



**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO**

**“IMPACTO DEL MANEJO Y AMBIENTE SOBRE EL RENDIMIENTO DE MAÍCES DE
DIFERENTE FECHA DE SIEMBRA”**

Ing. Agr. Lucas Nicolás Vitantonio-Mazzini

TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE DOCTOR EN CIENCIAS AGRARIAS

DIRECTORA: Dra. Brenda L. Gambín

CO-DIRECTOR: Dr. Lucas Borrás

2022

IMPACTO DEL MANEJO Y AMBIENTE SOBRE EL RENDIMIENTO DE MAÍCES DE DIFERENTE FECHA DE SIEMBRA

Lucas N. Vitantonio-Mazzini

Ingeniero Agrónomo – Universidad Nacional de Rosario

Esta tesis es presentada como parte de los requisitos para optar al grado académico de Doctor en Ciencias Agrarias, de la Universidad Nacional de Rosario y no ha sido previamente presentada para la obtención de otro título en esta u otra universidad. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en el grupo de investigación en manejo y utilización de cultivos extensivos (GIMUCE) dentro del Instituto de Investigaciones en Ciencias Agrarias de Rosario (IICAR-CONICET) durante el período comprendido entre el 1 de abril del año 2017 y el 9 de marzo 2021, bajo la dirección de la Dra. Brenda L. Gambín y el Dr. Lucas Borrás.

Vitantonio-Mazzini, Lucas N.

Doctorando

Gambín, Brenda L.

Directora

Borrás, Lucas

Co-Director

Defendida: 15 de Septiembre de 2022.

AGRADECIMIENTOS

A Lucas Borrás y Brenda Gambín, por formarme tanto profesional como personalmente, incentivarme al trabajo honesto y a buscar la originalidad en todos los aspectos de la vida. Gracias por la gran oportunidad de trabajar dentro de GIMUCE. Por último, pero no menos importante por acompañarme en mis años críticos de formación académica y humana.

A José Gerde y José Rotundo, por ser compañeros más que líderes a lo largo de estos años.

A mis amigos de GIMUCE, Lucas Abdala, Ezequiel Saenz, Ana Carcedo, Gabriel Santachiara, Gonzalo Parra, Guido Di Mauro, Nancy Caballero, Mercedes Barat, Lina Bosaz, Matias De Felipe, Florencia Buldain, Emeli Lopez, Facundo Zbinden, Federico Baronio y Andrés Madias, por su compañía y risas constantes.

A Santiago Gallo por darme la oportunidad de interactuar y hacerme sentir parte del CREA Sur de Santa Fe.

A Lucas Garibaldi, por recibirme en Bariloche para explorar la extensa base de datos y sus contribuciones relacionados al Capítulo II.

A Diego H. Perez, Tomás Bustillo, Pablo Bressa, Luciano Ascheri, Franco Permingeat, Adrián Rovea, Ricardo Pozzi, Tomás Bustillo, Santiago Morin, Federico Sampaoli, Cristian Natali, Germán Baroli, Darío Barth, Federico Sorenson, Agustín Fernandez, Paula Gelso, Gabriel Cottura, Hugo Blanco y Andrés Elizalde de CREA Sur de Santa Fe por su colaboración en la recopilación de la base de datos y permitirme ser parte del increíble grupo de asesores que formaban.

A Jorgelina Cárcova, Gustavo Maddoni, y Anibal Cerrudo, por evaluar esta tesis doctoral. Por sus valiosos comentarios, sugerencias y correcciones de este manuscrito.

Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), por el otorgamiento de la Beca Doctoral fundamental para la realización de esta tesis.

A la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Rosario y al Instituto de Investigaciones en Ciencias Agrarias de Rosario por brindarme sus instalaciones para desarrollar esta tesis.

A mi compañera Flor, mis padres Daniel y Lida, mi hermana Larisa, quienes siempre fueron mi soporte e inspiración para todos mis proyectos.

PUBLICACIONES CIENTÍFICAS DERIVADAS DE LA TESIS

- **Vitantonio-Mazzini, L.N.**, Borrás, L., Garibaldi, L.A., Gallo, S., Pérez, D.H., Gambin, B.L., 2020. Management options for reducing maize yield gaps in contrasting sowing dates. *Field Crops Research*, 251, 107779.

PUBLICACIONES CIENTÍFICAS EN PREPARACIÓN DERIVADAS DE LA TESIS

- **Vitantonio-Mazzini, L.N.**, Gambin, B.L., Gallo, S., Borrás, L. Genotype selection for yield effect is the same across early and late sowing dates. En preparación.

PUBLICACIONES DE EXTENSIÓN DERIVADAS DE LA TESIS

- **Vitantonio-Mazzini, L.N.**, Borrás, L., Garibaldi, L.A., Gallo, S., Pérez, D.H., Gambin, B.L., 2020. ¿Qué factores necesitamos optimizar para maximizar el rendimiento de maíces tempranos y tardíos en zona núcleo? *Revista Técnica Maíz AAPRESID* 2020, 37–45.

OTRAS PUBLICACIONES ALCANZADAS DURANTE EL TRANCURSO DE LA TESIS

- **Vitantonio-Mazzini, L.N.**, Gómez, D., Gambin B.L., Di Mauro, G., Iglesias, R., Costanzi, J., Jobbagy, E., Borrás, L., 2021. Sowing date, genotype choice, and water environment control Soybean yields in central Argentina. *Crop Science*, 61, 715-728.
- Madias, A., Di Mauro, G., **Vitantonio-Mazzini, L.N.**, Gambin, B.L., Borrás, L., 2021. Environment quality, sowing date, and genotype determine soybean yields in the Argentinean Gran Chaco. *European Journal of Agronomy*, 123, 126217
- Borrás, L., **Vitantonio-Mazzini, L.N.**, 2018. Maize reproductive development and kernel set under limited plant growth environments. *Journal of Experimental Botany*, 69, 3235–3243.
- Abdala, L.J., **Vitantonio-Mazzini, L.N.**, Gerde, J.A., Martí Ribes, F., Murtagh, G., Borrás, L., 2018. Dry milling grain quality changes in Argentinean maize genotypes released from 1965 to 2016. *Field Crops Research*, 226, 74–82.

IMPACTO DEL MANEJO Y AMBIENTE SOBRE EL RENDIMIENTO DE MAÍCES DE DIFERENTE FECHA DE SIEMBRA

ÍNDICE

ABREVIATURAS, SÍMBOLOS Y ANGLICISMOS	1
RESUMEN	2
ABSTRACT	3
<u>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN GENERAL</u>	4
Importancia del cultivo en Argentina	4
Ampliación de la ventana de siembra del cultivo de maíz	5
Variables de manejo y del ambiente que modifican el rendimiento dependiendo de la fecha de siembra	7
Análisis de datos multi-ambientales	12
OBJETIVOS	16
HIPÓTESIS	17
<u>CAPÍTULO II: MANEJO Y AMBIENTE PARA REDUCIR LAS BRECHAS DE RENDIMIENTO EN MAÍZ TEMPRANO Y TARDÍO</u>	18
Introducción	18
Materiales y métodos	19
Sistema en estudio	19
Variables predictoras exploradas	22
Análisis estadístico y selección de modelos	23
Incremento del rendimiento a través de la optimización del manejo en cada siembra	25
Resultados	26
Variación en las decisiones de manejo y variables ambientales a través de los sitios y fechas de siembra	26
Selección de modelos	27
Modelo promedio	30
Mejoras en el rendimiento a través de la optimización del manejo	34
Discusión	37

Los predictores ambientales más importantes son similares en ambas fechas de siembra, sin embargo, los efectos son contrastantes en base a la fecha de siembra	37
Los predictores más importantes de manejo difieren entre las siembras tempranas y tardías	38
Implicaciones regionales para la reducción de brechas de rendimiento	40
Conclusiones	41
<u>CAPÍTULO III: EL EFECTO DE LA ELECCIÓN DEL GENOTIPO SOBRE EL RENDIMIENTO A TRAVÉS DE FECHAS DE SIEMBRAS</u>	42
Introducción	42
Materiales y métodos	43
Base de datos exploradas	43
Análisis estadístico	45
Resultados	46
Variabilidad en el rendimiento	46
Efecto del genotipo sobre el rendimiento	46
Discusión	49
Conclusiones	52
<u>CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN GENERAL</u>	53
CONTRASTE DE HIPÓTESIS ASOCIADAS A LOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS	58
APORTES ORIGINALES AL CONOCIMIENTO CIENTÍFICO	60
IMPLICANCIAS PARA FUTURAS INVESTIGACIONES	61
BIBLIOGRAFÍA	67
ANEXO I: TABLAS SUPLEMENTARIAS	79

ABREVIATURAS, SÍMBOLOS Y ANGLICISMOS

AACREA: Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola.

Aapresid: Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa.

AIC: criterio de información de Akaike.

ANOVA: análisis de la varianza.

BIC: criterio de información bayesiano.

Bt: *Bacillus thuringiensis*.

BLUP: Best lineal unbiased lineal predictor (Anglicismo) Mejor predictor lineal insesgado.

CREA: Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola.

ENSO: fenómeno El Niño - Oscilación del Sur.

FIV: factor de inflación de la varianza.

GxA: interacción genotipo por ambiente.

GxM: interacción genotipo por manejo.

ha: hectárea.

IMM: inferencia multi modelo.

INTA: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

kg: kilogramos.

ML: máxima verosimilitud.

MO: materia orgánica.

MR: madurez relativa.

N: nitrógeno.

NO₃: nitratos.

P: fosforo.

pl: plantas.

ppm: partes por millón.

qq: quintales.

R²: coeficiente de determinación.

REML: máxima verosimilitud restringida.

IR: importancia relativa.

S: azufre.

Tn: tonelada.

Δ: variación para un determinado carácter.

~: aproximadamente.

ω_i: Akaike weight (anglicismo) Peso de Akaike.

IMPACTO DEL MANEJO Y AMBIENTE SOBRE EL RENDIMIENTO DE MAÍCES DE DIFERENTE FECHA DE SIEMBRA

RESUMEN

El maíz es el segundo cultivo con mayor superficie y producción en la República Argentina, donde actualmente los productores están sembrando en fechas de siembras contrastantes (temprana y tardía) y exponiendo a los cultivos a diferentes condiciones ambientales. En la presente tesis se estudió el efecto de las decisiones de manejo y las variables ambientales sobre el rendimiento de cultivos sembrados en fechas de siembra temprana y tardía. Además, se evaluó el incremento del rendimiento gracias a la optimización del manejo. Se utilizaron ensayos comparativos de rendimiento en lotes de producción. Se concluyó que las decisiones de manejo y el efecto de las variables ambientales más importantes difieren con la fecha de siembra. Las decisiones de manejo más importantes para fechas de siembras tempranas son la densidad, la disponibilidad de nitrógeno, la disponibilidad de azufre y el fósforo aplicado. En contraste, para fechas de siembras tardías fueron el uso de fungicidas foliares, el fósforo del suelo y la disponibilidad de nitrógeno. La elección del genotipo presentó similar importancia y efecto para ambas fechas de siembra. Las variables ambientales más importantes para ambas fechas de siembra fueron la presencia de una napa cercana y las precipitaciones durante el ciclo. El efecto en el rendimiento de una napa cercana fue positivo para fechas de siembra tempranas, mientras que el efecto fue negativo en fechas de siembra tardías. La presencia de una napa cercana en un lote condiciona la fecha de siembra, ubicando a la fecha de siembra temprana como la mejor opción ante lotes con presencia de napa. A partir de estos resultados, se logró optimizar en el manejo para aumentar el rendimiento en ambas fechas de siembra. La presente tesis demuestra que los productores deben ajustar el genotipo, la densidad, el nitrógeno y el azufre en fechas tempranas, mientras que en fechas tardías deben mejorar el manejo del genotipo, el fungicida, el fósforo del suelo y el nitrógeno. De esta manera, se lograrían aumentos del rendimiento de 3.053 kg ha⁻¹ para fechas tempranas, y de 1.459 kg ha⁻¹ para fechas tardías. En cambio, las variables ambientales más importantes son las relacionadas al agua disponible sin distinción de la fecha de siembra.

Palabras claves: maíz; *Zea mays* L.; fecha de siembra; napa; densidad; nitrógeno; genotipo; inferencia multi-modelo.

MANAGEMENT AND ENVIRONMENT EFFECT ON MAIZE YIELD AT CONTRASTING SOWING DATES

ABSTRACT

Maize is the second crop with the largest sown area and production in the Argentina, where farmers are currently sowing at contrasting sowing dates (early and late) and exposing the crops to different growing conditions. In the present thesis, the effect on yield of management decisions and environmental variables was studied at early and late sowing dates. In addition, the increase on yield by optimizing management decisions at each sowing date was evaluated. Genotype yield comparison trials were used throughout the thesis. It was concluded that the most relevant management decisions and environmental variables differed with sowing date. Stand density, nitrogen availability, sulphur availability and phosphorus applied were the most important management decisions at early sowing date. In contrast, for late sowing dates, fungicide use, soil phosphorus, and nitrogen availability were the most important management decisions. Genotype selection showed similar importance and effect for both sowing dates. The most important environmental variables for both sowing dates were the presence of a closed water table and rainfall during the cycle. The effect of a closed water table was positive for early sowing date, while, on late sowing date the effect was negative. The presence of a closed water table conditions the sowing date, making early sowing date as the best option for fields with a **closer** water table. Based on these results, optimizing through management decisions could increase yield on both sowing dates. In summary, the present thesis shows that farmers should adjust stand density, nitrogen and sulfur availability at early sowing dates, while at late sowing dates they should improve the management of fungicide, soil phosphorus and nitrogen availability. This would result, on yield increases of 3.053 kg ha⁻¹ for early sowing dates and 1.459 kg ha⁻¹ for late sowing dates would be achieved. Instead, the most important environmental variables are those related to available water at both sowing dates.

