo (densidad de siembra, fertilización,

riego) y/o los factores meteorológicos (lluvias, temperatura, radiación) se reflejan en el NGP a través de modificaciones de la TCP_{pc} (Andrade et al., 2000). Sin embargo existen cambios en esta respuesta atribuibles al N_d en diferentes genotipos (D'Andrea et al., 2006; D'Andrea et al., 2008) independientemente del impacto de N_d sobre la TCP_{pc} .

El mayor N_d registrado en siembras tardías (Díaz Valdez et al., 2014; Caviglia et al., 2014; Maltese et al., 2019) determina un mayor estatus N de las plantas (*e.g.* $\%N_b$) cuando se comparan con similares tratamientos bajo fechas de siembra tempranas (Caviglia et al., 2014). Las técnicas disponibles para cuantificar el estatus N de la planta insumen tiempo y conllevan altos costos asociados. Una medida indirecta del estatus N de las plantas, puede obtenerse a partir de mediciones ópticas del color verde de las hojas con el Soil-plant analysis development (SPAD-502, Spectrum Technology Inc.). Esta herramienta resulta útil, rápida y económica para cuantificar la condición nitrogenada de la planta (Yang et al., 2014). El estatus N de una planta puede ser dependiente de la densidad plantas para un mismo N_d , debido a que la misma cantidad de N_d es absorbida por un número diferente de individuos. Sin embargo, la magnitud de estos cambios no ha sido bien documentada y se desconoce qué grado de interacción existe entre el aumento de la densidad y el estatus N de las plantas cuando se consideran diferentes genotipos, dosis de fertilización con N y fechas de siembra extremas, *i.e.* tempranas y tardías.

Si bien los efectos del N_d sobre la TCP_{pc} y el NGP y su respuesta en diferentes genotipos han sido reportados en algunos pocos estudios previos (D'Andrea et al., 2006; D'Andrea et al., 2008), se desconoce la respuesta de ambas variables ante cambios en el estatus N dado por modificaciones en la fecha de siembra, densidad de plantas y dosis de fertilización nitrogenada. En este sentido, la mejor condición fototermal alrededor de floración reportada en siembras tempranas (Maddonni, 2012) respecto a las tardías, puede determinar mayores incrementos en la TCP_{pc} en este período. Por otra parte, el estudio de los efectos del estatus N por planta podría contribuir a explicar parcialmente la variabilidad observada en el NGP a un nivel similar de TCP_{pc} (Andrade et al., 1999; Vega et al., 2001; Echarte et al., 2004; Maddonni y Otegui, 2004; D'Andrea et al., 2006; Ciancio et al., 2016).

De manera destacada, D'Andrea et al. (2006) han reportado que para una TCP_{pc} similar, el NGP fijado puede variar ampliamente de acuerdo al nivel de N_d pero sin cuantificar el estatus N de las plantas. Estas variaciones reportadas en el NGP pueden afectar fuertemente la eficiencia de fijación de granos ($NGP\ TCP^{-1}$; EF_g), aunque se desconoce en profundidad el impacto del estatus N por planta sobre la EF_g en fechas de siembra contrastantes. Adicionalmente, el ambiente determinado por fechas de siembra tempranas y tardías genera cambios en los niveles de TCP_{pc} , los cuales pueden determinar fijación de granos en espigas secundarias (prolificidad) por encima de ciertos umbrales de TCP_{pc} (Ciancio et al., 2016). La fijación de granos en espigas secundarias tiene efecto sobre la EF_g , ya que puede incrementar NGP para una TCP_{pc} similar y con ello el IC. Por lo tanto, resulta relevante el estudio de este carácter en fechas de siembra contrastantes y su contribución al NGP total bajo diferentes rangos de TCP_{pc} y estatus N alrededor de floración. En consecuencia, el análisis a escala de planta individual podría contribuir a la comprensión de los mecanismos que operan a escala de cultivo sobre la EUN_g .

1.2. Hipótesis y Objetivos

1.2.1. Hipótesis

- i. La EUN_g de los maíces tardíos resulta menor a la de los tempranos debido al menor Rto alcanzado y al incremento en los niveles de N_d dado por el atraso en la fecha de siembra.
- ii. La adecuada combinación de prácticas de manejo agronómicas, como incrementos en la densidad de plantas, optimización de la dosis de fertilización con N y elección de genotipos con alto IC maximizan la EUN_g en maíces de siembra tardía.
- iii. Los maíces de siembra temprana presentan mayor TCP_{pc} frente a incrementos en el estatus N que los de siembra tardía debido a la mejora en el ambiente fotothermal alrededor de floración. En consecuencia, resulta mayor el NGP, la EF_g y la EUN_g de los maíces tempranos respecto a los de siembra tardía.

1.2.2. Objetivo general

Generar conocimientos sobre la economía del N en maíces tempranos y tardíos, a escala de cultivo y de planta.

1.2.3. Objetivos específicos

- i. Evaluar los cambios en la EUN_g ante atrasos en la fecha de siembra, determinando la contribución de la absorción de N en estadios vegetativos vs. reproductivos y la removilización de N en dos genotipos de maíz caracterizados *a priori* como diferentes en su $E_{abs}N$.
- ii. Determinar el efecto de la interacción fecha de siembra X genotipo sobre la EUN_g y sus componentes, *i.e.* $E_{abs}N$, $E_{ut}N_g$ e IC.
- iii. Estudiar el efecto de la interacción fecha de siembra X densidad de plantas X genotipo sobre la EUN_g y sus componentes, *i.e.* $E_{abs}N$, $E_{ut}N_b$ e IC.
- iv. Evaluar las combinaciones apropiadas de prácticas de manejo que optimicen el Rto y la EUN_g en siembra temprana y tardía.
- v. Estudiar la EF_g bajo diferentes combinaciones de fechas de siembra, rangos de TCP_{pc} y estatus N alrededor de floración, dados por cambios en la densidad de plantas y dosis de fertilización con N.
- vi. Estudiar la relación entre la EF_g a escala de planta con la EUN_g a escala de cultivo.

1.3. Secuencia de presentación correspondiente a los resultados obtenidos

Para evaluar el efecto del retraso de la fecha de siembra en el cultivo de maíz sobre la EUN_g , se propuso realizar el análisis de resultados a diferentes escalas, *i.e.* a escala de cultivo y planta. En función de lo anterior, se presentarán los resultados en 4 capítulos. En el Capítulo 2 se analizará la economía del N a escala de cultivo evaluando fechas de siembra contrastantes y los mecanismos involucrados que impactan sobre la EUN_g en cada una de ellas. En el Capítulo 3 se evaluarán combinaciones de prácticas de manejo

agronómicas (densidad de plantas, dosis de fertilización con N y genotipos) que promuevan mejoras de la EUN_g , particularmente en maíces con fecha de siembra tardía.

En el Capítulo 4 se evaluará el impacto de la fecha de siembra sobre las relaciones funcionales de los determinantes del Rto de maíz a escala de planta individual (NGP , TCP_{pc} , EF_g) y el estatus N por planta. Finalmente, en el Capítulo 5 se presentarán la discusión general y conclusiones de la tesis, integrando los conocimientos originales obtenidos en cada capítulo y se discutirán sus implicancias sobre el sistema productivo y sobre futuras líneas de investigación.

Capítulo 2: Economía del N en maíces de siembra temprana y tardía⁽¹⁾

⁽¹⁾ Maltese, N.E., Melchiori, R.J.M., Maddonni, G.A., Ferreyra, J.M., Caviglia, O.P. 2019. Nitrogen economy of early and late-sown maize crops. *Field Crops Res.* 231, 40-50.

2.1. Introducción

El retraso de la fecha de siembra de los cultivos de maíz, desde principios de primavera hasta finales de primavera o principios de verano, aumenta el período de barbecho, lo cual permite un mayor almacenamiento de agua en el perfil del suelo (Maddonni, 2012) y un aumento en el N_d por efecto de la mineralización de N desde la materia orgánica en el suelo (Bruun et al., 2006, Caviglia et al., 2014). Para la región Pampeana, Coyos et al. (2018) reportaron valores de N_d a la siembra superiores a 60 kg N ha^{-1} en quince de diecisiete sitios analizados en cultivos tardíos de maíz, lo que concuerda con los resultados reportados por Díaz Valdez et al. (2014), quienes también documentaron valores superiores a 60 kg N ha^{-1} en todos los sitios evaluados. Estos valores de N_d son mayores a los reportados en fechas de siembra tempranas de maíz (Orcellet et al., 2017). En consecuencia, se sugiere un menor requerimiento de fertilizante nitrogenado para los maíces tardíos, en comparación con los de siembra temprana, tanto por los menores niveles de R_{to} alcanzado como por el mayor N_d (Melchiori y Caviglia, 2008; Caviglia et al., 2014; Mercau y Otegui, 2014). En la región Pampeana existen estudios de fertilización N que describen respuesta de R_{to} diferencial entre lotes o genotipos de maíz, (Caviglia et al., 2014; Mercau y Otegui, 2014; Gambin et al., 2016; Coyos et al., 2018), lo cual conduce a la necesidad de analizar la economía del N ante cambios en la fecha de siembra, con el objetivo de generar conocimiento que contribuya a las recomendaciones de dosis adecuadas de fertilización con N en maíces de siembra tardía.

El análisis de la economía de N a escala de cultivo, implica la partición de la EUN_g en dos componentes: la $E_{abs}N$ y la $E_{ut}N_g$ (Moll et al., 1982). Estudios recientes que comparan los híbridos liberados en diferentes décadas han documentado una ganancia genética en EUN_g que está relacionada principalmente con los altos R_{tos} registrados en híbridos modernos (Ciampitti y Vyn, 2011, 2012, 2013; Ferreyra et al., 2013; Mueller y Vyn, 2016). Los aumentos proporcionalmente mayores en R_{to} que en el N absorbido total (N_{abs}) que se registraron asociados al mejoramiento genético se reflejaron en mayores $E_{ut}N_g$ en híbridos modernos, aunque estos estudios sólo incluyen cultivos de maíz bajo fechas de siembra óptimas (Ciampitti y Vyn, 2012; Haegele et al., 2013; Mueller y Vyn, 2016). Estos hallazgos, sin embargo, podrían no ser extrapolables a cultivos de maíz de siembra tardía, debido a las contrastantes condiciones ambientales durante los períodos previos y posteriores a la floración. Por ejemplo se anticipa una mayor producción de biomasa y absorción de N durante el período previo a la floración (N_{abspre}) de los maíces tardíos en comparación con los maíces tempranos, debido a los mayores contenidos de N_d y de agua en el suelo a la siembra y los mayores registros diarios de temperatura media y radiación solar. Sin embargo, el empobrecimiento del ambiente fototérmico durante el periodo post-floración de los maíces tardíos podría afectar negativamente el crecimiento, la absorción de N durante este período ($N_{abspost}$) y el índice de cosecha de N (la relación entre N en granos y N_{abs} total; ICN) (Cirilo y Andrade, 1994). Por lo tanto, la removilización de N aparente (N_{remAP}) podría ser una fuente relevante de N para sostener el crecimiento de los granos durante el periodo de llenado (Tsai et al., 1991; Gallais y Coque, 2005; Coque y Gallais, 2007; Abe et al., 2013). Sin embargo, se han documentado compensaciones entre N_{remAP} , N_{abspre} y $N_{abspost}$ (Weiland y Ta, 1992; Triboi y Triboi-Blondel, 2002; Ciampitti y Vyn, 2013). Por lo tanto, un marco de análisis basado en los componentes de EUN_g (Ciampitti y Vyn, 2012) podría ser útil para dar cuenta de las variaciones de la EUN_g bajo diferentes

ambientes de crecimiento (*i.e.* fechas de siembra, oferta de N y años) y genotipos. En esta tesis se propone una medida de cuantificación de la fuente de N post-floración por grano, estimada a partir de la relación entre el N total durante el período post-floración ($N_{\text{abspost}} + N_{\text{remAP}}$) y el número de granos por unidad de área. Éste estimador es similar al utilizado en términos del balance de carbono (C) (producción de biomasa post-floración por grano) y ambos podrían utilizarse en conjunto para comparar las limitaciones simultáneas de N y C en post-floración en ambientes de crecimiento contrastantes.

Los objetivos de este capítulo fueron:

- i. Evaluar los cambios en la EUN_g , N_d y el Rto ante atrasos en la fecha de siembra.
- ii. Analizar las relaciones entre la EUN_g , sus componentes, *i.e.* $E_{\text{abs}}N$, $E_{\text{ut}}N_g$ y variables asociadas en siembras tempranas y tardías.

2.2. Materiales y Métodos

2.2.1. Experimentos y manejo del cultivo

Se realizaron dos experimentos (Exp) a campo en Paraná (31°48' S 60°32' O), en la estación experimental del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Argentina, durante dos campañas consecutivas (2014-2015 y 2015-2016, Exp1 y Exp2, respectivamente).

Los tratamientos incluyeron una combinación de i) dos híbridos de maíz (DK 73-10 VT3P y DK 70-10 VT3P) tolerantes al glifosato [N-(fosfonometil)glicina], que han sido caracterizados *a priori* como contrastantes en su $E_{\text{abs}}N$ (alta y baja, para DK 73-10 VT3P y DK 70-10 VT3P, respectivamente; Robles et al., 2015) y con un ciclo de cultivo similar (123 días y un requerimiento térmico de siembra a floración de $900^{\circ}\text{Cd}^{-1}$; Cultivio, 2018), ii) dos fechas de siembra: mediados de septiembre (siembra temprana) y mediados de diciembre (siembra tardía), y iii) tres dosis de N: 0, 90 y 270 kg N ha⁻¹ (0N, 90N y 270N; respectivamente) aplicadas como urea (46% N) en cobertura en el estadio de V4 (Ritchie et al., 1997). Los tratamientos se dispusieron en un diseño de parcelas divididas con tres repeticiones. La fecha de siembra se aleatorizó en las parcelas principales y la combinación de híbridos y dosis de N en las sub-parcelas (en adelante, parcelas). Cada parcela (26 m²) incluyó cinco surcos, separados por 0,52 m y 10 m de largo, con una densidad de plantas de 7 pl m⁻². Los Exps fueron conducidos bajo condiciones de secano.

El lote experimental utilizado se encuentra bajo una secuencia continua de trigo/soja-maíz en siembra directa durante, al menos, los últimos 20 años. Por lo tanto, la soja fue el cultivo antecesor de cada Exp, la cual se cosechó a mediados de abril. El suelo es un Argiudol Ácuico de textura fina, con niveles moderados de disponibilidad de P (*ca.* 10 mg kg⁻¹ P Bray). Se aplicaron 100 kg ha⁻¹ de superfosfato triple previo a la siembra de cada Exp. Las malezas se controlaron químicamente con glifosato con una dosis de 3 L ha⁻¹, desde 60 días previos a la siembra hasta el final de los Exps. Los insectos y las enfermedades fueron controlados adecuadamente cuando fue necesario. Las variables meteorológicas se obtuvieron de una estación meteorológica convencional que se encuentra cerca de los Exps (<1000 m).

2.2.2. Mediciones sobre el cultivo y muestreo de suelo

La fenología del cultivo se registró semanalmente en diez plantas marcadas por parcela, desde la emergencia de las plántulas hasta la madurez fisiológica (R6), utilizando la escala de Ritchie et al. (1997). El stand final de plantas fue medido en R6 contando las plantas en las dos hileras centrales de cada parcela.

Las muestras de biomasa aérea se determinaron en floración (R1) y R6 cortando cinco plantas consecutivas por parcela a nivel del suelo. Se estimó la biomasa aérea por unidad de área en R1 y R6, en base al conteo de stand en cada parcela y el promedio de la biomasa de las plantas individuales. En R1 y R6, se determinaron los pesos de tallos + vainas, láminas foliares y espigas. Las muestras se secaron en una estufa de circulación de aire forzado a 65°C, hasta peso constante. Se molió una alícuota de las muestras utilizando un molino tipo Willey (malla < 1 mm) para determinar la concentración de N utilizando el método de micro-Kjeldahl (Nelson y Sommers, 1973).

El Rto de grano, corregido a 145 g kg⁻¹ de humedad, se determinó por cosecha mecánica de las dos hileras centrales de cada parcela. El IC se calculó como la relación entre el Rto de grano (0% de humedad) y la biomasa aérea total en R6.

Para determinar las concentraciones de N-NO₃⁻ en el suelo, se tomaron muestras de suelo a la siembra, R1 y R6 en las parcelas de cada tratamiento sin fertilización con N, considerando las profundidades de 0-0,2, 0,2-0,4 y 0,4-0,6 m. Las muestras fueron compuestas de 20 sub-muestras por parcela.

El N_d durante el ciclo de cultivo se calculó como la suma de N a la siembra (N_s; 0-0,6 m), el N aplicado como fertilizante y el N mineralizado desde la siembra hasta R6 (N_{min}). El N_{min} se estimó en las parcelas sin fertilización con N (0N) según Álvarez y Steinbach (2011), sin considerar las pérdidas de N a través de los procesos de volatilización, desnitrificación y/o lixiviación (Ec. 2.1).

$$N_{min} = (N_{abs} R6 + N_s R6) - N_s siembra \quad (2.1)$$

donde N_{abs} R6 es el N absorbido a madurez, N_s R6 corresponde al contenido de N-NO₃ en el suelo a madurez y N_s siembra corresponde al contenido de N-NO₃ en el suelo a la siembra. Cabe aclarar que bajo esta metodología N_{min} no es una medida directa de la mineralización. Sin embargo, representa el N_{min} que durante el ciclo de cultivo es absorbido por la planta, con una determinada eficiencia de absorción de N, la cual será variable de acuerdo a las condiciones ambientales, por lo tanto esta estimación del N_{min} podría denominarse aparente.

2.2.3. Cálculos

El N_{abs} en R1 y R6 se obtuvo de la suma del N acumulado en cada fracción (lámina de hojas y tallo + vaina + espiga), la que a su vez se obtuvo del producto de la biomasa y la concentración de N de cada fracción. El ICN se calculó a través del cociente entre la cantidad de N en los granos y N_{abs} en R6. El N_{abs}post se calculó como la diferencia entre el N_{abs} en R6 y el N_{abs} en R1 (*i.e.* N_{abs}pre). El N_{rem}AP se calculó como la diferencia entre el N_{abs} en hojas más tallo en R6 y N_{abs} en hojas más tallo en R1 (Chen et al., 2015). Las hojas senescidas durante el período reproductivo no se recolectaron en R6, debido a que la mayoría de ellas permanecieron aún unidas a la planta.

La EUN_g y sus componentes ($E_{ut}N_g$ y $E_{abs}N$) se calcularon utilizando las ecuaciones (1.1), (1.2) y (1.6); respectivamente.

La fuente de N post-floración por grano fue calculada de acuerdo a la Ec.2.2.

$$\text{Fuente de N post – floración por grano} = \frac{N_{abspost} + N_{remAP}}{\text{Número de granos por unidad de area}} \quad (2.2)$$

La fuente de biomasa (B) post-floración por grano fue calculada de acuerdo a la Ec.2.3.

$$\text{Fuente de B post – floración por grano} = \frac{B_{post} + B_{remAP}}{\text{Número de granos por unidad de area}} \quad (2.3)$$

donde B_{post} es la producción de biomasa post-floración, calculada como la diferencia entre la biomasa total en R1 y en R6, y B_{remAP} es la biomasa aparente que se removiliza durante el período post-floración, la cual se calculó como la diferencia entre la biomasa de hojas más el tallo en R6 y la biomasa de hojas más el tallo en R1. Cabe aclarar que este estimador podría subestimar la fuente de carbono en función de la demanda para sostener el crecimiento de los granos bajo condiciones ambientales de post-floración óptimas.

2.2.4. Análisis estadístico

El conjunto de datos se sometió a un análisis de varianza (ANOVA) para evaluar el efecto de los factores (Exp, fecha de siembra, híbrido y dosis de N) y sus interacciones en todas las variables evaluadas. Se consideró al Exp, a la parcela principal (fecha de siembra) y a la sub-parcela (combinación factorial de híbridos x dosis de N) como factores fijos.

El análisis estadístico además incluyó análisis de correlaciones, análisis multivariado (análisis de componentes principales; ACP) y regresiones lineales simples para evaluar las relaciones entre las variables. Algunas de las relaciones podrían resultar espurias, ya que comparten las mismas variables que se usan en su cálculo (e.g. EUN_g vs. $E_{abs}N$ y $E_{ut}N_g$, ICN vs. $E_{ut}N_g$ y fuente de B post-floración por grano vs. fuente de N post-floración por grano). En consecuencia, el coeficiente de correlación de Pearson (r) se calculó de acuerdo a Dunlap et al. (1997). Los nuevos coeficientes de determinación (R^2) se calcularon como el cuadrado de r para informar el ajuste de las relaciones mencionadas anteriormente.

Los análisis estadísticos se llevaron a cabo utilizando el software InfoStat (Di Rienzo et al., 2011). Para el ACP, se consideraron las condiciones ambientales, incluidas las variables de clima y suelo, Rto de grano, EUN_g y sus componentes. Las variables climáticas consideradas fueron: precipitaciones acumuladas durante el ciclo de cultivo (Ac PP); Evapotranspiración potencial acumulada durante el ciclo de cultivo (Ac ET0), radiación global acumulada durante el ciclo de cultivo (Ac Rg); temperatura media (Tm) y balance hídrico aparente (BH Ap) durante los períodos vegetativo (V), crítico alrededor de floración ($R1 \pm 15$ días) (PC) y reproductivo (R). Solo los dos primeros ejes (eje CP1 y eje CP2) se presentan gráficamente, y las correlaciones positivas entre las variables están representadas por vectores con ángulos cercanos a 0° , mientras que las variables que están correlacionadas negativamente están representadas por vectores con ángulos cercanos a 180° . Los ángulos de 90° entre vectores representan variables no correlacionadas entre sí.

2.3. Resultados

2.3.1. Condiciones climáticas

Las condiciones meteorológicas durante los Exps se resumen en la Fig. 2.1. La radiación solar media fue similar entre los Exps (en promedio, 20,1 y 18,6 MJ m⁻² d⁻¹ para el periodo septiembre – abril), pero la temperatura media del aire durante el ciclo de cultivo de los maíces de siembra temprana fue mayor durante el ciclo 2015-16 (Exp2) que en 2014-15 (Exp1) (en promedio, 24 vs. 23°C en el Exp2 y Exp1, respectivamente). El período pre-floración de los cultivos de siembra temprana estuvo expuesto a temperaturas más bajas del aire y a valores de radiación solar más altos que el período pre-floración de los cultivos de siembra tardía (en promedio, 21,5 vs. 25,5°C y 1304 vs. 1086 MJ m⁻² acumulados en maíces tempranos y tardíos, respectivamente). Por el contrario, el período post-floración de los cultivos de siembra tardía transcurrió con temperaturas medias diarias del aire y valores de radiación solar más bajos que el período post-floración de los cultivos de siembra temprana (en promedio, 20 vs. 26°C y 846 vs. 1125 MJ m⁻² acumulados en maíces tardíos y tempranos, respectivamente) (Figs. 2.1c, d, e, f).

La duración del ciclo de cultivo desde la siembra hasta R6 (*ca.* 138 días) fue similar entre híbridos y Exps (Fig. 2.1). El retraso de la fecha de siembra determinó un acortamiento de *ca.* 15 días en la duración del período pre-floración, pero de *ca.* 8 días en el ciclo total de cultivo, debido a que el período post-floración fue *ca.* 7 días más largo.

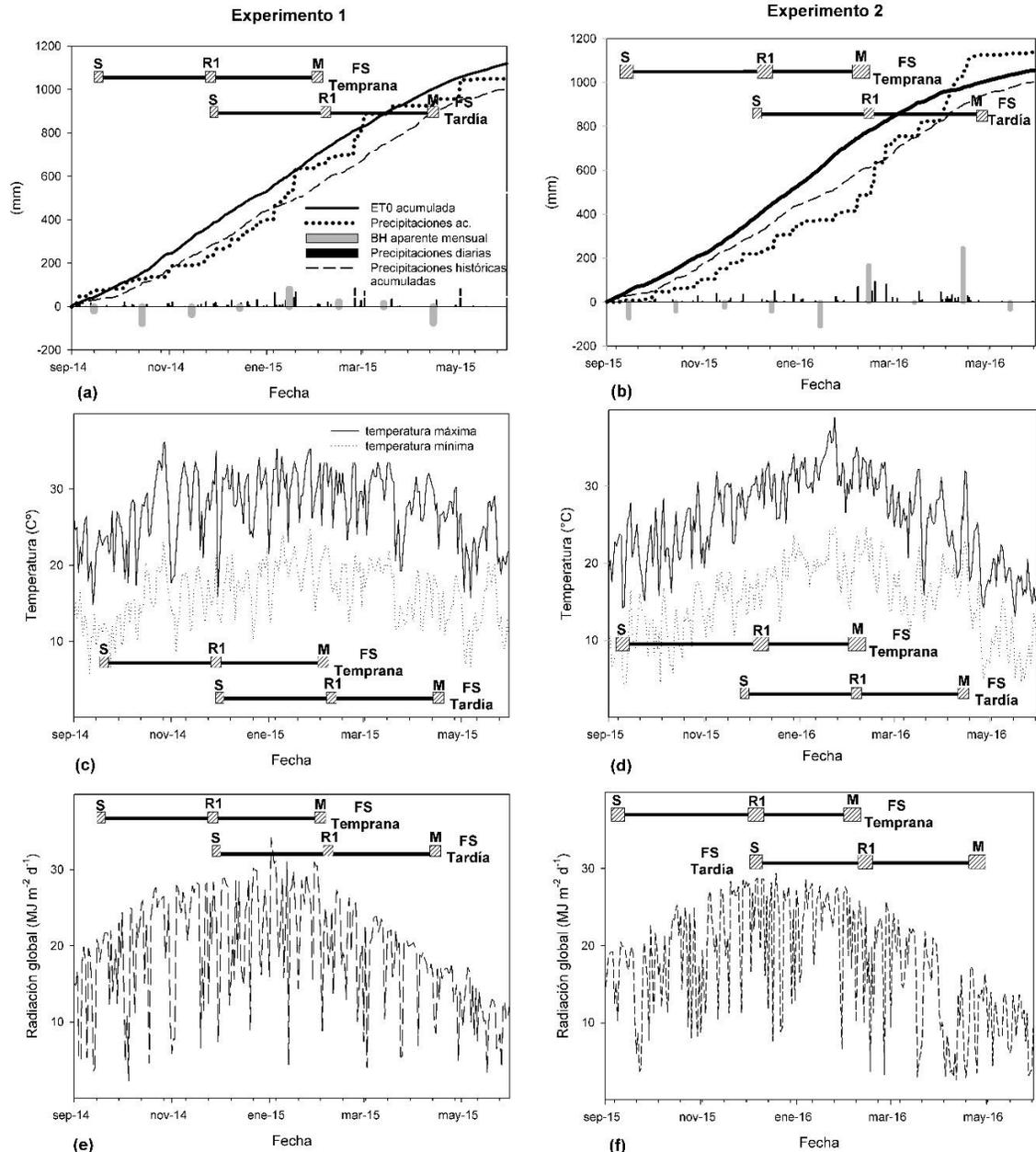


Fig. 2.1. Precipitaciones y ET0 (evapotranspiración potencial) acumuladas, precipitación diaria, datos históricos de precipitación, balance de agua mensual aparente (BHAp) (a, b), temperatura máxima y mínima del aire (c, d) y radiación solar global (e, f) en dos experimentos (2014-15 y 2015-16; Exp1 y Exp2, respectivamente) realizados en Paraná (Lat. 31,8° S). Los segmentos negros representan los ciclos de los cultivos correspondientes a maíces tempranos y tardíos. Los cuadrados identifican la fecha de siembra (S), floración (R1) y madurez fisiológica (R6).

Las precipitaciones (*ca.* 844 mm) y la ET0 (*ca.* 823 mm) acumuladas de octubre a marzo fueron similares entre Exps (Figs. 2.1a, b). Sin embargo, las precipitaciones acumuladas durante el periodo crítico de los cultivos ($R1 \pm 15$ días) fueron contrastantes entre el Exp1 (161 y 227 mm para maíces tempranos y tardíos, respectivamente) y el Exp2 (130 y 269 mm para maíces tempranos y tardíos, respectivamente). El período crítico de los

cultivos de siembra temprana (*i.e.* diciembre) estuvo expuesto a niveles más bajos de precipitaciones pero más alto de ET0 (*ca.* 127 mm y 152 mm para precipitaciones y ET0, respectivamente) que los registrados durante el mismo período (*i.e.* febrero) en maíces tardíos (*ca.* 226 mm y 131 mm para precipitaciones y ET0, respectivamente).

Aunque los niveles de precipitaciones a lo largo del ciclo del cultivo fueron más altos que los niveles históricos acumulados de precipitaciones (Figs. 2.1a, b), el balance de agua aparente (diferencia entre la precipitación y ET0, BHAp) durante el período crítico fue ligeramente deficiente para los cultivos de siembra temprana (en promedio, -8 mm para ambos Exps), y positivo para los maíces tardíos (en promedio, 114 mm para ambos Exps). En el Exp2, la precipitación total registrada durante el período posterior a la floración de los cultivos de siembra temprana (enero) fue un 44% más baja (70 mm) que el registro histórico para la localidad de Paraná (125 mm).

2.3.2. Disponibilidad de N y Rto de grano

El N_s no mostró un patrón común entre fechas de siembra (Cuadro 2.1). En el Exp1, N_s fue similar entre las fechas de siembra, mientras que en el Exp2, el N_s de los cultivos tardíos fue más alto que el de los maíces tempranos. Sin embargo, en ambos Exps, el N_{min} durante la estación de crecimiento de los maíces tardíos fue mayor (*ca.* 21%) que durante el mismo período de los maíces tempranos (en promedio, 113 kg N_{min} ha⁻¹ para ambos Exps) (Cuadro 2.1). Por otro lado, se detectó una interacción significativa de Exp x FS sobre N_d ($P < 0,0001$), donde el N_d durante el Exp1 presentó menores diferencias entre fechas de siembra (265 vs. 277 kg N_d ha⁻¹ para maíces tempranos y tardíos, respectivamente) que durante el Exp2 (270 vs. 348 kg N_d ha⁻¹ para maíces tempranos y tardíos, respectivamente) (Cuadro 2.2). El rango de N_d , mediado por variaciones en las dosis de N del fertilizante, el N_s y el N_{min} , se extendió en un rango de *ca.* 170-440 kg N ha⁻¹ (Cuadro 2.2).

Cuadro 2.1. Contenido de N-NO₃⁻ (0-60 cm) en el suelo a la siembra (N_s) y N mineralizado (N_{min}) desde siembra a R6 en maíces de siembra temprana y tardía en dos experimentos (2014-15 y 2015-16; Exp1 y Exp2, respectivamente) llevados a cabo en Paraná (Lat. 31,8°S), Argentina.

Fecha de siembra	Exp 1		Exp 2	
	N_s	N_{min}	N_s	N_{min}
	(kg N ha ⁻¹)			
Temprana	51	94	19	131
Error estándar	1,8	12,0	1,0	14,2
Tardía	46	111	55	173
Error estándar	7,0	5,4	2,4	16,8

El Rto de grano fue mayor en los maíces tempranos que en los tardíos en el Exp1. En el Exp2 no se detectaron diferencias entre fechas de siembra (interacción Exp x FS, $P < 0,05$, Fig. 2.2a y Cuadro 2.2). Además, se detectó una interacción significativa dosis de N x Exp ($P < 0,01$) sobre el Rto (Fig. 2.2b), donde la respuesta del Rto a la dosis de N fue mayor en el

Exp1 que en el Exp2, independientemente de la fecha de siembra. Por otro lado, el Rto de DK 73-10 VT3P superó el de DK 70-10 VT3P ($P<0,01$). A través de los Exps, la fertilización con N aumentó significativamente ($P<0,0001$) el Rto en ambos híbridos, pero la magnitud de esta respuesta difirió entre fechas de siembra (interacción de N x FS, $P<0,01$, Fig. 2.2c y Cuadro 2.2). Los maíces tempranos mostraron una mayor respuesta de Rto a la dosis de fertilización con N (en promedio, 22 kg grano por unidad de incremento en N aplicado) que los cultivos de siembra tardía (en promedio, 16 kg grano por unidad de incremento en N aplicado). El número de granos por unidad de área varió de manera similar al Rto, variando en un rango de 1939 - 4776 granos m^{-2} y valores promedio de *ca.* 3278 y 2759 granos m^{-2} en siembras tempranas y tardías, respectivamente (Cuadro 1 anexo).