Key-words: maize; *Zea mays* L.; sowing date; water table; stand density; nitrogen; genotype; multi-model inference.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN GENERAL

Importancia del cultivo en Argentina

El maíz es el segundo cultivo de mayor importancia a nivel mundial (FAO, 2020). Es un cultivo que genera gran rendimiento por unidad de superficie y de gran valor energético. Incluirlo en las rotaciones de los actuales sistemas agrícolas es beneficioso por su aporte de rastrojos de gran volumen, que mejora la calidad del suelo (Díaz-Zorita et al., 2002).

La **República** Argentina se ubica dentro de los mayores productores de maíz del mundo, colocándose en cuarta posición detrás de Estados Unidos, China y Brasil (FAO, 2020). En Argentina durante las campañas 2018/2019 y 2019/2020 se sembraron unas 6,7 y 7,2 millones de hectáreas (ha), respectivamente. Es el segundo cultivo con mayor superficie destinada y mayor producción luego del cultivo de soja (BCR, 2020a). La producción nacional de maíz fue de 48,5 millones de toneladas (Tn) en la campaña 2018/2019 y de 51,5 millones de Tn para la campaña 2019/2020. Estos datos dan un valor de rinde aproximado de 85,8 qq ha⁻¹ y 82,4 qq ha⁻¹ sobre superficie cosechada (5,8 y 6,2 millones de ha, respectivamente) para las campañas mencionadas anteriormente.

Analizando en detalle dentro de la **República** Argentina se puede observar grandes variaciones entre superficie destinada y rendimiento promedio entre cada provincia (BCR, 2020b). Para la campaña 2019/2020 se observa que la provincia de Córdoba es la de mayor superficie y mayor producción total (2,49 millones de ha y 19,5 millones de Tn con un rinde promedio de 85,5 qq ha⁻¹ para los 2,28 millones de ha de superficie cosechada). Mientras tanto, la provincia de Santa Fe es la de mayor rinde (98,3 qq ha⁻¹ sobre superficie cosechada) y Entre Ríos la de menor rinde entre las provincias más importantes en producción de maíz (68,0 qq ha⁻¹ sobre superficie cosechada). Existe una gran variación en el comportamiento del cultivo a lo largo del país, donde influyen distintas variables de manejo y ambientales en cada una de las regiones. El análisis de la influencia de las variables de manejo y del ambiente sobre el rendimiento tiene importantes consecuencias para los sistemas de producción del cultivo y para la producción nacional.

Ampliación de la ventana de siembra del cultivo de maíz

En maíz, las fechas de siembra tradicionalmente recomendadas para la región central eran las de principios de septiembre hasta mediados de octubre (Cirilo y Andrade, 1994a, 1994b). Estas fechas se basan en un mayor potencial de rinde, dado por temperaturas que se encuentran en valores óptimos y una alta radiación incidente durante el periodo crítico (Maddonni, 2012). Estas fechas de siembra ubican el periodo crítico del cultivo (15 días centrados en la antesis del cultivo; Fischer y Palmer, 1984; Hall, 1984; Andrade et al., 1999) a principios de diciembre, donde la probabilidad de un estrés hídrico es menor. Sin embargo, si un estrés hídrico ocurre en este momento crítico puede provocar grandes pérdidas de rendimiento, como fueron los casos de las campañas 2007/2008, 2008/2009 y 2011/2012. En estos casos, fechas de siembra de septiembre a octubre sufrieron mermas de rinde considerables por falta de agua durante el período alrededor de la floración del cultivo.

Las fechas de siembra más tardías de diciembre comenzaron a ser una opción interesante para muchos productores desde hace unos 20 años. Estas fechas de siembra no eran recomendadas por la alta incidencia y severidad de ataques de insectos, previo al desarrollo de materiales transgénicos para su control (Mercau y Otegui, 2014). El desarrollo de los primeros materiales Bt, y posteriormente de otros eventos con mayor eficiencia en el control de insectos, determinó que el problema de insectos deje de ser una limitante para fechas de siembras tardías. Durante las campañas 2000/2001 a 2008/2009 la República Argentina sembró alrededor de un 20% de maíz tardío o de segunda (ie., sembrado inmediatamente después de un cultivo invernal), valor que se incrementó a un 40% durante las campañas 2009/2010 a 2011/2012, y alcanzó niveles cercanos al 60% a partir de la campaña 2012/2013 hasta la actualidad (Fig. I. 1).

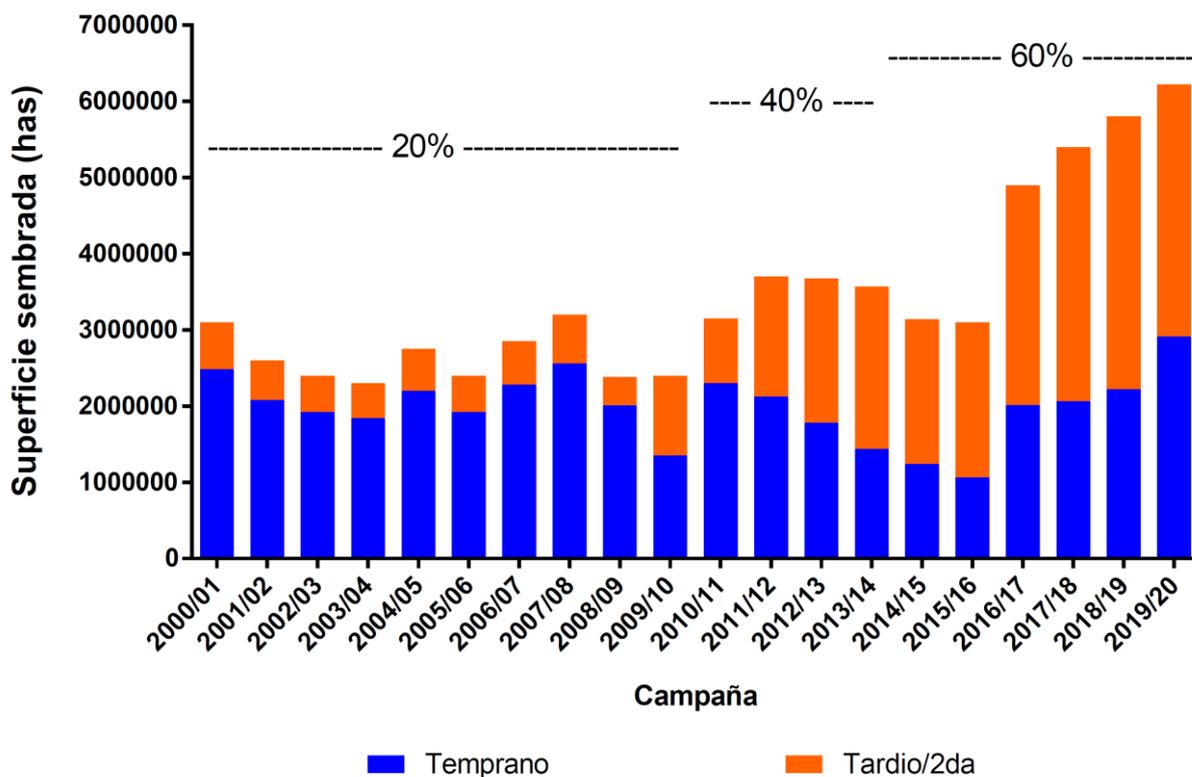


Fig. I. 1. Proporción de la superficie destinada al cultivo de maíz en la Rep. Argentina que se destina a siembras tardías o de segunda con respecto a siembras tempranas (basado en datos de la Bolsa de Comercio de Rosario, 2020).

El rápido incremento de las fechas tardías (diciembre-enero) se explica por varias cuestiones, tanto de manejo como ambientales. En estas fechas el periodo crítico del cultivo se ubica durante el mes de febrero, con menores posibilidades de ocurrencia de un estrés hídrico alrededor del periodo de floración del cultivo (Maddonni, 2012). Durante este mes el balance hídrico suele ser positivo en una mayor proporción de las campañas (Maddonni, 2012, Mercou y Otegui, 2014), producto de menores temperaturas y radiación (que determinan una menor demanda atmosférica diaria) y precipitaciones más frecuentes, en comparación con diciembre o enero (mayor oferta de agua). Estas condiciones ambientales varían los rendimientos del cultivo con respecto a fechas de siembras tempranas. En fechas tardías, los rendimientos potenciales son menores respecto a una fecha temprana (Mercou y Otegui, 2014). Sin embargo, el balance hídrico más positivo del cultivo alrededor de floración y la mayor probabilidad de arrancar con perfiles de suelo cargados de agua útil comparado con fechas tempranas (Mercou y Otegui, 2014) generan rendimientos más estables y pisos de rendimiento más altos en fechas de siembra tardía (Díaz Valdez et al., 2014; Bert y Satorre, 2012). Otras causas tienen que ver con la menor necesidad de uso de fertilizantes

nitrogenados, menor densidades recomendadas y la posibilidad de sembrar maíz en lotes de menor aptitud agrícola (Gambin et al., 2016; Coyos et al., 2018).

Al mismo tiempo que las fechas tardías se fueron imponiendo en el sistema productivo, comenzó una demanda de información sobre el manejo necesario para maximizar el rendimiento del cultivo en estas fechas. Durante los últimos años se estuvo generando información relevante en este sentido (Gambin et al., 2016; Coyos et al., 2018). Estos trabajos demostraron la relevancia de usar bases de datos de ensayos en lotes de producción, que actualmente están lejos de aprovecharse en su totalidad. El productor de la zona centro no sólo está interesado en determinar el manejo óptimo en fecha tardía, también en conocer las diferencias con una fecha temprana, a fin de tener más herramientas a la hora de tomar decisiones. El presente proyecto pretende analizar una base de datos única disponible en diversidad de sitios y años en la región central maicera de la República Argentina para evaluar la influencia de variables de manejo y del ambiente sobre el rendimiento de maíz en diferentes fechas de siembra.

Variables de manejo y del ambiente que modifican el rendimiento dependiendo de la fecha de siembra

El efecto de las variables de manejo y ambiente se ve reflejado en la variabilidad en los rendimientos del cultivo a lo largo del país (BCR, 2020b). Existen diversas variables que son relevantes para el cultivo, por lo que es importante identificarlas en primera instancia para el desarrollo de protocolos que impliquen mediciones y/o registro de las mismas. Las variables de manejo son aquellas donde el productor tiene influencia y puede modificar, como puede ser la fecha de siembra, la densidad, la fertilización, el genotipo, el riego y el cultivo antecesor, entre otras posibilidades. Las variables ambientales son difícilmente modificables por el productor, y en muchos casos difíciles de predecir, pero existen variables más estables en el espacio y tiempo que otras. Entre las variables ambientales se incluyen el tipo de suelo, profundidad de suelo, su textura y materia orgánica, y precipitaciones o temperaturas durante el ciclo. Cabe mencionar que hay variables que son indirectamente modificables por el productor, como puede ser el agua a la siembra o la profundidad de la napa.

La elección de genotipo es una práctica de manejo importante. Se observan grandes diferencias de rendimiento entre distintos genotipos en la misma fecha de siembra (de la Vega y de la Fuente, 2003), y son resultados frecuentemente obtenidos en cualquier ensayo comparativo de rendimientos como los que realiza INTA, AAPRESID y AACREA (Ferraris y

Mousegne, 2017; Gambin et al., 2019, 2020). En base a estos ensayos de evaluación de híbridos comerciales de diferentes semilleros se pudo determinar que entre el 2 y 10% de la variación en rendimiento se debe al genotipo. La variación de rendimiento entre genotipos fue, en promedio, de alrededor de 400 a 500 kg ha⁻¹ durante tres campañas con once sitios evaluados por campaña en el estudio de Gambin et al. (2016), indicando que existen genotipos que consistentemente rinden más que otros independientemente del manejo o del ambiente. En este sentido, una pregunta importante para el productor es si la elección del genotipo tiene la misma relevancia en ambas fechas. Teniendo en cuenta que las diferencias de rendimiento entre genotipos se maximizan en ambientes con presencia de algún estrés (Hernández et al., 2014), se hipotetiza que la elección del genotipo es más importante en fechas tempranas, donde la probabilidad de ocurrencia de un estrés hídrico es mayor. Esta hipótesis asume la ausencia del impacto de diversas plagas en fechas tardías, donde bajo su influencia la elección del genotipo es muy importante. De la misma manera, el impacto del genotipo por humedad a cosecha será más importante en fecha tardía, donde el ambiente durante el secado maximiza la variación genotípica (Gambín y Borrás, 2015).

La densidad de siembra en maíz es otra práctica de manejo clave, particularmente cuando se la comparada con otros cultivos como soja y girasol (Vega et al., 2001). La respuesta del rendimiento del maíz a la densidad presenta un comportamiento clásico de tipo óptimo o parabólico (Karlen y Camp, 1985; Tollenaar, 1992). El rendimiento por planta disminuye con el incremento en la densidad, aunque el rendimiento del cultivo aumenta hasta un máximo (densidad óptima), a partir del cual aumentos posteriores en la densidad de plantas producen reducciones en el rendimiento por planta más que proporcionales al aumento en el número de plantas. Si bien un aumento en la densidad disminuye el rendimiento por planta debido a un aumento de la competencia, la reducción es compensada y superada por el aporte de nuevas espigas, determinando un mayor rendimiento por unidad de superficie (Echarte et al., 2000). Este aumento en el rendimiento por unidad de superficie ante incrementos en la densidad de plantas no es lineal y existe un punto de inflexión a partir del cual el rendimiento por unidad de superficie cae por esterilidad de plantas. Este punto de inflexión (densidad óptima) aumenta con la calidad del ambiente (Al-Kaisi y Yin, 2003; Berzsenyi y Tokatlidis, 2012) y ha mostrado variaciones para distintos genotipos comerciales (Russell, 1968; Hernández et al., 2014). Por este motivo, la densidad es una práctica de manejo que debe definirse dependiendo del ambiente y el genotipo.

Actualmente no ha sido cuantificada la diferente respuesta del rendimiento a la densidad en fechas de siembra contrastante. El concepto difundido comúnmente en la zona centro es que la densidad en fecha tardía debería reducirse en un 20% respecto a una fecha

temprana (Satorre, 2016), pero esto no ha sido corroborado con datos a nivel de productor en el rango de densidades explorado hasta el presente. Para el productor sería de mucha utilidad conocer si la densidad es igual de importante en fechas tempranas con respecto a fechas tardías. Si bien, se ha encontrado una respuesta general y positiva en el rendimiento al aumento en la densidad desde 5,4 a 7,6 pl m⁻² a través de diversos ambientes en fecha tardía (Gambin et al., 2016), se hipotetiza que la importancia y el efecto sobre el rendimiento ante cambios en la densidad de siembra es mayor en fechas tempranas que en fechas tardías. Cuantificar esta respuesta a la densidad a través de sitios es de suma importancia para que el productor pueda evaluar la conveniencia de cambios en la densidad en diferentes fechas independientemente de otras variables ambientales o de manejo.

La fertilización es una práctica de las más importantes en el cultivo de maíz, siendo el cultivo que más se fertiliza en el país (MAGyP, 2021). El nitrógeno (N) es el nutriente que se utiliza con mayor frecuencia en este cultivo ya que existe una relación positiva costo/beneficio, producto de la elevada respuesta ante cambios de N que presenta el cultivo (Salvagiotti et al., 2011). La respuesta del rendimiento al N disponible sigue una curva de rendimientos decrecientes (Maddonni et al., 2003). La respuesta del rendimiento aumenta en forma lineal con el aumento del N disponible mientras el mismo limita la producción. Luego, la respuesta deja de ser lineal a medida que el N deja de limitar el crecimiento del cultivo y pasan a limitar otros recursos (otro nutriente, agua o radiación). Siguiendo con un aumento de los niveles de fertilización se alcanza un techo (o plateau), indicando la ausencia de limitación por parte de dicho elemento para la producción del cultivo. En el caso de valores excesivos de N el rendimiento puede disminuir debido a un efecto tóxico del nutriente o vuelco del cultivo (Steinbach, 2013).

Actualmente el criterio de fertilización más utilizada se basa en curvas de respuesta de rendimiento en función del N del suelo (0-60 cm de profundidad) más el N aplicado por el fertilizante. Esta técnica suma la presencia del N del suelo a la dosis del nutriente del fertilizante, resultando en un N disponible donde asume que ambas fuentes presentan la misma disponibilidad para el cultivo (Steinbach, 2013). Sobre estos datos se ajustan modelos que permiten determinar el umbral de N disponible a partir del cual no hay respuestas a la fertilización con N (Maddonni et al., 2003). Los modelos más conocidos son respuestas cuadráticas, curvas de Mitscherlin, curvas cuadráticas o lineales seguidas de un plateau de saturación de la respuesta, respuestas logísticas, entre otras (Cerrato y Blackmer, 1990). La aproximación típica es graficar de manera conjunta todos los datos de distintos sitios y distintos años, para luego ajustar un modelo de respuesta como los descriptos usando

mínimos cuadrados (Sain y Jauregui, 1993). De esta manera, se crea un modelo estadístico simple para determinar dosis de fertilizante a nivel regional y nivel productivo.

Para las fechas de siembras tempranas los valores umbrales de N disponible en diferentes sitios de la región central oscilan entre 135 y 150 kg N ha⁻¹ para lotes de menor nivel productivo, y entre 161 y 190 kg N ha⁻¹ para lotes de mayor nivel productivo (Salvagiotti et al., 2002; Pagani et al., 2008; Salvagiotti et al., 2011). En cambio, para fechas tardías los valores umbrales varían entre 140 y 165 kg N ha⁻¹ (Díaz Valdez et al., 2014; Salvagiotti et al., 2014; Gambin et al., 2016). Recientemente, usando modelos lineales mixtos se ha podido determinar que el umbral en fecha tardía es incluso menor ante una gran variabilidad ambientes (115-120 kg N ha⁻¹; Coyos et al., 2018). Así como fuera planteado para la densidad, a la hora de decidir la fertilización es mucho más relevante para el productor conocer una magnitud de respuesta al N disponible, y cómo esta respuesta varía con la fecha de siembra. Dada la mayor potencialidad de rendimiento **y la mayor disponibilidad de nitrógeno a lo largo del ciclo del cultivo para fechas tardías**, se hipotetiza que la respuesta a la fertilización es mayor en fecha temprana comparado con fecha tardía (Maltese et al., 2019).

El efecto de otros nutrientes también son aspectos de interés, donde actualmente existe poca información ante cambios en la fecha de siembra. Donde el fósforo (P) es limitante (menos de 12-14 ppm a los 0-20 cm de profundidad) se espera una menor respuesta al N disponible (Sucunza et al., 2018). Además del P, resulta relevante la influencia de otros nutrientes sobre el rendimiento de maíces en diferentes fechas de siembra, sobre todo para aquellos donde se ha detectado reciente limitación en la región (como el azufre; Echeverría et al., 2015; Carciochi et al., 2020). El azufre (S) no ha demostrado una respuesta general en la mayoría de los ambientes (Pagani et al., 2012; Salvagiotti et al., 2017). Sin embargo, se ha encontrado una mayor probabilidad de respuesta al agregado de S en ambientes de alto potencial, debido a su mayor demanda, o en ambientes deficiente en S, a causa de una menor oferta. Por lo tanto, es de esperar una mayor respuesta en ambientes de mayor potencial debido a una mayor demanda del cultivo de maíz. Por lo tanto, se espera mayores respuestas al agregado de S en fechas tempranas.

La mayoría de la producción de maíz en la Argentina se produce en seco, con alta variación interanual de las precipitaciones (Messina et al., 1999). El rendimiento del cultivo es muy dependiente de la disponibilidad de agua durante el ciclo y particularmente durante floración (Calviño et al., 2003; Hall et al., 1982). Existe una fuerte asociación entre el rendimiento y la ocurrencia de fases extremas del fenómeno El Niño - Oscilación del Sur (ENSO) durante el siglo XX (Podestá et al., 1999). Años con precipitaciones durante primavera-verano (desde noviembre a febrero) por debajo de los normales (año Niña) están

asociados con menores rendimientos, mientras que ocurre lo contrario en años con precipitaciones por encima de lo normal (año Niño) (Podestá et al., 1999). El impacto de este fenómeno y de las precipitaciones sobre los rendimientos en diferentes fechas de siembra aún no ha sido explorado, pero se hipotetiza que los niveles de precipitación durante el ciclo o alrededor de la floración del mismo van a tener mayor impacto sobre el rendimiento en fechas tempranas comparado con fechas tardías. Esto se basa en la mayor demanda evaporativa en las fechas tempranas (Maddonni, 2012). De hecho, los niveles de precipitaciones durante el ciclo del cultivo en fechas tardías no presentaron influencia sobre el rendimiento en un reciente análisis realizado por Gambin et al. (2016).

Por los mismos motivos expuestos anteriormente, el agua útil a la siembra es otra variable de importancia en el rendimiento, del cultivo de maíz (Mercau y Otegui, 2014). En el caso de un maíz de segunda, los rendimientos se reducen a medida que se reduce el agua útil a la siembra, algo que fue observado en un rango de fechas de siembra de diciembre a principios de enero. Sin embargo, para maíces tardíos sin la influencia de un antecesor invernal es probable que el agua útil a la siembra no tenga un impacto relevante sobre el rendimiento, ya que se espera que se encuentra en niveles de capacidad de campo al momento de la siembra (Maddonni, 2012). Recientes datos de agua útil a la siembra de una red de ensayos de maíces tardíos confirman estos altos niveles de agua útil a la siembra (Coyos et al., 2018). El efecto del agua a la siembra es dependiente también de la recarga del perfil y de la demanda que puede realizar el cultivo a lo largo de su ciclo (Rotili et al., 2021). Basado en estas evidencias, existe la expectativa de un mayor impacto del agua útil a la siembra en maíces tempranos comparado con maíces tardíos.

El estudio del aporte de agua gracias a las napas está adquiriendo cada vez mayor importancia en diversas zonas del país. La napa ha mostrado tener una importante influencia en los rendimientos de varios cultivos, incluido el maíz (Nosetto et al., 2009; Florio et al., 2014). Un estudio realizado en el oeste de la región central determinó que la profundidad de napa con impacto positivo sobre el rendimiento se encuentra alrededor de 1,5 - 2,5 m de profundidad (Nosetto et al., 2009). La presencia de napa por encima o debajo de este valor de profundidad tiene impacto negativo sobre el rendimiento, ya sea por problemas de exceso o por falta de agua. El impacto negativo de la mayor profundidad de napa ha mostrado ser mayor en maíz temprano en años secos. Asimismo, donde la profundidad de la napa es mayor, las precipitaciones alrededor de floración tuvieron una importante influencia sobre el rendimiento. En el caso de una napa en profundidades óptimas, las precipitaciones no tuvieron influencia sobre el rendimiento (Florio et al., 2014). Otro estudio donde se midió la presencia o ausencia de napa a la siembra a través de varios sitios de la región central estimó un impacto

negativo de la presencia de napa sobre el rendimiento de maíces tardíos (Gambín et al., 2016), lo que sugiere que la napa podría estar en profundidades consideradas no óptimas. Aunque la caracterización de las napas es un proceso complejo, es una variable a considerar en la comparación temprano versus tardío, donde se espera diferente influencia.

El tipo de suelo es otra variable de interés a analizar. Esta variable analizada en base a su clase de uso no mostró influencia sobre el rendimiento en maíces tardíos (Gambín et al., 2016), aunque se espera sí tenga influencia en maíces tempranos dada la relación entre tipo de suelo y capacidad de almacenamiento de agua. **Dadas las condiciones climáticas de mayores demandas atmosféricas y mayor demanda del cultivo en floración (Maddoni, 2012). Es de esperar que en suelos con texturas más finas (mayor contenido de arcilla) se presenten mayores sistemas de estrés hídrico que en suelos con texturas más francas (mayor contenido de limo y arena), principalmente por sus diferencias en agua útil a lo largo del perfil del suelo.**

Análisis de datos multi-ambientales

Junto con la rápida aparición de los maíces tardíos comenzó una gran demanda de información para optimizar el manejo de este cultivo. Cuestiones sobre qué genotipo usar, qué densidad, qué dosis de fertilizante, entre otras, pueden responderse de varias maneras. Una opción es realizar experimentos puntuales, que generalmente son limitados en el espacio (parcelas de espacio reducido, repetidos en pocos sitios) por su alta demanda de recursos y tiempo. Esto restringe la aplicabilidad a las limitadas condiciones exploradas en esos pocos sitios. Otra limitante de este tipo de aproximación es que muchas veces se exploran condiciones poco frecuentes para muchos productores (ejemplo, respuesta a un nutriente sin limitaciones de otros o respuesta a densidad sin limitaciones de nutrientes). Estas limitaciones también ocurren cuando se trabaja con datos modelados, donde, además del error en la predicción, sólo se exploran determinadas combinaciones (Mercau y Otegui, 2014). En **esta** tesis se pretende utilizar otra aproximación, y es la de aprovechar bases de datos existentes, y donde se cuenta con información específica sobre variables de manejo y ambiente. Un punto valioso de esta aproximación no sólo radica en que es información ya existente, sino que además está generada en lotes de productores, con la tecnología del productor y con decisiones de manejo del productor, siendo representativas del manejo habitual del productor. Esto determina que las conclusiones sean extrapolables a toda la región con alto valor predictivo (Zuur et al., 2009).

La disponibilidad de información proveniente de datos multi-ambientales se ha incrementado de manera exponencial en los últimos años, y aprovechar esta información es crucial para guiar y mejorar decisiones de manejo y testear hipótesis con implicancias regionales. Este aspecto es claramente importante en el contexto actual y bajo el desafío de aumentar los rendimientos de manera sustentable, reduciendo al mismo tiempo el impacto ambiental de la agricultura (Foley et al., 2011).

Los ensayos multi-ambientales son ampliamente difundidos en mejoramiento y extensión. Estos se conforman por un grupo de genotipos sembrados en una serie de ensayos a campo dentro de una región específica de producción durante varios años a fin de proveer información sobre el comportamiento de genotipos en los ambientes objetivos de producción (DeLacy et al., 1996). El término “ambiente” normalmente engloba variables de manejo y ambientales.

Hay muchas opciones de análisis de datos multi-ambientales (DeLacy et al., 1996; Malosetti et al., 2013). La mayoría de ellos se basan en datos de rendimiento y poca o nula información específica del ambiente y manejo, lo que limita las posibilidades de análisis. Los datos de rendimiento son tradicionalmente analizados mediante análisis de la varianza (ANOVA), determinando los componentes de la varianza asociados con el genotipo, ambiente y con la interacción genotipo x ambiente (GxA; que también incluye interacciones genotipo x manejo, GxM), con todos estos efectos considerados fijos. Sin embargo, en la actualidad los modelos de efecto mixtos han representado un paso hacia adelante respecto a los análisis clásicos (Smith et al., 2005).

Los modelos de efectos mixtos son herramientas estadísticas poderosas que permiten considerar la dependencia y estructura de datos, atributo común de bases de datos multi-ambientales, generando mayor precisión en la estimación de los parámetros. Los modelos mixtos siguen la misma estrategia lógica propia de muchos otros tipos de modelos estadísticos, por la que se tratan de describir la relación entre una “variable respuesta” (o “dependiente”) y una o varias “variables explicativas” (“independiente” o “predictores”). Si los valores que puede tener la variable explicativa son informativos, y su número está fijado de antemano estamos ante lo que se denomina “efectos fijos”, que asumen que tales valores son independientes entre observaciones. Si los valores de la variable son solo identificativos y pudiesen encontrarse otros, si el estudio se repitiera en diferentes circunstancias (por ejemplo, al año siguiente o en un lugar distinto) estamos ante “efectos aleatorios”, en los que se asume una relación entre las observaciones realizadas en la misma clase (Zuur et al., 2009).