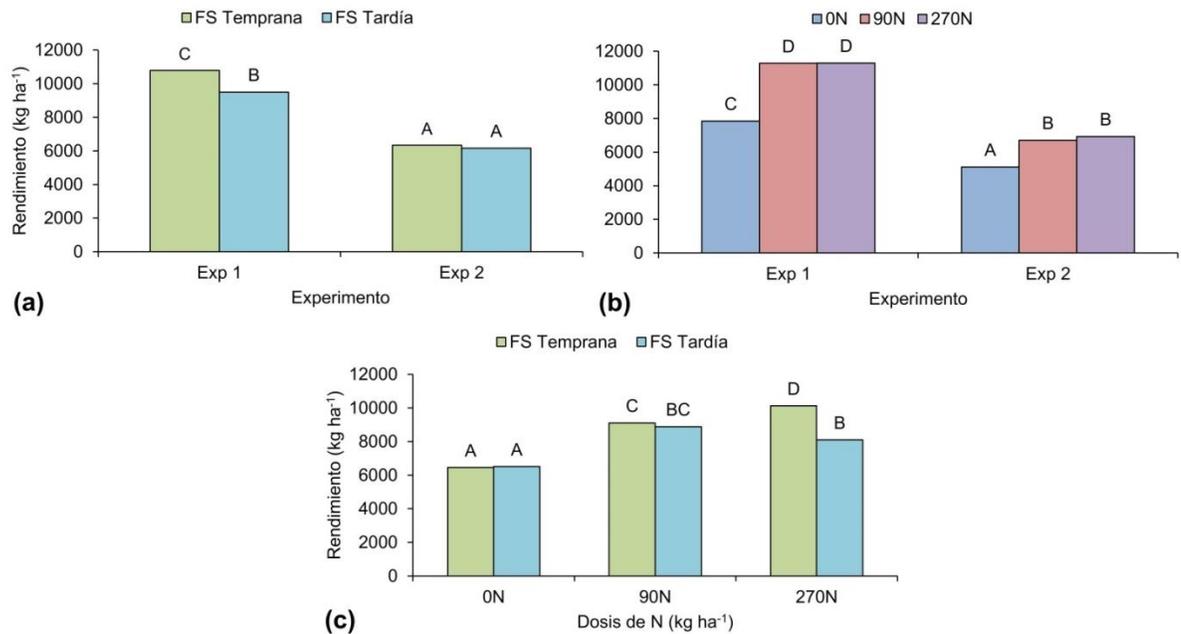


Fig. 2.2. Interacción de Exp x FS (a), Exp x N (b) y FS x N (c) sobre el rendimiento de grano. Los experimentos (2014-15 y 2015-16, Exp1 y Exp2, respectivamente) se llevaron a cabo en Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina. En cada combinación de FS x Exp, se cultivaron dos híbridos con tres dosis de N.

El índice de cosecha (IC) no difirió entre fechas de siembra en el Exp1 (0,54 vs. 0,54 en maíces tempranos y tardíos, respectivamente), mientras que en el Exp2 el retraso de la fecha de siembra disminuyó el IC (0,52 vs. 0,41 en maíces tempranos y tardíos, respectivamente, interacción E x FS, $P<0,01$, Cuadro 2.2). El IC varió de 0,46 a 0,54 y se incrementó con la dosis de N ($P<0,01$). DK 73-10 VT3P tuvo mayor IC ($P<0,01$) que DK 70-10 VT3P.

2.3.3. Absorción total de N, N_{abspre} , $N_{abspost}$, N_{remAP} , ICN y concentración de N en grano

Ambos híbridos variaron en su respuesta del N_{abs} a la dosis de N cuando la fecha de siembra fue modificada (interacción N x H x FS, $P < 0,01$, Fig. 2.3 y Cuadro 2.2). Se detectó una interacción significativa de Exp x FS sobre N_{abs} ($P < 0,0001$), donde los valores de N_{abs} de los maíces tempranos fueron más altos que los de los maíces tardíos en el Exp1 (169 vs. 142 kg N_{abs} ha⁻¹, respectivamente), mientras que en el Exp2 se produjo una tendencia opuesta (103 vs. 129 kg N_{abs} ha⁻¹ para maíces tempranos y tardíos, respectivamente). En general, los cultivos de siembra temprana tuvieron una mayor respuesta positiva del N_{abs} a la dosis de N (ca. 0,43 kg de N_{abs} por unidad de incremento en N aplicado) que los maíces tardíos (ca. 0,29 kg de N_{abs} por unidad de incremento en N aplicado).

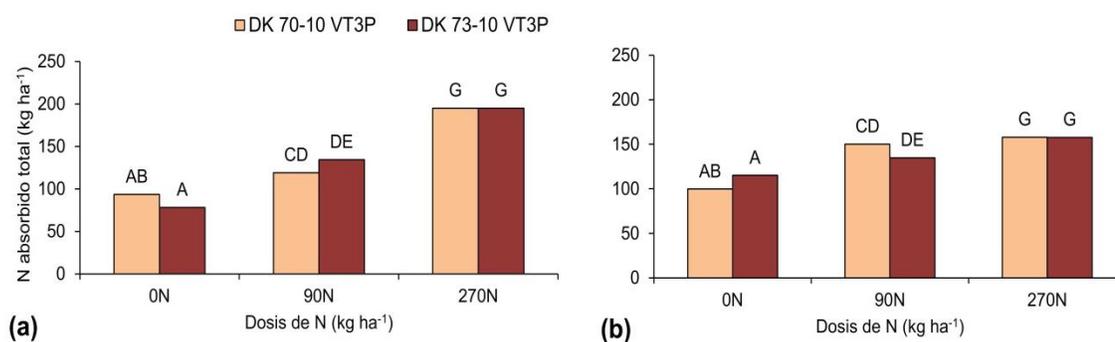


Fig. 2.3. Interacción de FS x N x H sobre el N total absorbido. Las fechas de siembra se presentan divididas (a. FS Temprana; b. FS Tardía). Los experimentos (2014-15 y 2015-16, Exp1 y Exp2, respectivamente) se llevaron a cabo en Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina. En cada combinación de FS x Exp, se cultivaron dos híbridos con tres dosis de N.

Una interacción de N x FS fue detectada sobre N_{abspre} , donde los maíces tempranos mostraron una mayor respuesta del N_{abspre} frente al incremento de la dosis de N que los tardíos (Fig. 2.4a y Cuadro 2.2). Por otro lado, no hubo patrones de respuesta definidos para la respuesta N_{abspre} a la dosis de N de ambos híbridos entre Exps, aunque, en general, la respuesta tendió a ser mayor en el Exp1 que en el Exp2 (interacción Exp x H x N, $P < 0,01$, Fig. 2.4b y Cuadro 2.2).

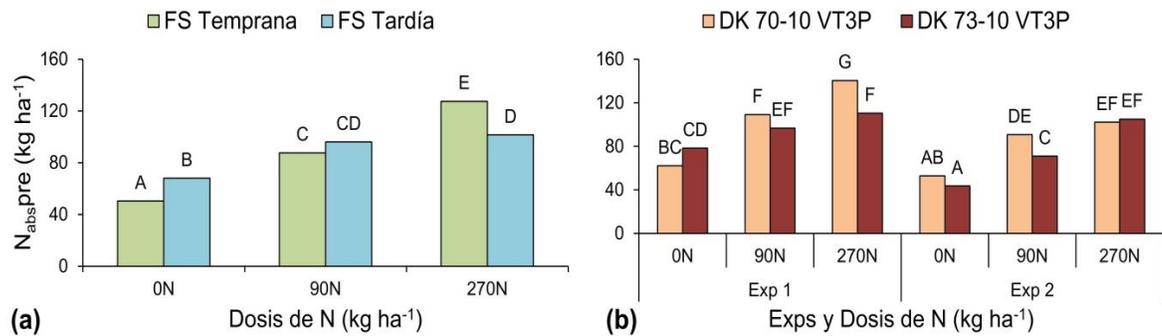


Fig. 2.4. Interacción de FS x N (a) y Exp x N x H (b) sobre el N absorbido en pre-floración ($N_{abs,pre}$). Las fechas de siembra se presentan divididas (a. FS Temprana; b. FS Tardía). Los experimentos (2014-15 y 2015-16, Exp1 y Exp2, respectivamente) se llevaron a cabo en Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina. En cada combinación de FS x Exp, se cultivaron dos híbridos con tres dosis de N.

El $N_{abs,post}$ aumentó por efecto de la dosis de N ($P < 0,0001$), pero no difirió entre los híbridos ($P < 0,05$, Cuadro 2.2). Se registró una interacción significativa de Exp x FS ($P < 0,01$) sobre $N_{abs,post}$. En el Exp1, el $N_{abs,post}$ no varió entre fechas de siembra (57 vs. 55 kg $N_{abs,post}$ ha⁻¹ para maíces tempranos y tardíos, respectivamente), pero en el Exp2, los maíces tempranos tuvieron menor $N_{abs,post}$ que los tardíos (28 vs. 50 kg $N_{abs,post}$ ha⁻¹, respectivamente) (Cuadro 2.2).

El $N_{rem,AP}$ de los cultivos tempranos se incrementó por la dosis de N (en promedio, 27,5 kg $N_{rem,AP}$ ha⁻¹), sin embargo, esta respuesta fue menor en los maíces tardíos (en promedio, 10,8 kg $N_{rem,AP}$ ha⁻¹) (interacción FS x N, $P < 0,05$, Cuadro 2.2). Se detectó una interacción significativa de Exp x H x N ($P < 0,05$) sobre $N_{rem,AP}$, donde la respuesta de $N_{rem,AP}$ a la dosis de N fue mayor en el Exp1 (en promedio, 26,3 kg $N_{rem,AP}$ ha⁻¹) que en el Exp2 (en promedio, 12,0 kg $N_{rem,AP}$ ha⁻¹), pero no se observó un patrón claro de variación entre híbridos.

El ICN disminuyó a medida que la fecha de siembra se retrasó, sólo en el Exp2 (0,67 vs. 0,54 ICN para maíces tempranos y tardíos, respectivamente), mientras que en el Exp1 no se detectaron diferencias entre las fechas de siembra (en promedio, 0,67 ICN) (interacción Exp x FS, $P < 0,0001$, Cuadro 2.2). Se detectó una interacción significativa de FS x H x N sobre ICN ($P < 0,05$; Fig 2.5a-b y Cuadro 2.2). En promedio, bajo fechas de siembra tempranas, DK 73-10 VT3P no tuvo diferencias de ICN entre dosis de N, mientras que DK 70-10 VT3P maximizó el ICN con dosis de 0N y 90N (Fig. 2.5a). Contrariamente, en siembras tardías, DK 73-10 VT3P maximizó el ICN con dosis de 0N y 90N, mientras que DK 70-10 VT3P no mostró respuesta del ICN a los cambios en la dosis de N (Fig. 2.5b).

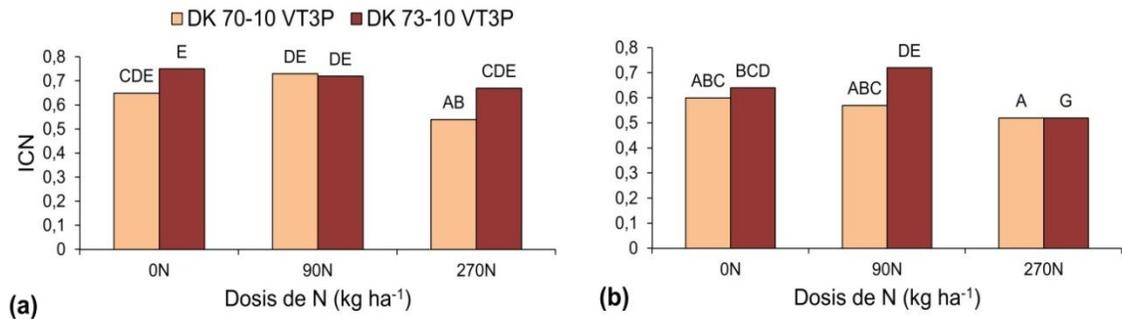


Fig. 2.5. Interacción de FS x N x H sobre el índice de cosecha de N (ICN). Las fechas de siembra se presentan divididas (a. FS Temprana; b. FS Tardía). Los experimentos (2014-15 y 2015-16, Exp1 y Exp2, respectivamente) se llevaron a cabo en Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina. En cada combinación de FS x Exp, se cultivaron dos híbridos con tres dosis de N.

Se registró una interacción significativa de Exp x FS x H x N ($P < 0,01$) sobre la concentración de N en grano (Cuadro 2.2). En ambos Exps, la concentración de N en grano de los maíces tempranos se incrementó por la dosis de N (en promedio, 0,110 y 0,118 % N_g para el Exp1 y Exp2, respectivamente), mientras que este patrón no varió entre ambos Exps en los maíces tardíos (en promedio, 0,113 % N_g). Además, en el Exp1 DK 70-10 VT3P tuvo mayor respuesta de la concentración de N_g a la dosis de N que DK 73-10 VT3P en siembras tempranas, pero menor respuesta en siembras tardías. Mientras que en el Exp2 se observó una tendencia opuesta.

Cuadro 2.2. Análisis de varianza para el total de N disponible (N_d) durante el ciclo de cultivo, Rto de grano, índice de cosecha (IC), absorción de N total (N_{abs}) durante el ciclo de cultivo, absorción de N durante el periodo pre- y post-floración (N_{abspre} y $N_{abspost}$, respectivamente), removilización aparente de N durante el periodo post-floración (N_{remAP}), índice de cosecha de N (ICN) y concentración de N en grano. En cada combinación de fechas de siembra x Exp, se evaluaron dos híbridos con tres dosis de N.

	N_d (kg N ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	IC	N_{abs} (kg N ha ⁻¹)	N_{abspre} (kg N ha ⁻¹)	$N_{abspost}$ (kg N ha ⁻¹)	N_{remAP} (kg N ha ⁻¹)	ICN	Concentración de N en grano (%)
Experimento (Exp)									
Exp1	271 a	10144 b	0,54 b	155 b	99 b	56 b	52 b	0,67 b	1,18 a
Exp2	308 b	6252 a	0,47 a	116 a	77 a	39 a	34 a	0,60 a	1,22 b
P-valor	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0031	0,0361
Dosis de N (kg N ha ⁻¹) (N)									
0N	170 a	6483 a	0,46 a	96 a	59 a	37 a	30 a	0,66 b	1,12 a
90N	260 b	8996 b	0,54 b	135 b	92 b	43 a	50 b	0,68 b	1,19 b
270N	440 c	9115 b	0,51 b	176 c	114 c	62 b	49 b	0,56 a	1,28 c
P-valor	<0,0001	<0,0001	0,003	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Híbrido (H)									
DK70-10VT3P	290	7801 a	0,47 a	137	93 b	44	46	0,60 a	1,21
DK73-10VT3P	290	8595 b	0,53 b	134	84 a	50	40	0,67 b	1,19
P-valor	ns	0,0016	0,0011	ns	0,0094	ns	ns	0,002	ns
Fecha de siembra (FS)									
Temprana	267 a	8564 b	0,53 b	131	89	42 a	45	0,68 b	1,15 a
Tardía	312 b	7832 a	0,47 a	140	88	52 b	41	0,59 a	1,24 b
P-valor	<0,0001	0,0033	0,0009	ns	ns	0,0114	ns	0,0002	0,0002
Interacciones									
Exp*FS	<0,0001	0,0231	0,0022	<0,0001	0,0001	0,0013	0,0188	0,0271	<0,0001
Exp*N	ns	0,0045	ns	ns	ns	ns	ns	0,0006	ns
FS*N	ns	0,0013	ns	<0,0001	<0,0001	ns	0,0139	ns	0,0001
N*H	ns	ns	ns	ns	0,0355	ns	ns	ns	ns
Exp*FS*N	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,0026
Exp*H*N	ns	ns	ns	ns	0,002	ns	0,0499	ns	ns
FS*H*N	ns	ns	ns	0,0098	0,0491	ns	ns	0,0148	0,0208
Exp*FS*H*N	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,0012

^a Valores seguidos de letras diferentes indican diferencias significativas (LSD, $P < 0,05$) dentro de cada fuente de variación.

^b Para una mayor claridad, en el cuadro solo se muestran las interacciones de los factores que fueron significativas ($P < 0,05$) en al menos una de las variables analizadas.

2.3.4. Eficiencia de uso del N, componentes y su correlación con las condiciones ambientales

Se detectó una interacción significativa de Exp x FS x H x N ($P < 0,01$) sobre $E_{abs}N$ (Cuadro 2.3). En ambos Exps, los cultivos de siembra tardía mostraron los mayores descensos en $E_{abs}N$ con incrementos en la dosis de N comparado con los tempranos (en promedio, $-0,160$ vs. $-0,070 E_{abs}N$, respectivamente). Se observaron mayores variaciones en la $E_{abs}N$ en el Exp1 que en el Exp2, y ambos híbridos no mostraron un patrón definido de variación en la respuesta de $E_{abs}N$ a la dosis de N.

Por otra parte, se detectó una interacción significativa de Exp x FS x N ($P < 0,05$) sobre $E_{ut}N_g$ (Cuadro 2.3). En general, los aumentos en la dosis de N afectaron negativamente a la $E_{ut}N_g$, aunque, en ambos Exps, el efecto negativo de la dosis de N fue mayor en los maíces tempranos (en promedio, $-19,3 E_{ut}N_g$ cuando la dosis de N se incrementó de 0N a 90N y 270N) que en los tardíos (en promedio, $-2,4 E_{ut}N_g$ cuando la dosis de N se incrementó de 0N a 90N y 270N). Las mayores diferencias de $E_{ut}N_g$ entre fechas de siembra se detectaron en el Exp2 (mayor $E_{ut}N_g$ en maíces tempranos que en tardíos) que en el Exp1 (sin diferencias de $E_{ut}N_g$ entre fechas de siembra). En general, para ambas fechas de siembra, DK 73-10 VT3P tuvo una $E_{ut}N_g$ mayor que DK 70-10 VT3P (Fig. 2.6a-b). Sin embargo, en siembras tempranas, la $E_{ut}N_g$ de DK 70-10 VT3P solo disminuyó con la dosis de N superior (270N), mientras que DK 73-10 VT3P tuvo disminuciones en la $E_{ut}N_g$ cada vez que la dosis de N se incrementó (Fig. 2.6a). Contrariamente, en siembras tardías la $E_{ut}N_g$ de DK 70-10 VT3P no fue afectada por la dosis de N y DK 73-10 VT3P solo tuvo reducciones de la $E_{ut}N_g$ con la dosis de 270N (Fig. 2.6b).

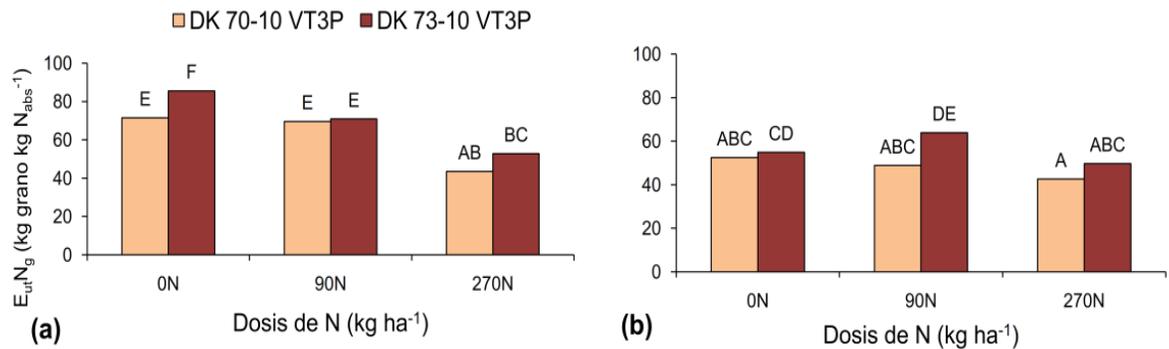


Fig. 2.6. Interacción de FS x N x H sobre la eficiencia de utilización de N para producir granos ($E_{ut}N_g$). Las fechas de siembra se presentan divididas (a. FS Temprana; b. FS Tardía). Los experimentos (2014-15 y 2015-16, Exp1 y Exp2, respectivamente) se llevaron a cabo en Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina. En cada combinación de FS x Exp, se cultivaron dos híbridos con tres dosis de N.

La $E_{ut}N_g$ se redujo (*ca.* 19%) por el retraso en la fecha de siembra ($P < 0,0001$) y difirió entre los híbridos ($P < 0,001$) (Cuadro 2.3). En efecto, DK 73-10 VT3P tuvo la $E_{ut}N_g$ más alta (en promedio, un 10% mayor que DK 70-10 VT3P). Además, en promedio, los cultivos en el Exp1 tuvieron valores más altos de $E_{ut}N_g$ que en el Exp2 (Cuadro 2.3), y las

disminuciones de la EUN_g dadas por incrementos en la dosis de N fueron mayores en el Exp1 que en el Exp2 (-13 vs. -8 EUN_g , respectivamente) (interacción Exp x N, $P < 0,0001$).

Cuadro 2.3. Análisis de varianza y valores medios para la eficiencia de uso de nitrógeno (EUN_g), la eficiencia de utilización de nitrógeno ($E_{ut}N_g$) y la eficiencia de absorción de nitrógeno ($E_{abs}N$) en dos experimentos (2014-15 y 2015-16; Exp1 y Exp2, respectivamente) que fueron conducidos en Paraná (Lat. 31,8 ° S), Argentina. En cada combinación de fechas de siembra x Exp, se evaluaron dos híbridos con tres dosis de N.

	$E_{abs}N$	$E_{ut}N_g$	EUN_g
	(kg N absorbido kg N disponible ⁻¹)	(kg granos kg N absorbido ⁻¹)	(kg granos kg N disponible ⁻¹)
Experimento (Exp)			
Exp1	0,63 b	57,4	35,8 b
Exp2	0,38 a	60,3	22,6 a
P-valor	<0,0001	ns	<0,0001
Dosis de N (N) (kg N ha⁻¹)			
0N	0,58 c	66,1 b	36,3 c
90N	0,53 b	63,3 b	32,3 b
270N	0,40 a	47,2 a	19,1 a
P-valor	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Híbrido (H)			
DK70-10VT3P	0,51	54,8 a	27,8 a
DK73-10VT3P	0,50	63,0 b	30,7 b
P-valor	ns	0,0001	0,0002
Fecha de siembra (FS)			
Temprana	0,51	65,6 b	32,3 b
Tardía	0,50	52,1 a	26,2 a
P-valor	ns	<0,0001	<0,0001
Interacciones		P-valor	
Exp*FS	0,0007	<0,0001	ns
Exp*N	<0,0001	0,0004	<0,0001
FS*N	0,0002	0,0001	ns
Exp*FS*N	ns	0,0293	ns
FS*H*N	0,0003	0,0359	ns
Exp*FS*H*N	0,0096	ns	ns

^a Valores seguidos de letras diferentes indican diferencias significativas (LSD, $P < 0,05$) dentro de cada fuente de variación.

^b Para una mayor claridad, en el cuadro solo se muestran las interacciones de los factores que fueron significativas ($P < 0,05$) en al menos una de las variables analizadas.

Analizando el ACP, los dos primeros ejes (CP1 y CP2) explicaron el 69% de la varianza total (Fig. 2.7 y Cuadro 2.4). Los auto-vectores e1 y e2 muestran los coeficientes con los que se ponderó cada variable original para conformar el CP1 y CP2, respectivamente. Para el CP1, Tm_R , $Ac ET0_{PC}$ y $Ac Rg_{PC}$ recibieron los mayores pesos

negativos, que se asociaron con los cultivos de siembra temprana. Por otro lado, Tm_V , $Ac\ PP_{PC}$ y $BH_{PC}Ap$ tuvieron los mayores pesos positivos sobre $CP1$, los cuales fueron asociados con los maíces tardíos (Cuadro 2.4). Por lo tanto, $CP1$ separó ambas fechas de siembra, las siembras tardías con valores positivos del $CP1$ y las siembras tempranas con valores negativos de $CP1$. Además, las diferencias entre fechas de siembra fueron más contrastantes en el Exp2 que en el Exp1. Por otro lado, los Exps fueron discriminados por el $CP2$. Los valores más altos de N_{min} , $Ac\ ET0_V$, $BH_R Ap$ y PP_R se asociaron con el Exp2, y los valores más altos de $E_{abs}N$, $Ac\ ET0_R$ y $Ac\ Rg_R$ fueron asociados al Exp1.

Además, la Fig. 2.7 muestra una mayor asociación entre la $E_{abs}N$ y EUN_g que entre $E_{ut}N_g$ y EUN_g . La EUN_g se asoció fuertemente con $Ac\ ET0_R$ y $Ac\ Rg_R$. Por otro lado, N_{min} se correlacionó negativamente con EUN_g , y N_{abs} positivamente con $BH_V Ap$ y $Ac\ PP_V$.

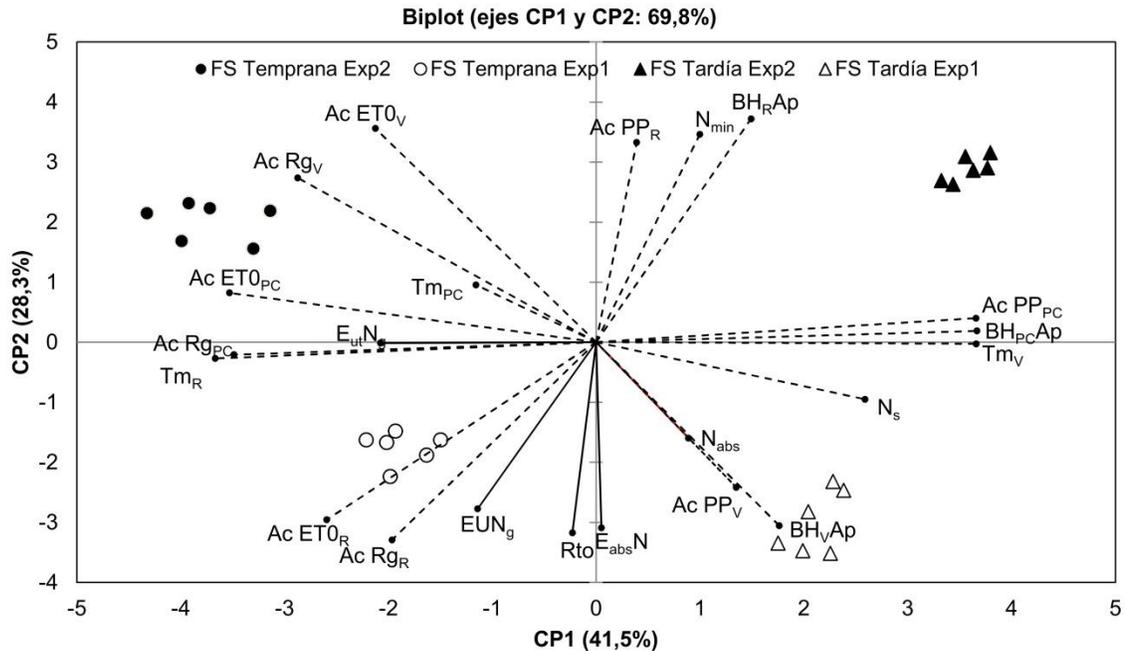


Fig. 2.7. Análisis de componentes principales (ACP). Las combinaciones de dos experimentos, Exp1 (símbolos abiertos) y Exp2 (símbolos cerrados) y dos fechas de siembra, fechas tempranas de siembra (círculos) y fechas tardías de siembra (triángulos) se representan de acuerdo con las variables de clima, suelo y cultivo (vectores). Los vectores de líneas de puntos corresponden al clima [lluvia acumulada ($Ac\ PP$), $ET0$ ($Ac\ ET0$), radiación global ($Ac\ Rg$), temperatura media (Tm) y balance de agua aparente ($BH\ Ap$) en períodos vegetativo (V), crítico alrededor de floración ($R1\pm 15$ días) (PC) y reproductivo (R)] y variables N del suelo [disponibilidad de N en la siembra (N_s) y mineralización de N durante el ciclo de cultivo (N_{min})]. Los vectores de línea continua corresponden a las variables de cultivo [eficiencia de uso del N (EUN_g), eficiencia de utilización del N ($E_{ut}N_g$), eficiencia de absorción del N ($E_{abs}N$), absorción de N durante el ciclo de cultivo (N_{abs}) y el Rto (Rto)].

Cuadro 2.4. Los valores de los auto-vectores e1 y e2 resultantes del ACP para las variables de clima, N del suelo y cultivo en dos experimentos (2014-15 y 2015-16; Exp1 y Exp2, respectivamente) conducidos en Paraná (Lat. 31,8°S), Argentina. En cada combinación de fechas de siembra x Exp, se evaluaron dos híbridos con tres dosis de N.

Variables	e1	e2
Tm _R (°C)	-0,33	-4E ⁻⁰³
Ac ET0 _{PC} (mm)	-0,32	0,07
Ac Rg _{PC} (MJ m ⁻² d ⁻¹)	-0,31	-0,03
Ac Rg _V (MJ m ⁻² d ⁻¹)	-0,26	0,24
Ac ET0 _R (mm)	-0,23	-0,27
E _{ut} N _g (kg grano kg N _{abs} ⁻¹)	-0,20	0,01
Ac ET0 _{PC} (mm)	-0,19	0,30
Ac Rg _R (MJ m ⁻² d ⁻¹)	-0,18	-0,30
EUN _g (kg grano kg N _d ⁻¹)	-0,10	-0,24
Tm _{PC} (°C)	-0,07	0,21
Rto (kg ha ⁻¹)	-0,02	-0,29
E _{abs} N (kg N kg N _d ⁻¹)	7E ⁻⁰⁴	-0,28
Ac PP _R (mm)	0,03	0,27
N _{abs} (kg N ha ⁻¹)	0,08	-0,15
N _{min} (kg N ha ⁻¹)	0,10	0,34
Ac PP _V (mm)	0,13	-0,18
BH _R Ap (mm)	0,13	0,31
BH _V Ap (mm)	0,16	-0,25
N _s (kg N ha ⁻¹)	0,24	-0,11
Tm _V (°C)	0,33	0,01
BH _{PC} Ap (mm)	0,33	0,02
Ac PP _{PC} (mm)	0,33	0,04

2.3.5. Relaciones entre la EUN_g y sus componentes

Para el set de datos completo (a través de Exps, FS, dosis de N e H), las variaciones en la EUN_g estuvieron principalmente asociadas a las variaciones en la E_{abs}N (P<0,0001; R²=0,72) (Fig. 2.8a). Por otro lado, las variaciones de E_{ut}N_g representaron el 65% de las

variaciones totales de la EUN_g ($P < 0,01$) (Fig. 2.8b). Sin embargo, las funciones no tuvieron una distribución homogénea de los residuos, debido al balance hídrico negativo registrado alrededor de la floración en el Exp2 (enero; Fig. 2.1b) que afectó fuertemente la determinación del número de granos y el $N_{abs}post$ en maíces tempranos (Cuadro 2.2). Estas tendencias fueron similares entre fechas de siembra. Además, estas relaciones fueron consistentes con el ordenamiento de las variables mediante el ACP (Fig. 2.7), donde los vectores de la EUN_g y la $E_{abs}N$ formaron un ángulo más agudo que los de EUN_g y $E_{ut}N_g$.

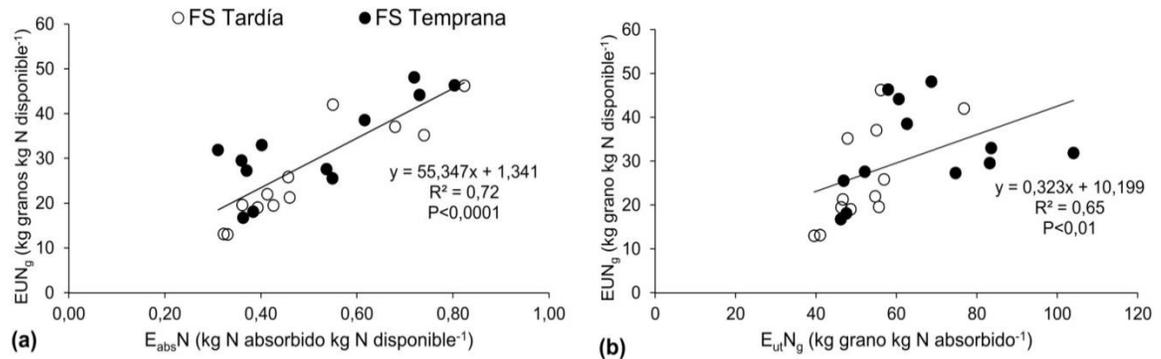


Fig. 2.8. Eficiencia de uso del N (EUN_g) en función de la eficiencia de absorción de nitrógeno ($E_{abs}N$) (a) y la eficiencia de utilización de nitrógeno ($E_{ut}N_g$) (b) de maíces tempranos (símbolos cerrados) y tardíos (símbolos abiertos), en dos experimentos (2014-15 y 2015-16; Exp1 y Exp2, respectivamente) llevados a cabo en Paraná (Lat. 31,8°S), Argentina.

En ambas fechas de siembra, la $E_{abs}N$ de los tratamientos sin N (0N) se asoció positivamente con $N_{abs}pre$ y $N_{abs}post$ (Figs. 2.9a-b). El valor para el coeficiente de determinación, sin embargo, fue mayor para la relación $E_{abs}N$ vs. $N_{abs}post$. Los valores de pendiente de las funciones lineales que se ajustaron para las mismas variables con los datos de los tratamientos altamente fertilizados (270N), resultaron más bajos que los del conjunto de datos correspondientes a 0N, y la función ajustada entre $E_{abs}N$ y $N_{abs}post$ de maíces tardíos no fue significativa ($P > 0,05$) (Fig. 2.9b).

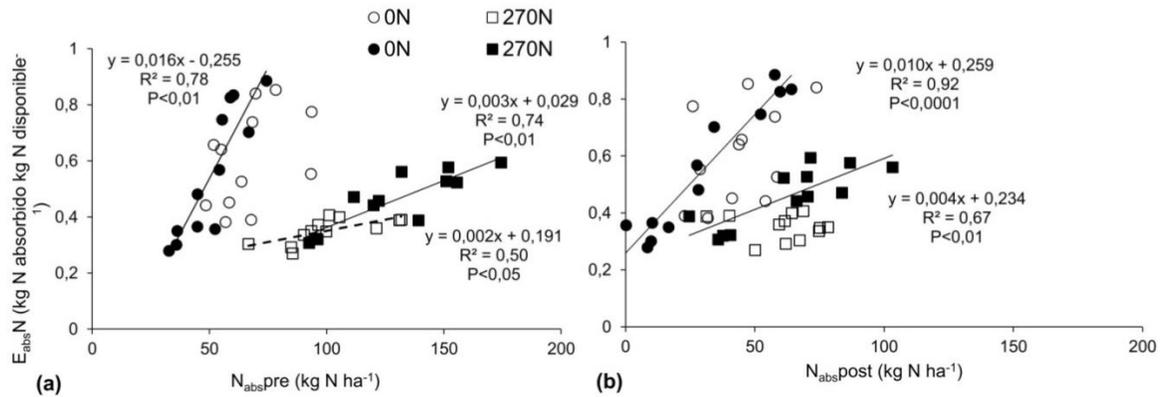


Fig. 2.9. Eficiencia de absorción de nitrógeno (E_{abcN}) en función de la absorción de nitrógeno durante el periodo pre-floración (N_{abcPre}) (a) y el período post-floración ($N_{abcPost}$) (b) para dos dosis de N, 0N (círculo) y 270N (cuadrados) en maíces tempranos (símbolos cerrados) y tardíos (símbolos abiertos), en dos experimentos (2014-15 y 2015-16; Exp1 y Exp2, respectivamente) que se llevaron a cabo en Paraná (Lat. 31,8°S), Argentina. Las líneas continuas y de puntos representan las funciones lineales que se ajustan al set de datos de los maíces tempranos ($n=12$) y tardíos ($n=12$); respectivamente. El set de datos correspondiente a 90N no se incluyó en la figura para describir mejor las diferencias entre dosis de N contrastantes.

Para todo el set de datos, las variaciones en la E_{utN_g} se relacionaron positivamente con los cambios en el ICN ($R^2=0,88$, $P<0,0001$) (Fig. 2.10a), los que fueron afectados por cambios en las dosis de N, híbridos y fechas de siembra (Cuadro 2.2). La E_{utN_g} también se relacionó negativamente con la concentración de N en grano ($R^2=0,52$, $P<0,0001$) (Fig. 2.10b). Estas tendencias fueron similares para ambas fechas de siembra.

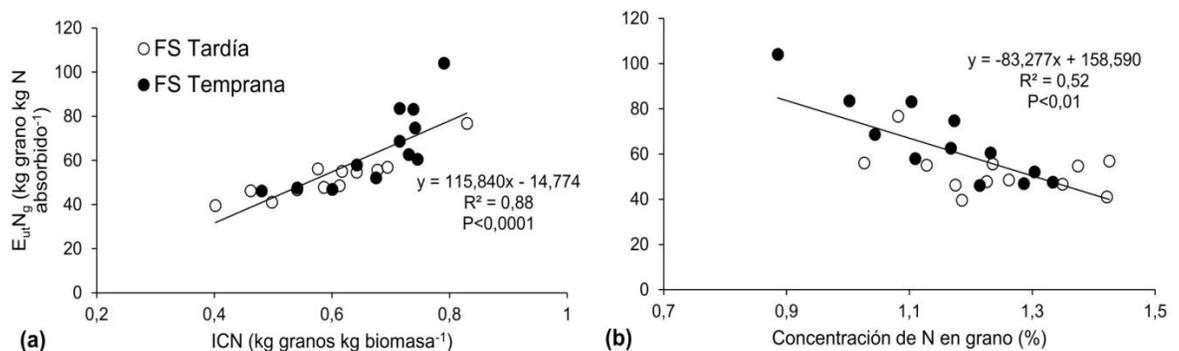


Fig. 2.10. Eficiencia de utilización del nitrógeno (E_{utN_g}) en función del índice de cosecha de nitrógeno (ICN) (a) y la concentración de N en grano (b) de cultivos de maíz tempranos (símbolos cerrados) y tardíos (símbolos abiertos) en dos experimentos (2014-15 y 2015-16, Exp1 y Exp2) realizados en Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina. Las líneas continuas representan la función lineal ajustada a todo el set de datos ($n=24$).

2.3.6. Fuentes de N y biomasa post-floración por grano

En ambos Exps, los cultivos de siembra tardía tuvieron una mayor fuente de B post-floración por grano que los cultivos tempranos; especialmente en el Exp2 (171 vs. 314 mg biomasa post-floración por grano para maíces tempranos y tardíos, respectivamente) y en el híbrido DK 73-10 VT3P (interacción Exp x FS x H, $P < 0,05$; Fig. 2.11a-b y Cuadro 2.5).

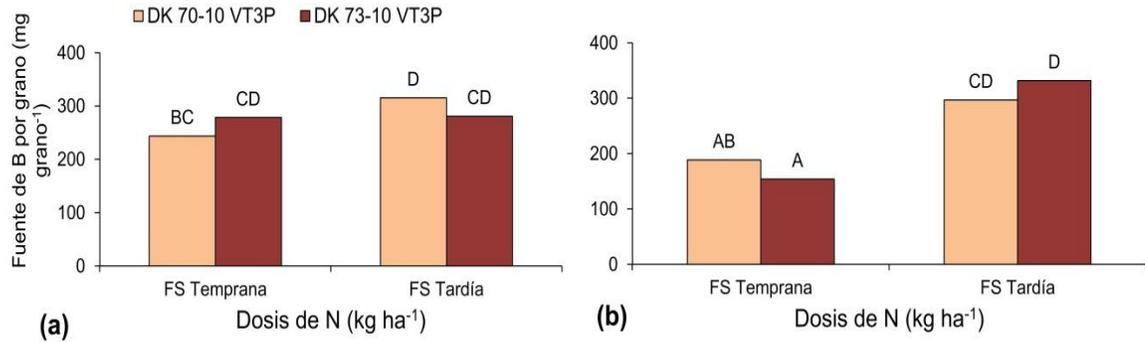


Fig. 2.11. Interacción de Exp x FS x H sobre la fuente de biomasa (B) post-floración por grano. Las fechas de siembra se presentan divididas (a. Exp1; b. Exp2). Los experimentos (2014-15 y 2015-16, Exp1 y Exp2, respectivamente) se llevaron a cabo en Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina. En cada combinación de FS x Exp, se cultivaron dos híbridos con tres dosis de N.

La fuente de N post-floración por grano aumentó con la dosis de N ($P < 0,001$), mientras que no se encontraron diferencias para ésta variable entre híbridos ($P > 0,05$; Cuadro 2.5). Se detectó una interacción significativa de Exp x FS ($P < 0,0001$) sobre la fuente de N post-floración por grano. En el Exp1, no se observaron diferencias significativas entre fechas de siembra. Por el contrario, en el Exp2, la fuente de N post-floración por grano fue mayor en maíces tardíos que en los tempranos (Fig. 2.12 y Cuadro 2.5).

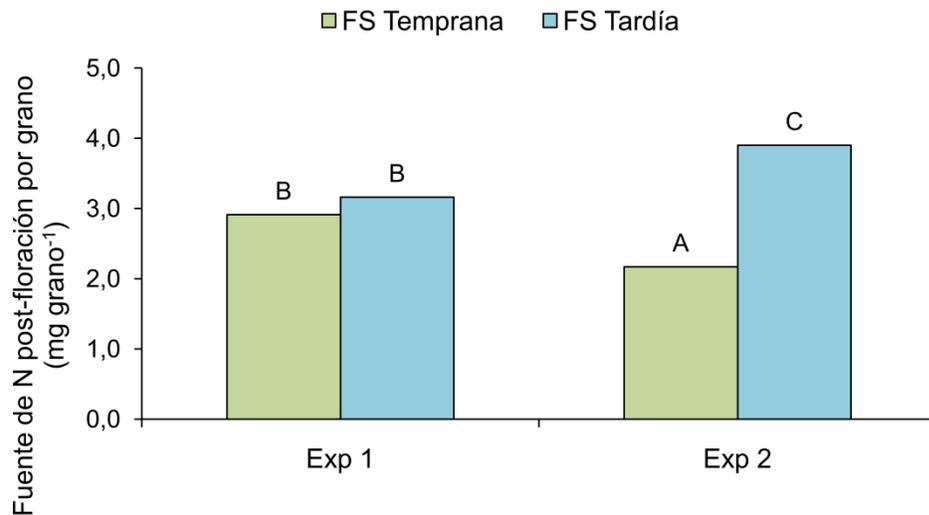


Fig. 2.12. Interacción de Exp x FS sobre la fuente de N post-floración por grano. Los experimentos (2014-15 y 2015-16, Exp1 y Exp2, respectivamente) se llevaron a cabo en Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina. En cada combinación de FS x Exp, se cultivaron dos híbridos con tres dosis de N.

Cuadro 2.5. Análisis de varianza y valores medios para las fuentes de biomasa (B) y N por unidad de grano en dos experimentos (2014-15 y 2015-16, Exp1 y Exp2, respectivamente) realizados en Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina. En cada combinación de fechas de siembra x Exp, se evaluaron dos híbridos con tres dosis de N.

	Fuente de B por grano (mg B grano ⁻¹)	Fuente de N por grano (mg N grano ⁻¹)
Experimento (Exp)		
Exp1	280 b	3,1
Exp2	243 a	3,0
P-valor	0,0221	ns
Dosis de N (N) (kg N ha ⁻¹)		
0N	255	2,7 a
90N	253	3,0 a
270N	276	3,4 b
P-valor	ns	0,0004
Hibrido (H)		
DK70-10VT3P	268	3,1
DK73-10VT3P	255	2,9
P-valor	ns	ns
Fecha de siembra (FS)		
Temprana	216 a	2,5 a
Tardía	306 b	3,5 b
P-valor	<0,0001	<0,0001
Interacciones		<u>P-valor</u>
Exp*FS	0,0014	<0,0001
Exp*FS*H	0,0296	ns

^a Valores seguidos de letras diferentes indican diferencias significativas (LSD, $P < 0,05$) dentro de cada fuente de variación.

^b Para una mayor claridad, en el cuadro solo se muestran las interacciones de los factores que fueron significativas ($P < 0,05$) en al menos una de las variables analizadas.

Las fuentes N y B post-floración por grano se asociaron positivamente entre sí, y una única función lineal describió significativamente esta relación para todas las condiciones de

cultivo (pendiente de 72 mg B post-floración grano⁻¹ por unidad de N grano⁻¹) (Fig. 2.13a). Una asociación similar se encontró entre la concentración de N en grano y la fuente de N post-floración por grano (Fig. 2.13b) con un valor de pendiente de *ca.* 0,11%, lo que indica la magnitud de la variación de la concentración de N de grano por cada mg de incremento en la fuente de N post-floración por grano.

Cabe destacar que las variaciones de $E_{ut}N_g$ (ante cambios en fechas de siembra, dosis de N e híbridos) se asociaron negativamente con la fuente de N post-floración por grano a través de una única función exponencial (Fig. 2.13c).

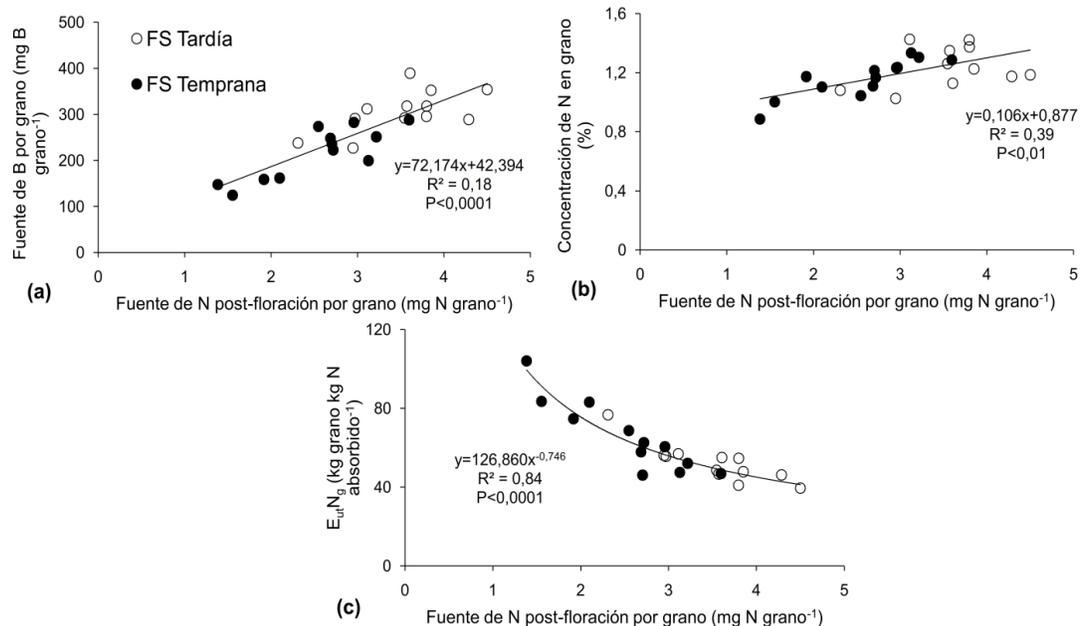


Fig. 2.13. Fuente de biomasa (B) post-floración por grano (a) concentración de N en grano y (b) eficiencia de utilización de nitrógeno ($E_{ut}N_g$) (c) en función de la fuente de N post-floración por grano de maíces tempranos (símbolos cerrados) y tardíos (símbolos abiertos), en dos experimentos (2014-15 y 2015-16; Exp1 y Exp2, respectivamente) realizados en Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina. Las líneas negras continuas representan la función ajustada al set de datos completo (n=24).

2.4. Discusión

Las fechas de siembra tardía de maíz bajo condiciones de secano, han sido ampliamente adoptadas en la región pampeana de Argentina (más del 45% del área cultivada de maíz), por estabilizar los Rtos debido a un balance hídrico más favorable alrededor de la floración (Maddoni, 2012). Sin embargo, los maíces tardíos están expuestos a niveles más elevados de N_d en el suelo, altas temperaturas durante el período pre-floración y condiciones foto-térmicas declinantes durante el periodo de llenado de granos comparado con maíces sembrados en fechas tradicionales, lo cual puede afectar la $E_{un}N_g$ (kg de grano por kg de N_d).

En este capítulo, los maíces tardíos presentaron una mayor disminución en la $E_{abs}N$ asociada a la dosis de N que los cultivos de siembra temprana (interacción FS x N;

$P < 0,0002$; Cuadro 2.3). Esta reducción podría relacionarse con el mayor N_d (Cuadro 2.2) promovido por el aumento en N_{min} (Cuadro 2.1 y Fig. 2.7), como lo sugirieron previamente Caviglia et al. (2014). La alta correlación entre EUN_g y $E_{abs}N$ podría estar relacionada con el hecho de que las dosis de N afectaron más a N_d que a los Rtos, independientemente de la fecha de siembra y el híbrido (Figs. 2.7 y 2.8). Estudios previos conducidos por Moll et al. (1982) sugirieron que, a bajos niveles de N_d , la principal fuente de variación de la EUN_g fue $E_{ut}N_g$, mientras que la $E_{abs}N$ cobra mayor relevancia sobre las variaciones en EUN_g cuando los niveles de N_d fueron altos, como frecuentemente sucede bajo fechas de siembra retrasadas. Por lo tanto, en los sistemas actuales de producción de maíz tardío con alto N_d (promovido por altas dosis de N y N_{min}), la EUN_g debería incrementarse mediante aumentos en la eficiencia de captura del N, *i.e.* $E_{abs}N$ (Cassman et al., 2002). Aunque nuestros resultados no mostraron reducciones en la $E_{abs}N$ por el retraso en la fecha de siembra (Cuadro 2.3), la interacción de dosis de N x Exp x H x FS indicó que los maíces tardíos tuvieron mayores disminuciones en $E_{abs}N$ asociados al incremento de la dosis de N que los maíces tempranos (con mayores variaciones en el Exp1 que en el Exp2), lo cual podría implicar una restricción para el manejo de la fertilización nitrogenada en cultivos de siembra tardía. Estos resultados sugieren que la EUN_g de los cultivos fertilizados con N en siembras tardías, podría mejorarse mediante prácticas agronómicas que promuevan una mayor $E_{abs}N$ (Ciampitti y Vyn, 2013), como el incremento en la densidad de plantas (De-Yang et al., 2016). Además, los resultados de este capítulo indican que, independientemente de la fecha de siembra y la dosis de N, N_{abspre} tuvo un fuerte y positivo impacto sobre $E_{abs}N$ (Fig. 2.9a). Por lo tanto, las prácticas agronómicas orientadas a mejorar el N_{abspre} podrían ser una estrategia útil para mejorar la EUN_g , principalmente en ambientes con alto N_d como los cultivos de siembra tardía.

De manera inesperada, el efecto negativo de la dosis de N sobre la EUN_g fue mayor en los maíces tempranos que en los tardíos, especialmente en el híbrido DK 73-10 VT3P, caracterizado previamente por su mayor $E_{abs}N$ (Robles et al., 2015). Si bien este patrón genotípico no se verificó en nuestros resultados, DK 73-10 VT3P mostró una mayor $E_{ut}N_g$, lo cual se reflejó en una EUN_g más alta independientemente de la fecha de siembra (Cuadro 2.3). Estudios recientes han documentado que las variaciones en la EUN_g entre híbridos de maíz antiguos y modernos está más relacionada a diferencias genotípicas en la $E_{ut}N_g$ que en la $E_{abs}N$ (ver revisión de Ciampitti y Vyn, 2012, Ferreyra et al., 2013). Por lo tanto, la elección de un genotipo con alta $E_{ut}N_g$ parece ser otra estrategia válida para mitigar las reducciones en la EUN_g promovidas por el alto N_d típico de los cultivos de siembra tardía.

Las variaciones genotípicas en $E_{ut}N_g$ se han asociado a menudo con cambios en la partición de N, es decir, IC e ICN. Por ejemplo, Chen et al. (2015) informaron que las mejoras en la $E_{ut}N_g$ de los híbridos modernos se asociaron con aumentos en el ICN, que a su vez estuvo asociado con un mayor N_{rem} en etapas avanzadas del período de llenado de granos (R3 en adelante). En consecuencia, la mayor $E_{ut}N_g$ de DK 73-10 VT3P se asoció a su mayor ICN (Cuadro 2.2). Sin embargo, ambos híbridos exhibieron un N_{rem} similar durante todo el período post-floración (Cuadro 2.2). Se deberían explorar otros métodos que permitan estimar más eficientemente el N_{rem} , ya que el utilizado en este estudio no considera la removilización de N previo a R1, la cual podría ser relevante en tratamientos con alta densidad de plantas y bajas dosis de N aplicado como fertilizante. Por otra parte, se deberían realizar estudios con una base genética más amplia para validar i) la aparente falta de asociación entre el ICN y N_{rem} en maíces tardíos, ii) las bases fisiológicas de las interacciones genotipo x ambiente sobre $E_{ut}N_g$ y iii) la dinámica del N absorbido y

removilizado durante el período post-floración y su contribución relativa sobre la EUN_g en cultivos de siembra tardía.

Finalmente, tanto el destino (número de granos) como la fuente de N post-floración ($N_{abspost} + N_{remAP}$) se vieron afectados de manera diferencial por los factores fijos, es decir, Exps, híbridos, fechas de siembra y dosis de N (Cuadros 2.2 y 2.5 y Figs. 2.11 y 2.12). La fuente de N post-floración por grano se relacionó positivamente con la fuente de B post-floración por grano (Fig. 2.13a), lo que sugiere que el cultivo tiende a mantener una relación carbono/nitrógeno estable frente a cambios en el ambiente de crecimiento (i.e. combinaciones de Exps, fechas de siembra, dosis de N e híbridos). La fuente de B post-floración por grano, varió de 125 a 389 mg de grano⁻¹, y fue similar a la obtenida a partir de Exps de fertilización de maíces tempranos (125-400 mg de grano⁻¹) por Uhart y Andrade (1995), aunque los resultados no son estrictamente comparables, ya que estos autores analizaron un período más corto (R3-R5) y una expresión de cálculo diferente para la fuente de estimación de B post-floración por grano. Por otro lado, la fuente de N post-floración por grano se asoció positivamente con la concentración de N en grano (Fig. 2.13b), con una pendiente de *ca.* 0,11%, lo cual indica la magnitud de la variación de la concentración de N de grano por cada mg de N post-floración por grano. Estos resultados concuerdan parcialmente con los obtenidos por Abdala et al. (2018) los cuales utilizaron un set de datos que cubren un área amplia de la región Pampeana, e informaron valores similares en la concentración de N en grano entre fechas de siembra. Los resultados aquí obtenidos mostraron ligeras diferencias entre las fechas de siembra en la concentración de N en grano, donde los maíces tardíos tuvieron una mayor concentración de N en grano que los tempranos (*ca.* 1,15 y 1,24 % de N en grano para los maíces tempranos y tardíos, respectivamente; Cuadro 2.2) dado por la más alta fuente de N post-floración por grano. Algunos estudios (Ciampitti y Vyn, 2012; Chen et al., 2015) han informado disminuciones en la concentración de grano N asociadas con la $E_{ut}N_g$ más alta de los genotipos modernos. Sin embargo, ambos genotipos evaluados en este estudio no difirieron en su concentración de N en grano ni en la fuente de N post-floración por grano (Cuadros 2.2 y 2.5). Los resultados de este capítulo también demostraron esta relación negativa entre la concentración de N de grano y la $E_{ut}N_g$ (Fig. 2.10b). Aunque las relaciones exploradas en relación a la EUN_g y sus componentes no cambiaron mayormente por efecto de la fecha de siembra (Figs. 2.8, 2.9, 2.10 y 2.13), por ejemplo, en cultivos de siembra tardía, la mayor fuente de N post-floración por grano (Cuadro 2.5) incrementó la concentración de N en grano (Fig. 2.13b), lo cual explicó la disminución en la $E_{ut}N_g$ (Fig. 2.10b).

2.5. Conclusiones

En este capítulo se estudió la economía del N de los maíces tempranos y tardíos en una región húmeda-templada del centro de Argentina utilizando un marco integral para determinar el efecto de la fecha de siembra sobre la EUN_g y sus componentes ($E_{abs}N$ y $E_{ut}N_g$ y sus determinantes N_d , N_{abs} y R_{to}). Las diferencias en la EUN_g entre Exps, fechas de siembra, híbridos y dosis de N estuvieron principalmente relacionadas con la $E_{abs}N$, la cual varió en un rango más amplio que la $E_{ut}N_g$. Tanto la dosis de N como la fecha de siembra afectaron de manera similar a N_{abspre} , que se asoció positivamente con la $E_{abs}N$. El retraso en la fecha de siembra afectó negativamente la EUN_g , principalmente debido a

disminuciones en la $E_{ut}N_g$, dado por menores R_{to} , mayor N_d y niveles superiores de fuente de N post-floración por grano.

2.6. Relación de los resultados con las hipótesis planteadas

La EUN_g fue *ca.* 18% menor en maíces de siembra tardía comparado con fechas de siembra tempranas, dado principalmente por reducciones en el R_{to} (-9%) e incrementos en el N_d (+14%). Estos resultados conducen a no rechazar la hipótesis i (*La EUN_g de los maíces tardíos resulta menor a la de los tempranos debido al menor R_{to} alcanzado y al incremento en los niveles de N_d dado por el atraso en la fecha de siembra*), ya que las reducciones en el ambiente foto-térmico exploradas durante el periodo reproductivo de los maíces tardíos sumado a incrementos en el N_s y N_{min} durante el ciclo de cultivo determinaron reducciones en R_{to} e incrementos en los niveles de N_d .

Contrariamente a lo que se esperaba, el $N_{abspost}$ fue mayor (en promedio, 19%) en siembras tardías que en tempranas. Estos resultados se explican en parte por el balance hídrico negativo registrado en fechas de siembra tempranas durante el periodo reproductivo en el Exp2, lo cual afectó negativamente el crecimiento y absorción de N post-floración. Sin embargo, estudios recientes llevados a cabo por Mueller and Vyn (2018) sugieren que el $N_{abspost}$ en maíz depende mayormente del N_d que de la demanda de N dada por el crecimiento durante el periodo reproductivo, lo cual es una condición que ocurre frecuentemente en maíces de siembra tardía. Sería necesario conducir experimentos en fechas contrastantes sin limitación hídrica para poder esclarecer esta aparente controversia.

2.7. Relación con los siguientes capítulos

En el presente capítulo se evaluó el efecto del retraso de la fecha de siembra en maíz sobre la economía del N en maíces de siembras tempranas y tardías. La EUN_g fue menor ante atrasos en la fecha de siembra. Sin embargo, el N_{abspre} contribuyó mayormente al N_{abs} total y a la $E_{abs}N$, lo cual sugiere que este componente podría ser mejorado mediante incrementos en la densidad de plantas, contribuyendo a mejorar la menor EUN_g reportada en maíces de siembra tardía. El siguiente Capítulo propone evaluar combinaciones adecuadas de prácticas de manejo agronómicas (densidad de plantas, dosis de fertilización con N y genotipos) que promuevan mejoras de la EUN_g , particularmente en maíces con fecha de siembra retrasada.

Capítulo 3: Optimización de la densidad de plantas, dosis de nitrógeno y la elección del genotipo en maíces tardíos, para alcanzar una alta eficiencia de uso del nitrógeno

3.1. Introducción

Los menores Rtos de maíz obtenidos en fechas tardías combinados con alto N_d determinan una menor EUN_g que la de maíces de siembra temprana (Capítulo 1, Maltese et al., 2019). Algunas prácticas agronómicas, como la elección de la densidad de plantas, la fertilización con N o el genotipo, podrían contribuir a mantener un alto nivel de EUN_g cuando la fecha de siembra de maíz se retrasa considerablemente (*e.g.* desde principios de primavera hasta principios del verano). Por ejemplo, Gambin et al. (2016) informaron respuestas positivas de Rto de grano (*i.e.* el numerador de EUN_g) de maíces tardíos con incrementos en la densidad de plantas (rango de 5,4 a 7,6 pl m⁻²). En el capítulo previo (ver también Maltese et al., 2019) se informó que altas dosis de N (*i.e.* alto N_d , el denominador de EUN_g) en maíces tardíos sembrados con una densidad de 7 pl m⁻², redujeron la EUN_g , al disminuir principalmente la $E_{ut}N_g$. Esta penalización sobre la EUN_g se atenuó en uno de los híbridos evaluados a través de un mayor IC. Sin embargo, densidades de plantas supra óptimas podrían afectar negativamente la EUN_g , particularmente en híbridos con baja estabilidad en el IC (Echarte y Andrade, 2003).

De manera similar, los estudios realizados por Ciampitti et al. (2013) informaron efectos positivos de la densidad de plantas sobre N_{abs} durante el ciclo de cultivo, pero estos estudios se realizaron bajo fechas de siembra óptimas sin limitaciones de fuente fotosintética durante el llenado de granos. Por lo tanto, el estudio del N_{abs} total en maíces tardíos bajo densidades de plantas contrastantes podría contribuir a mejorar el conocimiento previo sobre EUN_g . El N_{abs} total se puede dividir en N_{abspre} y $N_{abspost}$ para una mejor comprensión de sus factores determinantes. En los maíces tempranos, más del 60% del N_{abs} total se acumula durante el período pre-floración (Lemaire et al., 2008; Ciampitti et al., 2013; Haegele et al., 2013) y las altas densidades de plantas podrían aumentar esta proporción a través de una mayor producción de biomasa (Ciampitti et al. 2013). Además, estudios previos han enfatizado la importancia del $N_{abspost}$ sobre el N_{abs} total en genotipos modernos de maíz en fechas de siembra tempranas (Ciampitti y Vyn, 2011; Chen et al., 2015; Mueller y Vyn, 2016), aunque estos hallazgos podrían no ser válidos para fechas de siembra tardías. Bajo estas condiciones, N_{abspre} resultaría una fuente potencial de N relevante a removilizarse a los granos durante el período post-floración (DeBruin et al., 2017; Maltese et al., 2019; Nasielski et al., 2019), sosteniendo una alta EUN_g . Hasta el momento, no se conocen estudios que comparen el efecto de la densidad de plantas sobre el N_{abs} total, N_{abspre} y $N_{abspost}$ de maíces de siembra temprana y tardía. Los maíces de siembra tardía podrían ser más eficientes en la absorción del N_d ($>E_{abs}N$) y en producir biomasa y granos por unidad de N_{abs} total ($>E_{ut}N_b$ y $>E_{ut}N_g$) cuando son cultivados con densidades más altas (>7 pl m⁻²), especialmente en híbridos con alto IC.

Los objetivos de este capítulo fueron estudiar en maíces de siembra temprana y tardía:

- i. El efecto de la interacción fecha de siembra X densidad de plantas X genotipo sobre la EUN_g y sus componentes, *i.e.* $E_{abs}N$, $E_{ut}N_b$ e IC.
- ii. Las combinaciones apropiadas de densidad de plantas, dosis de N y genotipo que optimicen conjuntamente el Rto y la EUN_g .

3.2. Materiales y Métodos

3.2.1. Experimentos y manejo del cultivo

La ubicación y conducción de los Exps se realizaron acorde a lo mencionado anteriormente en el Capítulo 2 – sección 2.2.1. del presente manuscrito. Las diferencias en los tratamientos evaluados se detallan a continuación.

Los tratamientos incluyeron una combinación de i) dos híbridos de maíz caracterizados *a priori* como contrastantes en su IC (Mayor=DK 73-10 VT3P y Menor=DK 70-10 VT3P; Maltese et al., 2019), ii) dos fechas de siembra: mediados de septiembre (siembra temprana) y mediados de diciembre (siembra tardía), iii) tres dosis de N: 0, 90 y 270 kg N ha⁻¹ (0N, 90N y 270N, respectivamente) aplicadas como urea (46% N) en cobertura en V4 (Ritchie et al., 1997) y iv) tres densidades de plantas: 5, 7 y 9 pl m⁻². Los tratamientos se distribuyeron en un diseño de parcelas divididas con tres repeticiones (bloques). La fecha de siembra fue aleatorizada en las parcelas principales y la combinación de híbridos x dosis de N x densidades de plantas en las sub-parcelas (en adelante, parcelas).

3.2.2. Mediciones sobre el cultivo y muestreo de suelo

Estas mediciones se realizaron acorde a lo mencionado anteriormente en el Capítulo 2 – sección 2.2.2. del presente manuscrito.

3.2.3. Cálculos

Los cálculos se realizaron acorde a lo mencionado anteriormente en el Capítulo 2 – sección 2.2.3. del presente manuscrito. Las diferencias en los cálculos realizados en este capítulo se detallan a continuación.

La $E_{ut}N_b$ se calculó utilizando la ecuación (3.1).

$$E_{ut}N_b = \frac{\text{Biomasa total a R6}}{N \text{ absorbido total}} \quad (3.1)$$

3.2.4. Análisis estadístico

El set de datos se sometió a un análisis de varianza (ANOVA) para evaluar el efecto de los factores (Exp, fecha de siembra, densidad de la plantas, híbrido y dosis de N) y sus interacciones en las variables evaluadas. La fecha de siembra (parcela principal) y la combinación factorial de híbridos x dosis de N x densidades de plantas (sub-parcelas) se consideraron factores fijos, mientras que los bloques se trataron como efectos aleatorios. Ambos años fueron analizados como factores fijos.

Se utilizó un análisis de componentes principales (ACP) para evaluar el efecto de la densidad de plantas sobre EUN_g , sus componentes ($E_{abs}N$, $E_{ut}N_b$ e IC) y variables asociadas (Biomasa, Rto, N_{abspre} , $N_{abspost}$, N_{abs}) en cada fecha de siembra. Solo los dos primeros ejes (eje CP1 y eje CP2) se presentan gráficamente. Para identificar las prácticas de manejo (densidad de plantas y dosis de N) para cada combinación de fecha de siembra, genotipos y Exp que optimizan la EUN_g y el Rto, se utilizaron proyecciones perpendiculares de prácticas de manejo a los vectores de interés, *i.e.* EUN_g y Rto. Se seleccionaron aquellas

combinaciones con puntuaciones más altas proyectadas sobre ambos vectores. Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software InfoStat (Di Rienzo et al., 2011).

3.3. Resultados

3.3.1. Fenología y condiciones climáticas

Las condiciones climáticas durante los experimentos se resumen en la Fig. 2.1 de la sección 2.3.1. correspondiente al Capítulo 2.