Entre las ventajas de los modelos de efectos mixtos se puede mencionar la capacidad de manejar datos incompletos o bases de datos desbalanceadas (no todos los genotipos en

todos los ambientes, por ejemplo), la habilidad de asumir efectos como fijos o aleatorios, de acuerdo al interés particular del análisis, la posibilidad de analizar la totalidad de los datos en conjunto (Smith et al., 2005) y determinar la magnitud de los efectos (Gambin et al., 2016; Coyos et al., 2018). El uso de modelos de efectos mixtos en agronomía está ampliamente difundido en mejoramiento (Smith et al., 2001, 2005; Malosetti et al., 2013), mientras que su uso para decisiones de manejo es reciente (Gambin et al., 2016; Coyos et al., 2018).

Los análisis de datos multi-ambientales muestran generalmente que el efecto ambiente (sitio x año) es mayor que el efecto genotipo y la interacción GxA (DeLacy et al., 1996). Sin embargo, si se dispone de información es posible incorporar co-variables del ambiente o manejo al modelo para explorar su influencia sobre la variable respuesta, en general rendimiento por unidad de área. También suele ocurrir que la interacción GxA es mayor al efecto del genotipo (Smith et al., 2005; Malosetti et al., 2013). Esta interacción es conocida como una respuesta o sensibilidad diferencial a ciertos predictores, como pueden ser la densidad de plantas, fecha de siembra, o temperatura. Para ciertas co-variables seleccionadas de manera adecuada, la interacción GxA y GxM es predecible (Smith et al., 2005), lo que tiene consecuencias importantes sobre las estimaciones del comportamiento de un genotipo bajo condiciones específicas de manejo de un productor particular y el efecto en su rendimiento.

Un ejemplo reciente de esta aproximación sobre datos multi-ambientales es en base a la red de ensayos de maíz tardío de Aapresid que ha arrojado interesantes resultados de la influencia del genotipo, variables de manejo y del ambiente sobre el rendimiento (Gambin et al., 2016). El análisis con modelos de efectos mixtos ha demostrado que las decisiones del productor tuvieron más impacto sobre el rendimiento que las variables del ambiente como tipo de suelo y las precipitaciones durante el ciclo. Decisiones de manejo como la elección del genotipo, el manejo del N y la densidad de plantas fueron las más relevantes para maximizar el rendimiento. Se demostró además que la disponibilidad de agua podría ser excesiva en ambientes donde hay influencia de napa, lo que impacta negativamente sobre el rendimiento. Por último, se determinó que el N y el genotipo tienen que manejarse en conjunto, ya que los genotipos comerciales responden diferencialmente al N disponible. Este análisis reportó una descripción **satisfactoria** de la variabilidad temporal y espacial del rendimiento ($r^2= 0,91$), que fue de 5.555 a 12.078 kg ha⁻¹, lo que demuestra la solidez del modelo estadístico propuesto. La presente tesis pretende realizar este tipo de análisis con una base de datos más amplia y de origen diverso y de manera comparativa entre maíz temprano y tardío.

Previo a describir las hipótesis sobre la influencia de distintas variables de interés sobre el rendimiento en diferentes fechas cabe aclarar que **la presente tesis** se concentra en maíces

tempranos y tardíos. Los maíces tardíos son sembrados en diciembre o inicios de enero, y sobre el rastrojo de la cosecha de un cultivo de verano durante el ciclo anterior (en la mayor parte de los casos una soja de primera, o una soja de segunda sobre trigo). Esta tesis no pretende estudiar maíces de segunda, los cuales también se siembran tardíamente en diciembre o inicios de enero, pero luego de la cosecha de un cultivo invernal de cosecha como puede ser trigo, arveja o colza. La influencia de determinadas variables es muy diferente si se compara un maíz tardío contra un maíz de segunda (Mercau y Otegui, 2014), generando interacciones complejas que no serán tenidas en cuenta en la presente tesis. El interés de la presente tesis está centrado en maíces de primera sembrados temprana y tardíamente en la estación de crecimiento.

OBJETIVOS

Objetivo general:

Optimizar el manejo del cultivo de maíz en la zona templada sembrados en diferentes fechas de siembra.

Objetivos específicos:

1. Identificar la importancia relativa de diferentes variables de manejo y del ambiente sobre el rendimiento de maíz en la región central para fechas de siembra tempranas y tardías.
2. Estimar el mejor modelo y la magnitud de la respuesta de las diferentes variables sobre el rendimiento en maíces tempranos y tardíos.
3. Estimar los rendimientos esperables de los productores bajo el manejo ideal en base al modelo propuesto. Estimar la **perdida de producción** por un incorrecto manejo en ambos cultivos.

HIPÓTESIS

Hipótesis asociadas a los objetivos específicos:

1. Las variables de manejo y ambiente de mayor impacto sobre el rendimiento no son las mismas en fechas de siembra temprana y tardía (*Capítulo II*).
2. La fecha de siembra interacciona con variables de manejo como la densidad de siembra, y con variables de ambiente como tipo de suelo y agua a la siembra (*Capítulo II*).
3. Todas las variables relacionadas con agua disponible tienen un efecto mayor en fechas tempranas que en fechas tardías (*Capítulo II*).
4. El manejo ideal para cada fecha de siembra tiene un efecto mayor sobre el rendimiento en fechas tardías que en fechas tempranas (*Capítulo II*).
5. El efecto del genotipo sobre el rendimiento es mayor en siembras tempranas que en fechas tardías (*Capítulo III*).

CAPÍTULO II

MANEJO Y AMBIENTE PARA REDUCIR LAS BRECHAS DE RENDIMIENTO EN MAÍZ TEMPRANO Y TARDÍO

Introducción

La producción agrícola mundial de alimentos persigue el objetivo de un aumento de rendimiento en cultivos con un menor impacto ambiental (Foley et al., 2011; Alexandratos y Bruinsma, 2012). Para obtener este incremento en el rendimiento, los productores agrícolas deben ajustar las decisiones de manejo para cada ambiente en particular (Bennett et al., 1989; Calviño y Sadras, 1999; Hatfield y Walthall, 2015). Esto requiere un conocimiento detallado de las complejas interacciones entre manejo y ambiente. Un trabajo previo informó que hoy la brecha de rendimiento limitado por agua del maíz para Argentina es de alrededor del 41% (o 4.810 kg ha⁻¹; Aramburu Merlos et al., 2015) **a través de varias localidades y sus usuales fechas de siembras.**

Los productores de maíz de la región templada central están actualmente sembrando en dos fechas de siembra contrastantes. La fecha temprana es tradicional en la región, mientras que las fechas tardías han tomado mayor difusión en los últimos años. Actualmente el 60% del maíz es de siembra tardía, mientras que el 40% es de siembra temprana (PAS, 2018; Fig. I. 1; **Capítulo I**). Si bien los productores deben decidir qué fecha de siembra es la óptima para cada lote en particular, también existe un gran nivel de incertidumbre sobre la importancia y el efecto de las decisiones de manejo específicas y variables ambientales para cada fecha de siembra. Sin embargo, los predictores más relevantes no se han analizado de forma comparativa entre fechas de siembras tempranas y tardías. De esta manera, se puede proporcionar información para ayudar a los productores a determinar la fecha de siembra que es más conveniente para sus lotes en particular y comprender el efecto de las decisiones de manejo específicas y variables ambientales en cada fecha de siembra.

Existen diversas formas de generar información para optimizar la producción de granos. Una es la experimentación de campo para responder a una pregunta particular, pero estos experimentos requieren de una alta demanda tiempo y de recursos, y los resultados generalmente se limitan a los entornos y genotipos explorados. Otra opción es la experimentación *in silico* (Boote et al., 1996; Passioura, 1996), que permite explorar diferentes condiciones de manejo y ambientales siempre que la estructura y validación del

modelo de simulación lo permita (Hammer et al., 2014). No obstante, los modelos de simulación están sujetos a errores y los resultados siempre tienen un nivel de incertidumbre, **adicionalmente** la experimentación de campo siempre es necesaria para validar opciones de manejo.

Una aproximación intermedia implica el uso de ensayos multi ambientales (EMA), o también llamados ensayos comparativos de rendimiento aprovechando bases de datos existentes. Cada ensayo es conducido generalmente por el productor en términos de fecha de siembra particular, proporcionando así diferentes combinaciones de genotipo x manejo x ambiente, y un gran potencial para explorar la influencia de diferentes variables de manejo y ambientales (Gambin et al., 2016; Coyos et al., 2018).

En el presente capítulo se estudió la influencia de diferentes variables de manejo y ambiente en fechas de siembra contrastantes en la región templada central de Argentina. Los objetivos fueron (i) identificar la importancia relativa de diferentes variables de manejo y del ambiente sobre el rendimiento de maíz en la región central para fechas de siembra tempranas y tardías, (ii) estimar el mejor modelo y la magnitud de la respuesta de las diferentes variables sobre el rendimiento en maíces tempranos y tardíos, y (iii) estimar los rendimientos esperables de los productores bajo el manejo ideal en base al modelo propuesto y la **perdida de producción** por un incorrecto manejo en ambos cultivos.

Materiales y métodos

Sistema en estudio

Los ensayos comparativos de rendimiento para fechas de siembras temprana y tardía se realizaron en lotes de productores agrupados dentro del CREA Sur de Santa Fe de la Asociación Argentina de Consorcios Regionales para la Experimentación Agrícola (AACREA). Los ensayos incluyeron diferentes localidades ubicadas en la zona central de Argentina (Fig. II. 1) durante seis campañas agrícolas (desde la campaña 2010/2011 a la campaña 2015/2016, referidas como 2010 a 2015). En total, se realizaron 58 y 33 ensayos para fechas de siembras tempranas y tardías, respectivamente. No existió ninguna distribución espacial clara cuando se compararon las fechas de siembra como se evidencia en la Fig. II. 1. El término "sitio" se utilizará aquí para definir la combinación de una fecha de siembra, ubicación y año en particular. Todos los lotes utilizados para los ensayos se manejaron con siembra directa durante un mínimo de 15 años y no recibieron riego.

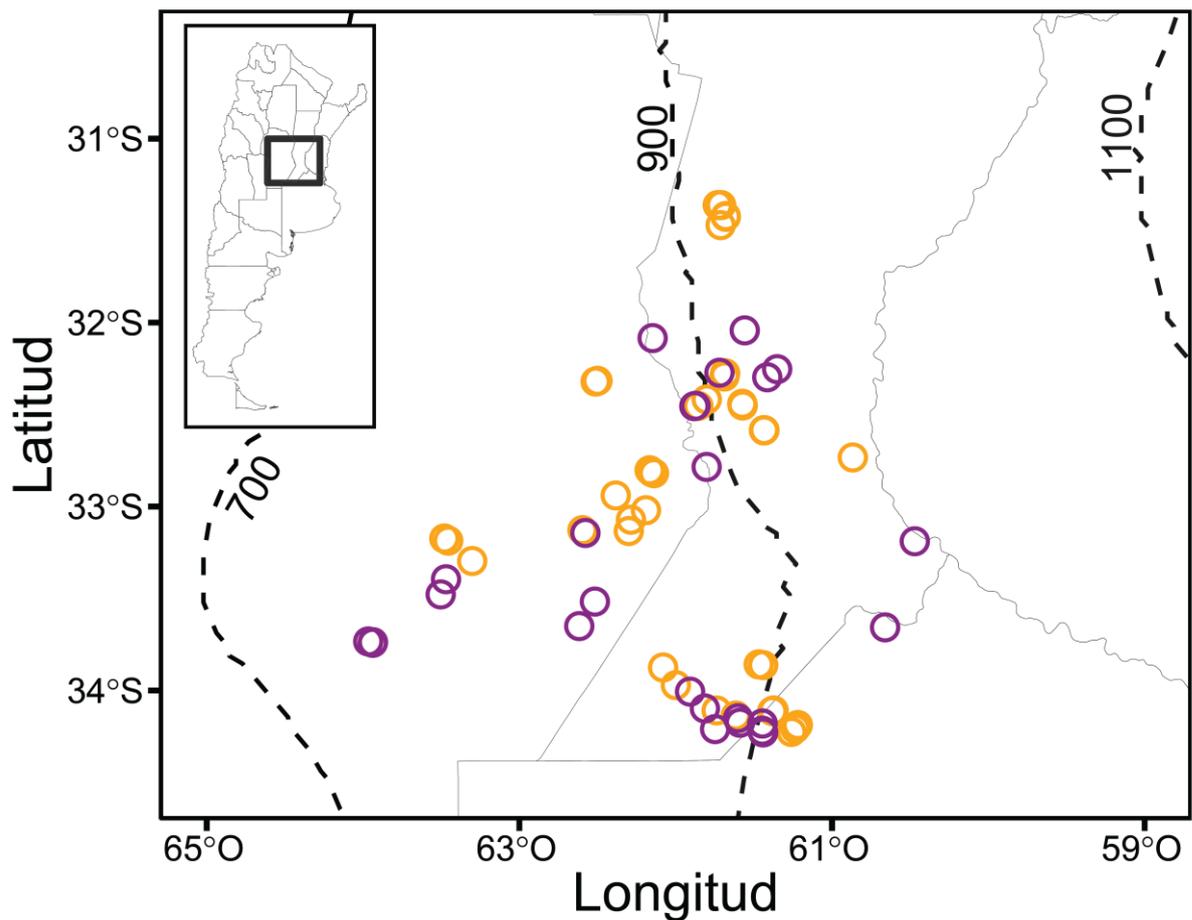


Fig. II. 1. Mapa de la región central Argentina con la ubicación de los sitios explorados. Los círculos amarillos son los 58 sitios de fecha temprana y los círculos violetas son los 33 sitios de fecha tardía. Las líneas discontinuas describen las isohietas de precipitación anual medias (700, 900 y 1100 mm año⁻¹) según promedios desde 1970 a 2000.