3.3.2. Producción total de biomasa y Rto de grano

La producción de biomasa total de los maíces tempranos fue similar a la de los tardíos en el Exp1 (en promedio, 16042 kg ha⁻¹), pero en contraste, los cultivos de siembra tardía, en el Exp2, alcanzaron mayor producción de biomasa comparado con los de siembra temprana (12877 vs. 9800 kg ha⁻¹, respectivamente) (interacción Exp x FS, P<0,0001; Cuadro 3.1). En general, la respuesta de la biomasa a la dosis de N fue menor en los maíces tardíos que en los tempranos (ca. 7 y 22 kg de biomasa ha⁻¹ por unidad de incremento en N aplicado, respectivamente), mostrando una respuesta similar y positiva entre híbridos en siembras tempranas, mientras que en siembras tardías solo DK 70-10 VT3P tuvo incrementos en la biomasa por aumentos en la dosis de N (interacción FS x N x H, P<0,05, Fig. 3.1A y Cuadro 3.1). La densidad de plantas afectó positivamente a la biomasa obteniendo una respuesta promedio de 830 kg ha⁻¹ de biomasa cuando la densidad de plantas fue incrementada de 5 a 7 y de 5 a 9 pl m⁻² (P<0,05; Cuadro 3.1). Ambos híbridos mostraron una respuesta positiva de la biomasa a la densidad de plantas, pero con un orden de magnitud diferente (DK 73-10 VT3P > DK 70-10 VT3P) (Fig. 3.1B). Ambos híbridos tuvieron una producción de biomasa similar en el Exp1 (ca. 16042 kg ha⁻¹), pero en el Exp2, DK 73-10 VT3P alcanzó mayor biomasa que DK 70-10 VT3P (11934 vs. 10743 kg ha⁻¹, respectivamente) (interacción Exp x H, P<0,05; Cuadro 3.1).

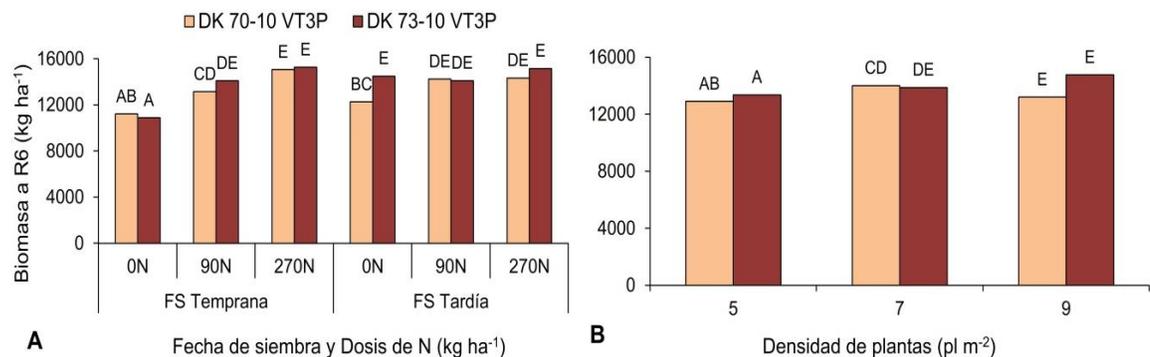


Fig. 3.1. Interacción de FS x N x H (A) y D x H (B) sobre la biomasa a madurez (R6). Los experimentos (2014-15 y 2015-16, Exp1 y Exp2, respectivamente) se llevaron a cabo en Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina. En cada combinación de FS x Exp, se cultivaron dos híbridos con tres

densidades de plantas y tres dosis de N.

El Rto y la respuesta del Rto a la dosis de N fueron menores en maíces tardíos que en los de siembra temprana y en el Exp2 (sin diferencias, en promedio, 6155 kg ha⁻¹) que en el Exp1 (10679 vs. 9483 kg ha⁻¹ para maíces tempranos y tardíos, respectivamente) (interacciones FS x N, Exp x N y Exp x FS, P<0,0001, P<0,001 y P<0,0001, respectivamente; Cuadro 3.1). Las diferencias entre híbridos (DK 73-10 VT3P > DK 70-10 VT3P) solo se detectaron en la siembra temprana de ambos Exps. Sin embargo, la respuesta de Rto a incrementos en la dosis de N fue similar en siembras tempranas y en siembras tardías DK 70-10 VT3P mostró una mayor respuesta (interacción FS x N x H, P<0,05; Fig. 3.2A y Cuadro 3.1). Aunque el Rto no fue afectado por la densidad de plantas (P>0,05; Cuadro 3.1), en la fecha de siembra tardía, DK 73-10 VT3P tuvo una mayor respuesta de Rto a la densidad de plantas que DK 70-10 VT3P (ca. 40 vs. 20 kg de grano ha⁻¹ por planta; respectivamente), mientras que en maíces tempranos la tendencia fue opuesta (interacción FS x D x H, P<0,01; Fig. 3.2B).

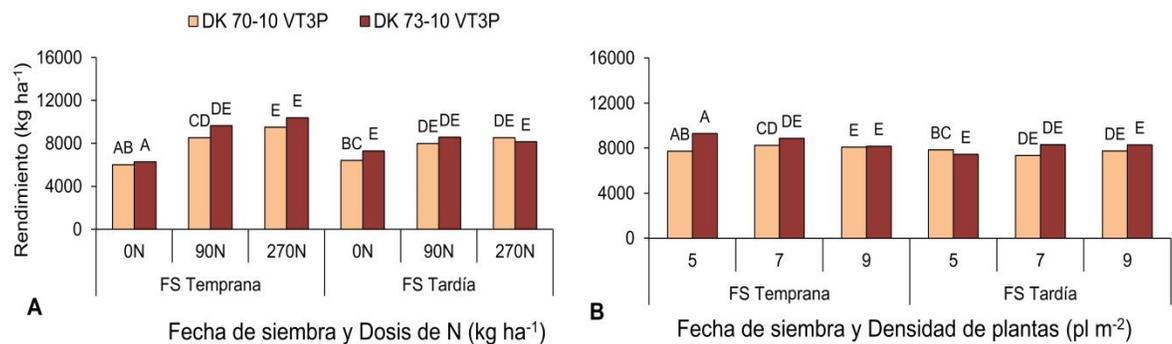


Fig. 3.2. Interacción de FS x N x H (A) y FS x D x H (B) sobre el rendimiento de grano. Los experimentos (2014-15 y 2015-16, Exp1 y Exp2, respectivamente) se llevaron a cabo en Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina. En cada combinación de FS x Exp, se cultivaron dos híbridos con tres densidades de plantas y tres dosis de N.

3.3.3. N disponible, N absorbido durante los periodos pre- y post-floración, y N absorbido total

Consistentemente, el N_d fue mayor en maíces tardíos que en los tempranos, con mayores diferencias en el Exp2 (348 vs. 270 kg N_{av} ha⁻¹, respectivamente) que en el Exp1 (277 vs. 265 kg N_{av} ha⁻¹, respectivamente) (interacción Exp x FS, P<0,0001; Cuadro 3.1).

N_{abspre} fue ca. 24% más alto (P<0,0001) en Exp1 (ca. 100 kg N_{abspre} ha⁻¹) que en el Exp2 (ca. 76 kg N_{abspre} ha⁻¹), mientras que en ambos Exps, el N_{abspre} aumentó en respuesta a la dosis de N (P<0,0001) (Cuadro 3.1). En particular, la respuesta de N_{abspre} a la dosis de N fue mayor en los maíces tempranos que en los tardíos (pendiente = 0,32 vs. 0,17 kg N_{abspre} ha⁻¹ por unidad de incremento en la dosis de N aplicada; para cultivos tempranos y

tardíos, respectivamente), con mayor diferencia entre fechas de siembra en el Exp1 (interacción N x FS x Exp; $P < 0,05$). Sólo el N_{abspre} de cultivos de siembra tardía varió con la densidad de plantas, especialmente en el Exp2 (ca. 7,04 kg $N_{\text{abspre}} \text{ ha}^{-1}$ por planta), mientras que el N_{abspre} de maíces tempranos solo fue incrementado por la densidad de plantas en el Exp1 (ca. 4,92 kg $N_{\text{abspre}} \text{ ha}^{-1}$ por planta) (interacción D x FS x Exp; $P < 0,05$). DK 73-10 VT3P tuvo una mayor respuesta de N_{abspre} a la densidad de plantas que DK 70-10 VT3P (ca. 2,5 vs. 2,1 kg de $N_{\text{abspre}} \text{ ha}^{-1}$ por planta, respectivamente). DK 73-10 VT3P tuvo la mayor respuesta de N_{abspre} a la dosis de N en el Exp2, pero la más baja en el Exp1 (interacción Exp x H x N, $P < 0,001$).

El N_{abspost} no varió entre fechas de siembra en el Exp1 (en promedio, 53 kg $N_{\text{abspost}} \text{ ha}^{-1}$), pero en el Exp2, el N_{abspost} de maíces tardíos fue mayor el de los tempranos (52 vs. 22 kg $N_{\text{abspost}} \text{ ha}^{-1}$, respectivamente) (interacción Exp x FS, $P < 0,0001$; Cuadro 3.1). DK 73-10 VT3P tuvo mayor N_{abspost} que DK 70-10 VT3P solo en la densidad de 5 pl m^{-2} en el Exp1 (64 vs. 49 kg $N_{\text{abspost}} \text{ ha}^{-1}$ para DK 73-10 VT3P y DK 70-10 VT3P, respectivamente), mientras que en el Exp2, estas diferencias se dieron sólo en la densidad de 9 pl m^{-2} (42 vs. 27 kg $N_{\text{abspost}} \text{ ha}^{-1}$ para DK 73-10 VT3P y DK 70-10 VT3P, respectivamente) (interacción Exp x D x H, $P < 0,01$). En el Exp1, la respuesta de N_{abspost} a la dosis de N fue mayor en los maíces tempranos que en los tardíos (20 vs. 5 kg $N_{\text{abspost}} \text{ ha}^{-1}$, respectivamente); mientras que lo contrario ocurrió en el Exp2 (17 vs. 23 kg $N_{\text{abspost}} \text{ ha}^{-1}$ para maíces tempranos y tardíos, respectivamente) (interacción Exp x FS x N, $P < 0,0001$). En maíces tempranos, la respuesta de N_{abspost} a la dosis de N fue mayor con baja e intermedia que con alta densidad de plantas (15 y 16 vs. 9 kg $N_{\text{abspost}} \text{ ha}^{-1}$, respectivamente), mientras que en siembras tardías sucedió lo contrario (6 y 8 vs. 17 kg $N_{\text{abspost}} \text{ ha}^{-1}$, respectivamente) (interacción FS x D x N, $P < 0,0001$). La contribución de N_{abspost} al N_{abs} total fue mayor en maíces tardíos que en tempranos (Cuadro 3.1).

El N_{abs} total fue mayor en los maíces tardíos que en los tempranos (Cuadro 3.1) sólo en el Exp2 (131 vs. 94 kg $N_{\text{abs}} \text{ ha}^{-1}$, respectivamente), mientras que en el Exp1, la tendencia fue opuesta (146 vs. 162 kg $N_{\text{abs}} \text{ ha}^{-1}$, respectivamente) (interacción Exp x FS, $P < 0,0001$), pero en ambos Exps, DK 73-10 VT3P exhibió el mayor N_{abs} (156 y 118 kg $N_{\text{abs}} \text{ ha}^{-1}$ para el Exp1 y Exp2, respectivamente). DK 70-10 VT3P alcanzó el máximo N_{abs} con 7 pl m^{-2} (137 kg $N_{\text{abs}} \text{ ha}^{-1}$), mientras que DK 73-10 VT3P maximizó su N_{abs} con 9 pl m^{-2} (142 kg $N_{\text{abs}} \text{ ha}^{-1}$) (interacción D x H, $P < 0,01$). El N_{abs} fue incrementado por la dosis de N, pero con una mayor respuesta en los maíces tempranos que en los tardíos (73 vs. 40 kg $N_{\text{abs}} \text{ ha}^{-1}$, respectivamente) (interacción FS x N, $P < 0,0001$). Cabe destacar que, en la fecha de siembra tardía, la respuesta de N_{abs} a la dosis de N aumentó con densidades más altas (33, 43 y 44 kg $N_{\text{abs}} \text{ ha}^{-1}$ para 5, 7 y 9 pl m^{-2} , respectivamente) (interacción FS x D x N, $P < 0,01$) especialmente en DK 70-10 VT3P (49 kg $N_{\text{abs}} \text{ ha}^{-1}$) (interacción FS x H x N, $P < 0,01$). La densidad de plantas no afectó el N_{abs} total, pero la contribución de N_{abspre} y N_{abspost} al N_{abs} total difirió entre densidades de plantas, el mayor N_{abspre} se logró con 9 pl m^{-2} (ca. 68% del N_{abs} total) y el N_{abspost} más alto con densidades de plantas bajas e intermedias (5 y 7 pl m^{-2}) (ca. 36% del N_{abs} total) (Cuadro 3.1).

Cuadro 3.1. Análisis de varianza y valores medios para biomasa, rendimiento, disponibilidad de N (N_d) absorción de N durante el período pre- y post-floración ($N_{abs,pre}$ y $N_{abs,post}$, respectivamente) y absorción de N total (N_{abs}) en dos experimentos (2014-15 y 2015-16; Exp1 y Exp2, respectivamente) que se llevaron a cabo en Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina. En cada combinación de fechas de siembra x Exp, se cultivaron dos híbridos con tres densidades de plantas y tres dosis de N.

	Biomasa	Rendimiento	N_d	$N_{abs,pre}$	$N_{abs,post}$	N_{abs}
	kg ha ⁻¹			kg N ha ⁻¹		
Exp (Exp)						
Exp 1	16042 b	10081 b	271,3 a	100,5 b	53,3 b	153,8 b
Exp 2	11338 a	6156 a	308,7 b	75,6 a	37,0 a	112,6 a
<i>P</i> -valor	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Dosis de N (kg N ha ⁻¹ ; N)						
0N	12218 a	6510 a	170,0 a	61,1 a	34,4 a	95,6 a
90N	13896 b	8697 b	260,0 b	87,1 b	42,8 b	129,9 b
270N	14956 c	9148 c	440,0 c	115,9 c	58,2 c	174,1 c
<i>P</i> -valor	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Híbrido (H)						
DK70-10VT3PRO	13376 a	7837 a	290	87,8	41,6 a	129,4 a
DK73-10VT3PRO	14004 b	8400 b	290	88,3	48,7 b	137,0 b
<i>P</i> -valor	0,0158	0,0002	ns	ns	0,0002	0,0038
Fecha de siembra (FS)						
Temprano	13281 a	8401 b	267,5 a	89,6	38,4 a	128,0 a
Tardío	14099 b	7836 a	312,5 b	86,5	52,0 b	138,4 b
<i>P</i> -valor	0,0018	0,0002	<0,0001	ns	<0,0001	0,0001
Densidad de plantas (pl m ⁻² ; D)						
5	13136 a	8078	290	83,6 a	47,1 b	130,8
7	13945 b	8198	290	88,5 b	47,7 b	133
9	13989 b	8078	290	92,0 b	41,0 a	135,9
<i>P</i> -valor	0,01	ns	ns	0,0022	0,007	ns
Interacciones				<i>P</i> -valor		
Exp*FS	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Exp*H	0,0298	ns	ns	ns	ns	ns
Exp*N	ns	0,0008	ns	0,0054	ns	ns
FS*N	0,0001	<0,0001	ns	<0,0001	ns	<0,0001
D*H	0,0264	ns	ns	<0,0001	ns	0,0065
D*N	ns	ns	ns	0,0245	ns	ns
Exp*FS*D	ns	ns	ns	0,0377	ns	ns
Exp*FS*N	ns	ns	ns	0,0387	<0,0001	ns
Exp*H*N	ns	0,0468	ns	0,001	ns	0,0272
Exp*D*H	ns	ns	ns	ns	0,0099	ns
FS*D*H	ns	0,0011	ns	ns	ns	ns
FS*H*N	0,0167	0,0292	ns	ns	ns	0,0039
FS*D*N	ns	ns	ns	ns	<0,0001	0,0016
Exp*D*H*N	ns	ns	ns	ns	0,0194	ns
Exp*FS*D*H*N	ns	ns	ns	ns	0,0003	0,0089

^a Valores seguidos de letras diferentes indican diferencias significativas ($LSDP < 0,05$) dentro de cada fuente de variación.

^b Para una mayor claridad, en el cuadro solo se muestran las interacciones de los factores que fueron significativas ($P < 0,05$) en al menos una de las variables analizadas.

3.3.4. Eficiencia de uso de N para producción de grano y sus componentes

Dos interacciones de Exp x H x N ($P < 0,05$) y Exp x FS x N ($P < 0,01$) fueron detectadas sobre la EUN_g (Cuadro 3.2). Aunque la EUN_g del Exp1 fue superior a la del Exp2, las reducciones de EUN_g dadas por incrementos en la dosis de N fueron mayores en el Exp1 y en el híbrido DK 73-10 VT3P (-19,3 vs. -15,5 EUN_g por incremento en la dosis de N para DK 73-10 VT3P y DK 73-10 VT3P, respectivamente), mientras que en el Exp2 ambos híbridos tuvieron similares reducciones (ca. -7,1 EUN_g por incremento en la dosis de N). Por otra parte, en el Exp1, las reducciones en EUN_g dadas por incrementos en la dosis de N fueron mayores en siembras tardías comparado con las tempranas (-20,6 vs. 14,2 EUN_g por incremento en la dosis de N, respectivamente), mientras que en el Exp2, la reducción en EUN_g fue similar entre fechas de siembra (ca. -7,1 EUN_g por incremento en la dosis de N). La EUN_g de los maíces tempranos fue mayor que la de los tardíos ($P < 0,0001$; Cuadro 3.2 y Fig. 3.7A-B). La EUN_g no fue afectada por la densidad de plantas, pero se redujo significativamente por la dosis de N, con un mayor impacto en los maíces de siembra tardía (interacción FS x N, $P < 0,01$). Las reducciones de EUN_g dadas por incrementos en la dosis de N se atenuaron parcialmente a densidades más altas sólo en maíces tempranos (-10,3, -9,4 y -8,6 EUN_g por planta, en 5, 7 y 9 $pl\ m^{-2}$; respectivamente) (interacción FS x D x N, $P < 0,01$). En siembras tempranas, DK 73-10 VT3P solo superó en su EUN_g a DK 70-10 VT3P con la dosis de 90N, mientras que en siembras tardías, ocurrió la misma tendencia pero con dosis de 0N y 90N (interacción FS x N x H, $P < 0,05$; Cuadro 3.2 y Fig. 3.3A). En siembras tempranas, DK 73-10 VT3P redujo su EUN_g con incrementos en la densidad de plantas, mientras que DK 70-10 VT3P no mostró cambios. Contrariamente, en siembras tardías, DK 73-10 VT3P incrementó su EUN_g con aumentos en la densidad de plantas, mientras que DK 70-10 VT3P no varió (interacción FS x D x H, $P < 0,001$; Cuadro 3.2 y Fig. 3.3).

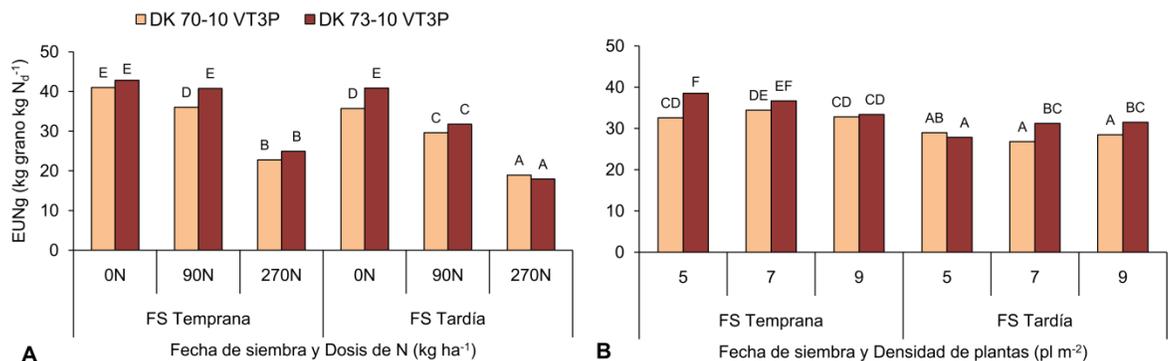


Fig. 3.3. Interacción de FS x N x H (A) y FS x D x H (B) sobre la eficiencia de uso del N para producir granos (EUN_g). Los experimentos (2014-15 y 2015-16, Exp1 y Exp2, respectivamente) se llevaron a cabo en Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina. En cada combinación de FS x Exp, se cultivaron dos híbridos con tres densidades de plantas y tres dosis de N.

Una interacción de Exp x H x N ($P < 0,05$) fue detectada sobre la $E_{abs}N$ (Cuadro 3.2). Aunque la $E_{abs}N$ del Exp1 fue superior a la del Exp2, las reducciones de $E_{abs}N$ dadas por incrementos en la dosis de N fueron mayores en el Exp1 y en el híbrido DK 73-10 VT3P (-

0,25 vs. -0,18 $E_{abs}N$ por incremento en la dosis de N para DK 73-10 VT3P y DK 73-10 VT3P, respectivamente), mientras que en el Exp2 ambos híbridos tuvieron similares reducciones (ca. -0,02 $E_{abs}N$ por incremento en la dosis de N). En ambas fechas de siembra los cultivos presentaron una similar $E_{abs}N$ ($P > 0,05$; Fig. 3.7C-D), pero las reducciones en la $E_{abs}N$ por efecto de la dosis de N fueron proporcionalmente más altas en los maíces tardíos que en los tempranos (interacción FS x N, $P < 0,0001$). En maíces tempranos, las reducciones de la $E_{abs}N$ por efecto de la dosis de N se atenuaron a densidades de plantas más altas (-0,0008, -0,0005 y +0,0002 $E_{abs}N$ por planta, para 5, 7 y 9 $pl\ m^{-2}$, respectivamente). En siembras tempranas, DK 73-10 VT3P solo redujo su $E_{abs}N$ con la dosis de N superior (270N), mientras que DK 70-10 VT3P redujo su $E_{abs}N$ cada vez que se incrementó la dosis de N. En siembras tardías, DK 73-10 VT3P tuvo mayor $E_{abs}N$ con 0N comparado con DK 70-10 VT3P, pero con las dosis de 90N y 270N ambos híbridos no difirieron (interacción FS x N x H, $P < 0,05$; Cuadro 3.2 y Fig. 3.4).

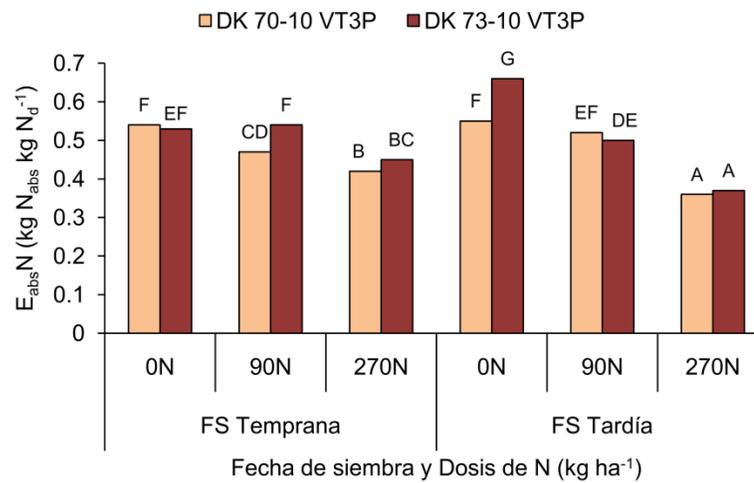


Fig. 3.4. Interacción de FS x N x H sobre la eficiencia de absorción de N ($E_{abs}N$). Los experimentos (2014-15 y 2015-16, Exp1 y Exp2, respectivamente) se llevaron a cabo en Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina. En cada combinación de FS x Exp, se cultivaron dos híbridos con tres densidades de plantas y tres dosis de N.

Aunque la $E_{ut}N_b$ se redujo con incrementos en la dosis de N (Cuadro 3.2), las reducciones fueron mayores en el Exp2 (-27,9 vs. -41,8 $E_{ut}N_b$ para el Exp1 y Exp2, respectivamente), en siembras tempranas (-45,3 vs. -24,5 $E_{ut}N_b$ para maíces tempranos y tardíos, respectivamente), el híbrido DK 73-10 VT3P (-36,1 vs. -33,7 $E_{ut}N_b$ para DK 73-10 VT3P y DK 70-10 VT3P, respectivamente) y densidades de plantas intermedias y altas (-36,8 $E_{ut}N_b$ para 7 y 9 $pl\ m^{-2}$ vs. -30,9 $E_{ut}N_b$ para 5 $pl\ m^{-2}$) (interacciones de Exp x H x N, Exp x FS x N y Exp x D x N, $P < 0,05$). Los maíces tempranos tuvieron una mayor $E_{ut}N_b$ que los tardíos ($P < 0,0001$; Fig. 3.7E-F) y la $E_{ut}N_b$ se maximizó a 9 $pl\ m^{-2}$ sólo en los maíces tardíos. Los aumentos en la dosis de N afectaron negativamente la $E_{ut}N_b$ pero con un orden de magnitud mayor en los maíces tempranos (-1,16 vs. -0,27 $E_{ut}N_b$ por unidad de incremento en N aplicado, para los cultivos tempranos y tardíos; respectivamente) (interacción FS x N, $P < 0,0001$). En siembras tempranas, las reducciones de la $E_{ut}N_b$ dadas

por incrementos en la dosis de N fueron similares entre híbridos en la densidad de 5 pl m⁻², mientras que DK 73-10 VT3P solo superó en E_{ut}N_b a DK 70-10 VT3P con la dosis de 0N para 7 pl m⁻² y DK 70-10 VT3P tuvo una E_{ut}N_b superior a DK 73-10 VT3P solo para la dosis de 90N en alta densidad (9 pl m⁻²) (Fig. 3.5A). En siembras tardías, las reducciones de la E_{ut}N_b dadas por incrementos en la dosis de N fueron similares entre híbridos todas las densidades de plantas evaluadas (Fig. 3.5B) (interacción FS x D x N x H, P<0,01; Cuadro 3.2 y Fig. 3.5A-B)

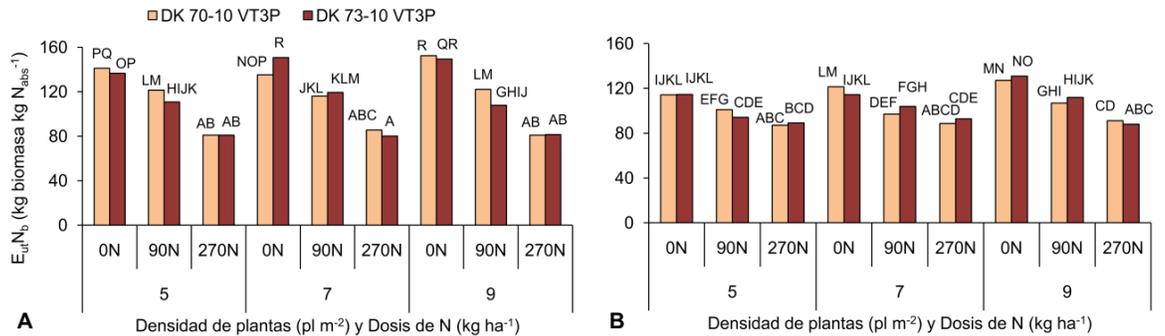


Fig. 3.5. Interacción de FS x D x N x H sobre la eficiencia de utilización del N para producir biomasa (E_{ut}N_b). Las fechas de siembra se presentan divididas (A. FS Temprana; B. FS Tardía). Los experimentos (2014-15 y 2015-16, Exp1 y Exp2, respectivamente) se llevaron a cabo en Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina. En cada combinación de FS x Exp, se cultivaron dos híbridos con tres densidades de plantas y tres dosis de N.

Dos interacciones de Exp x FS (P<0,0001) y Exp x N (P<0,0001) fueron observadas sobre el IC (Cuadro 3.2). En el Exp1, el IC no varió por efecto de la fecha de siembra (0,54 vs. 0,53 IC para maíces tempranos y tardíos, respectivamente), mientras que en el Exp2, los maíces tempranos tuvieron un IC superior al de los tardíos (0,54 vs. 0,42 IC para maíces tempranos y tardíos, respectivamente). Por otra parte, la respuesta del IC a incrementos en la dosis de N fue mayor en el Exp1 comparado con el Exp2 (pendiente = 0,0008 vs. 0,0003 IC por unidad de incremento en la dosis de N aplicado, respectivamente). Los maíces tempranos tuvieron un IC más alto que los tardíos (P<0,0001, Cuadro 3.2 y Figs. 3.6 y 3.7G-H). En general, la dosis de N tuvo un efecto positivo sobre el IC, con el mayor impacto en los maíces tempranos (interacción FS x N, P<0,05). El IC fue similar entre densidades de plantas, pero DK 73-10 VT3P tuvo disminución en su IC en siembras tempranas, mientras que en siembras tardías alcanzó su mayor IC con la densidad de 7 pl m⁻² (Fig. 3.6). Por otra parte, DK 70-10 VT3P no mostró un patrón definido de respuesta del IC a la densidad de plantas en ambas fechas de siembra evaluadas (FS x H x D interacción, P<0,001, Cuadro 3.2 y Fig. 3.6).

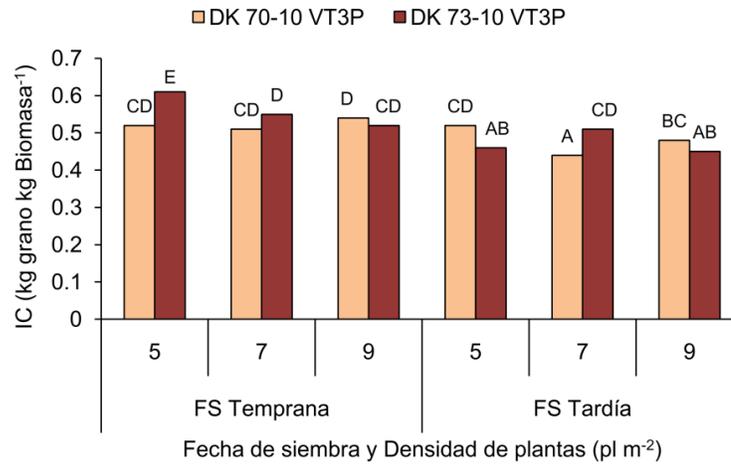


Fig. 3.6. Interacción de FS x D x H sobre el índice de cosecha (IC). Los experimentos (2014-15 y 2015-16, Exp1 y Exp2, respectivamente) se llevaron a cabo en Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina. En cada combinación de FS x Exp, se cultivaron dos híbridos con tres densidades de plantas y tres dosis de N.

Cuadro 3.2. Análisis de varianza y valores medios para la eficiencia de uso de nitrógeno (EUN_g) y sus componentes, *i.e.* eficiencia de absorción de nitrógeno ($E_{abs}N$), índice de cosecha (IC) y la eficiencia de utilización de nitrógeno para producción de biomasa ($E_{ut}N_b$). Los experimentos (2014-15 y 2015-16; Exp1 y Exp2, respectivamente) fueron conducidos en Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina. En cada combinación de fechas de siembra x Exp, se evaluaron dos híbridos con tres dosis de N.

	EUN_g (kg grano kg N_d^{-1})	$E_{abs}N$ (kg N_{abs} kg N_d^{-1})	IC (kg grano kg biomasa ⁻¹)	$E_{ut}N_b$ (kg biomasa kg N_{abs}^{-1})
Exp (Exp)				
Exp 1	41,8 b	0,62 b	0,54 b	107,9 a
Exp 2	22,1 a	0,37 a	0,48 a	110,3 b
P-valor	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0198
Dosis de N (kg N ha⁻¹) (N)				
0N	40,1 c	0,57 c	0,46 a	132,4 c
90N	34,5 b	0,51 b	0,54 b	109,4 b
270N	21,1 a	0,40 a	0,52 b	85,6 a
P-valor	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Hibrido (H)				
DK70-10VT3P	30,7 a	0,48 a	0,5	109,5
DK73-10VT3P	33,2 b	0,51 b	0,52	108,8
P-valor	<0,0001	0,0004	ns	
Fecha de siembra (FS)				
Temprano	34,7 b	0,49	0,54 b	114,1 b
Tardío	29,1 a	0,49	0,48 a	104,2 a
P-valor	<0,0001	ns	<0,0001	<0,0001
Densidad de plantas (pl m⁻²; D)				
5	32	0,49	0,53 b	106,0 a
7	32,3	0,5	0,50 a	108,8 b
9	31,5	0,48	0,50 a	112,5 c
P-valor	ns	ns	0,0284	<0,0001
Interacciones				
			<u>P-valor</u>	
Exp*FS	ns	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Exp*H	ns		ns	0,0141
Exp*N	ns	<0,0001	0,0122	<0,0001
FS*N	0,0115	ns	ns	<0,0001
FS*H	ns	ns	0,0203	ns
FS*D	0,0069	ns	ns	ns
D*H	ns	0,003	0,0007	0,0432
D*N	0,0344	0,0414	ns	0,0011
H*N	0,0507	ns	ns	ns
Exp*D*N	ns	ns	ns	0,0064
Exp*FS*N	0,0065	ns	ns	<0,0001
Exp*H*N	0,0396	0,0265	ns	0,0118
FS*D*H	0,0006	ns	0,0002	ns
FS*H*N	0,0355	<0,0001	ns	ns
FS*D*N	0,0052	0,0133	0,038	ns
FS*D*H*N	ns	ns	ns	0,0043
Exp*FS*D*H*N	ns	0,0022	ns	ns

^a Valores seguidos de letras diferentes indican diferencias significativas (LSD, $P < 0,05$) dentro de cada fuente de variación.