Se **evaluó** un total 91 híbridos de maíz de 18 compañías de semillas diferentes (Tabla S1). Los genotipos utilizados en fechas de siembras temprana y tardía no siempre fueron los mismos, y solo una proporción de ellos apareció en ambas fechas de siembra (**50% de los genotipos fueron sembrados en ambas fechas de siembra con mayor porcentaje en los últimos años analizados**). La madurez relativa promedio fue de 120 y 123 para todas las siembras tempranas y tardías, respectivamente, y varió desde 116 a 128 y desde 116 a 129 en las siembras tempranas y tardías, respectivamente (Tabla S1). Esto mostró que la madurez relativa era básicamente la misma al comparar entre las fechas de siembra. Los ensayos tuvieron un diseño de bloques completos al azar con dos o tres repeticiones. El tamaño de las parcelas varió desde 6 a 8 surcos de ancho y desde 200 a 240 m de longitud. El espacio entre hileras fue siempre de 0,52 m.

Cada ensayo fue manejado por el productor en términos de fecha de siembra, manejo del P, N y S, densidad del cultivo y fue llevado a cabo utilizando tecnología comercial al alcance del productor (sembradora, cosechadora, pulverizadora). Estas características **determinan** que los ensayos analizados sean representativos del sistema de producción de maíz en la región. Todos los ensayos fueron en secano y las malezas, enfermedades e insectos se controlaron químicamente mediante prácticas comunes y recomendaciones de los asesores. Los suelos fueron predominantemente francos arenosos profundos (Hapludol típico, Hapludol éntico y Haplustol) o suelos arcillosos poco profundos (Argiudol aquico y Argialbol) (Soil Survey Staff, 2014). Los principales tipos de suelo explorados son los más utilizados para la producción de maíz en la región (tipo I, II, y III; Klingebiel y Montgomery, 1961). Los ensayos se realizaron dentro de una porción del lote que tenía características de suelo uniformes, basados en mapas de taxonomía de suelos y un manejo similar de cultivos anteriores.

En cada ensayo, se tomaron muestras de suelo hasta los 60 cm de profundidad antes de la siembra para determinar las propiedades del suelo. El muestreo incluyó porcentaje de materia orgánica (MO) y la cantidad de P y S (ppm) se determinó hasta los 20 cm de profundidad y los nitratos (N-NO₃) se determinaron hasta 60 cm de profundidad. La materia orgánica se determinó mediante la técnica de Walkley y Black (1934), y el P, S y N-NO₃ se determinó mediante espectrofotometría. La cantidad de P, S y N aplicada en cada ensayo fue determinada por cada productor individualmente de forma independiente y en base al análisis del suelo, el rendimiento esperado y los costos de producción.

El contenido de agua disponible en el suelo se determinó en cada sitio a 1 m de profundidad por método gravimétrico (Black, 1965). El porcentaje de agua se convirtió a mm ha⁻¹ según la densidad aparente del suelo. La densidad aparente del suelo se tomó de mapas proporcionados por el INTA (Geolnta, <http://visor.geointa.inta.gob.ar/>) para cada sitio. El nivel freático de la napa se indicó cuando estaba presente en la siembra, hasta 2 m de profundidad al momento de la siembra. En cada sitio se registró la precipitación durante el ciclo del cultivo desde la siembra hasta la madurez fisiológica.

Los datos de rendimiento en grano se presentan con 14% de humedad. La cosecha a campo se realizó con una cosechadora comercial. El rendimiento de cada parcela se obtuvo ponderando los kilos de granos dentro de la tolva mediante sensores. Los sitios explorados no mostraron problemas importantes de las malezas, enfermedades o insectos. La primera helada fue siempre posterior a la madurez fisiológica para todos los ensayos.

Variables predictoras exploradas

El **objetivo (i)** del capítulo fue identificar variables de manejo y ambientales que puedan ayudar a predecir el rendimiento para las dos fechas de siembra contrastantes de la región. Para ello, primero se exploró la potencial influencia de diferentes predictores en el rendimiento. Estos predictores incluyeron tanto variables cuantitativas como cualitativas. Los predictores explorados fueron (Tabla II. 1): (i) cultivo antecesor, (ii) fecha de siembra (como días después del 1 de septiembre para fechas de siembras tempranas y después del 20 de noviembre para fechas de siembras tardías **con el objetivo de explorar rangos similares de días**), (iii) fósforo aplicado (kgP ha^{-1} ; referido como P aplicado), (iv) fósforo del suelo (ppm, 0-20 cm de profundidad; referido como P del suelo), (v) N del suelo en el momento de la siembra (kgN ha^{-1} , 0-60 cm de profundidad) más N del fertilizante (kgN ha^{-1} ; referido como N disponible), (vi) S del suelo en la siembra (kgS ha^{-1} , 0-20 cm de profundidad) más fertilizante (kgS ha^{-1} ; referido como S disponible), (vii) densidad de plantas al momento de la cosecha (pl ha^{-1}), (viii) uso de fungicida foliar, como variable nominal con dos niveles (0 para el no uso y 1 para el uso de fungicida en cualquier momento del ciclo de cultivo), (ix) presencia de una napa a la siembra entre la superficie del suelo y 2 metros de profundidad, como variable nominal (0 para ausencia y 1 para presencia), (x) precipitaciones durante el ciclo de cultivo (mm), (xi) disponibilidad de agua en el suelo en la siembra (mm) hasta 1 m de profundidad, (xii) tipo de suelo, como tres niveles cualitativos (tipos de suelo I y II, III y IV-V-VI) y (xiii) materia orgánica del suelo (% , 0-20 cm de profundidad).

Existen conceptos clave a considerar durante la exploración de datos como valores atípicos (outliers), multicolinealidad, respuesta de rendimiento a cada variable, **variabilidad de los posibles predictores**, y posibles interacciones entre variables (Zuur et al., 2009). La multicolinealidad entre variables cuantitativas se evaluó mediante correlaciones matriciales siguiendo el método de Pearson y el factor de inflación de la varianza (FIV) en R (R Core Team, 2018, versión 3.5.1; paquete *fmsb*; Nakazawa, 2014). La colinealidad entre variables cualitativas y cuantitativas se evaluó mediante ANOVA (paquete *agricolae*; Mendiburu, 2017). La latitud y la longitud también se incluyeron en este análisis de correlación como variables cuantitativas para explorar cualquier posible tendencia espacial (Tabla II. 1). La correlación espacial entre las variables de manejo y ambientales se evaluó mediante una prueba de Moran (paquete *ape*, función Moran.I; Paradis y Schliep, 2019).

Tabla II. 1. Variables de manejo y ambiente consideradas en el análisis para fechas de siembra tempranas y tardías, incluyendo tipo, unidad y rango explorado. Nitrógeno y azufre se expresan en kg ha⁻¹, y representa la cantidad en el suelo (0-60 cm) a la siembra más la cantidad fertilizada.

Tipo de variable	Variable	Tipo	Unidad	Rango explorado	
				Fecha temprana	Fecha tardía
<i>Manejo</i>	Antecesor	Cuantitativa	-	Maíz, Soja	Maíz, Soja y Maní
	Fecha de siembra	Cuantitativa	días	8 Sept – 10 Nov	27 Nov – 7 Ene
	P aplicado	Cuantitativa	kgP ha ⁻¹	0 – 41	0 - 35
	P suelo	Cuantitativa	ppm	6,7 - 43,8	5,0 - 46,2
	N disponible	Cuantitativa	kgN ha ⁻¹	149 – 338	132 - 303
	S disponible	Cuantitativa	kgS ha ⁻¹	22 – 73	18 - 56
	Densidad	Cuantitativa	pl ha ⁻¹	59.974 – 100.000	60.000 – 77.000
	Fungicida foliar	Cualitativa	Si/No	-	-
<i>Ambiental</i>	Clase de suelo	Cualitativa	-	I – III	I - VI
	Precipitaciones durante el ciclo	Cuantitativa	mm	248 – 908	218 - 854
	Presencia de napa	Cualitativa	Si/No	-	-
	Agua a la siembra	Cuantitativa	mm	33 – 190	56 - 205
	Materia orgánica	Cuantitativa	%	1,23 - 3,94	1,49 - 3,44
	Latitud	Cuantitativa	°	-34,23 a -31,36	-34,23 a -32,04
	Longitud	Cuantitativa	°	-63,94 a -60,87	-63,97 a -60,47

Análisis estadístico y selección de modelos

Las bases de datos de fechas de siembras temprana y tardía se evaluaron por separado. Se utilizaron modelos lineales de efectos mixtos para estimar la influencia de diferentes predictores en el rendimiento de grano para fechas de siembras temprana y tardía (paquete *nlme*, función *lme*; Pinheiro et al., 2018). Se aplicó la estrategia de arriba hacia abajo (o “top-down”) del proceso de selección de modelos (Zuur et al., 2009), de manera similar a Gambin et al. (2016) y Coyos et al. (2018). Esta estrategia incluye cuatro pasos (Zuur et al., 2009). Primero, se define un modelo “por encima del óptimo” (“beyond optimal model”) que incluye todas las posibles variables explicativas como efectos fijos. Segundo, se define la óptima estructura del componente aleatorio. Tercero, se ajusta la componente fija.

El modelo “por encima del óptimo” está basado en la exploración de variables explicativas que evidenciaron un efecto sobre el rendimiento en cada fecha de siembra (Zuur et al., 2009). A partir de análisis gráficos de la respuesta del rendimiento a diferentes variables para cada fecha, se definieron las variables explicativas dentro de los componentes fijos que tenían más probabilidades de contribuir al modelo óptimo para cada fecha. Cada coeficiente de regresión (β) se consideró un efecto fijo que refleja la influencia de un predictor (por ejemplo, la densidad) sobre el rendimiento a través de los ambientes en cada fecha de siembra. Para algunas variables se consideró una función polinomial de segundo orden ($Y_i =$

$\alpha + \beta_1 \times X_i + \beta_2 \times X_i^2 + \varepsilon_i$), por lo que en estos casos se presentan modelos con coeficientes $\beta_1 + \beta_2$. Debido a que las variables predictoras se encuentran en diferentes escalas, los análisis se realizaron con variables estandarizadas en valores Z.

La estructura aleatoria para fechas de siembras tempranas y tardías fue la misma. Al anidar el bloque dentro del genotipo y el genotipo anidado dentro del sitio como efectos aleatorios, los modelos estimaron diferentes interceptos para cada bloque, genotipo y sitio para considerar la estructura jerárquica de los datos. Para fechas de siembras tardías, se modeló la heterogeneidad de la varianza mediante el uso de la estructura de varianza "VarIdent" (Zuur et al., 2009) para la variable uso de fungicidas.

Finalmente, se buscó la estructura fija óptima utilizando el método de inferencia multi-modelo (IMM), el cual está basado en el enfoque de la teoría de la información (Burnham y Anderson, 2004). Este enfoque **estadístico** no acepta la idea de que existe un único "modelo verdadero" en las ciencias biológicas. En su lugar, se intenta explorar **los mejores modelos que sean posibles infiriendo** en la base a los datos **en estudio** de la manera más simple y significativa posible. **Logrando determinar** qué variables (representados por parámetros) pueden ser respaldados **y validados** por los datos (Burnham y Anderson, 2004). En base al contexto y objetivos de este estudio, el criterio AIC (criterio de información de Akaike) es la herramienta más adecuada para la selección de modelos cuando se compara con otros criterios como BIC (criterio de información bayesiano) o una simple prueba de hipótesis (Burnham et al., 2011; Aho et al., 2014). Debido a que los modelos tienen diferentes efectos fijos (pero una estructura aleatoria similar), se utilizó la estimación de ML (máxima verosimilitud) y no la estimación de REML (máxima verosimilitud restringida) para ajustar la componente fija.

Se calculó el peso relativo ("Akaike weight" o peso de Akaike; ω_i) para medir la importancia de cada posible predictor (basado en la importancia relativa, IR) para ambas fechas de siembra. Los pesos relativos (ω_i) representan la probabilidad de que un modelo i sea el "mejor modelo" dado un conjunto de modelos considerados. El ω_i es un valor estandarizado que va de 0 a 1, siendo 1 la suma de todos los ω_i del conjunto de modelos candidatos (Burnham y Anderson, 2004). En ocasiones el mejor modelo seleccionado por AIC incluirá y excluirá algunas variables sin una distinción diferencial de la importancia de los diferentes predictores sobre el rendimiento. En consecuencia, la IR proporciona información complementaria de la evidencia para todos los predictores (Burnham y Anderson, 2004). Los ω_i de todos los modelos derivaron de la IMM, y en base a este ω_i se calculó la IR de cada predictor (paquete *MuMin*, función importance; Barton et al., 2018).

El mejor modelo para cada fecha de siembra se obtuvo siguiendo un enfoque de "modelo promedio" ("modeling averaging"; Burnham y Anderson, 2004). El modelo promedio produce parámetros que no se basan solamente en un solo modelo, sino que derivan de promedios ponderados de varios modelos basados en su ω_i . Estas estimaciones promediadas son un parámetro mucho más estable en situaciones donde los mejores modelos muestran pequeñas variaciones de AIC entre sí (o lo que es lo mismo, no hay un mejor modelo en términos de AIC; Buckland et al., 1997; Lukacs et al., 2010). Existen dos versiones de modelo promedio, la primera llamada "completa" y la segunda llamada "natural" o "subconjunto". El enfoque "completo" considera que el predictor está incluido en todos los modelos y el efecto se establece en cero cuando no se incluye el predictor en el modelo. El enfoque "natural" o "subconjunto" sólo promedia los modelos que incluyeron el predictor. A lo largo del capítulo se presentarán ambas estimaciones. Los modelos incluidos en el modelo promedio fueron aquellos con una diferencia (Δ) de AIC menor a 4 respecto al de menor AIC (Burnham y Anderson, 2004).

Se realizó un análisis de sensibilidad para probar posibles variaciones en los modelos estadísticos **ante** cambios en los sitios explorados. Se utilizó un enfoque de validación dejando uno fuera ("leave one out validation approach"; Hastie et al., 2001; Arlot y Celisse, 2010) y se eliminaron diez sitios extremos (cinco sitios con residuales extremos y cinco sitios con variación extrema en el valor de los predictores). Solamente se observaron mínimas variaciones en las estimaciones (datos no mostrados), por lo que el análisis se presenta con el total de los sitios explorados.

Incremento del rendimiento a través de la optimización del manejo en cada siembra

Se utilizaron los modelos finales para explorar posibles mejoras en el rendimiento gracias a la optimización del manejo en cada fecha de siembra. Para cada variable predictora, se estimó el valor óptimo y la pérdida de rendimiento para valores distintos al óptimo. Este valor óptimo se definió como el valor del predictor para obtener el 90% del rendimiento máximo a partir de las regresiones lineales de cada variable. La definición de optimización del rendimiento está relacionada con el aumento de los rendimientos a sus máximos niveles para cada decisión de manejo, y es independientemente de la relación costo/beneficio, el riesgo económico y/o los cambios en la eficiencia del uso de los recursos (Sadras y Denison, 2016). Se estimaron las pérdidas de rendimiento en función de la diferencia entre el rendimiento en el valor óptimo del predictor y el rendimiento en niveles explorados distintos al óptimo. Para

cada variable también se exploró la frecuencia acumulada de los valores explorados a fin de comparar con las decisiones que toman actualmente los productores en cada fecha de siembra. Para estudiar el efecto de cada predictor específico sobre el rendimiento se **mantuvieron** constantes todos los demás parámetros. Esto permitió observar el efecto de cada predictor sin las posibles interacciones con otros predictores.

El efecto de las precipitaciones se analizó utilizando las fases del ENSO (Messina et al., 1999). Para ello, **se utilizaron** valores reportados de precipitaciones para años clasificados como Niño, Niña y Neutral en base a una recopilación de datos históricos desde 1931 a 1997 en Pergamino, ciudad ubicada en el área de estudio. El período considerado para fechas de siembra temprana fue desde septiembre a febrero, con valores promedio de 454, 590 y 641 mm para los años Niña, Neutro y Niño, respectivamente. El período considerado para fechas de siembra tardía fue de diciembre a abril, con valores promedio de 426, 549 y 580 mm para los años Niña, Neutro y Niño, respectivamente (Messina et al., 1999).

Resultados

Variación en las decisiones de manejo y variables ambientales a través de los sitios y fechas de siembra

La mayoría de las decisiones de manejo y variables ambientales exploradas evidenciaron una amplia variación a través de los sitios y exploraron un rango similar entre ambas fechas de siembra (Tabla II. 1). La densidad y las disponibilidades de N y S fueron levemente superiores en fechas de siembras tempranas ($p < 0,05$; Tabla II. 1), y el contenido de agua a la siembra fue mayor en fechas de siembra tardías ($p < 0,05$; Tabla II. 1). Las variaciones del rendimiento a través de los ensayos fueron desde 107 a 17.993 kg ha⁻¹ para fechas de siembra temprana y desde 1.125 a 14.583 kg ha⁻¹ para fechas de siembra tardía. La Fig. II. 2 representa los rendimientos explorados en cada ensayo y fecha de siembra.

Se analizó la multicolinealidad entre variables para ambas fechas de siembra. En fechas de siembra tempranas, la disponibilidad de N, la disponibilidad de S y la densidad evidenciaron diferencias significativas y valores superiores cuando se aplicó un fungicida foliar durante el ciclo del cultivo ($p < 0,05$). Por este motivo, no se consideró para el análisis el uso de fungicidas en fechas de siembra temprana. La alta correlación entre la disponibilidad de N y la densidad en fecha temprana ($r = 0,48$; $p < 0,001$; Tabla S2) también fue evidente cuando se analizó el factor de inflación de la varianza ($FIV > 10$; Burnham y Anderson, 2004). Por esta

razón, se excluyó del análisis la disponibilidad de N en esta fecha. Sin embargo, debido al interés de cuantificar la importancia del N, se realizó un análisis alternativo explorando la variable N sin considerar la densidad. Otras correlaciones entre variables no fueron relevantes en términos de FIV, por lo que todas se incluyeron en el análisis (Tablas S2 y S3). No se encontró ninguna correlación espacial entre las variables de manejo y ambientales ($p > 0,05$).

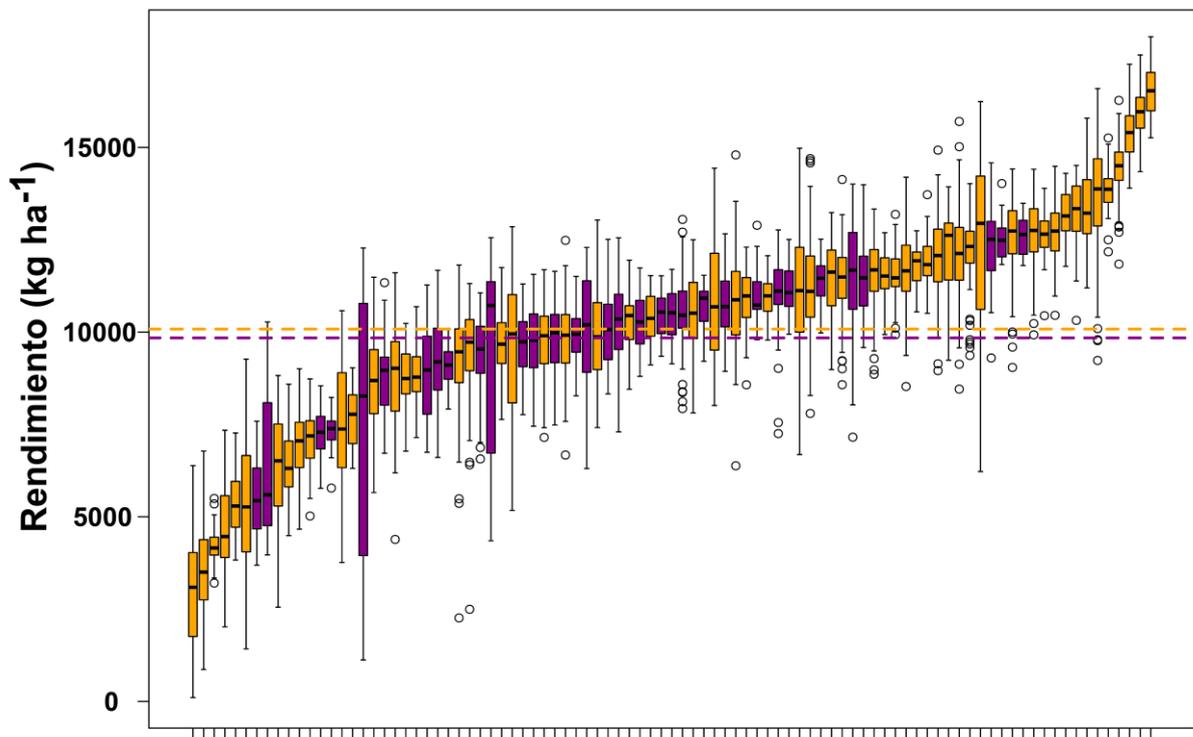


Fig. II. 2. Boxplot del rendimiento para los 91 sitios analizados. Los boxplot amarillos representan los sitios de fecha temprana y los boxplot violetas a los sitios de fecha tardía. La línea discontinua amarilla indica el rendimiento promedio de todos los sitios de fecha temprana ($10.081 \text{ kg ha}^{-1}$) y la línea discontinua violeta indica el rendimiento promedio de todos los sitios de fecha tardía (9.842 kg ha^{-1}).

Selección de modelos

Las variables de manejo que se incluyeron en el modelo “por encima del óptimo” para ambas bases de datos fueron la fecha de siembra, la disponibilidad de S y la densidad. Las variables ambientales incluidas fueron la presencia de napa, las precipitaciones durante el ciclo del cultivo, la interacción entre ellas (es decir, napa x precipitaciones) y el agua disponible en el suelo a la siembra. El P aplicado se incluyó sólo en fechas de siembra tempranas, mientras que la disponibilidad de N, P del suelo y el uso de fungicidas se incluyeron en el

modelo de fecha de siembra tardía (Tabla II. 2). El resto de las variables no mostraron un efecto claro en el rendimiento y fueron desestimadas del análisis.

Varios predictores aparecieron consistentemente en los mejores modelos para cada fecha de siembra. Este fue el caso de la densidad en fecha temprana, uso de fungicidas en fecha tardía, y la presencia de napa, las precipitaciones durante el ciclo del cultivo y la interacción entre napa y precipitaciones en ambas fechas de siembra (Tabla II. 2). Los diez mejores modelos (modelos desde la A a la J para fechas de siembra temprana y tardía; Tabla II. 2) mostraron pocas diferencias en AIC y ω_i , lo que indica la ausencia de un único “mejor modelo”. Por lo tanto, se procedió a considerar un modelo promedio.

Tabla II. 2. Criterio de información de Akaike (AIC) para modelos de efectos mixtos de las variables de manejo y ambientales en el rendimiento para fechas de siembra temprana y tardía. La tabla describe los 10 mejores modelos, más el modelo sin efectos fijos (modelo nulo). Cada columna representa una variable predictora diferente, las celdas no marcadas indican variables que no se incluyeron en un modelo en particular. El AIC mide la bondad de ajuste relativa de un modelo dado, cuanto menor es su valor, más probable es que este modelo sea correcto. La columna Δ indica la diferencia entre el AIC de un modelo y el AIC del modelo que mejor se ajusta. La columna ω_i expresa la probabilidad de ser el mejor modelo entre todos los modelos posibles, cuanto mayor es su valor, más probable es que este modelo sea el mejor modelo. Los modelos se compararon utilizando el método de máxima verosimilitud (ML) y los mismos efectos aleatorios. Los datos se estandarizaron antes del análisis.

Fecha de siembra	Modelo	Variables de manejo				Variables ambientales				Estadísticas del modelo		
		Densidad	Azufre	Fecha de siembra	P aplicado	Napa	Precipitaciones	Precipitaciones x Napa	Agua a la siembra	AIC	Δ	ω_i
Temprana	A	+			+	+	+			2888,33	0,00	0,08
	B	+	+			+	+			2888,48	0,15	0,07
	C	+				+	+			2888,61	0,28	0,06
	D	+	+		+	+	+			2888,88	0,55	0,06
	E	+			+	+	+			2889,65	1,32	0,04
	F	+	+					+		2889,82	1,50	0,04
	G	+	+			+				2890,10	1,77	0,03
	H	+	+				+			2890,18	1,85	0,03
	I	+	+		+					2890,30	1,97	0,03
	J	+				+	+	+	+	2890,32	1,99	0,03
	Nulo										2915,07	26,7
Tardía	A				+					2047,11	0,00	0,03
	B			+	+	+	+			2047,80	0,69	0,02
	C					+	+			2048,03	0,92	0,02
	D			+	+	+	+		+	2048,08	0,98	0,02
	E			+	+	+	+		+	2048,13	1,03	0,02
	F					+	+			2048,31	1,21	0,02
	G		+		+	+	+			2048,32	1,21	0,02
	H				+		+			2048,41	1,30	0,02
	I				+	+	+			2048,44	1,33	0,02
	J		+		+		+			2048,79	1,69	0,01
	Nulo										2054,27	7,16

Adicionalmente, se examinó la importancia relativa de todos los predictores explorados (Tabla II. 3). Las variables más importantes para fechas de siembra tempranas fueron la densidad y la disponibilidad de N (IR=1). Esto evidenció la relevancia de estas dos variables de manejo en fecha temprana. Otras variables de manejo como la disponibilidad de S y el P aplicado siguieron en importancia, con valores de IR comparativamente más bajos (IR~0,50). En cambio, las variables de manejo más relevantes para fechas de siembra tardías fueron el uso de fungicidas, el P del suelo y la disponibilidad de N (IR>0,60). Sin embargo, todas las decisiones de manejo exhibieron una IR más baja (IR<0,70) al compararlos con las decisiones más relevantes en fecha temprana. Las variables ambientales como la presencia de napa y las precipitaciones durante el ciclo del cultivo exhibieron una IR alta y comparable para ambas fechas de siembra (IR entre 0,70 y 0,80), seguidas por la interacción entre ambas variables ambientales (IR~0,50; Tabla II. 3). El agua disponible a la siembra y la fecha de siembra evidenciaron una baja IR en ambas fechas de siembra (IR<0,40; Tabla II. 3). La densidad y la disponibilidad de S mostraron los valores de IR más bajos (IR<0,40; Tabla II. 3) entre las decisiones de manejo en fechas de siembra tardías.

Modelo promedio

Se utilizó una aproximación de modelo promedio para estimar los coeficientes de regresión (β) de cada predictor de rendimiento para cada fecha de siembra. Esto permitió cuantificar la influencia de cada predictor sobre el rendimiento a través de varios modelos posibles (Tabla II. 3).

Tabla II. 3. Importancia relativa (IR) y efectos fijos estimados ($\beta+$) de los predictores de rendimiento para las fechas de siembra temprana y tardía. El promedio de “subconjunto” es el efecto promedio de los modelos que contiene el efecto particular, mientras que el promedio “completo” toma el valor de 0 para los efectos particulares que no aparecen en un modelo (consulte la Tabla II. 2 y materiales y métodos para más detalles). La estimación promedio $\beta+$ está estandarizada (z-scores) y no estandarizada (nominal) con sus unidades específicas.