^b Para una mayor claridad, en el cuadro solo se muestran las interacciones que fueron significativas ($P < 0,05$) en al menos una de las variables analizadas.

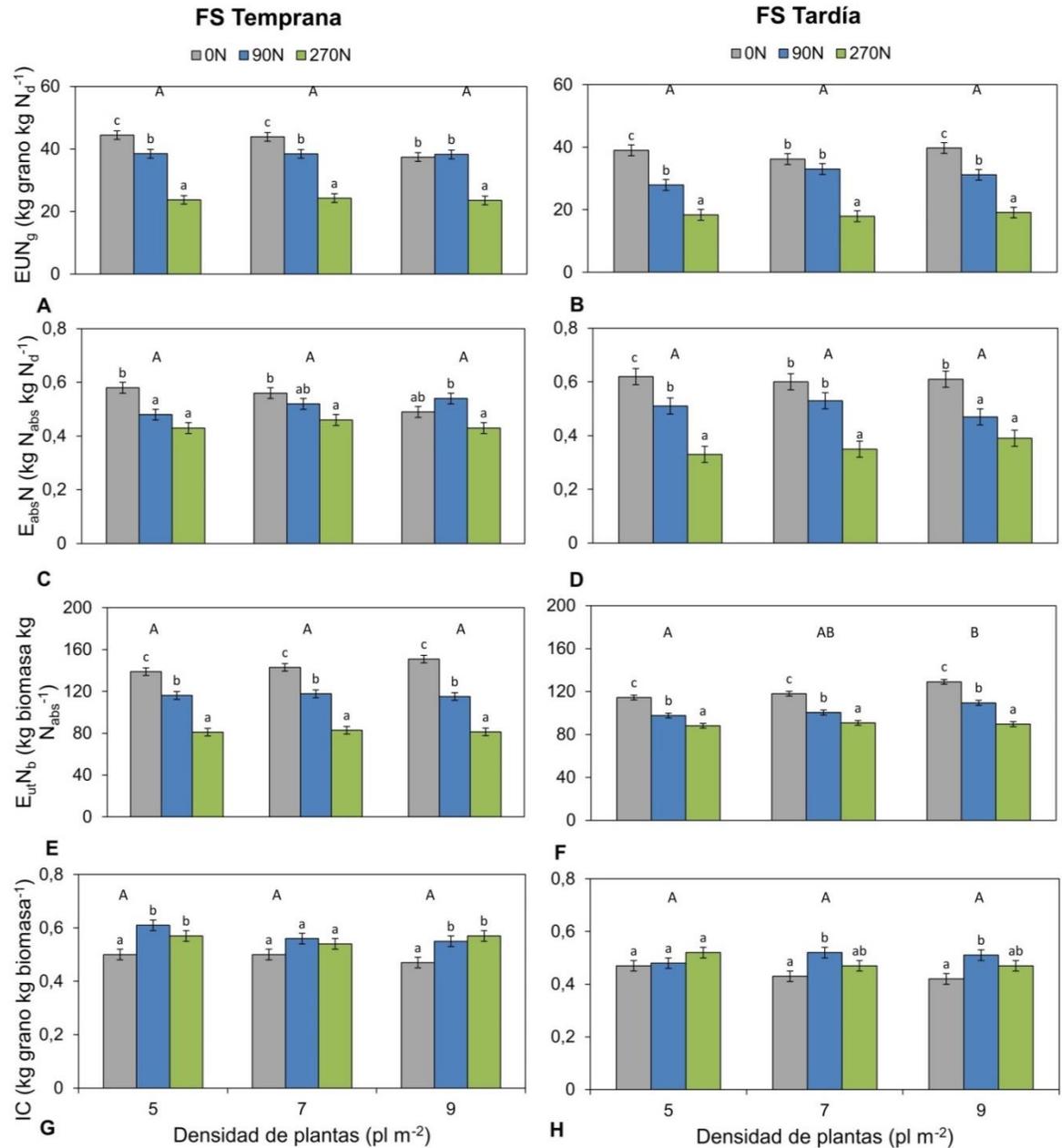


Fig. 3.7. Valores medios de eficiencia de uso de nitrógeno (EUN_g) (A, B) y sus componentes, *i.e.* eficiencia de absorción de nitrógeno ($E_{abs}N$) (C, D), eficiencia de utilización de nitrógeno para producción de biomasa ($E_{ut}N_b$) (E, F) e índice de cosecha (IC) (G, H). En cada fecha de siembra, las letras mayúsculas indican diferencias significativas entre densidades y las letras minúsculas representan diferencias significativas entre las dosis de N dentro de cada densidad de plantas ($P < 0,05$). Los valores son el promedio de dos híbridos en dos experimentos de campo 2014-15 y 2015-16) que se llevaron a cabo en Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina.

3.3.5. Relaciones entre componentes de la EUN_g y sus variables asociadas

Para maíces tempranos, el CP1 explicó *ca.* 60% de la varianza total, discriminando entre combinaciones de dosis de N x densidad de plantas x híbrido x experimento,

contrastando la $E_{ut}N_b$ y otras variables, como la biomasa, R_{to} , $N_{abs}post$, N_{abs} y $N_{abs}pre$. El CP2 explicó *ca.* 25% de la varianza total, discriminado EUN_g , $E_{abs}N$, $E_{ut}N_b$ y IC, $N_{abs}pre$ (Fig. 3.8A, C y Cuadro 3.3). En maíces tardíos, *ca.* 44% de la varianza total fue explicada por CP1, por el contraste entre la $E_{ut}N_b$ y biomasa, R_{to} , IC, $N_{abs}post$, N_{abs} y $N_{abs}pre$, mientras que CP2 explicó *ca.* 34% de la varianza total y EUN_g , $E_{abs}N$ y $E_{ut}N_b$ tuvieron los autovalores más altos y positivos en este eje (Fig. 3.8B, D y Cuadro 3.3).

Consistentemente, en ambas fechas de siembra, el CP1 discriminó entre las diferentes dosis de N, densidades de plantas y Exps, mientras que el CP2 discriminó principalmente los Exps (años). La EUN_g se asoció estrechamente con $E_{abs}N$, pero esta relación fue más fuerte en maíces tardíos que en los tempranos. En ambas fechas de siembra, los tratamientos control (0N) se asociaron con la $E_{ut}N_b$ teniendo un alto peso negativo sobre el CP1, mientras que los cultivos altamente fertilizados con N (270N) se asociaron con altos N_{abs} , $N_{abs}pre$ y $N_{abs}post$, con pesos positivos sobre el CP1 (Cuadro 3.3). Los tratamientos moderadamente fertilizados (90N) se posicionaron en valores intermedios del CP1. La asociación entre N_{abs} y sus componentes ($N_{abs}pre$ y $N_{abs}post$) fue similar en ambas fechas de siembra (Fig. 3.8), pero con un mayor peso de $N_{abs}pre$ sobre el CP1 para maíces tardíos comparado con los tempranos (0,44 vs. 0,38, respectivamente; Cuadro 3.3). El IC se correlacionó negativamente con la $E_{ut}N_b$ en maíces tempranos, y positivamente con el R_{to} y la biomasa en maíces tardíos. Los datos correspondientes al Exp1 (2014-2015) tuvieron los valores positivos más altos de N_{abs} , $N_{abs}post$, R_{to} , $N_{abs}pre$ y biomasa sobre el CP1 y el Exp2 (2015-2016) los valores más negativos sobre el CP1 para las mismas variables, pero con un mayor peso de la $E_{ut}N_b$ sobre el CP2 comparado con el Exp1 (Fig. 3.8 y Cuadro 3.3).

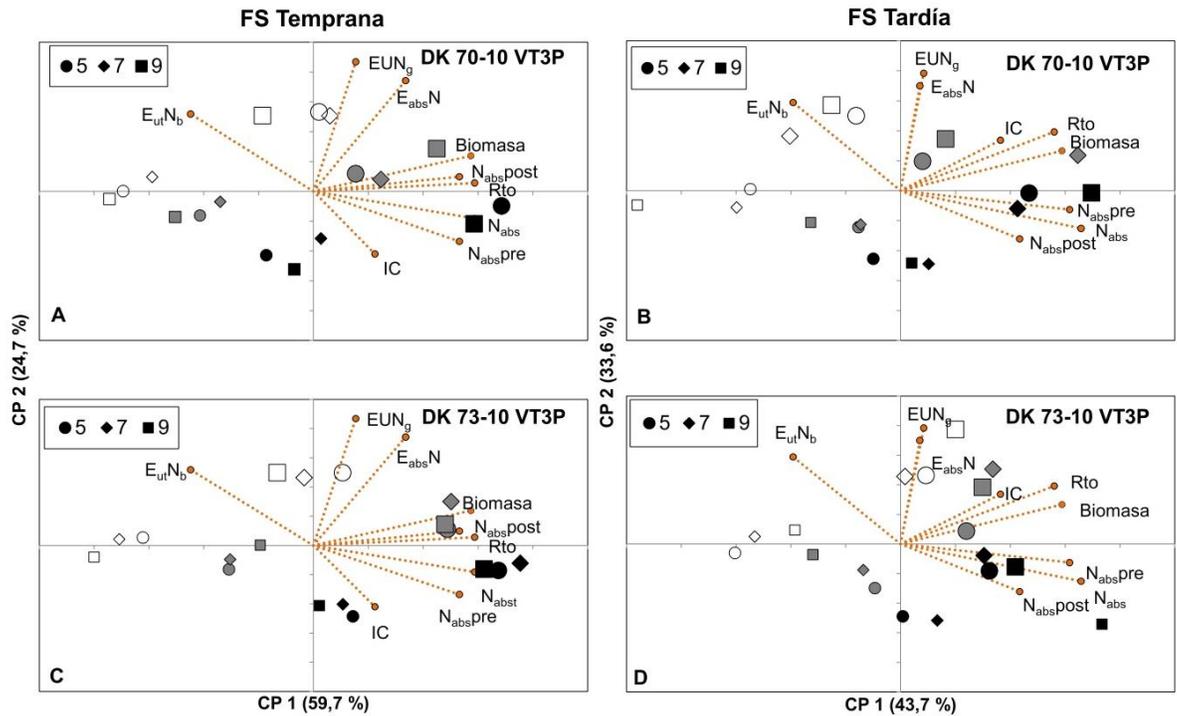


Fig. 3.8. Análisis de componentes principales (ACP) para el set de datos correspondiente a maíces tempranos (A y C) y tardíos (B y D) y para los híbridos DK 70-10 VT3P (A y B) y DK 73-10 VT3P (C y D) en dos experimentos a campo [2014-15 (símbolos grandes) y 2015-16 (símbolos pequeños)] cultivados con tres densidades de plantas [5 (círculos), 7 (diamantes) y 9 pl m⁻² (cuadrados)] y tres dosis de N [0N (símbolos blancos), 90N (símbolos grises) y 270N (símbolos negros)]. El análisis incluyó la eficiencia del uso de nitrógeno (EUN_g) y sus componentes (representados por vectores), *i.e.* Rto de grano (Rto), absorción de N total (N_{abs}), absorción de N durante el período pre- y post-floración ($N_{abs}pre$ y $N_{abs}post$, respectivamente), Índice de cosecha (IC), biomasa en R6 (Biomasa), eficiencia de absorción de nitrógeno ($E_{abs}N$) y eficiencia de utilización de nitrógeno para producción de biomasa ($E_{ut}N_b$).

Cuadro 3.3. Valores de los auto-vectores (e1 y e2) correspondientes al análisis de componentes principales (ACP) realizado para el set de datos de maíces tempranos y tardíos, presentado en la Fig. 3.8.

Variables	FS Temprana		FS Tardía	
	e1	e2	e1	e2
N_{abspre} (kg N ha ⁻¹)	-0,36	0,29	0,36	0,10
$E_{\text{ut}}N_{\text{b}}$ (kg biomass kg N _{upt} ⁻¹)	-0,29	0,39	0,35	-0,24
Biomasa (kg ha ⁻¹)	0,14	0,50	0,36	-0,07
IC (kg grano kg biomasa ⁻¹)	0,21	-0,46	-0,36	-0,10
N_{abs} (kg N ha ⁻¹)	0,25	0,43	0,33	0,35
$E_{\text{abs}}N$ (kg N _{abs} kg N _d ⁻¹)	0,35	0,31	0,06	0,86
N_{abspost} (kg N ha ⁻¹)	0,42	0,11	-0,36	0,12
Rto (kg grano ha ⁻¹)	0,43	0,01	0,36	-0,07
EUN_{g} (kg grano kg N _d ⁻¹)	0,43	-0,05	0,35	-0,17

3.3.6. Combinación de prácticas de manejo para optimizar Rto y EUN_{g}

El análisis multivariado (ACP) también resultó útil para identificar aquellas prácticas de manejo que maximizaron para cada híbrido tanto la EUN_{g} como Rto en cada fecha de siembra (*i.e.* valores máximos proyectados sobre ambos vectores) y Exp (Fig. 3.9). Durante 2014-15, para la maíces tempranos, DK 70-10 VT3P a 9 pl m⁻² con 90N se posicionó con los valores más altos sobre los vectores de EUN_{g} y Rto (Fig. 3.9A), mientras que cuando la fecha de siembra se retrasó, la densidad de plantas óptima disminuyó a 7 pl m⁻² con una dosis similar de N (90N) (Fig. 3.9B). Para DK 73-10 VT3P, en siembras tempranas, se alcanzaron altos Rtos a 5, 7 y 9 pl m⁻² con 90 N, pero se registraron los máximos valores de EUN_{g} a 7 pl m⁻² (Fig. 3.9C). Cuando la fecha de siembra se retrasó, DK 73-10 VT3P también maximizó la EUN_{g} y el Rto con 7 pl m⁻² y 90N (Fig. 3.9D). Durante 2015-16, DK 70-10 VT3P alcanzó el máximo Rto y EUN_{g} con 7 pl m⁻² y 270N en ambas fechas de siembra. Para DK 73-10 VT3P, la densidad de plantas óptima varió de 5-7 a 9 pl m⁻², cuando la fecha de siembra se retrasó pero con una dosis similar de N (270N).

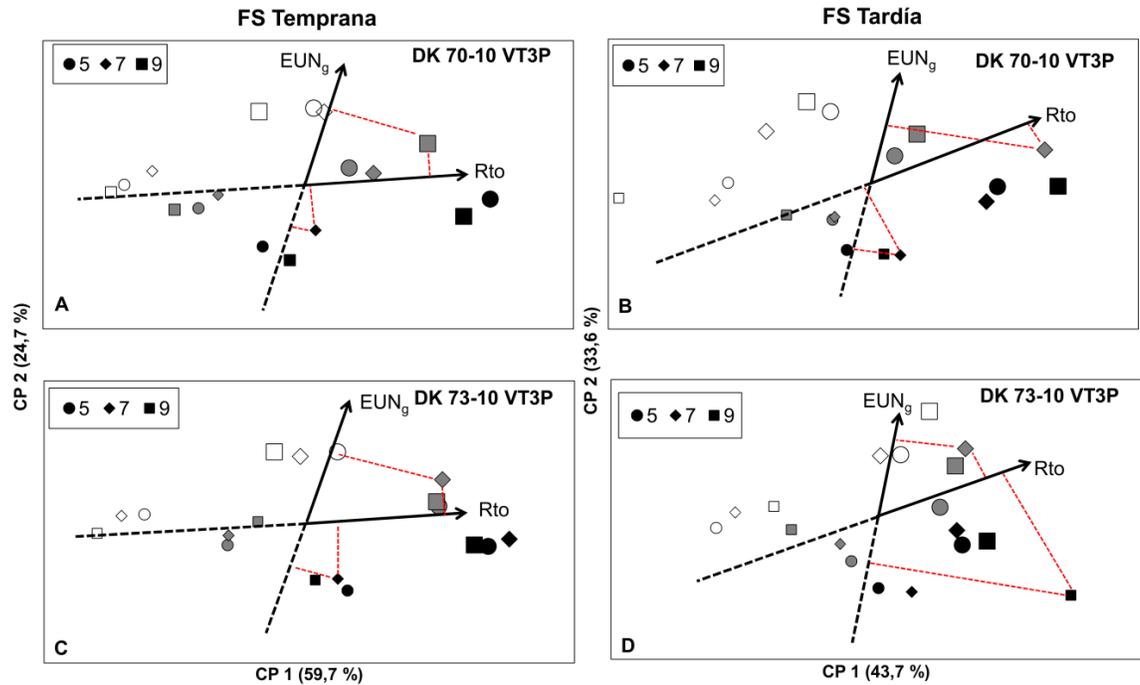


Fig. 3.9. Simplificación de la Fig. 3.8, en donde se muestra el análisis de componentes principales (ACP) para el set de datos correspondiente a maíces tempranos (A y C) y tardíos (B y D) y para los híbridos DK 70-10 VT3P (A y B) y DK 73-10 VT3P (C y D) en dos experimentos a campo [2014-15 (símbolos grandes) y 2015-16 (símbolos pequeños)] cultivados con tres densidades de plantas [5 (círculos), 7 (diamantes) y 9 pl m⁻² (cuadrados)] y tres dosis de N [0N (símbolos blancos), 90N (símbolos grises) y 270N (símbolos negros)]. La combinación óptima de tratamientos (dosis de N y densidad de plantas) que maximizan el Rto (Rto) y la eficiencia de uso de nitrógeno (EUN_g) en cada fecha de siembra, híbrido y Exp están representadas por las proyecciones perpendiculares (líneas punteadas rojas) a los vectores correspondientes. Las líneas punteadas negras representan las proyecciones negativas para los vectores de Rto y EUN_g.

3.4. Discusión

En siembras tardías, los productores usan comúnmente los mismos híbridos que en siembras tempranas (*i.e.* híbridos con genes Bt; Shi et al., 2013), con densidades de plantas y dosis de N similares o menores. Sin embargo, los Rtos en grano de los maíces tardíos podrían incrementarse seleccionando genotipos de alta capacidad de respuesta al N, densidades de plantas más altas y optimizando la dosis de N (Gambin et al., 2016). En particular, el costo de las semillas y los fertilizantes resultan los insumos con mayor impacto en el ingreso económico neto de la producción de maíz en la región Pampeana Argentina (Cabrini et al., 2018). En consecuencia, resulta de gran relevancia establecer combinaciones de densidades de plantas y dosis de N que optimicen la EUN_g.

En el Capítulo previo (ver también Maltese et al., 2019), se ha demostrado que el retraso de la siembra en la región húmeda templada de Argentina tuvo penalidades sobre la EUN_g (una disminución de EUN_g de *ca.* 32 a 26 kg de grano kg N_{av}⁻¹) en los cultivos de

maíz sembrados a una densidad intermedia de plantas (7 pl m^{-2}). Este capítulo se centró en evaluar los efectos de la densidad de plantas, la dosis de N y los híbridos sobre EUN_g , sus principales determinantes (R_{to} y N_d) y componentes (E_{absN} , E_{utN_b} e IC) en maíces de siembra temprana y tardía. Se evaluaron combinaciones de estas prácticas, en orden a obtener un alto R_{to} con una mínima reducción sobre la EUN_g . La fecha de siembra, la dosis de N y la densidad de plantas modificaron los principales componentes de la EUN_g ; *i.e.* R_{to} y/o N_d (Cuadro 3.1). La EUN_g fue menor en maíces de siembra tardía que en los tempranos (*ca.* 35 vs. 29 kg de grano kg N_d^{-1}) debido a un mayor N_d (*ca.* 268 vs. 313 kg N ha^{-1} , Cuadro 3.1) y menor R_{to} (*ca.* 8400 vs. 7800 kg ha^{-1} ; Cuadro 3.1). Aunque el balance hídrico más favorable registrado en el Exp1 comparado con el Exp2 (ver Fig. 2.1, Capítulo 1) condujo a mayores R_{tos} y EUN_g , el R_{to} del Exp2 se optimizó con una dosis de N mayor (270N) que el Exp1 (90N) (ver Figs. 3.8 y 3.9). Esto podría atribuirse al menor R_{to} de los tratamientos control (0N) en el Exp2 (4942 kg ha^{-1}) que en el Exp1 (8077 kg ha^{-1}), con lo cual se pudo haber requerido mayores dosis de N para optimizar estas variables. Por otra parte, la cantidad de tratamientos de fertilización con N fueron acotados (sólo dos niveles de fertilización más el tratamiento control sin N) para un rango muy amplio de dosis (de 0 a 270 kg N ha^{-1}). De esta manera, la optimización en el Exp2 no se logró con la dosis más baja de fertilización (90N) pero sí con la siguiente (270N). En consecuencia, el método (ACP) pareciera requerir más tratamientos con N para realizar la optimización por dosis de N para maximizar tanto el R_{to} como la EUN_g .

La EUN_g disminuyó con la dosis de fertilización nitrogenada (Boomsma et al., 2009; Ciampitti y Vyn, 2011; Chen y Vyn, 2017; Maltese et al., 2019), debido a incrementos más que proporcionales en el N_d (*ca.* 60%) que en el R_{to} (*ca.* 41%) (Figs. 3.3 y 3.7A-B y Cuadro 3.1). La compensación detectada entre N_{abspre} y $N_{abspost}$ determinó un N_{abs} total similar (en promedio, 133 kg N ha^{-1} ; Cuadro 3.1) para todas las densidades de plantas como ya se ha documentado previamente (Chen et al., 2015). Particularmente, en esta tesis, la contribución de $N_{abspost}$ al N_{abs} total fue mayor en maíces tardíos que en tempranos (Cuadro 3.1), probablemente debido al mejor balance hídrico registrado durante el período reproductivo en maíces de siembra retrasada (Fig. 2.1), lo cual es frecuente en la región húmeda de Argentina (Maddonni, 2012; Mercau y Otegui, 2014). En efecto, un mayor $N_{abspost}$ podría atenuar las penalizaciones sobre el R_{to} y la calidad del grano promovida por granos más livianos con baja concentración de N registrada para maíces sembrados con alta densidad de plantas (Maddonni y Otegui, 2006).

Las densidades de plantas más altas *a priori* no atenuaron las reducciones en la EUN_g originadas por el atraso en la fecha de siembra, debido a que ambos N_{abs} y R_{to} no se vieron afectados por la densidad de plantas. Consistentemente, la misma interacción (FS x D x N) se registró sobre la EUN_g y la E_{absN} , con el menor impacto de la dosis de 90N sobre la EUN_g y la E_{absN} con 9 pl m^{-2} en maíces tempranos y con $7\text{-}9 \text{ pl m}^{-2}$ en los tardíos (Cuadro 3.2 y Fig. 3.7). Colectivamente, los resultados hasta aquí discutidos mostraron que la hipótesis ii previamente planteada en el Capítulo 1 (*La adecuada combinación de prácticas de manejo agronómicas, como incrementos en la densidad de plantas, optimización de la dosis de fertilización con N y elección de genotipos con alto IC maximizan la EUN_g en maíces de siembra tardía*) fue rechazada ya que los factores no se cumplen en forma simultánea. Sin embargo, el efecto negativo del incremento de la dosis de N sobre E_{absN} (Ciampitti y Vyn, 2011; Yan et al., 2017; Maltese et al., 2019) se podría mitigar

parcialmente optimizando la densidad de plantas en cada fecha de siembra. Tanto en los maíces tempranos como en los tardíos, la EUN_g estuvo estrechamente asociada con la $E_{abs}N$, de acuerdo con los hallazgos de Ciampitti y Vyn (2012) para maíces en fechas de siembra óptimas en el cinturón maicero de los EEUU. Dado que la $E_{abs}N$ tuvo una mayor correlación con la EUN_g en siembras tardías que en tempranas (Fig. 3.8), en este estudio se pudo dilucidar que la $E_{abs}N$ resultó más crítica para estabilizar la EUN_g , especialmente en maíces de siembra tardía (Fig. 3.8).

También en la misma hipótesis ii se ha planteado el impacto del IC sobre la EUN_g en maíces de siembra tardía. En maíces tempranos y para ambos híbridos, el IC se correlacionó negativamente con la $E_{ut}N_b$ pero sin asociación con la EUN_g (Fig. 3.8A y C), tal como se informó previamente para fechas de siembra óptimas (Chen y Vyn, 2017). Curiosamente, en fechas de siembra tardías, el IC estuvo estrechamente relacionado con el Rto y también positivamente con la EUN_g sin presentar asociación con la $E_{ut}N_b$ (Fig. 3.8B y D). Por lo tanto, podrían esperarse variaciones de la EUN_g por diferencias genotípicas en la respuesta del IC a la densidad de plantas en maíces tardíos, lo que sostendría parcialmente la hipótesis planteada. Particularmente, DK 73-10 VT3P (el híbrido previamente caracterizado por alto IC) en siembras tardías tuvo una respuesta positiva del IC a la densidad de plantas (Fig. 3.8D) y optimizó tanto el Rto como la EUN_g a un nivel similar (7 pl m^{-2}) o mayor de densidad de plantas (9 pl m^{-2}) que en siembras tempranas (Fig. 3.9B y D). Estos resultados coinciden parcialmente con estudios previos realizados por Gambin et al. (2016), quienes sugirieron que la productividad de los maíces tardíos puede incrementarse seleccionando genotipos de alta respuesta en Rto a N , incrementando la densidad de plantas y optimizando las dosis de fertilización de N .

3.5. Conclusiones

Las prácticas de manejo que optimizaron la EUN_g y el Rto (combinación de dosis de N , densidad de plantas e híbrido) difirieron entre fechas de siembra y Exps. Los resultados obtenidos sugieren que el Exp (*i.e.* año) cambió el N objetivo (de $90N$ a $270N$, Exp 1 y Exp2, respectivamente) independientemente de la fecha de siembra. En siembras tempranas, la densidad de plantas objetivo para DK 70-10 VT3P fue condicionada por el efecto de Exp (9 vs. 7 pl m^{-2}), la cual se mantuvo (Exp1) o disminuyó (Exp2) cuando la fecha de siembra fue retrasada. Por el contrario, en DK 73-10 VT3P una densidad de plantas similar maximizó el Rto y la EUN_g en siembras tempranas en ambos Exps (7 pl m^{-2}), y se mantuvo (Exp1) o aumentó (Exp2) a medida que se retrasó la fecha de siembra.

En este Capítulo se identificó al IC como un rasgo genotípico apropiado para estabilizar la EUN_g en maíces de siembra tardía. Por lo tanto, la elección del genotipo, la densidad de plantas y la dosis de N parece ser particularmente crítica en los maíces tardíos. Los resultados obtenidos confirmaron tales suposiciones y añadieron conocimientos más detallados para dilucidar los mecanismos que determinan la EUN_g en cultivos de maíz de siembra tardía.

3.6. Relación de los resultados con las hipótesis planteadas

Coincidentemente con los resultados obtenidos en el Capítulo 2, la EUN_g fue menor en los maíces de siembra tardía. A pesar de que los incrementos en la densidad de plantas condujeron a mayores N_{abspre} , no se logró estabilizar la EUN_g ante el atraso en la fecha de siembra debido principalmente a la falta de efecto sobre el Rto. Sin embargo, las reducciones de la EUN_g y uno de sus componentes (E_{absN}) por efecto de los incrementos en la dosis de N fueron atenuadas cuando la densidad de plantas fue incrementada. Por lo tanto, la hipótesis ii planteada en el Capítulo 1 fue rechazada. Finalmente, se pudieron establecer combinaciones adecuadas de prácticas agronómicas (D x N x H) que optimizaron el Rto y la EUN_g en ambos años (Exps) y fechas de siembra.

3.7. Relación con los siguientes capítulos

El presente Capítulo se focalizó en evaluar aquellas combinaciones de prácticas de manejo agronómico que promuevan mejoras en la EUN_g y sus componentes. El Capítulo siguiente se centrará en analizar a escala de planta individual, las variaciones en los determinantes del Rto en el cultivo de maíz, *i.e.* TCP_{pc} y NGP , ante cambios en el estatus N de las plantas. Finalmente, se evaluará la relación entre los resultados obtenidos a escala de planta individual y los obtenidos a escala de cultivo (Capítulos 2 y 3) en orden a profundizar el análisis sobre los cambios detectados sobre la EUN_g .

Capítulo 4: Economía del N en maíces tempranos y tardíos, una aproximación a escala de planta individual

4.1. Introducción

El número de granos por unidad de área es el componente principal del Rto en el cultivo de maíz (*Zea mays*, L.). En siembras tardías, se han reportado reducciones en el número de granos por unidad de área comparado con siembras tempranas (Otegui et al., 1995; ver también Capítulo 2 y Cuadro 1 anexo), lo cual explicaría parcialmente las reducciones detectadas en Rto y EUN_g ($\text{kg grano kg N}_d^{-1}$) con atrasos en la fecha de siembra (Capítulo 2). Por lo tanto, el estudio de las variables eco-fisiológicas que definen el número de granos a escala de cultivo cobra especial relevancia para poder explicar su determinación en fechas de siembra contrastantes.

El análisis a escala de planta individual ha permitido comprender mejor el efecto del ambiente sobre la determinación del Rto (Andrade et al., 1999; Ciancio et al., 2016; Echarte et al., 2004; Maddonni y Otegui, 2004; Vega et al., 2000). El número de grano por planta (NGP) se define durante el período crítico y es dependiente de la tasa de crecimiento por planta en el mismo período (TCP_{pc}). La relación entre la TCP_{pc} y el NGP es curvilínea, variando el tipo de función de acuerdo al genotipo considerado (D'Andrea et al., 2008) y hay un umbral mínimo de TCP_{pc} necesario para fijación granos en espigas primarias y un umbral más alto de TCP_{pc} para fijación de granos en espigas secundarias (Ciancio et al., 2016). Por lo tanto, los cambios en la oferta de recursos por planta (radiación, agua, nutrientes) impulsados por modificaciones en las prácticas de manejo (densidad de plantas, fertilización, riego) y/o factores meteorológicos (lluvia, temperatura, radiación solar) se reflejan en cambios en el NGP a través de variaciones en la TCP_{pc} (Andrade et al., 1999). Sin embargo, se han informado variaciones genotípicas para la respuesta del NGP a la TCP_{pc} , atribuible al N_d , independientemente del efecto de N_d sobre la TCP_{pc} (D'Andrea et al., 2006; D'Andrea et al., 2008). Por el contrario, Andrade et al. (2002) documentaron que el NGP varía exclusivamente a través de cambios en la TCP_{pc} , impulsados por el ambiente de crecimiento, lo cual es determinado por las condiciones climáticas y las prácticas de manejo agronómicas. Por lo tanto, debido a los resultados contradictorios, resulta relevante estudiar las variaciones de NGP a una TCP_{pc} dada. En este sentido, la determinación del estatus N de la planta podría contribuir a explicar el efecto directo del N_d sobre el NGP.

Por otra parte, el estudio del NGP fijados por unidad de TCP_{pc} (*i.e.* EF_g) podría contribuir a explicar la menor EUN_g a escala de cultivo documentada previamente en maíces de siembra tardía (Capítulo 2 y 3). La relación curvilínea reportada entre la TCP_{pc} y el NGP puede ser afectada por el N_d (D'Andrea et al., 2006; D'Andrea et al., 2008), por lo tanto, la EF_g podría ser afectada por el estatus N de la planta. Resulta relevante entonces, estudiar el vínculo entre estas relaciones a escala de planta individual con la EUN_g a escala de cultivo.

Los objetivos del presente capítulo fueron:

- i. Estudiar la EF_g bajo diferentes combinaciones de fechas de siembra, rangos de TCP_{pc} y estatus N alrededor de floración, dados por cambios en la densidad de plantas y dosis de fertilización con N.
- ii. Estudiar la relación entre la EF_g a escala de planta con la EUN_g a escala de cultivo.

4.2. Materiales y Métodos

4.2.1. Experimentos y manejo del cultivo

La ubicación y conducción de los Exps se realizaron acorde a lo mencionado anteriormente en el Capítulo 2 – sección 2.2.1. del presente manuscrito.

En ambos Exps (2014-2015 y 2015-2016), se evaluaron combinaciones de cuatro factores con sus respectivos niveles: fecha de siembra (temprana y tardía, a mediados de septiembre y mediados de diciembre, respectivamente), híbrido (DK 73-10 VT3P y DK 70-10 VT3P), dosis de N (0, 90 y 270 kg N ha⁻¹ aplicado) y densidad de plantas (5, 7 y 9 pl m⁻²).