Fecha de siembra	Efecto fijo	IR	Promedio subconjunto		Promedio completo		Unidad	
			z-scores	nominal	z-scores	nominal		
Temprana	Densidad	β_1	1,00	0,572	1,1	0,572	1,1	kg pl ⁻¹
		β_2		-0,053	0,0	-0,053	0,0	
	Napa		0,75	0,352	1.140	0,276	895	kg ha ⁻¹
	Precipitaciones		0,70	0,055	1,2	0,040	0,9	kg ha ⁻¹ mm ⁻¹
	Disponibilidad de S	β_1	0,56	0,216	206	0,124	118	kg kgS ⁻¹
		β_2		-0,054	-1,5	-0,031	-0,9	
	Precipitaciones x Napa		0,48	-0,389	-7,2	-0,214	-4,6	kg ha ⁻¹ mm ⁻¹
	P aplicado		0,46	0,129	43	0,058	19	kg kgP ⁻¹
	Agua a la siembra		0,29	0,038	4,1	0,009	0,9	kg ha ⁻¹ mm ⁻¹
	Fecha de siembra	β_1	0,14	0,042	74	0,002	3,7	kg ha ⁻¹ día ⁻¹
β_2			-0,044	-1,0	-0,002	-0,1		
Tardía	Precipitaciones		0,82	0,355	4,1	0,338	3,9	kg ha ⁻¹ mm ⁻¹
	Napa		0,77	-0,478	-938	-0,440	-865	kg ha ⁻¹
	Fungicida		0,66	0,532	1.044	0,395	776	kg ha ⁻¹
	P del suelo	β_1	0,61	0,137	197	0,095	136	kg ha ⁻¹ ppm ⁻¹
		β_2		-0,326	-3,7	-0,225	-2,6	
	Disponibilidad de N		0,61	0,214	10	0,147	7,1	kg kgN ⁻¹
	Precipitaciones x Napa		0,55	-0,505	-1,7	-0,427	-4,9	kg ha ⁻¹ mm ⁻¹
	Agua a la siembra		0,37	0,138	7,9	0,033	1,9	kg ha ⁻¹ mm ⁻¹
	Fecha de siembra	β_1	0,36	-0,204	21	-0,062	6,2	kg ha ⁻¹ día ⁻¹
		β_2		-0,077	-1,1	-0,024	-0,3	
	Densidad		0,32	0,046	0,02	0,008	0,003	kg pl ⁻¹
	Disponibilidad de S	β_1	0,22	0,057	289	0,009	44	kg kgS ⁻¹
β_2			-0,136	-3,5	-0,021	-0,5		

Las variables con mayor IR para fechas de siembra tempranas, en orden decreciente, fueron densidad > presencia de napa y su interacción con las precipitaciones > disponibilidad de S > P aplicado (Tabla II. 3). La densidad mostró un aumento decreciente en el rendimiento, con un efecto positivo en promedio de 0,28 kg pl⁻¹ (Fig. II. 3A) hasta las 90.000 pl ha⁻¹. Cuando se analizó la disponibilidad de N (en lugar de la densidad), el efecto fue de 27,6 kg kgN⁻¹ (Fig. II. 3H). La presencia de napa tuvo un efecto positivo de 1.140 kg ha⁻¹ (Fig. II. 3B) y, cuando estuvo presente, se evidenció un efecto negativo de las precipitaciones (-7,2 kg ha⁻¹ mm⁻¹; Fig. II. 3C). En cambio, en los sitios sin presencia de napa, se observó un efecto positivo de las precipitaciones durante el ciclo sobre el rendimiento de 1,2 kg ha⁻¹ mm⁻¹ (Fig. II. 3C). La disponibilidad de S evidenció un aumento de rendimiento promedio de 110 kg kgS⁻¹ hasta el

valor umbral de 41 kgS ha⁻¹, y la respuesta del rendimiento al P aplicado fue de 43 kg kgP⁻¹ (Figs. II. 3D y E).

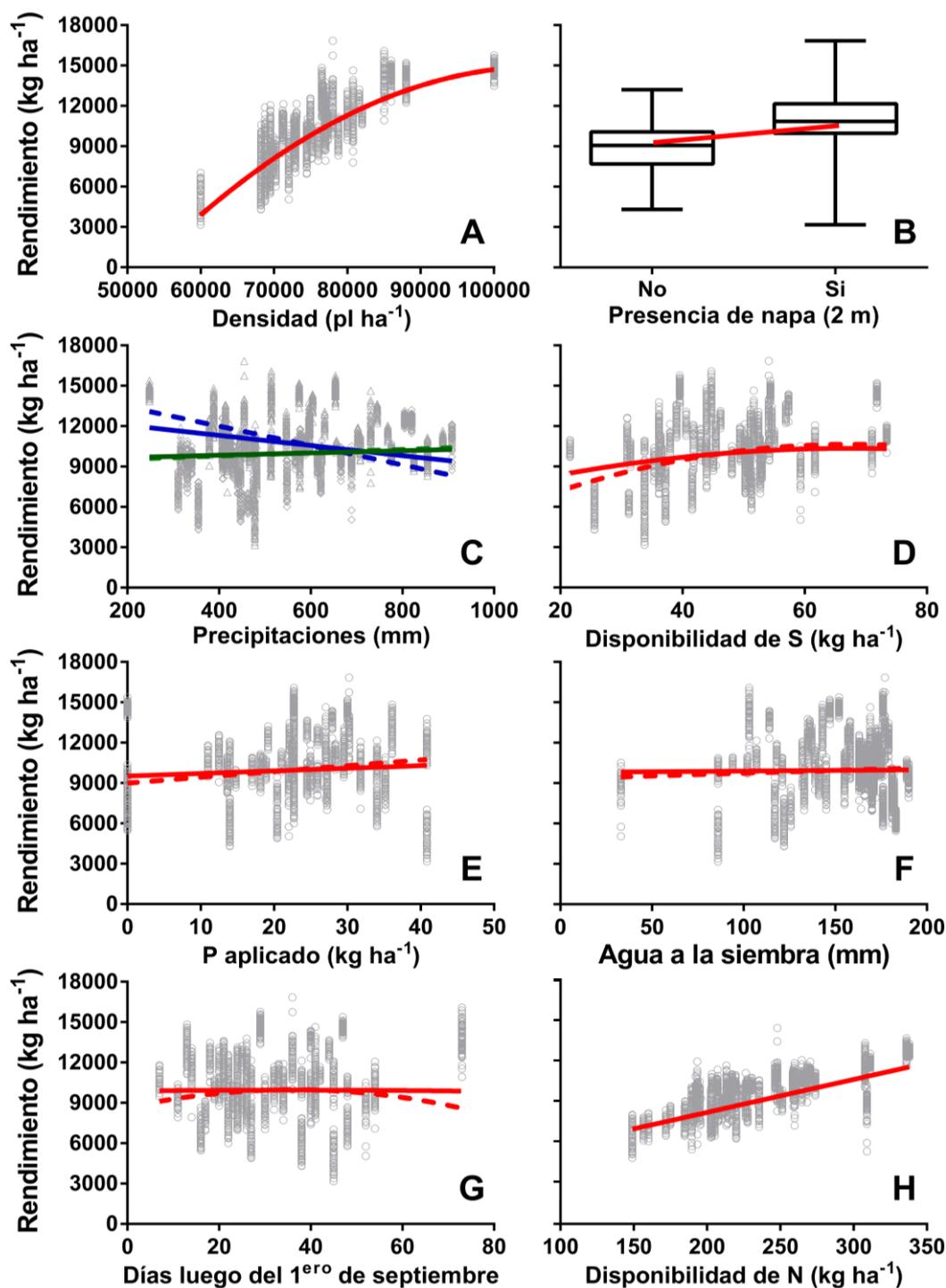


Fig. II. 3. Relación entre el rendimiento en la fecha de siembra temprana y la densidad (A), la presencia de napa (B), las precipitaciones durante el ciclo de cultivo (C), la disponibilidad de S (D), el P aplicado (E), el agua a la siembra (F), la fecha de siembra (G) y la disponibilidad de N (H). En las Figs. A, B, D, E, F, G y H, las líneas rojas continuas y discontinuas hacen referencia al $\beta+$ del "promedio completo" y el "promedio subconjunto", respectivamente. En la Fig. C, las líneas azules

sólidas y discontinuas hacen referencia al $\beta+$ del "promedio completo" y el "promedio subconjunto", respectivamente, para sitios con una napa cercana, mientras que las líneas verdes sólidas y discontinuas hacen referencia al $\beta+$ del "promedio completo" y el "promedio subconjunto", respectivamente, para sitios sin una napa cercana. En la Fig. C, los triángulos vacíos indican sitios con una napa cercana, y los cuadrados vacíos indican sitios sin una napa cercana.

Las variables con mayor IR en fechas de siembra tardías fueron, en orden decreciente, el uso de fungicidas > la presencia de napa y su interacción con las precipitaciones > el P del suelo > la disponibilidad de N (Tabla II. 3). El uso de fungicidas promovió un aumento promedio en el rendimiento de 1.044 kg ha⁻¹ (Fig. II. 4C). Contrariamente a lo observado en fechas tempranas, la presencia de napa tuvo un efecto negativo sobre el rendimiento de -938 kg ha⁻¹ (Fig. II. 4B), y en sitios con una napa cercana las precipitaciones durante el ciclo promovieron una reducción del rendimiento a una tasa de 1,7 kg ha⁻¹ mm⁻¹ (Fig. II. 4A). En ausencia de una napa cercana, las precipitaciones tuvieron un efecto positivo sobre el rendimiento de 4,1 kg ha⁻¹ mm⁻¹ (Fig. II. 4A). El P del suelo exhibió aumentos decrecientes en el rendimiento (Fig. II. 4D) con una respuesta promedio de 138 kg ha⁻¹ ppmP⁻¹ hasta el valor umbral de 11 ppm medidos a los 20 cm de profundidad. La disponibilidad de N tuvo un efecto positivo sobre el rendimiento (Fig. II. 4E) con un aumento promedio de 10 kg kgN⁻¹.

Las variables de menor IR en ambas fechas de siembra fueron el agua disponible a la siembra (con un efecto positivo en ambos casos de 4,1 y 7,9 kg ha⁻¹ mm⁻¹ para fechas tempranas y tardías, respectivamente; Figs. II. 3F y 4F) y la fecha de siembra. La fecha de siembra presentó una respuesta cuadrática con un rango óptimo (90% del rendimiento máximo) para ambas siembras. El rango óptimo fue desde del 7 de septiembre al 6 de noviembre en fecha temprana (Fig. II. 3G), **y desde el 20 de noviembre hasta el 30 de diciembre** para fecha tardía (Fig. II. 4G), con una disminución promedio de 80 kg ha⁻¹ día⁻¹ a partir de esta fecha. Otras variables de menor importancia en fecha de siembra tardía fueron la densidad (con un efecto positivo de 0.02 kg pl⁻¹; Fig. II. 4H) y la disponibilidad de S (con una respuesta de rendimiento promedio de 144 kg kgS⁻¹ hasta el valor umbral de 24 kgS ha⁻¹; Fig. II. 4I).

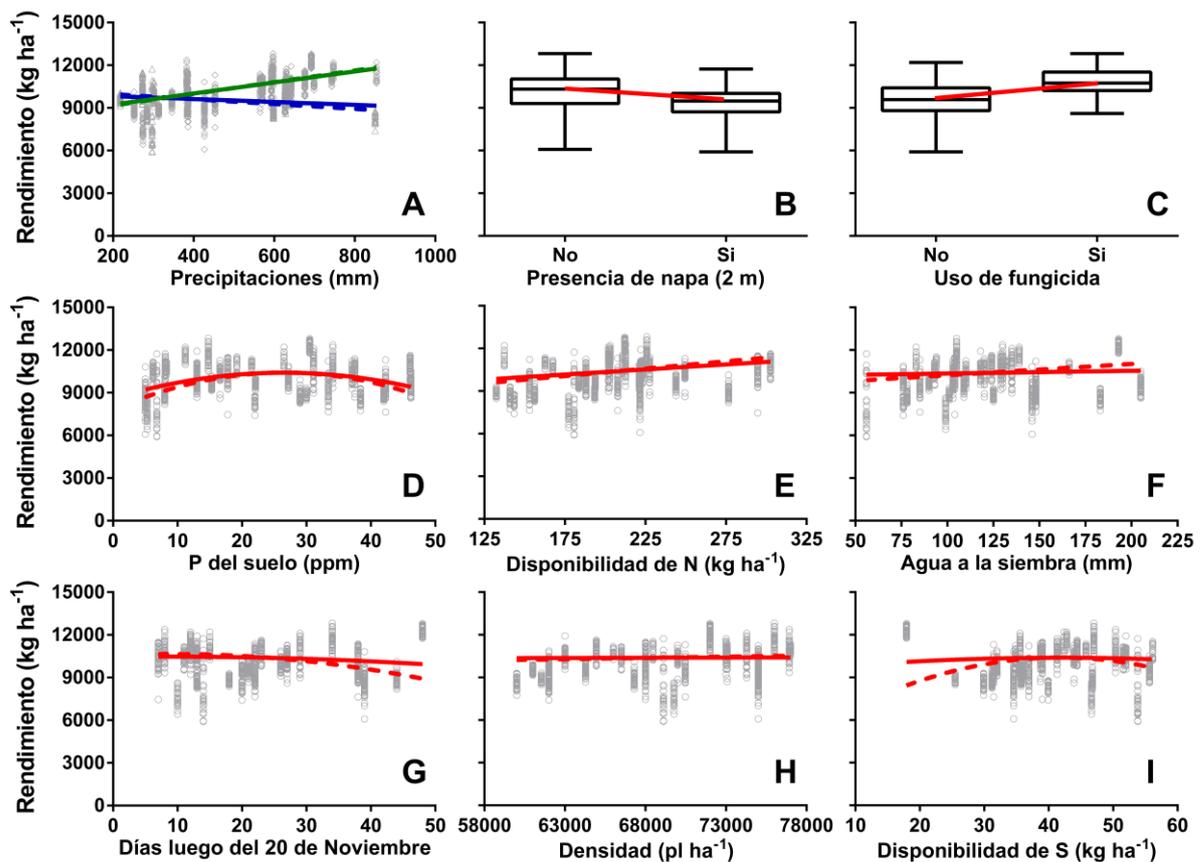


Fig. II. 4. Relación entre el rendimiento en la fecha de siembra tardía y las precipitaciones durante el ciclo del cultivo (A), la presencia de napa (B), el uso de fungicidas (C), el P del suelo (D), la disponibilidad de N (E), el agua a la siembra (F), la fecha de siembra (G), la densidad (H) y la disponibilidad de S (I). En la Fig. A, las líneas azules continuas y discontinuas hacen referencia al $\beta+$ del "promedio completo" y el "promedio subconjunto", respectivamente, en sitios con una napa cercana, mientras que las líneas verdes sólidas y discontinuas hacen referencia al $\beta+$ del "promedio completo" y el "promedio subconjunto", respectivamente, para sitios sin una napa cercana. En la Fig. A, los triángulos vacíos indican sitios con una napa cercana, y los cuadrados vacíos indican sitios sin una napa cercana. En las Figs. B, C, D, E, F, G, H y I, las líneas rojas continuas y discontinuas hacen referencia al $\beta+$ del "promedio completo" y el "promedio subconjunto", respectivamente.