4.2.2. Mediciones sobre el cultivo y muestreo de suelo

A partir del estadio fenológico de V4, período en el cual se estabiliza la variabilidad poblacional en el crecimiento de las plantas de maíz (Maddoni y Otegui, 2004), se etiquetaron 10 plantas consecutivas por parcela que visualmente presentaban un tamaño similar. Sobre las plantas seleccionadas se realizaron estimaciones no destructivas de biomasa por planta mediante mediciones alométricas, a partir del registro de variables morfométricas:

- Altura de la planta, desde la base del tallo al último collar visible.
- Diámetro en la base del tallo.
- Diámetro máximo de espigas primarias y secundarias (a partir de R1, si las hubiere).
- Valor SPAD en la sección media de la hoja 12 basado en Shapiro et al. (2006).

Las mediciones se realizaron en 3 momentos diferentes alrededor de floración durante el período crítico del maíz (R1±15d). En cada momento de medición, se seleccionaron 40 plantas para la determinación de la biomasa por planta mediante mediciones destructivas. En los individuos seleccionados para el muestreo destructivo se realizaron las mismas mediciones de variables morfométricas y mediante secado en estufa con circulación de aire forzado a 65°C hasta peso constante, se determinó la materia seca por planta. En base a las mediciones morfométricas realizadas en los individuos seleccionados y la biomasa determinada en ellos se construyeron modelos alométricos que fueron utilizados para estimar la materia seca de las plantas medidas a campo, en cada uno de los 3 momentos alrededor de floración donde se realizaron las mediciones no destructivas según Vega et al. (2000).

La biomasa en R6 de las plantas marcadas se determinó mediante muestreos destructivos. Las plantas se secaron en estufa con circulación de aire forzado a 65°C hasta peso constante.

El Rto por planta se determinó mediante trilla manual y peso de los granos por individuo. El NGP se determinó por conteo de los granos totales y el peso de grano mediante el cociente entre Rto por planta y el NGP.

4.2.3. Cálculos

A partir de las estimaciones de biomasa acumulada por planta mediante las mediciones alométricas, se calculó la TCP_{pc} , como la pendiente de la función de regresión lineal entre la biomasa estimada en 3 momentos alrededor del período crítico de floración y el tiempo térmico transcurrido entre las mencionadas etapas expresado en °Cd considerando una temperatura base de crecimiento de 8°C.

La EF_g se calculó mediante la Ec. (4.1).

$$EF_g = \frac{NGP}{TCP_{pc}} \quad \text{Ec. (4.1)}$$

En orden de realizar un análisis particionado por rangos de TCP_{pc} (Echarte et al., 2004) y estatus N, se conformaron grupos de bajo, intermedio y alto TCP_{pc} y estatus N, respectivamente. Para ello, a partir de los valores de TCP_{pc} y lecturas SPAD en hoja 12 en R1, se conformaron los tres grupos utilizando los percentiles 33 y 66 como valores de corte, obtenidos a partir de las tablas de frecuencias y estadísticos descriptivos para el set de datos completo de cada variable. Para la TCP_{pc} , los percentiles 33 y 66 fueron de 0,20 y 0,28 g °Cd⁻¹, respectivamente. Para las lecturas SPAD, al percentil 33 le correspondió un valor de 44,9 y al percentil 66 un valor de 52,4.

La proporción de individuos prolíficos se calculó como la cantidad de plantas con más de 10 granos fijados en espiga secundaria en relación al número de plantas totales dentro de cada combinación de fecha de siembra, rango de TCP_{pc} y lectura SPAD a R1.

4.2.4. Análisis estadístico

Los resultados se analizaron mediante pruebas de test de t Student, evaluando el efecto de la fecha de siembra para las variables de interés. Se realizaron también análisis de correlaciones, regresiones lineales simples y múltiples para la selección de modelos alométricos utilizando el procedimiento stepwise, considerando valores $\alpha=0,15$ y $\alpha=0,05$ para el ingreso y retención de variables dentro de los modelos. La selección de modelos se realizó considerando los valores del R^2 , R^2_{aj} y cuadrado medio del error. Para la validación de los modelos alométricos seleccionados, se utilizó un set de plantas independientes donde se realizaron comparaciones 1 a 1 utilizando el software IRENE (Integrated Resources for Evaluating Numerical Estimates, software beta versión 1.00; Fila et al., 2003). Además, para la TCP_{pc} , el estatus N por planta a R1, el NGP, la prolificidad y los factores densidad de plantas y dosis de N, se establecieron tablas de frecuencia relativa (basado en Echarte et al. 2004).

Se utilizó un análisis discriminante (AD) para vincular los resultados obtenidos a escala de planta individual (NGP, TCP_{pc} , EF_g , Proporción de plantas prolíficas) y escala de cultivo (EUN_g) en cada fecha de siembra. Sólo los ejes canónicos 1 y 2 (EC1 y EC2) se presentan gráficamente. Las correlaciones positivas entre las variables están representadas por vectores con ángulos cercanos a 0°, mientras que las variables que están correlacionadas negativamente se representan mediante vectores con ángulos cercanos a 180°. Los ángulos de 90° entre vectores representan variables no correlacionadas entre sí. Previo al AD, se establecieron grupos de bajo, intermedio y alto estatus N a partir de los valores de lecturas

SPAD en hoja 12 a R1 para poder apreciar la asociación de los mismos con todas las variables a escala de planta y de cultivo evaluadas. Adicionalmente, se tuvo en consideración la variabilidad explicada por las ecuaciones del AD (EC1 y EC2) y la tasa aparente de mala clasificación. Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software InfoStat (Di Rienzo et al., 2011).

4.3. Resultados

4.3.1. Condiciones climáticas

Detalles de las condiciones climáticas registradas durante las temporadas de crecimiento 2014-2015 (Exp1) y 2015-2016 (Exp2) fueron informados previamente en la sección 2.3.1. correspondiente al Capítulo 2 del presente manuscrito.

4.3.2. Número de granos por planta, tasa de crecimiento por planta alrededor de floración y estatus N por planta a R1

El NGP se asoció positivamente con la TCP_{pc} en ambas fechas de siembra (Fig. 4.1). Basado en Vega et al. (2000), para ambas fechas de siembra, se ajustó una función curvilínea ($R^2=0,43$; $P<0,0001$) para la relación entre la TCP_{pc} y el número de granos de la espiga primaria. A bajos niveles de TCP_{pc} sólo se observaron unos pocos individuos estériles, particularmente en siembras tempranas. Tanto en siembras tempranas como tardías se detectaron individuos que fijaron granos en espigas secundarias, pero en un rango menor de TCP_{pc} en las tardías que en las siembras tempranas. Sin embargo, para todo el rango de TCP_{pc} explorado en los Exps, existió una gran variabilidad en el NGP, por lo tanto, resultó necesaria la inclusión de un marco de análisis apropiado que incluya al estatus N de cada planta como determinante de las variaciones en el NGP bajo diferentes rangos de TCP_{pc} en ambas fechas de siembra.

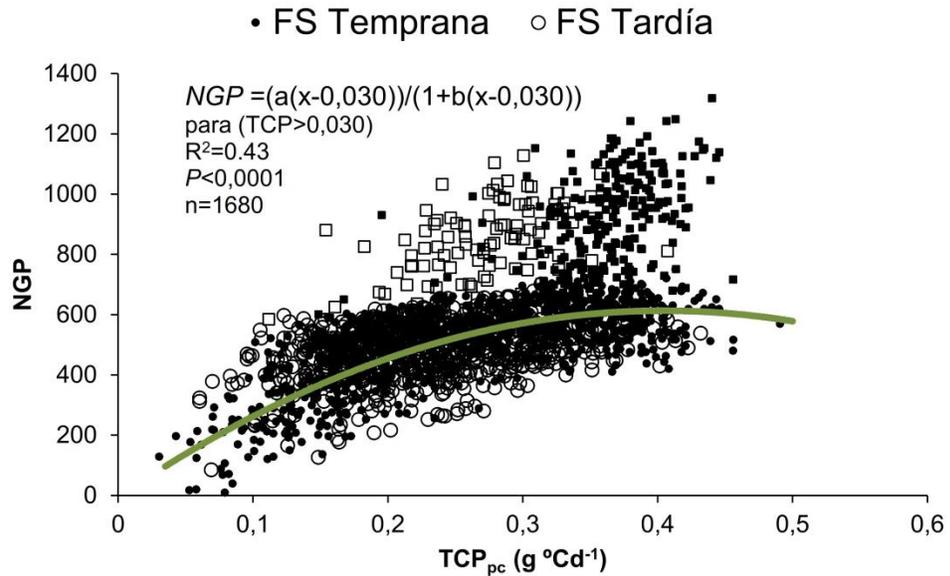


Fig. 4.1. Número de granos por planta (NGP) en función de la tasa de crecimiento por planta alrededor de floración ($R1 \pm 15d$; TCP_{pc}) para individuos sembrados en fecha temprana (símbolos cerrados) y tardía (símbolos abiertos). Los símbolos cuadrados representan los individuos que fijaron granos en espigas secundarias en ambas fechas de siembra (llenos temprana, vacíos tardía). La línea continua verde representa la función ajustada a los granos de la espiga primaria en ambas fechas de siembra. Se muestra el set de datos completo en dos experimentos (2014-15 y 2015-16; Exp1 y Exp2, respectivamente) realizados en Paraná (Lat. $31,8^\circ$ S), Argentina.

La TCP_{pc} se relacionó positivamente con lecturas SPAD en hoja 12 a $R1$ en ambas fechas de siembra (Fig. 4.2a). Sin embargo, los incrementos en TCP_{pc} por unidad de incremento en la lectura SPAD fueron superiores ($>$ pendiente, $P < 0,0001$) y con un mayor ajuste en siembras tempranas que en las tardías ($R^2 = 0,59$ vs. $0,18$, respectivamente).

El NGP además se relacionó positivamente con las lecturas SPAD en hoja 12 a $R1$ en ambas fechas de siembra (Fig. 4.2b). Una única función curvilínea fue ajustada ($R^2 = 0,45$; $P < 0,0001$) para la relación entre lecturas SPAD y el número de granos por planta en espiga primaria para ambas fechas de siembra. Los individuos de siembras tardías presentaron un estatus N levemente mayor a los de siembras tempranas (Cuadro 2 anexo). Sin embargo, a un estatus N dado, los individuos de siembras tempranas fijaron mayor NGP que los de siembras tardías (en promedio, 574 vs. 528 NGP, respectivamente).

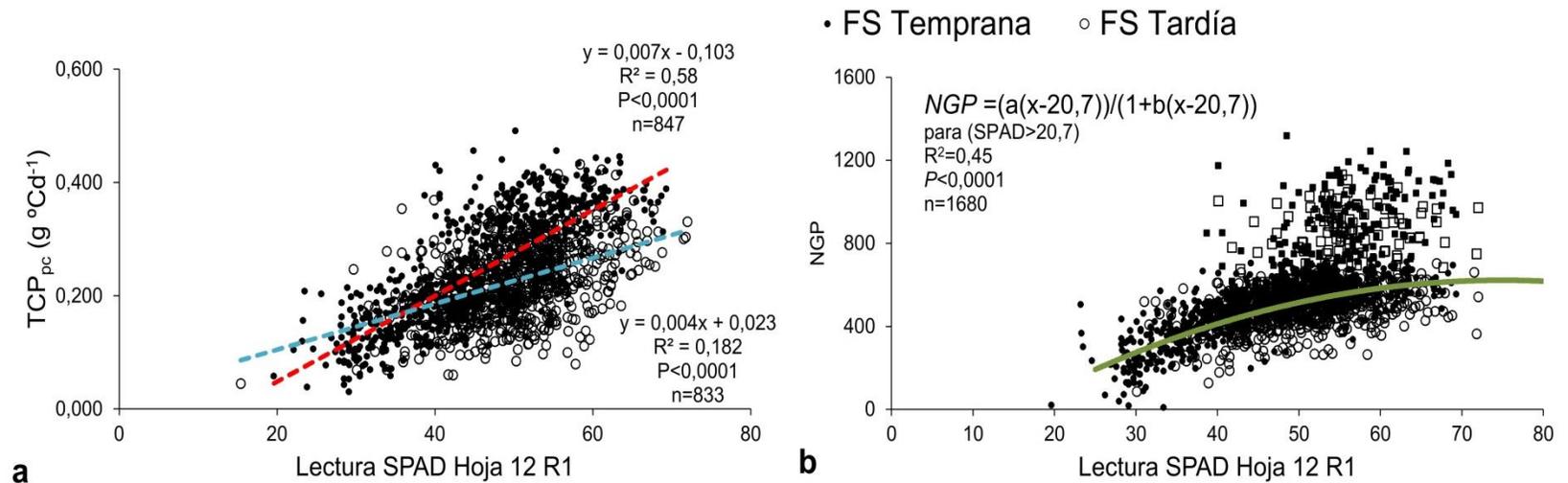


Fig. 4.2. Tasa de crecimiento por planta alrededor de floración ($R1 \pm 15d$; TCP_{pc}) (a) y número de granos por planta (NGP) (b) en función de las lecturas SPAD en hoja 12 a R1 para individuos sembrados en fechas tempranas (símbolos cerrados) y tardías (símbolos abiertos). Las líneas cortadas roja y azul representan la función ajustada al set de datos de las plantas en siembras tempranas y tardías, respectivamente. La línea continua verde representa la función ajustada al número de granos de la espiga primaria para ambas fechas de siembra. Los símbolos cuadrados representan los individuos que fijaron granos en espigas secundarias en ambas fechas de siembra (llenos temprana, vacíos tardía). Se muestra el set de datos completo en dos experimentos (2014-15 y 2015-16; Exp1 y Exp2, respectivamente) realizados en Paraná (Lat. $31,8^\circ S$), Argentina.

4.3.3. Eficiencia de fijación de granos, número de granos por planta y prolificidad bajo diferentes rangos de TCP_{pc} y estatus N alrededor de floración

En promedio, para set de datos completo, la EF_g no difirió entre fechas de siembra ($P > 0,05$; Cuadro 2 anexo). Sin embargo, cuando la EF_g fue comparada bajo diferentes rangos de TCP_{pc} se observaron diferencias significativas entre fechas de siembra (Fig. 4.3a). En el rango de baja TCP_{pc}, la EF_g fue mayor en maíces tardíos comparado con los tempranos ($P < 0,0001$), mientras que en el rango superior ocurrió lo opuesto ($P < 0,0001$) (Fig. 4.3a). Por otra parte, las lecturas SPAD en hoja 12 a R1 (estatus N por planta) fueron mayores en maíces tardíos que en tempranos cuando la TCP_{pc} fue baja e intermedia ($P < 0,0001$). Sin embargo, en altas TCP_{pc} no se observaron diferencias en el estatus N por planta entre fechas de siembra ($P > 0,05$) (Fig. 4.3b).

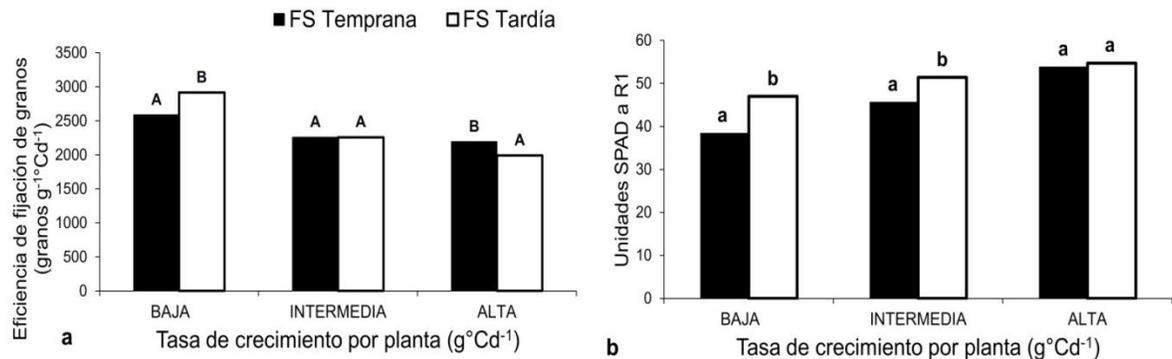


Fig. 4.3. Eficiencia de fijación de granos (a) y unidades SPAD en hoja 12 a R1 (b) en función de rangos de baja ($< 0,20 \text{ g } ^\circ\text{Cd}^{-1}$), intermedia ($0,20\text{-}0,28 \text{ g } ^\circ\text{Cd}^{-1}$) y alta ($> 0,28 \text{ g } ^\circ\text{Cd}^{-1}$) tasa de crecimiento por planta alrededor de floración ($R1 \pm 15$ días) en fechas de siembra temprana y tardía. Los experimentos (2014-15 y 2015-16; Exp1 y Exp2, respectivamente) fueron realizados en Paraná (Lat. $31,8^\circ \text{ S}$), Argentina.

En la Fig. 4.4 se muestran las frecuencias relativas del NGP para ambas fechas de siembra y diferentes niveles de estatus N y TCP_{pc}. Independientemente de la fecha de siembra, el NGP se incrementó en función de aumentos en la TCP_{pc} (en promedio, 418, 534 y 730 NGP para bajo, intermedio y alto rango de TCP_{pc}, respectivamente; Cuadro 2 anexo). La respuesta en el NGP ante cambios incrementos en el rango de estatus N fue mayor en baja que en intermedia y alta TCP_{pc} en ambas fechas de siembra (en promedio, 141 NGP para bajo rango de TCP_{pc} vs. 81 y 106 NGP para intermedio y alto rango de TCP_{pc}, respectivamente; Cuadro 2 anexo).

El efecto de la densidad de plantas y la dosis de N sobre el estatus N y TCP_{pc} fue similar entre ambas fechas de siembra cuando se analizó la combinación de baja TCP_{pc} con bajo estatus N (61 - 60% plantas correspondientes a 0N y 56 - 60% plantas correspondientes a 9 pl m⁻² en siembras tempranas y tardías, respectivamente) (Cuadros anidados en Fig. 4.4a-b). Por otra parte, en la combinación opuesta (alta TCP_{pc} con alto estatus N), ambas fechas de siembra difirieron en la proporción de individuos representados por los factores densidad de plantas y dosis de N. En siembras tempranas, la proporción de individuos que determinaron una alta TCP_{pc} con alto estatus N fueron similares entre los niveles más comúnmente determinantes de estos factores, *i.e.* alta dosis (270N, 53%) y baja densidad (5 pl m⁻², 61%) (Cuadro anidado en Fig. 4.4e). Contrariamente, en siembras

tardías, bajo la misma combinación, un 51% de los individuos perteneció al tratamiento de 270N, mientras que un 79% perteneció al tratamiento de 5 pl m⁻² (Cuadro anidado en Fig. 4.4f). Notablemente, en ambas fechas de siembra, bajo la combinación de baja TCP_{pc} con bajo estatus N, la densidad de plantas fue el factor más influyente, especialmente en siembras tardías.

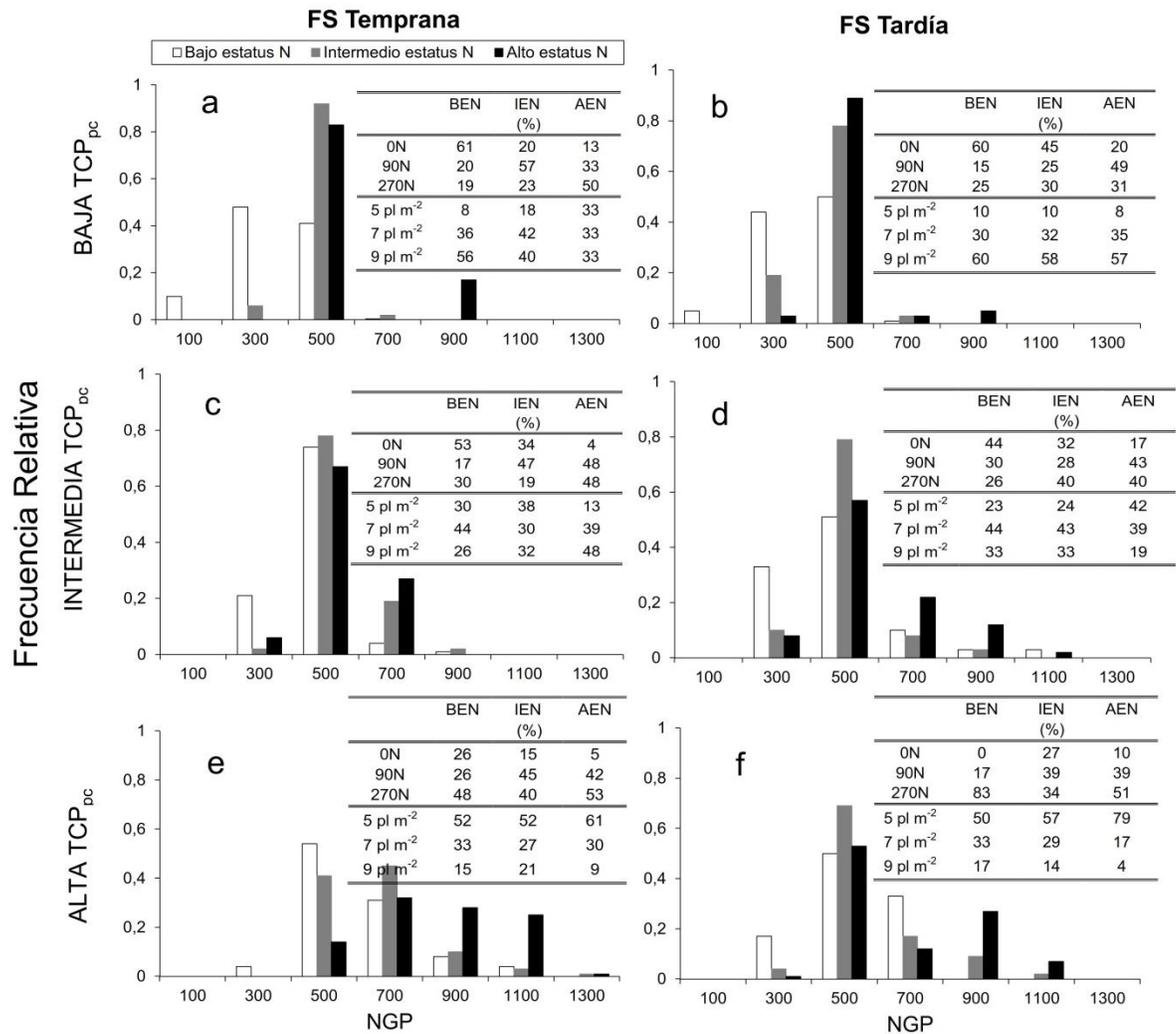


Fig. 4.4. Frecuencia relativa del número de granos por planta (NGP) en función de rangos de baja (<0,20 g °Cd⁻¹) (a-b), intermedia (0,20-0,28 g °Cd⁻¹) (c-d) y alta (>0,28 g °Cd⁻¹) (e-f) tasa de crecimiento por planta alrededor de floración (R1±15d; TCP_{pc}), en fechas de siembra temprana (a-c-e) y tardía (b-d-f) y rangos de bajo (lectura SPAD a R1<45; BEN), intermedio (lectura SPAD a R1 entre 45 y 52,4; IEN) y alto (lectura SPAD a R1>52,4; AEN) estatus N de la planta. Los cuadros anidados en cada combinación de fecha de siembra y rango de TCP_{pc} muestran las frecuencias relativas correspondientes a los tratamientos evaluados en función de rangos de bajo, intermedio y alto estatus N (lectura SPAD en hoja 12 a R1) de la planta. Los experimentos (2014-15 y 2015-16; Exp1 y Exp2, respectivamente) fueron realizados en Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina.

La proporción de individuos que fijaron granos en espigas secundarias se incrementó en función del aumento en la TCP_{pc}, especialmente en fechas de siembra

tempranas (Fig.4.5). La respuesta en prolificidad en función de incrementos en el estatus N de la planta fue mayor en rangos de alta TCP_{pc} y en fechas de siembra tempranas respecto a bajas TCP_{pc} y siembras tardías.

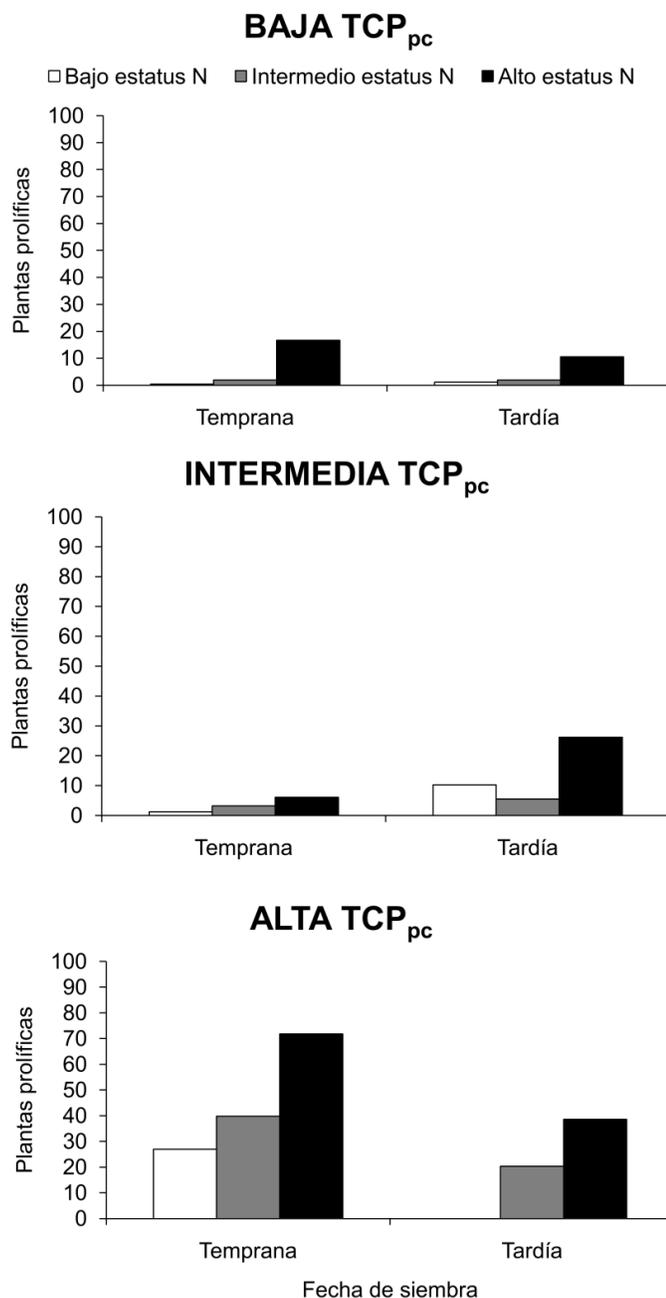


Fig. 4.5. Plantas prolíficas (%) en función de rangos de baja ($<0,20 \text{ g } ^\circ\text{Cd}^{-1}$), intermedia ($0,20-0,28 \text{ g } ^\circ\text{Cd}^{-1}$) y alta ($>0,28 \text{ g } ^\circ\text{Cd}^{-1}$) tasa de crecimiento por planta alrededor de floración ($R1 \pm 15d$; TCP_{pc}), en fechas de siembra temprana y tardía y rangos de bajo (lectura SPAD a $R1 < 45$), intermedio (lectura SPAD a $R1$ entre 45 y 52,4) y alto (lectura SPAD a $R1 > 52,4$) estatus N de la planta. Los experimentos (2014-15 y 2015-16; Exp1 y Exp2, respectivamente) fueron realizados en Paraná (Lat. $31,8^\circ \text{ S}$), Argentina.

4.3.4. Relación entre la eficiencia de uso de N para producir granos a escala de cultivo y componentes ecofisiológicos a escala de planta individual

En ambas fechas de siembra, la primera función canónica (EC1) del análisis discriminante (AD) fue la que explicó la mayor parte de las variaciones totales (más del 95 y 92% en maíces tempranos y tardíos, respectivamente, $P < 0,0001$; Fig.4.6), por lo cual solo con una función discriminante podemos discriminar los grupos de bajo, intermedio y alto estatus N por planta. La tasa de error aparente de mala clasificación registrada en cada uno de los modelos fue levemente diferente entre fechas de siembra (30 y 36% de error en siembras tempranas y tardías, respectivamente). En ambas fechas de siembra, los mayores errores de clasificación fueron provocados principalmente por clasificaciones erróneas de individuos de intermedio y alto estatus N. La tasa de clasificaciones erróneas en el AD surge a partir de que el modelo confunde la discriminación entre grupos con diferente estatus N, especialmente cuando se trata de plantas de estatus N intermedio que probablemente podrían ser similares a individuos de bajo o alto estatus N, ya que existe variabilidad interna en el estatus N de los individuos agrupados dentro de cada grupo.

En siembras tempranas, la EUN_g se correlacionó positivamente con la TCP_{pc} y la EF_g y en menor medida con la proporción de plantas prolíficas, mientras que no hubo correlación con el NGP. Además, la EUN_g se asoció principalmente con plantas de intermedio y alto estatus N (Fig. 4.6a). Contrariamente, en siembras tardías, la EUN_g se correlacionó positivamente con el NGP y la TCP_{pc} , y negativamente con la EF_g y la proporción de plantas prolíficas. Asimismo, las mayores EUN_g se asociaron principalmente con el grupo de plantas con intermedio estatus N (Fig. 4.6b).

El Cuadro 4.1 muestra el peso con que cada variable evaluada en el AD permitió diferenciar los grupos de estatus N por planta previamente establecidos en ambas fechas de siembra. En ambas fechas de siembra la TCP_{pc} fue la variable que mayor peso tuvo en separar los grupos de plantas con diferente estatus N a lo largo del EC1, y el peso de esta variable fue considerablemente mayor en siembras tempranas que en tardías (1,14 vs. 0,72). Además, el NGP pesó también positivamente sobre EC1 en siembras tardías (1,12). La EF_g permitió principalmente separar a lo largo del EC2 los grupos de plantas con alto e intermedio estatus N en siembras tardías.

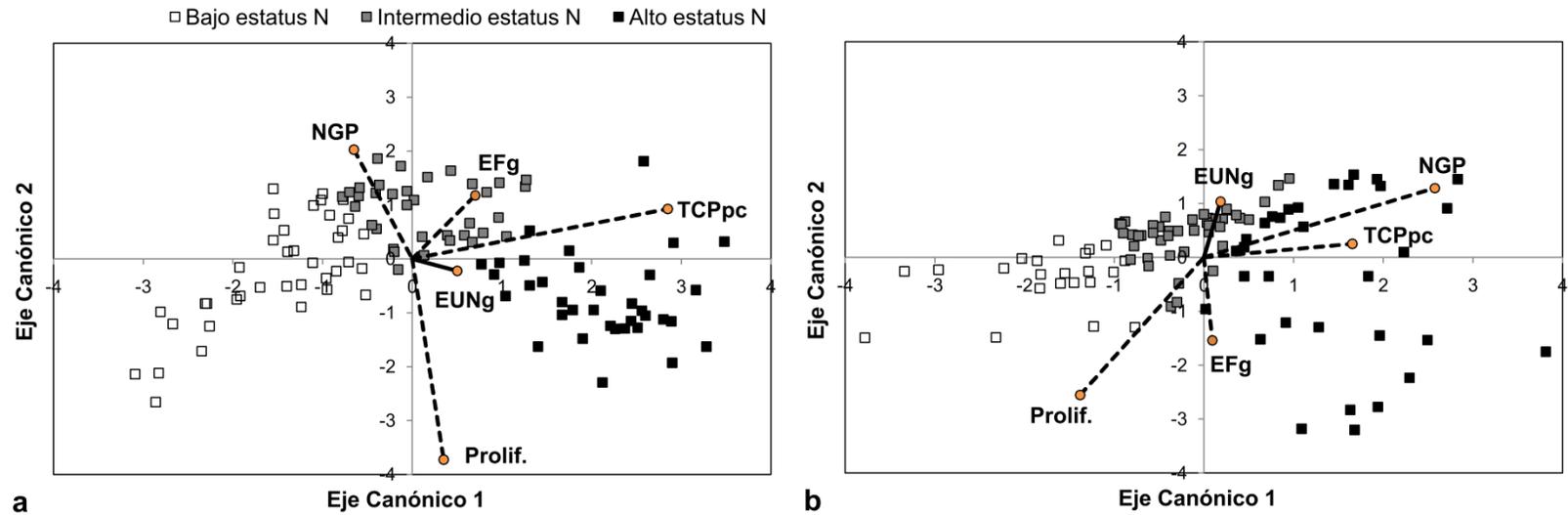


Fig. 4.6. Análisis discriminante (AD) para diferentes rangos de bajo (lectura SPAD a $R1 < 45,6$), intermedio (lectura SPAD a $R1$ entre 45,6 y 52,1) y alto (lectura SPAD a $R1 > 52,1$) estatus N de la planta en siembras tempranas (a) y tardías (b) de maíz. Los vectores con líneas punteadas representan variables ecofisiológicas a escala de planta [número de granos por planta (NGP), tasa de crecimiento por planta en periodo crítico (TCP_{pc}), eficiencia de fijación de granos por planta (EF_g) y porcentaje de individuos prolíficos (Prolif.)] y el vector con línea continua representa la variable a escala de cultivo [eficiencia de uso de N para producir granos (EUN_g)]. Los experimentos (2014-15 y 2015-16; Exp1 y Exp2, respectivamente) fueron realizados en Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina.

Cuadro 4.1. Funciones discriminantes EC1 y EC2 para todas las variables incluidas en el análisis discriminante (AD) en fechas de siembra temprana y tardía correspondiente a la Fig. 4.6. Los experimentos (2014-15 y 2015-16; Exp1 y Exp2, respectivamente) fueron realizados en Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina.

	FS Temprana		FS Tardía	
	EC1	EC2	EC1	EC2
EUN _g (kg grano kg N _d ⁻¹)	0,20	-0,09	0,08	0,45
Prolif. (%)	0,14	-1,49	-0,60	-1,11
EF _g (NGP TCP _{pc} ⁻¹)	0,28	0,47	0,04	-0,57
TCP _{pc} (g °Cd ⁻¹)	1,14	0,37	0,72	0,11
NGP	-0,26	0,81	1,12	0,56

4.4. Discusión

El presente capítulo se focalizó en estudiar las variables eco-fisiológicas del maíz a escala de planta, que principalmente definen el Rto y su relación con la EUN_g a escala de cultivo. En efecto, con el estudio bajo diferentes escalas de análisis se espera poder contribuir a explicar más detalladamente la menor EUN_g observada previamente a escala de cultivo cuando la fecha de siembra es retrasada (Capítulos 2 y 3). La relación entre el NGP y la TCP_{pc} ha sido uno de los enfoques mayormente estudiados a escala de planta en maíz, ya que permite evaluar detalladamente el NGP por unidad de TCP_{pc}, *i.e.* la EF_g, lo que resulta muy útil para explicar la relación entre ambiente y Rto a escala cultivo. Sin embargo, la gran variabilidad reportada en el NGP y la EF_g a una TCP_{pc} dada genera interrogantes en torno a la intervención de otras variables explicativas, como el estatus N por planta (D`Andrea et al., 2006). En efecto, en base al enfoque utilizado previamente por Echarte et al. (2004), se propuso un marco de análisis novedoso que permitió comparar el NGP y la EF_g bajo diferentes rangos de TCP_{pc} y estatus N de la planta en siembras tempranas y tardías. Los resultados obtenidos concuerdan con los reportados por D`Andrea et al. (2006), quienes informaron efectos directos de la disponibilidad de N (N_d) sobre la determinación del NGP y su partición, *i.e.* EF_g, no sólo definidos por cambios en la TCP_{pc}. A su vez, Below et al. (2000) también reportaron efectos directos sobre el NGP asociados a condiciones de estrés por N. Adicionalmente, las variaciones en el N_d por planta dado por la fecha de siembra, la densidad de plantas y la dosis de fertilización con N afectaron el estatus N de las plantas y por lo tanto su TCP_{pc}. En este sentido, los menores incrementos de TCP_{pc} por unidad de cambio de lecturas de SPAD a R1 (<pendiente) detectado en siembras tardías (0,004 g °Cd⁻¹ por unidad de incremento en valor SPAD) comparado con las tempranas (0,007 g °Cd⁻¹ por unidad de incremento en valor SPAD) (Fig. 4.2a), podrían deberse principalmente al mayor estatus N alcanzado por los maíces tardíos en rangos bajos e intermedios de TCP_{pc} (Fig. 4.3b) y particularmente en los tratamientos control sin N (0N) (en promedio, 47,3 vs. 40,1 unidades SPAD en siembras tardías y tempranas, respectivamente; P<0,0001) o grupos de bajo estatus N y baja TCP_{pc} (40 vs. 36 unidades SPAD en siembras tardías y tempranas, respectivamente; Cuadro 2 anexo). Adicionalmente, aunque la temperatura media durante el periodo crítico fue similar en ambas fechas de siembra (24,9 y 23,5°C en maíces tempranos y tardíos, respectivamente; Fig. 2.1), los menores niveles de radiación solar registrados en maíces tardíos respecto a los tempranos (616 vs. 691 MJ m⁻² acumulados, respectivamente; Fig. 2.1) podrían explicar las variaciones de TCP_{pc} observadas. En consecuencia, estos resultados contribuyen a explicar

el menor número de granos y menor Rto por unidad de área en maíces tardíos respecto a los tempranos reportados previamente en los Capítulos 2 y 3.

La mayoría de los trabajos previos han estudiado los diferentes tipos de respuesta del NGP ante cambios en la TCP_{pc} en líneas e híbridos liberados en distintas eras (Echarte et al., 2004; D'Andrea et al., 2006, D'Andrea et al., 2008). Sin embargo, hasta la fecha, resulta escaso el conocimiento en torno al NGP fijados por unidad de TCP_{pc} (*i.e.* la EF_g) ante cambios en el estatus N y diferentes rangos de TCP_{pc} , dado por efectos combinados de la densidad de plantas y dosis de fertilización con N en fechas de siembra temprana y tardía. En este sentido, a pesar de las condiciones fototermales más restrictivas reportadas durante el periodo reproductivo en siembras tardías (Capítulo 2 y 3), la EF_g fue *ca.* 11% mayor a la de siembras tempranas en rangos de bajas TCP_{pc} (Fig. 4.3a), lo cual estuvo parcialmente asociado a un mejor estatus N de la planta (Fig. 4.3b), y a un incremento proporcionalmente mayor del NGP (Fig. 4.4). Sin embargo, en rangos de intermedia y alta TCP_{pc} , ambas fechas de siembra no difirieron o los maíces tempranos tuvieron mayor EF_g pero sin un mayor estatus N de las plantas (Fig. 4.3a-b). Esto puede explicarse a través de la mayor respuesta en el NGP frente a cambios en el estatus N de los maíces tempranos respecto a los tardíos, particularmente en rangos de alta TCP_{pc} (Fig.4.4). Estos resultados sugieren que en rangos de bajas TCP_{pc} , el N_{av} fue el factor que principalmente limitó el NGP en siembras tempranas, mientras que en rangos de altas TCP_{pc} , los niveles de radiación solar fueron los que principalmente limitaron el NGP en siembras tardías. Además, la mayor EF_g detectada en maíces tempranos en rangos de altas TCP_{pc} respecto a los tardíos, se debió a la mayor proporción de individuos que fijaron granos en espigas secundarias (46 vs. 20% pl prolíficas en siembras tempranas y tardías, respectivamente), y a la mayor respuesta de este rasgo ante la mejora en el estatus N de la planta (Fig.4.5).

Por otra parte, surgen interrogantes en torno a los efectos diferenciales de la densidad de plantas y la dosis de fertilización con N que determinan cambios en los diferentes rangos de TCP_{pc} y estatus N explorados. Por lo tanto, para cada combinación de rangos de TCP_{pc} y estatus N a R1 pudo evaluarse el peso del efecto de las prácticas de manejo (densidad de plantas y dosis de fertilización con N) cuantificando la proporción de individuos en cada tratamiento por fecha de siembra (Fig.4.4). Teniendo en cuenta la condición más restrictiva (baja TCP_{pc} con bajo estatus N), el mayor efecto de la dosis de N comparado con la densidad de plantas observado en ambas fechas de siembra puede estar asociado al mejoramiento genético de los genotipos utilizados en este estudio, los cuales tienen una alta capacidad de fijar granos en condiciones de una alta población de plantas, *i.e.* mayor tolerancia al estrés por densidad (Tollenaar y Lee, 2002). Contrariamente, la densidad de plantas fue el factor que más peso tuvo sobre NGP y EF_g en condiciones de alta TCP_{pc} con alto estatus N, especialmente en siembras tardías, indicando una exacerbación del estrés por luz en condiciones de alta densidad y desarrollo vegetativo (Razquin, 2018). Este comportamiento puede estar asociado a la menor respuesta tanto en TCP_{pc} (Fig.4.2a) como en el NGP (Fig.4.4) ante cambios en el estatus N observado en los maíces tardíos respecto a los tempranos. Estos resultados, reafirman la utilidad del análisis particionado por rangos de TCP_{pc} y estatus N de la planta, dando cuenta de las variaciones en el NGP y por lo tanto de la EF_g en fechas de siembra contrastantes.

El análisis discriminante (AD) permitió vincular las escalas de análisis a escala de planta y cultivo, evaluadas a través de los componentes eco-fisiológicos (TCP_{pc} , NGP, Prolif., EF_g) y la EUN_g (Fig. 4.6), respectivamente. En siembras tempranas, la mayor correlación de la EUN_g con la TCP_{pc} y la EF_g (Fig. 4.6a) puede asociarse en parte a la

mayor proporción de plantas prolíficas comparado con siembras tardías, pero particularmente a la alta expresión de este carácter cuando el estatus N de la planta se incrementó en maíces tempranos, sobretodo en rangos de altas TCP ($>0,28 \text{ g } ^\circ\text{Cd}^{-1}$; Fig. 4.5; Ver Cuadro anexo 2). Contrariamente, el efecto negativo de la baja proporción de plantas prolíficas y la EF_g sobre la EUN_g detectado en siembras tardías, podría asociarse con plantas que recibieron tratamientos con alta dosis de fertilización (270N) y/o baja densidad de siembra (5 pl m^{-2}) pero que no lograron altos Rtos de grano a escala de cultivo. Finalmente, en siembras tempranas, la EUN_g se asoció con plantas de intermedio y alto estatus N, mientras que en siembras tardías sólo fue asociada con plantas de estatus N intermedio. Estos resultados evidencian mecanismos diferentes entre fechas de siembra que determinan cambios en el estatus N por planta y por lo tanto en la EUN_g a escala de cultivo. En efecto, la adecuada combinación de prácticas de manejo agronómicas como la optimización de la densidad de siembra y la dosis de fertilización con N (Capítulo 3) resultan herramientas promisorias en orden de generar plantas con un estatus N óptimo según la fecha de siembra, que maximicen la TCP_{pc} y contribuyan a mejorar la menor EUN_g informada a escala de cultivo en maíces de siembra tardía (Capítulos 2 y 3).

4.5. Conclusiones

El NGP logrado por unidad de TCP_{pc} , *i.e.* la EF_g , fue similar entre fechas de siembra para el rango total de TCP_{pc} explorada. Sin embargo, el marco de análisis basado en rangos de TCP_{pc} y estatus N por planta permitió detectar una mayor EF_g y estatus N de los maíces tardíos en rangos de baja TCP_{pc} , mientras que los maíces tempranos tuvieron mayores EF_g en rangos de TCP_{pc} superiores pero sin diferencias en el estatus N respecto a los tardíos. La mayor EF_g lograda por los maíces tempranos en rangos de alta TCP_{pc} fue principalmente asociada a i) una mayor respuesta en el NGP ante incrementos en el estatus N, ii) una mayor proporción de individuos que fijaron granos en espigas secundarias ($>$ prolificidad) y iii) los mayores niveles de radiación solar registrados durante el periodo crítico respecto a los maíces de siembra tardía.

Finalmente, el AD permitió evidenciar diferentes mecanismos eco-fisiológicos a escala de planta entre fechas de siembra, los cuales se asociaron diferencialmente con la EUN_g a escala de cultivo. En siembras tempranas, la EUN_g se asoció positivamente con la TCP_{pc} , la EF_g y con plantas de intermedio y alto estatus N. Contrariamente, en siembras tardías, la EUN_g fue más correlacionada con el NGP, la TCP_{pc} y tuvo una mayor asociación con plantas de intermedio estatus N.

4.6. Relación de los resultados con las hipótesis planteadas

En el presente Capítulo, se puso a prueba la hipótesis iii (*Los maíces de siembra temprana presentan mayor TCP_{pc} frente a incrementos en el estatus N que los de siembra tardía debido a la mejora en el ambiente foto-termal alrededor de floración. En consecuencia, resulta mayor el NGP, la EF_g y la EUN_g de los maíces tempranos respecto a los de siembra tardía*). En este sentido, parte de las variaciones reportadas en el NGP a una TCP_{pc} dada, podrían ser parcialmente explicadas por diferencias en el estatus nitrogenado (estatus N) de las plantas y el ambiente foto-termal (principalmente radiación solar) en el cual crecen las plantas durante el periodo crítico, los cuales están dados por cambios en la fecha de siembra, densidad de plantas y dosis de fertilización con N utilizadas comúnmente en la región Pampeana Argentina. Adicionalmente, el análisis particionado por rangos de TCP_{pc} y estatus N podría contribuir a detectar diferencias en algunos de los componentes

eco-fisiológicos más importantes a escala de planta individual, *i.e.* NGP, EF_g , prolificidad, en fechas de siembra contrastantes. Por lo tanto, la hipótesis iii no fue rechazada, ya que la respuesta de la TCP_{pc} a los incrementos en el estatus N de las plantas fue mayor en siembras tempranas que en tardías (Fig. 4.2a). Adicionalmente, el análisis por rangos de estatus N y TCP_{pc} permitió explicar parcialmente las diferencias observadas en el NGP, la TCP_{pc} , la EF_g y la prolificidad entre fechas de siembra temprana y tardía (Figs. 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5).

Finalmente, se propuso utilizar la escala a escala de planta individual como una herramienta que permitiera poder explicar los cambios observados a escala de cultivo en los Capítulos 2 y 3. En este sentido, el AD permitió vincular las escalas a escala de planta y cultivo, dando cuenta de los mecanismos eco-fisiológicos a escala de planta que contribuyeron a explicar las variaciones de la EUN_g a escala de cultivo en fechas de siembra tempranas y tardías (Fig. 4.6 y Cuadro 4.1). Por lo tanto, la hipótesis iii no fue rechazada.

Capítulo 5: Discusión general y Conclusiones

En el presente capítulo se analiza los resultados más relevantes de la tesis en orden de definir el cumplimiento de las hipótesis y objetivos planteados. Por otra parte, se discuten los aportes novedosos de la tesis al conocimiento y sus alcances para futuras líneas de investigación. Finalmente, se evalúa la contribución de los resultados obtenidos para la toma de decisiones de manejo agronómicas y el diseño de esquemas productivos de maíz más sustentables desde el punto de vista del uso eficiente del N.

5.1. Análisis global de los resultados obtenidos

En las últimas décadas, la amplia adopción de siembras tardías (Diciembre-Enero) de maíz en la región Pampeana Argentina (más del 45% del área sembrada) (BCBA, 2018), ha llevado al cultivo a explorar ambientes muy diferentes al de siembras tempranas (Septiembre-October), especialmente desde el punto de vista hídrico, nutricional, sanitario y fototermal (Capítulo 1). Estas condiciones generan interrogantes en torno a la eficiencia de estos sistemas de siembra tardía, particularmente sobre la EUN_g , debido a que presentan un menor Rto alcanzable y crecen con mayores niveles de N_d durante el ciclo de cultivo respecto a los maíces de siembras tempranas (Capítulo 2).

La EUN_g y sus componentes ($E_{abs}N$, $E_{ut}N_g$) (Moll et al., 1982) han resultado una herramienta útil para cuantificar la economía del N en fechas de siembra contrastantes. Sin embargo, la mayoría de los estudios se han centrado en sus componentes en maíces bajo fechas de siembra óptimas (Moll et al., 1982; Ciampitti et al., 2012; Chen et al., 2015; Mueller and Vyn, 2016). Por lo tanto, resultó relevante enfocar esta tesis en el contraste entre fechas de siembras tempranas y tardías, analizando en particular el efecto de las prácticas de manejo agronómico sobre la EUN_g y sus componentes, de aquellas prácticas sobre las cuáles surgen incertidumbres al pasar de una fecha temprana a una tardía (densidad de siembra, genotipos y dosis de fertilización con N).

Numerosos estudios han evaluado la EUN_g y su ganancia genética bajo amplias condiciones de manejo agronómico (densidad de siembra y dosis de fertilización con N) en fechas de siembra óptimas (Ciampitti y Vyn, 2012; Haegele et al., 2013; Mueller y Vyn, 2016). Sin embargo, estos hallazgos, podrían no ser extrapolables a cultivos de maíz de siembra tardía, debido a las contrastantes condiciones ambientales durante los períodos pre- y post-floración. Un hallazgo novedoso informado en el Capítulo 2, fue la reducción de la EUN_g con el atraso en la fecha de siembra, debido a la menor $E_{ut}N_g$ (Cuadro 2.3), dada por reducciones en el Rto, mayores niveles de N_d y una mayor fuente de N post-floración por grano comparado con maíces de siembra temprana (Cuadro 2.2 y Fig. 2.13c). Estos resultados condujeron a no rechazar la hipótesis i (*La EUN_g de los maíces tardíos resulta menor a la de los tempranos debido al menor Rto alcanzado y al incremento en los niveles de N_d dado por el atraso en la fecha de siembra*). A su vez, el análisis particionado del N_{abs} total durante los períodos vegetativos y reproductivos (N_{abspre} y $N_{abspost}$) (Capítulo 2), permitió identificar al N_{abspre} como un componente relevante en la determinación de la $E_{abs}N$ (Fig. 2.9a).

Algunas prácticas agronómicas, como la densidad de las plantas, la fertilización con N o el genotipo, podrían ayudar a mantener un alto nivel de EUN_g cuando la fecha de siembra de maíz se retrasa considerablemente. Se ha reportado que, en los maíces tempranos, más

del 60% del N_{abs} total se acumula durante el período pre-floración (Lemaire et al., 2008; Ciampitti et al., 2013; Haegele et al., 2013) y las altas densidades de plantas podrían aumentar la absorción temprana de N (N_{abspre}) a través de una mayor producción de biomasa (Ciampitti et al. 2013). Sin embargo, hasta el momento, no se conocían estudios que comparen el efecto de la densidad de plantas sobre el N_{abs} total, N_{abspre} y N_{abspost} de maíces en siembras tempranas y tardías, y el efecto sobre la EUN_g y sus componentes. En consecuencia, en el Capítulo 3 fue puesta a prueba la hipótesis ii “*La adecuada combinación de prácticas de manejo agronómicas, como incrementos en la densidad de plantas, optimización de la dosis de fertilización con N y elección de genotipos con alto IC maximizan la EUN_g en maíces de siembra tardía*”. En efecto, se propuso evaluar combinaciones de prácticas de manejo agronómicas (densidad de siembra, genotipos y dosis de fertilización con N) en orden de mejorar la menor EUN_g documentada en siembras tardías (Capítulo 2). Aunque el incremento en la densidad de plantas *per se* no logró estabilizar la EUN_g y sus componentes ante el retraso en la fecha de siembra, este estudio permitió detectar interacciones significativas de fecha de siembra x densidad de plantas x dosis de N sobre la EUN_g y la E_{absN} (Fig. 3.7A-B-C-D), donde el efecto negativo de los incrementos en la dosis de fertilización con N fue atenuado parcialmente con aumentos en la densidad de plantas, especialmente en siembras tempranas. Finalmente, un hallazgo relevante del Capítulo 3, fue establecer combinaciones de prácticas de manejo agronómicas (densidad de siembra x genotipos x dosis de fertilización con N) que maximizaron la EUN_g y el Rto en cada fecha de siembra y Exp evaluado (año) a través de un análisis multivariado (análisis de componentes principales, ACP) (Fig. 3.9). Por lo tanto, estos resultados conducen a rechazar la hipótesis ii anteriormente mencionada, ya que no todos los factores se cumplieron en forma simultánea.

En esta tesis se incluyó también un análisis a escala de planta individual, a través de la relación curvilínea entre el NGP y la TCP_{pc} y el cociente entre estas dos variables, *i.e.* EF_g ($NGP \cdot TCP_{pc}^{-1}$), en orden a profundizar con más detalle el estudio de los cambios producidos por el ambiente (fecha de siembra x N_d x densidad de siembra) sobre la fijación de granos en maíz. Los antecedentes a esta tesis documentan que para un genotipo dado y un rango de TCP_{pc} similar, se verifica una alta variabilidad en el NGP (Fig. 4.1) y por lo tanto en la EF_g ($NGP \cdot TCP_{pc}^{-1}$) (Andrade et al., 1999; Vega et al., 2001; Echarte et al., 2004; Maddonni y Otegui, 2004; D`Andrea et al., 2006; Ciancio et al., 2016), lo cual podría parcialmente explicarse por diferencias en el estatus nitrogenado (estatus N) de las plantas. Este estatus N puede estar dado por cambios en la fecha de siembra, densidad de plantas y las dosis de fertilización con N comúnmente utilizadas en la región Pampeana Argentina. En consecuencia, en el Capítulo 4, se utilizó un marco de análisis basado en Echarte et al. (2004), donde se evaluaron las variaciones en la EF_g bajo diferentes rangos de TCP_{pc} y estatus N por planta contribuyendo a explicar la elevada variabilidad documentada en la EF_g .

Un hallazgo novedoso del Capítulo 4, fue la menor pendiente detectada en la relación entre la TCP_{pc} y el estatus N (lectura SPAD hoja 12 a R1) en maíces tardíos comparado con los tempranos (Fig. 4.2a), dado principalmente por un mayor estatus N de los tratamientos control sin N (0N) asociado a los mayores niveles de N_d (Cuadro 2.2) y por los menores niveles de radiación solar registrados durante el período crítico ante el atraso en la fecha de siembra (Fig. 2.1). Además, a un nivel dado de estatus N, los maíces tempranos fijaron un mayor NGP respecto a los tardíos (en promedio, 574 vs. 528 NGP; Cuadro 2 anexo),

especialmente en rangos de altos estatus N y TCP_{pc} (Figs. 4.2b y 4.4). Además, para los tres rangos de estatus N evaluados, las siembras tempranas tuvieron mayor TCP_{pc} que las tardías (en promedio, 0,35 vs. 0,32 g °Cd⁻¹; Fig.4.2a), lo cual explicaría en parte las variaciones en el NGP observadas. Por otra parte, el análisis particionado por rangos de TCP_{pc} y estatus N basado en Echarte et al. (2004), permitió explicar parcialmente la gran variabilidad en el NGP a una TCP_{pc} dada, la cual ha sido reportado previamente en numerosos estudios (Andrade et al., 1999; Vega et al., 2001; Echarte et al., 2004; Maddonni y Otegui, 2004; D`Andrea et al., 2006; Ciancio et al., 2016) y en esta tesis (Fig. 4.1). En rangos de bajas TCP_{pc} (<0,20 g °Cd⁻¹), los maíces tardíos tuvieron una mayor EF_g comparados con los tempranos, posiblemente asociado a un mayor estatus N a R1. Contrariamente, en rangos de altas TCP_{pc} (>0,28 g °Cd⁻¹), los maíces tempranos tuvieron mayor EF_g comparado con los tardíos pero sin diferencias detectables en el estatus N (Fig. 4.3a-b). Por lo tanto, bajo condiciones de altas TCP_{pc} , la mayor radiación solar registrada durante el periodo crítico de los maíces tempranos (Fig. 2.1) sería el factor que principalmente define el NGP. Estos resultados sugieren que en rangos de bajas TCP_{pc} , el N_{av} fue el factor que principalmente limitó el NGP en siembras tempranas, mientras que en rangos de altas TCP_{pc} , el nivel de radiación solar fue el que principalmente limitó el NGP en siembras tardías. Sin embargo, las respuestas en el NGP ante incrementos en el estatus N fueron mayores en rangos de bajas TCP_{pc} en ambas fechas de siembra (Fig. 4.4). En este sentido, el alto NGP fijado por unidad de TCP_{pc} , *i.e.* EF_g , detectado en maíces tempranos creciendo en rangos de altas TCP_{pc} (>0,28 g °Cd⁻¹), puede explicarse en parte, a la mayor proporción de plantas que fijaron granos en espigas secundarias bajo estas condiciones y especialmente a la mayor respuesta de los maíces tempranos respecto a los tardíos en la expresión de este carácter cuando el estatus N se incrementó (Fig. 4.5). En consecuencia, estos resultados conllevan a no rechazar la hipótesis iii (*Los maíces de siembra temprana presentan mayor TCP_{pc} frente a incrementos en el estatus N que los de siembra tardía debido a la mejora en el ambiente foto-termal alrededor de floración. En consecuencia, resulta mayor el NGP, la EF_g y la EUN_g de los maíces tempranos*).

Finalmente, el análisis multivariado permitió vincular las escalas a nivel de planta y cultivo, donde todas las variables eco-fisiológicas evaluadas (NGP, TCP_{pc} , EF_g , Prolificidad) fueron relacionadas con la EUN_g a escala de cultivo y asociadas a grupos de bajo, intermedio y alto estatus N (rangos de lectura SPAD a R1 de <45,6, 45-52,1 y >52,1, respectivamente; Fig. 4.6). En efecto, los resultados del Capítulo 4, sugieren que debe lograrse un estatus N óptimo según la fecha de siembra para lograr maximizar los mecanismos eco-fisiológicos que contribuyen en la determinación de la EUN_g a escala de cultivo. En este sentido, la optimización de prácticas de manejo agronómicas como la adecuada combinación de densidades de siembra y dosis de fertilización con N podrían determinar individuos con un estatus N que maximice la EUN_g en siembras tempranas y tardías de maíz, tal como lo reafirman los resultados del Capítulo 3.

5.1.1. Conclusión general

Mediante la utilización de un marco analítico apropiado, esta tesis contribuyó a profundizar el conocimiento de los mecanismos que regulan la EUN_g y sus componentes ($E_{abs}N$ y $E_{ut}N_g$) en fechas de siembra temprana y tardía de maíz. La Fig. 5.1 integra los

principales hallazgos detectados a nivel de cultivo y planta. En este sentido, el esquema a escala de cultivo muestra la menor EUN_g de los maíces tardíos comparado con los tempranos previamente informada en el Capítulo 2 y 3. Esta penalidad en la EUN_g dada por el atraso en la fecha de siembra fue conducida por menores R_{to} , menor $E_{ut}N_g$, menor IC , mayores niveles de N_d y una mayor fuente de N post-floración por unidad de grano comparado con siembras tempranas (Fig. 2.13c, Cuadro 2.2). Adicionalmente, se destacó la relevancia del N_{abspre} en la determinación de los niveles de la $E_{abs}N$ (Fig. 2.9a). Por otra parte, la Fig. 5.1 además muestra como a través de la interacción de $FS \times D \times N \times H$ informada en el Capítulo 3, se pueden lograr adecuadas combinaciones de prácticas de manejo agronómicas diferenciadas por fecha de siembra, como la optimización de la densidad de plantas y dosis de fertilización con N en conjunto con la elección del genotipo, que permiten maximizar tanto el R_{to} como la EUN_g en maíces tempranos y tardíos (Fig. 3.9).

El estudio a escala de planta individual en el Capítulo 4 permitió identificar los principales mecanismos eco-fisiológicos que contribuyeron a explicar los cambios observados en la EUN_g a escala de cultivo. En este sentido, la Fig. 5.1 muestra las relaciones directas entre los componentes a escala de planta y las asociaciones con variables a escala cultivo. En efecto, la mayor EF_g registrada en siembras tempranas en rangos de altas TCP_{pc} , dado por explorar ambientes con mayores niveles de radiación solar, resultó en incrementos proporcionalmente mayores en el NGP que en la TCP_{pc} (i.e. $>EF_g$) comparado con las siembras tardías (Fig. 4.3a), lo que podría explicar el mayor R_{to} y EUN_g registrado a escala de cultivo en los maíces tempranos (ver Capítulos 2 y 3). Adicionalmente, el mayor estatus N y EF_g de los maíces tardíos en rangos de baja TCP_{pc} respecto a los tempranos, puede asociarse a incrementos en los niveles de N_d a escala de cultivo registrados comúnmente ante el atraso de la fecha de siembra. Finalmente, en maíces tardíos, estas condiciones condujeron a menores incrementos en el estatus N y a una mayor penalidad sobre la EF_g cuando el nivel TCP_{pc} se incrementó, posiblemente determinando la menor EUN_g registrada a escala de cultivo, respecto a maíces de siembra temprana.

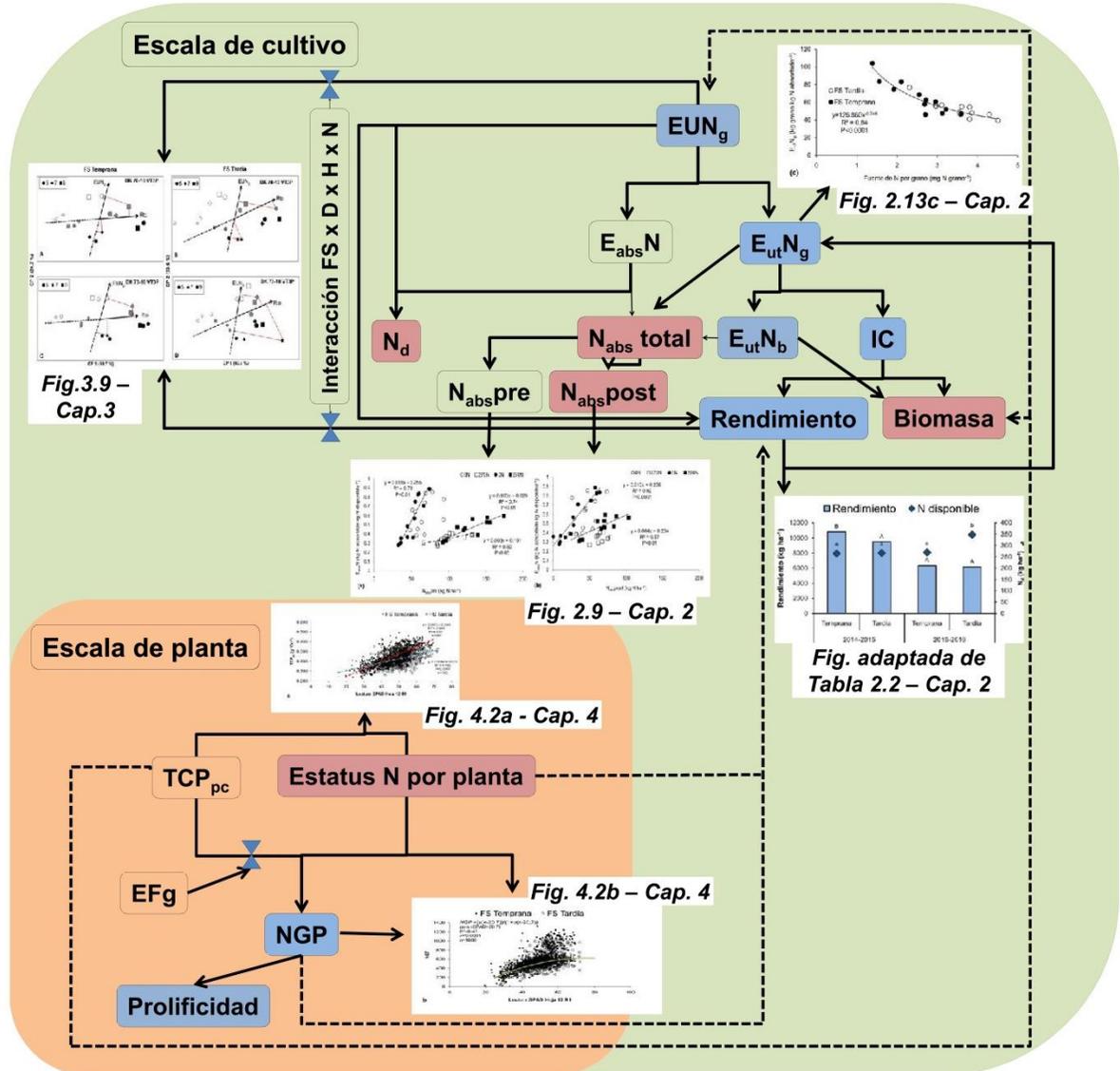


Fig. 5.1. Resumen general de los resultados obtenidos describiendo el marco de análisis en torno a la economía del N abordado en la tesis. Las cajas verde y naranja representan las escalas de estudio a nivel de cultivo (Capítulos 2 y 3) y a nivel de planta (Capítulo 4), respectivamente. Las líneas negras continuas representan relaciones directas entre las variables, mientras que las líneas cortadas indican relación entre variables a diferentes escalas de análisis. Las cajas llenas con fondo azul representan las variables que tuvieron valores medios mayores en siembras tempranas, mientras que las cajas llenas con fondo rojo las variables que mostraron valores medios mayores en siembras tardías. Las cajas vacías representan variables que no difirieron en sus valores medios para ambas fechas de siembra. Los experimentos (2014-15 y 2015-16; Exp1 y Exp2, respectivamente) fueron realizados en Paraná (Lat. 31,8° S), Argentina.

5.2. Alcances de la información obtenida

Los resultados obtenidos en el presente manuscrito contribuyen a profundizar el análisis de la economía del N en maíces de fechas de siembra tempranas y tardías de maíz, comúnmente realizadas en la región templada húmeda de la Argentina. El estudio de la economía del N en fechas de siembra temprana y tardía, evaluada a través de la EUN_g y sus componentes (E_{absN} , E_{utN_b} e IC), resulta relevante para diseñar esquemas de producción de maíz sustentables desde el punto de vista productivo y ambiental.

Más allá de haber documentado diferencias en la economía del N entre las fechas de siembra evaluadas (Capítulos 2 y 3), en este estudio se enfatizó sobre las alternativas de mejora EUN_g tanto en maíces tempranos como tardíos. Se destacó que la adecuada combinación de prácticas de manejo agronómicas diferenciadas por fechas de siembra, como la optimización de la densidad de plantas y dosis de fertilización con N en conjunto con la elección de genotipos apropiados, contribuyen a la mejora de la EUN_g a través del incremento en uno o ambos de sus componentes, *i.e.* E_{absN} , E_{utN_b} e IC (Capítulos 3 y 4).

Por otra parte, se pudieron establecer los principales mecanismos que regulan la EUN_g en ambas fechas de siembra. En este sentido, la optimización de la dosis de N y la densidad de plantas en conjunto con la selección de genotipos de alta respuesta del R_{to} al N_d resultó particularmente relevante para lograr obtener plantas con un estatus N intermedio, alto número de granos fijados, alta TCP_{pc} y una mayor EUN_g a escala de cultivo en maíces de siembra tardía.

Por otra parte, los resultados de esta tesis contribuyen al manejo de la fertilización con N en el cultivo de maíz, particularmente cuando se combina con otras prácticas de manejo agronómicas de importancia como la densidad de plantas y la fecha de siembra, buscando la optimización del manejo sobre variables relevantes como el R_{to} y la EUN_g .

Finalmente, parte de los resultados obtenidos en este estudio, podrían ser utilizados en programas de mejoramiento genético, seleccionando genotipos que presenten rasgos agronómicos adecuados a cada fecha de siembra, como por ejemplo IC, E_{utN_b} , E_{absN} , prolificidad, entre otros. Adicionalmente, el mayor conocimiento de los mecanismos que regulan la economía del N en ambas fechas de siembra podría contribuir al diseño de modelos de simulación agronómica, pudiendo extrapolar los resultados obtenidos a una escala regional, con una validación previa.

5.3. Vínculo con futuras líneas de investigación

Incorporación de genotipos contrastantes en rasgos relacionados con la EUN_g

Una limitante que tuvo esta tesis fue el escaso número de genotipos utilizados en el esquema experimental. En consecuencia, bajo el mismo marco de análisis planteado, los resultados obtenidos podrían ser de mayor alcance si se incorporase en futuros estudios un mayor número de genotipos caracterizados *a priori* como contrastantes en rasgos de importancia concernientes a la economía del N en siembras tempranas y tardías de maíz. En

efecto, como aporte relevante de esta tesis surge que los genotipos a evaluar contrasten particularmente en IC, $E_{ut}N_b$, $E_{abs}N$, y prolificidad.

Efecto de la densidad de plantas sobre estatus N del cultivo y sus implicancias agronómicas

Actualmente, existe una necesidad creciente de mejorar la economía del N para lograr agro-ecosistemas sostenibles (Caviglia et al., 2019). Por ejemplo, en algunos países de Asia, el N aplicado como fertilizante frecuentemente resulta mayor al requerimiento de N por parte del cultivo (Yang et al., 2014), mientras que en otros países, como Argentina, el balance de N en el suelo es negativo (Caviglia et al., 2019). El status nitrogenado del maíz resulta una herramienta útil para poder predecir la respuesta al fertilizante, desarrollar estrategias para manejar la nutrición y mejorar los modelos de simulación de cultivos (Gastal et al., 2015). Del mismo modo, conocer el status N del cultivo podría ayudar a optimizar el suministro de N con la demanda de N durante el ciclo del cultivo (Yang et al., 2014, Lemaire et al., 2008).

El efecto de las prácticas de manejo como la densidad de plantas, la fecha de siembra y la fertilización con N sobre las variables que definen el estatus N de la planta, como el N_d por planta y el N_{abs} por planta ha sido escasamente estudiado. Además, se desconoce el efecto de la densidad de plantas, dosis de fertilización con N y cambios en la fecha de siembra sobre la acumulación de N en distintos compartimentos de la planta, como hojas y tallos. En este sentido futuros trabajos podrían focalizarse en establecer umbrales de respuesta diferencial de N_d y N_{abs} por planta en función de la densidad de siembra a partir del estudio en torno a las relaciones entre estas variables.

Curva de dilución de N diferencial por fecha de siembra

La curva de dilución de N representa una reducción general en la concentración de N en la biomasa ($\%N_c$) a medida que aumenta la biomasa del cultivo (Plénet y Lemaire, 1999). Sin embargo, no se han estudiado en profundidad los efectos de las interacciones ambientales generadas a partir del atraso en la fecha de siembra sobre la localización del N en distintos compartimentos estructurales y metabólicos de la biomasa. En este sentido, el análisis de la literatura revela variaciones importantes en la relación hoja/tallo entre diversas fuentes de variación, lo que sugiere que la relación entre el N acumulado en hojas y tallo a floración puede ser mayor en fechas de siembra tardías respecto a las tempranas, lo que sugiere una mayor relación entre compartimento metabólico y estructural. Recientes estudios realizados por Chen et al. (2015) demuestran que los genotipos modernos presentan una mayor partición de materia seca y N hacia hojas hasta períodos cercanos a la floración, por lo cual se dispone de una fuente de N fácilmente removilizable hacia los granos durante el período reproductivo. También se ha documentado cambios en la asignación de materia seca entre órganos vegetativos y reproductivos, bajo diferentes ambientes de crecimiento (Sayre, 1948; Hay et al., 1953; Hanway, 1962; Karlen et al., 1988; Ciampitti et al., 2013) y la existencia de variabilidad genotípica en la relación hoja/tallo (Beauchamp et al., 1976).

A partir de estos resultados se puede especular que para un genotipo y un nivel de biomasa total dados, los maíces de fechas de siembra tardía presentarían un mayor $\%N_c$ que los tempranos debido al aumento del N acumulado en el compartimento metabólico (mayor relación hoja/tallo), lo que indicaría que la máxima tasa de crecimiento del cultivo se lograría con mayores $\%N_b$ en fechas de siembra tardías. En consecuencia, los maíces tardíos podrían presentar una curva de dilución diferente a la de los maíces tempranos.

Modelo alométrico para estimación de N a nivel de planta individual

Conocer los niveles de N_{abs} por la planta en diferentes momentos del ciclo de cultivo de maíz resulta relevante, ya que define el estatus N de la planta y su productividad final. Adicionalmente, la estimación del N_{abs} contribuye a la toma de decisiones agronómicas relacionadas con aplicaciones postergadas de N en el cultivo. Numerosos estudios han reportado modelos no destructivos (alométricos) de estimación de biomasa por planta a partir de mediciones de variables morfométricas (Andrade et al., 1999; Vega et al., 2000; Maddonni y Otegui, 2004; Echarte et al., 2004; D`Andrea et al., 2006; Rossini et al., 2011; Ciancio et al., 2016). Sin embargo, escasos estudios han reportado modelos alométricos de estimación del N_{abs} por planta (D`Andrea et al., 2008). En este sentido, una dificultad que surge a la hora de seleccionar plantas para la construcción del modelo es poder diferenciar el estatus N de cada individuo, ya que las diferentes combinaciones de densidades y N_d pueden determinar plantas de tamaño similar pero con un estatus N muy distinto. En consecuencia, modelos alométricos de N_{abs} por planta más ajustados a diferentes manejos agronómicos podrían lograrse realizando mediciones adicionales de estatus N por planta, por ejemplo a través de lecturas con SPAD. Adicionalmente, a partir de estos modelos ajustados, se podría contribuir a profundizar el estudio de la dinámica del N_{abs} por planta a lo largo del ciclo de cultivo, lo cual resulta un aspecto escasamente estudiado hasta la fecha.

Bibliografía

- Abdala, L. J., Gambin, B. L., Borrás, L., 2018. Sowing date and maize grain quality for dry milling. *Eur. J. Agron.* 92, 1–8.
- Abe, A., Adetimirin, V., Menkir, A., Moose, S., Olaniyan, A. 2013. Performance of tropical maize hybrids under conditions of low and optimum levels of nitrogen fertilizer application—grain yield, biomass production and nitrogen accumulation. *Maydica.* 58,141-150.
- Albarenque, S. M., Basso, B., Caviglia, O. P., Melchiori, R. J. 2016. Spatio-temporal nitrogen fertilizer response in maize: field study and modeling approach. *Agron. J.* 108(5), 2110-2122.
- Alvarez, R., Steinbach, H. S. 2011. Modeling apparent nitrogen mineralization under field conditions using regressions and artificial neural networks. *Agron. J.* 103, 1159–1168.
- Andrade, F. H., Ferreiro, M. A. 1996. Reproductive growth of maize, sunflower and soybean at different source levels during grain filling. *Field Crops Res.* 48(2), 155-165.
- Andrade, F. H., Vega, C., Uhart, S., Cirilo, A., Cantarero M., Valentinuz O. 1999. Kernel number determination in maize. *Crop Sci.* 39(2), 453-459.
- Aramburu, F., Monzon, J. P., Mercu, J. L., Taboada, M., Andrade, F. H., Hall, A. J., Grassini, P. 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Field Crops Res.* 184, 145–154.
- BCBA, 2018. Informe cierre de campaña maíz 2017 – 2018. Panorama agrícola semanal. Departamento de Estimaciones Agrícolas. Bolsa de Cereales de Buenos Aires. 6 de septiembre de 2018.
- Beauchamp, E. G., Kannenberg, L. W. Hunter, R. B. 1976. Nitrogen accumulation and translocation in corn genotypes following silking. *Agron. J.* 68(2), 418-422.
- Below, F. E., Cazetta, J. O., Seebauer, J. R. 2000. Carbon/nitrogen interactions during ear and kernel development of maize. *Physiology and modeling kernel set in maize, (physiologyandmo)*, 15-24.
- Boomsma, C.R., Santini, J.B., Tollenaar, M., Vyn, T.J., 2009. Maize per-plant and canopy-level morpho-physiological responses to the simultaneous stresses of intense crowding and low nitrogen availability. *Agron. J.* 101, 1426–1452.
- Bruun, T.B., Mertz, O., Elberling, B., 2006. Linking yields of upland rice in shifting cultivation to fallow length and soil properties. *Agric. Ecosyst. Environ.* 113, 139–149.
- Cabrini, S.M., Llovet, J.A., Paollili, M.C., Fillat, F.A., Bitar, M.V., 2018. Márgenes brutos de las principales actividades agrícolas campaña 2018/2019. *Economía y Sociología*, EEA Pergamino. Informe Técnico N° 2. Mayo, 2018.
- Cassman, K. G., Dobermann, A., Walters, D. T. 2002. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. *AMBIO.* 31, 132-140.

- Caviglia, O. P., Melchiori, R. J. M., Sadras, V. O. 2014. Nitrogen utilization efficiency in maize as affected by hybrid and N rate in late-sown crops. *Field Crops Res.* 168, 27–37.
- Caviglia, O. P., Rizzalli, R. H., Monzon, J. P., García, F. O., Melchiori, R. J. M., Martinez, J. J., Andrade, F. H. 2019. Improving resource productivity at a crop sequence level. *Field Crops Res.* 235, 129-141.
- Chen, K., Kumudini, S. V., Tollenaar, M., Vyn, T. J. 2015. Plant biomass and nitrogen partitioning changes between silking and maturity in newer versus older maize hybrids. *Field Crops Res.* 183, 315–328.
- Chen, K., Vyn, T.J. 2017. Post-silking factor consequences for N efficiency changes over 38 years of commercial maize hybrids. *Front. Plant Sci.* 8, 1737.
- Ciampitti, I. A., Murrell, S. T., Camberato, J. J., Tuinstra, M., Xia, Y., Friedemann, P., Vyn, T. J., 2013. Physiological dynamics of maize nitrogen uptake and partitioning in response to plant density and N stress factors: I. Vegetative phase. *Crop Sci.* 53(5), 2105-2119.
- Ciampitti, I. A., Vyn, T. J. 2011. A comprehensive study of plant density consequences on nitrogen uptake dynamics of maize plants from vegetative to reproductive stages. *Field Crops Res.* 121, 2–18.
- Ciampitti, I. A., Vyn, T. J. 2012. Physiological perspectives of changes over time in maize yield dependency on nitrogen uptake and associated nitrogen efficiencies : A review. *Field Crops Res.* 133, 48–67.
- Ciancio, N., Parco, M., Incognito, S. J. P., Maddonni, G. A. 2016. Kernel setting at the apical and sub-apical ear of older and newer Argentinean maize hybrids. *Field Crops Res.* 191, 101-110.
- Cirilo, A. G., Andrade, F. H. 1994. Sowing date and maize productivity: II. Kernel number determination. *Crop Sci.* 34, 1044-1046.
- Cirilo, A. G., Andrade, F. H. 1996. Sowing date and kernel weight in maize. *Crop Sci.* 36(2), 325-331.
- Coque, M., Gallais, A. 2007. Genetic variation for nitrogen remobilization and postsilking nitrogen uptake in maize recombinant inbred lines: heritabilities and correlations among traits. *Crop Sci.* 47, 1787–1796.
- Coyos, T., Borrás, L., Gambin, B. L. 2018. Site-Specific Covariates Affecting Yield Response to Nitrogen of Late-Sown Maize in Central Argentina. *Agron. J.* 110(4), 1544-1553.
- Craswell E.T., Godwin D.C. 1984. The efficiency of nitrogen fertilizers applied to cereals grown in different climates, in: P.B. Tinker, A. Lauchli (Eds.), *Advances in Plant Nutrition*, Vol. 1 Praeger Publishers, pp. 1–55.
- Cultivio, 2018. Recovered from: <https://cultivio.com/es/desktop/>. Ultimo acceso: 01/31/2018.

- D'Andrea, K. E., Otegui, M. E., Cirilo, A. G. 2008. Kernel number determination differs among maize hybrids in response to nitrogen. *Field Crops Res.* 105(3), 228-239.
- D'Andrea, K. E., Otegui, M. E., Cirilo, A. G., Eyherabide, G. 2006. Genotypic variability in morphological and physiological traits among maize inbred lines—nitrogen responses. *Crop Sci.* 46(3), 1266-1276.
- DeBruin, J. L., Schussler, J. R., Mo, H., Cooper, M., 2017. Grain yield and nitrogen accumulation in maize hybrids released during 1934 to 2013 in the US Midwest. *Crop Sci.* 57(3), 1431-1446.
- De-yang, S. H. I., Yan-hong, L. I., Ji-wang, Z., Peng, L. I. U., Bin, Z., Shu-ting, D. 2016. Increased plant density and reduced N rate lead to more grain yield and higher resource utilization in summer maize. *JIA.* 15, 2515–2528.
- Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Tablada, M., Robledo, C.W., 2011. InfoStat. Córdoba, Argentina. Universidad Nacional de Córdoba. <http://www.infostat.com.ar/>.
- Díaz Valdez, S., García, F., Caviglia, O.P. 2014. Maíz tardío en Entre Ríos, Argentina: Calibración de umbrales críticos en nitrógeno. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica.* IPNI. 13, 18-20.
- Dobermann, A. 2007. Nutrient use efficiency-measurement and management. Proc. Of International Fertilizer Industry Association (IFA). Workshop on fertilizer Best Management Practices. Brusseles, Belgium, March 7-9.
- Dunlap, W. P., Dietz, J., Cortina, J. M. 1997. The spurious correlation of ratios that have common variables: A Monte Carlo examination of Pearson's formula. *J. Gen. Psychol.* 124, 182-193.
- Echarte, L., Andrade, F. H., 2003. Harvest index stability of Argentinean maize hybrids released between 1965 and 1993. *Field Crops Res.* 82(1), 1-12.
- Echarte, L., Andrade, F. H., Vega, C. R. C., Tollenaar, M. 2004. Kernel number determination in Argentinean maize hybrids released between 1965 and 1993. *Crop Sci.* 44(5), 1654-1661.
- Evans, L. T., Fischer, R. A. 1999. Yield potential: its definition, measurement, and significance. *Crop Sci.* 39(6), 1544-1551.
- Faostat, F. 2016. Agriculture Organization of the United Nations Statistics Division (2014). Production Available in: <http://faostat3.fao.org/browse/Q/QC/S> [Ultimo acceso: April 2015].
- Ferreira, J. M., Arisnabarreta, S., Andrade, F., Valentinuz, O. 2013. Maize yield improvement in Argentina (1965-2010). Indirect effect in yield components and nitrogen use efficiency. Recovered from: <https://scisoc.confex.com/crops/2013am/webprogram/Paper81568.html>
- Fila, G., Bellocchi, G., Acutis, M., Donatelli, M. 2003. Irene: a software to evaluate model performance. *Eur. J. Agron.* 18, 369–372.

- Gallais, A., Coque, M. 2005. Genetic variation and selection for nitrogen use efficiency in maize: A synthesis. *Maydica*. 50, 531–547.
- Gambin, B. L., Coyos, T., Di Mauro, G., Borrás, L., Garibaldi, L. A. 2016. Exploring genotype, management, and environmental variables influencing grain yield of late-sown maize in central Argentina. *Agric. Syst.* 146, 11-19.
- Gastal, F., Lemaire, G., Durand, J. L., Louarn, G. 2015. Quantifying crop responses to nitrogen and avenues to improve nitrogen-use efficiency. In *Crop physiology* (pp. 161-206). Academic Press.
- Good A.G., Shrawat A.K., Muench D.G. 2004. Can less yield more? Is reducing nutrient input into the environment compatible with maintaining crop production? *Trends Plant Sci.* 9(12): 597-605.
- Haegerle, J. W., Cook, K. A., Nichols, D. M., Below, F. E. 2013. Changes in nitrogen use traits associated with genetic improvement for grain yield of maize hybrids released in different decades. *Crop Sci.* 53, 1256.
- Hanway, J. J. 1962. Corn growth and composition in relation to soil fertility: II. Uptake of N, P, and K and their distribution in different plant parts during the growing season. *Agron. J.* 54(3), 217-222.
- Hay, R. E., Earley, E. B., DeTurk, E. E. 1953. Concentration and translocation of nitrogen compounds in the corn plant (*Zea mays*) during grain development. *Plant Physiol.* 28(4), 606.
- Karlen, D.L., Flannery, R. A., Sadler, E. J. 1988. Aerial accumulation and partitioning of nutrients by corn. *Agron. J.* 80(2), 232-242.
- Lemaire, G., Jeuffroy, M. H., Gastal, F., 2008. Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage: Theory and practices for crop N management. *Eur. J. Agron.* 28(4), 614-624.
- Lemcoff J.H., Loomis R.S. 1986. Nitrogen influences on yield determination in maize. *Crop Sci.*, 26, 1017-1022.
- Maddoni, G. A. 2012. Analysis of the climatic constraints to maize production in the current agricultural region of Argentina - a probabilistic approach. *Theor. Appl. Climatol.* 107, 325–345.
- Maddoni, G. A., Otegui, M. E. 1996. Leaf area, light interception, and crop development in maize. *Field Crops Res.* 48(1), 81-87.
- Maddoni, G. A., Otegui, M. E. 2004. Intra-specific competition in maize: early establishment of hierarchies among plants affects final kernel set. *Field Crops Res.* 85(1), 1-13.
- Maddoni, G. A., Otegui, M. E. 2006. Intra-specific competition in maize: Contribution of extreme plant hierarchies to grain yield, grain yield components and kernel composition. *Field Crops Res.* 97(2-3), 155-166.

- Maltese, N. E., Melchiori, R. J. M., Maddonni, G. A., Ferreyra, J. M., Caviglia, O. P., 2019. Nitrogen economy of early and late-sown maize crops. *Field Crops Res.* 231, 40-50.
- Melchiori, R.J.M., Caviglia, O.P., 2008. Maize kernel growth and kernel water relations as affected by nitrogen supply. *Field Crops Res.* 108, 198–205.
- Mercau, J. L., Otegui, M. E. 2014. A modeling approach to explore water management strategies for late-sown maize and double-cropped wheat–maize in the rainfed Pampas region of Argentina. *Practical applic.* 351-374.
- Moll, R.H., Kamprath, E.J., Jackson, W.A., 1982. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. *Agron. J.* 74, 562.
- Mueller, S. M., Vyn, T. J. 2016. Maize plant resilience to N stress and post-silking N capacity changes over time : A review. *Front. Plant Sci.* 7, 53.
- Mueller, S. M., Vyn, T. J., 2018. Physiological constraints to realizing maize grain yield recovery with silking-stage nitrogen fertilizer applications. *Field Crops Res.* 228, 102-109.
- Nasielski, J., Deen, B., Earl, H., 2019. Luxury vegetative nitrogen uptake in maize buffers grain yield under post-silking water and nitrogen stress: a mechanistic understanding. *Front. Plant Sci.* 10, 318.
- Nelson, D.W., Sommers, L.E., 1973. Determination of total nitrogen in plant material. *Agron. J.* 65, 109–112.
- Orcellet, J., Reussi Calvo, N. I., Sainz Rozas, H. R., Wyngaard, N., Echeverría, H. E. 2017. Anaerobically incubated nitrogen improved nitrogen diagnosis in corn. *Agron. J.* 109, 291-298.
- Otegui, M. E., Andrade, F. H., Suero, E. E. 1995. Growth, water use, and kernel abortion of maize subjected to drought at silking. *Field Crops Res.* 40, 87–94.
- Plénet, D., Lemaire, G. 1999. Relationships between dynamics of nitrogen uptake and dry matter accumulation in maize crops. Determination of critical N concentration. *Plant Soil* 216, 65–82.
- Razquin, C.J. 2018. Competencia intra-específica por recursos edáficos y lumínicos en maíz (*Zea mays*, L.): efectos sobre la variabilidad intrapoblacional y la determinación del número de granos final (Tesis doctoral). FCA – UNC. Córdoba, Argentina.
- Ritchie, S.W., Hanway, J.J., Benson, G.O., 1997. How a Corn Plant Develops. Special Report, vol 48. Iowa State University of Science and Technology, pp. 21.
- Robles, M., Ferreyra, J. M., Peper, M. A., Rattalino Edreira, J. I. 2015. Diferencias genotípicas en la captura, eficiencia de uso y partición de nitrógeno en híbridos modernos de maíz. Congreso de Maíz 2015.
- Rossini, M. A., Maddonni, G. A., Otegui, M. E. 2011. Inter-plant competition for resources in maize crops grown under contrasting nitrogen supply and density: Variability in plant and ear growth. *Field Crops Res.* 121(3), 373-380.
- Sayre, J. 1948. Mineral accumulation in corn. *J. Plant physiol.* 23(3), 267.

- Shapiro, C. A., Schepers, J. S., Francis, D. D., Shanahan, J. F. 2006. Using a chlorophyll meter to improve N management. Lincoln, NE: University of Nebraska-Lincoln Extension Bulletin G, 1632.
- Shi, G., Chavas, J. P., Lauer, J. 2013. Commercialized transgenic traits, maize productivity and yield risk. *Nat. Biotechnol.* 31(2), 111.
- Snyder, C. S., Bruulsema, T. W., Jensen, T. L., Fixen, P. E. 2009. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agric. Ecosyst. Environ.* 133(3), 247-266.
- Spectrum Technology, Inc. 2009. Spad 502 Chlorophyll Meter, Product Manual.
- Tollenaar, M., Lee, E. A. 2002. Yield potential, yield stability and stress tolerance in maize. *Field Crops Res.* 75(2-3), 161-169.
- Triboi, E., Triboi-Blondel, A. M. 2002. Productivity and grain or seed composition: A new approach to an old problem - Invited paper. *Eur. J. Agron.* 16, 163–186.
- Tsai, C., Huber, D. M., Warren, H. L., Tsai, C. Y. 1991. Effects of cross-pollination on dry matter accumulation, nutrient partitioning and grain yield of maize hybrids grown under different levels of N fertility. *J. Sci. Food Agric.* 57, 163-174.
- Uhart, S., Andrade, F. H. 1995. Nitrogen and carbon accumulation and remobilization during grain filling in maize under different source/sink ratios. *Crop Sci.* 35, 183-190.
- Vega, C. R. C., Sadras, V. O., Andrade, F. H., Uhart, S. A. 2000. Reproductive allometry in soybean, maize and sunflower. *Ann. Bot.* 85(4), 461-468.
- Vega, C. R., Andrade, F. H., Sadras, V. O., Uhart, S. A., Valentinuz, O. R. 2001. Seed number as a function of growth. A comparative study in soybean, sunflower, and maize. *Crop Sci.* 41(3), 748-754.
- Weiland, R. T., Ta, T. C. 1992. Allocation and retranslocation of ¹⁵N by maize (*Zea mays* L.) hybrids under field conditions of low and high N fertility. *Funct. Plant Biol.* 19, 77–88.
- Yan, P., Pan, J., Zhang, W., Shi, J., Chen, X., Cui, Z., 2017. A high plant density reduces the ability of maize to use soil nitrogen. *PLOS One.* 12(2), e0172717.
- Yang, H., Yang, J., Lv, Y., He, J. 2014. SPAD values and nitrogen nutrition index for the evaluation of rice nitrogen status. *Plant Prod. Sci.* 17(1), 81-92.

Anexo

Cuadro 1. Valores promedio de N disponible total (N_d) durante el ciclo de cultivo, rendimiento, índice de cosecha (IC), N absorbido total (N_{abs}), N absorbido durante el periodo pre- y post-floración ($N_{abs,pre}$ and $N_{abs,post}$, respectivamente), N remobilizado aparente ($N_{rem,AP}$), índice de cosecha de N (ICN), concentración de N en grano, eficiencia de uso de N (EUN_g), eficiencia de utilización de N para producir granos ($E_{ut}N_g$), eficiencia de absorción de N ($E_{abs}N$), fuente de biomasa (B) y N post-floración por grano, peso de mil granos (PMG) y número de granos por metro cuadrado en dos experimentos (2014-15 and 2015-16; Exp1 and Exp2, respectivamente) llevados a cabo en Paraná (Lat. 31,8°S), Argentina. En cada combinación de Exp x FS, dos híbridos fueron cultivados con tres dosis de N.

Exp	Fecha de siembra	Híbrido	Dosis	N_d	Rendimiento	IC	N_{abs}	$N_{abs,pre}$	$N_{abs,post}$	$N_{rem,AP}$	ICN	Concentra- ción de N en grano	$E_{abs}N$	$E_{ut}N_g$	EUN_g	Fuente de B post- floración por grano	Fuente de N post- floración por grano	PMG	Nº granos m ⁻²
				(kg N ha ⁻¹)	(kg ha ⁻¹)		(kg N ha ⁻¹)		(%)	(kg Nabs kg Nd ⁻¹)	(kg grain kg Nabs ⁻¹)	(kg grani kg Nd ⁻¹)	(mg B grano ⁻¹)	(mg N grano ⁻¹)					
2014-2015	Tardía	DK70-10VT3P	0N	157	6798	0,43	107	58	49	29	0,62	1,13	0,68	55	37	389	3,6	268	2165
2014-2015	Tardía	DK70-10VT3P	90N	247	10187	0,47	182	114	68	58	0,59	1,23	0,74	48	35	352	3,9	265	3289
2014-2015	Tardía	DK70-10VT3P	270N	427	9532	0,52	168	123	45	63	0,61	1,26	0,39	49	19	292	3,5	264	3116
2014-2015	Tardía	DK73-10VT3P	0N	157	8510	0,55	129	80	49	45	0,57	1,03	0,82	56	46	227	3,0	229	3197
2014-2015	Tardía	DK73-10VT3P	90N	247	12157	0,70	136	86	50	46	0,83	1,08	0,55	77	42	238	2,3	251	4151
2014-2015	Tardía	DK73-10VT3P	270N	427	9820	0,55	154	88	66	36	0,68	1,23	0,36	56	20	291	3,0	239	3516
2014-2015	Temprana	DK70-10VT3P	0N	145	7895	0,48	117	58	59	28	0,64	1,11	0,81	58	46	248	2,7	210	3220
2014-2015	Temprana	DK70-10VT3P	90N	235	10623	0,59	145	115	30	70	0,73	1,17	0,62	63	39	223	2,7	244	3728
2014-2015	Temprana	DK70-10VT3P	270N	415	12416	0,52	228	160	68	86	0,60	1,29	0,55	47	26	288	3,6	245	4319
2014-2015	Temprana	DK73-10VT3P	0N	145	8194	0,51	105	65	40	35	0,71	1,04	0,72	69	48	274	2,5	238	2939
2014-2015	Temprana	DK73-10VT3P	90N	235	12168	0,55	172	115	57	65	0,75	1,23	0,73	61	44	283	3,0	251	4140
2014-2015	Temprana	DK73-10VT3P	270N	415	13426	0,60	223	132	91	62	0,68	1,30	0,54	52	28	251	3,2	241	4776
2015-2016	Tardía	DK70-10VT3P	0N	228	4847	0,35	104	66	38	31	0,54	1,35	0,46	47	21	318	3,6	214	1939
2015-2016	Tardía	DK70-10VT3P	90N	318	6205	0,42	136	106	30	60	0,46	1,17	0,42	46	20	289	4,3	246	2158
2015-2016	Tardía	DK70-10VT3P	270N	498	6551	0,42	160	99	61	35	0,50	1,42	0,32	41	13	296	3,8	219	2556
2015-2016	Tardía	DK73-10VT3P	0N	228	5891	0,39	104	63	41	32	0,70	1,43	0,46	57	26	312	3,1	216	2337
2015-2016	Tardía	DK73-10VT3P	90N	318	6992	0,48	131	75	56	35	0,64	1,37	0,42	55	22	318	3,8	249	2428
2015-2016	Tardía	DK73-10VT3P	270N	498	6497	0,40	165	93	72	27	0,40	1,18	0,33	40	13	354	4,5	250	2256
2015-2016	Temprana	DK70-10VT3P	0N	150	4947	0,48	60	47	13	23	0,71	1,00	0,4	84	33	124	1,5	182	2320
2015-2016	Temprana	DK70-10VT3P	90N	240	6552	0,51	88	65	23	34	0,74	1,17	0,37	75	27	159	1,9	188	2985
2015-2016	Temprana	DK70-10VT3P	270N	420	7053	0,49	152	103	49	36	0,48	1,21	0,36	46	17	236	2,7	200	3068
2015-2016	Temprana	DK73-10VT3P	0N	150	4778	0,53	47	35	12	19	0,79	0,88	0,31	104	32	148	1,4	181	2257
2015-2016	Temprana	DK73-10VT3P	90N	240	7088	0,57	86	60	26	31	0,74	1,11	0,36	83	30	162	2,1	223	2732
2015-2016	Temprana	DK73-10VT3P	270N	420	7624	0,55	161	118	43	47	0,54	1,33	0,38	48	18	200	3,1	233	2856

Cuadro 2. Valores promedio del número de granos por planta (NGP), eficiencia de fijación de granos (EF_g), tasa de crecimiento por planta en periodo crítico ($R1 \pm 15$ días) (TCP_{pc}) y unidades SPAD en hoja 12 a R1 para dos fechas de siembra (Temprana y Tardía), tres rangos de TCP_{pc} (baja, $<0,20 \text{ g } ^\circ\text{Cd}^{-1}$ intermedia, $0,20-0,28 \text{ g } ^\circ\text{Cd}^{-1}$ y alta, $>0,28 \text{ g } ^\circ\text{Cd}^{-1}$) y tres rangos de estatus N (bajo, unidades SPAD a $R1 < 45$, intermedio, unidades SPAD a $R1$ entre 45 y 52,4 y alto, unidades SPAD a $R1 > 52,4$). Los experimentos (2014-15 and 2015-16; Exp1 and Exp2, respectivamente) fueron llevados a cabo en Paraná (Lat. $31,8^\circ\text{S}$), Argentina. En cada combinación de Exp x FS, dos híbridos fueron cultivados con tres dosis de N.

Fecha de siembra	Rango de TCP_{pc}	Rango Estatus N	NGP	EF_g ($NGP \text{ } TCP_{pc}^{-1}$)	TCP_{pc} ($\text{g } ^\circ\text{Cd}^{-1}$)	Unidades SPAD hoja 12
Temprana	BAJA TCP	BAJO ESTATUS N	364	2465	0,148	36
Temprana	BAJA TCP	INTERMEDIO ESTATUS N	514	2966	0,176	48
Temprana	BAJA TCP	ALTO ESTATUS N	588	3436	0,17	55
Temprana	INTERMEDIA TCP	BAJO ESTATUS N	472	2097	0,226	40
Temprana	INTERMEDIA TCP	INTERMEDIO ESTATUS N	553	2321	0,24	49
Temprana	INTERMEDIA TCP	ALTO ESTATUS N	564	2345	0,243	56
Temprana	ALTA TCP	BAJO ESTATUS N	609	1788	0,34	42
Temprana	ALTA TCP	INTERMEDIO ESTATUS N	662	1950	0,341	49
Temprana	ALTA TCP	ALTO ESTATUS N	839	2323	0,359	58
Tardía	BAJA TCP	BAJO ESTATUS N	392	2723	0,151	40
Tardía	BAJA TCP	INTERMEDIO ESTATUS N	471	2943	0,162	49
Tardía	BAJA TCP	ALTO ESTATUS N	530	3393	0,158	56
Tardía	INTERMEDIA TCP	BAJO ESTATUS N	480	1996	0,242	41
Tardía	INTERMEDIA TCP	INTERMEDIO ESTATUS N	505	2129	0,239	49
Tardía	INTERMEDIA TCP	ALTO ESTATUS N	595	2480	0,241	57
Tardía	ALTA TCP	BAJO ESTATUS N	544	1724	0,317	40
Tardía	ALTA TCP	INTERMEDIO ESTATUS N	565	1826	0,31	49
Tardía	ALTA TCP	ALTO ESTATUS N	671	2114	0,324	58