Mejoras en el rendimiento a través de la optimización del manejo

Los coeficientes de regresión estimados se utilizaron para explorar posibles mejoras en el rendimiento en comparación con el manejo promedio de los productores (Tabla II.4).

En fechas de siembra tempranas, las pérdidas de rendimiento pueden ser muy importantes si la densidad disminuye por debajo del valor óptimo de 90.000 pl ha⁻¹ (Fig. II. 5A). Al valor promedio de densidad utilizada actualmente por los productores (77.000 pl ha⁻¹), la pérdida de rendimiento es de 3.053 kg ha⁻¹, teniendo en cuenta que esto sería en condiciones no limitantes de N (es decir, el productor que incrementa la densidad también

considera un aumento en la disponibilidad de N a la siembra; Tabla S2). El 40% de los productores siembra en lotes sin presencia de napa cercana en fechas tempranas y podrían estar perdiendo hasta 1.742 kg ha⁻¹ cuando los niveles de precipitaciones son inferiores al promedio. Esta pérdida se reduce a solo 274 kg ha⁻¹ cuando los niveles de precipitaciones son superiores al promedio (Fig. II. 5B; Tabla II.4).

Tabla II. 4. Mejora potencial en el rendimiento basado en la optimización de las prácticas de manejo y utilizando estimaciones de coeficientes finales (promedio “subconjunto”; Tabla II. 3). Los valores promedios se refieren al valor donde la frecuencia acumulada es del 50% de los sitios. Para las variables fecha de siembra y disponibilidad de S en ambas fechas de siembra y el P del suelo en fecha de siembra tardía, los valores se encuentran dentro del umbral crítico, por lo que no se debería esperar una mejora en el rendimiento.

Fecha de siembra	Variable de manejo	Valores		Aumento de rendimiento kg ha ⁻¹
		Promedio	Optimo	
<i>Temprana</i>	Densidad	77.000 pl ha ⁻¹	90.000 pl ha ⁻¹	3.053
	Lote con napa	No	Si	1.140
	Disponibilidad de S	45 kgS ha ⁻¹	41 kgS ha ⁻¹	0
	P aplicado	24 kgP ha ⁻¹	32 kgP ha ⁻¹	344
	Fecha de siembra	25 Sept	7 Sept al 6 Nov	0
<i>Tardía</i>	Uso de fungicida	No	Si	1.044
	Lote con napa	Si	No	938
	P del suelo	14 ppm	11 ppm	0
	Disponibilidad de N	210 kgN ha ⁻¹	250 kgN ha ⁻¹	415
	Fecha de siembra	6 Dic	Hasta el 30 Dic	0
	Densidad	64.000 pl ha ⁻¹	75.000 pl ha ⁻¹	187
	Disponibilidad de S	36 kgS ha ⁻¹	24 kgS ha ⁻¹	0

Más del 50% de los productores exploraron niveles de disponibilidad de S cercanos a los niveles óptimos para fechas tempranas (41 kgS ha⁻¹; Fig. II. 5C), pero prácticamente ningún productor aplicó dosis óptimas de P (solo el 12% de los productores aplicó más de 32 kg P ha⁻¹; Fig. II. 5D). Por lo tanto, la mejora en el de rendimiento después de optimizar cada nutriente sería más importante para P que para S (Figs. II. 5C y 5D, respectivamente). La pérdida de rendimiento en el rango de fecha explorado en fecha temprana es baja debido a que la mayoría de los productores están sembrando dentro del rango óptimo para fechas tempranas (Tabla II. 4), y sólo es importante cuando la fecha de siembra se retrasa hasta mediados de noviembre (hasta 880 kg ha⁻¹; Fig. II. 4G).

Las estimaciones indicaron que la mayoría de los productores (70%) de siembra tardía están perdiendo 1.044 kg ha⁻¹ por no aplicar ningún fungicida foliar durante el ciclo del cultivo (Fig. II. 5E; Tabla II.4). Alrededor del 30% de los productores siembran en lotes bajo la influencia de una napa, y podrían estar perdiendo hasta 1.367 kg ha⁻¹ si los niveles de

precipitaciones son superiores al promedio, valor que se reduce a 530 kg ha⁻¹ si los niveles de precipitaciones están por debajo del promedio (Fig. II. 5F). Un porcentaje similar de productores se encuentra perdiendo rendimiento (hasta 827 kg ha⁻¹) debido a los bajos niveles de P en el suelo (<11 ppm). La pérdida de rendimiento debido a la baja disponibilidad de N es más importante (hasta 1200 kg ha⁻¹), donde prácticamente ningún productor está sembrado con valores óptimos de disponibilidad de N para maximizar el rendimiento (solo el 10% de los productores tuvieron más de 250 kgN ha⁻¹; Fig. II. 5H; Tabla II.4). La densidad también puede aumentar el rendimiento en fechas tardías, pero la magnitud de la respuesta es relativamente baja (hasta 187 kg ha⁻¹ cuando se aumenta la densidad desde 64.000 a 75.000 pl ha⁻¹; Tabla II.4). Finalmente, la mayoría de los productores (>70%) están sembrando en las fechas óptimas para siembras tardías (Fig. II. 4G; Tabla II.4), y los niveles de disponibilidad de S explorados son cercanos al valor umbral considerado óptimo (Fig. II. 4I; Tabla II.4).

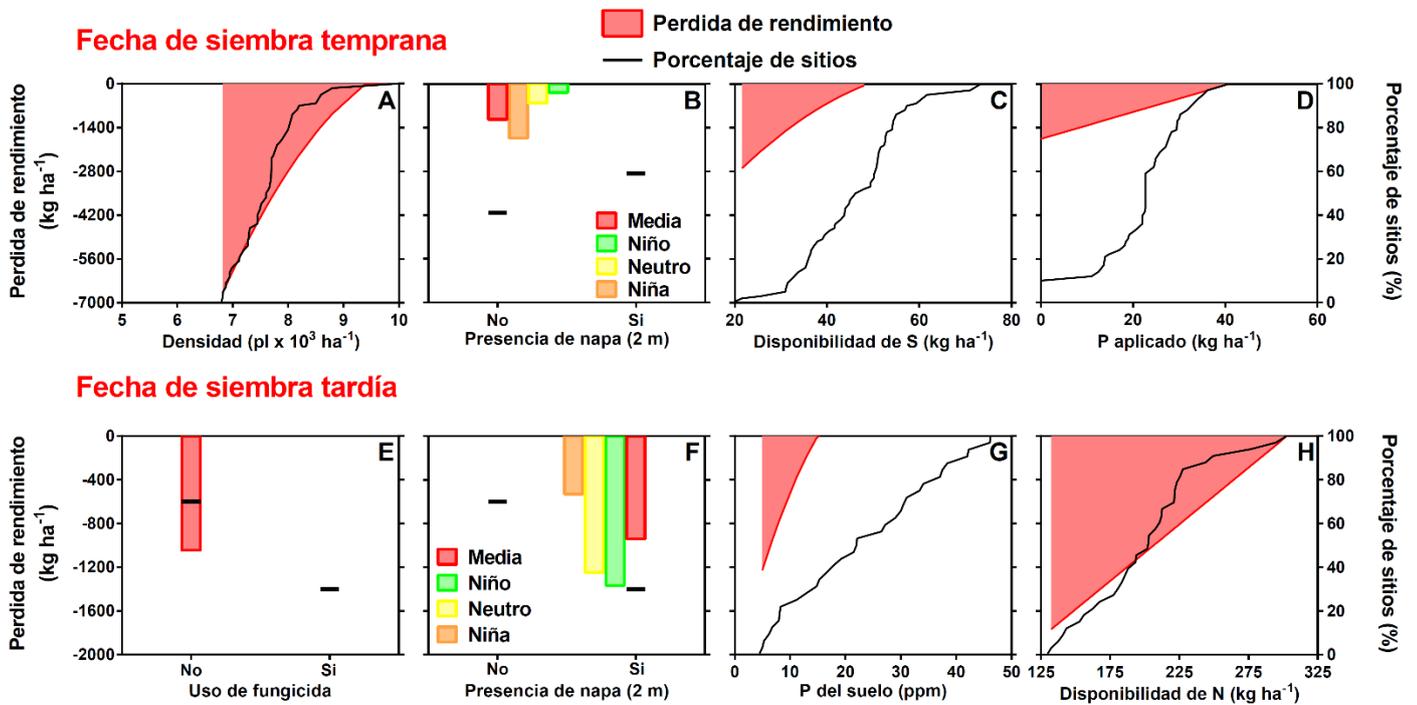


Fig. II. 5. Relación entre la pérdida de rendimiento (eje izquierdo) y el porcentaje de sitios totales (eje derecho) para la densidad (A), la presencia de una napa (B), la disponibilidad de S (C), y el P aplicado (D) en fecha de siembra temprana y para el uso de fungicidas (E), la presencia de una napa (F), el P del suelo (G) y la disponibilidad de N (5H) en fecha de siembra tardía. El área roja representa la pérdida de rendimiento promedio y la línea negra representa el porcentaje acumulado del total de sitios. Las áreas verde, amarilla y marrón simbolizan la pérdida de rendimiento en años con eventos Niño (precipitación por encima del promedio), neutro y Niña (precipitación por debajo del promedio), respectivamente.

Discusión

Los predictores ambientales más importantes son similares en ambas fechas de siembra, aunque con efectos contrastantes dependiendo de la fecha de siembra

La presencia de una napa cercana, las precipitaciones durante el ciclo del cultivo y su interacción fueron variables importantes que afectaron el rendimiento en ambas fechas de siembra. Esto es acorde a la disponibilidad de agua como la restricción más importante al rendimiento en sistemas en seco (Hall et al., 1992). La presencia de una napa cercana interactuando con el cultivo de maíz tuvo un efecto positivo en el rendimiento en fechas de siembra tempranas, pero un efecto negativo en fechas tardías. Este comportamiento contrastante podría relacionarse con las diferencias en demanda evaporativa entre fechas de siembra (Maddonni, 2012), junto con la profundidad óptima de la napa freática. La profundidad óptima con efectos positivos en el rendimiento del maíz se estimó entre los 1,40 y 2,45 m de profundidad (Nosetto et al., 2009). Una mayor demanda evaporativa en fechas de siembra tempranas podría mantener la napa fluctuando dentro de su rango óptimo, mientras que esto no ocurriría en fechas de siembra tardías. En fecha tardía, una menor demanda evaporativa elevaría la profundidad freática por encima de los niveles óptimos. **Por lo tanto, es de esperar que ante un atraso en la fecha de siembra y las diferencias en balance hídrico (mayor en fechas tardías) el nivel de la napa tendería a aumentar para el rango de fechas de siembra para un maíz tardío (Mercau et al., 2016).** Este resultado es consistente con lo recientemente encontrado utilizando una base de datos de maíz tardío independiente, donde se estimó un efecto negativo de similar magnitud (Gambin et al., 2016).

Los resultados de este capítulo mostraron que el efecto de las precipitaciones durante el ciclo de cultivo dependerá de la presencia de una napa cercana en ambas fechas de siembra. Las mayores precipitaciones en lotes con presencia de napa provocan penalizaciones en el rendimiento, mientras que mayores precipitaciones en lotes sin presencia de napa resultaron en los más altos rendimientos (Fig. II. 3C y 4A). El alto aporte de las precipitaciones puede aumentar los niveles de la napa freática hasta profundidades que afectan el rendimiento del maíz (<1,40 m de profundidad; Nosetto et al., 2009), produciendo anegamientos temporales, inundaciones y condiciones anóxicas (Lone y Warsi, 2009; Kuppel et al., 2015). Basado en un estudio anterior de maíz de siembra tardía en la región (Gambin et al., 2016), el efecto de interacción negativa entre precipitaciones y la presencia de una napa freática podría ser frecuente en fechas de siembra tardías, aunque se espera una frecuencia menor en fechas tempranas. Este resultado sugiere que los niveles de la napa podrían

encontrarse actualmente más cerca de la superficie del suelo y por encima de la profundidad óptima (es decir, 1,40 m; Noretto et al., 2009) con una mayor frecuencia.

Independientemente de la fecha de siembra, la presencia de una napa cercana puede tener otro efecto positivo o negativo sobre el rendimiento dependiendo de su composición química, algo que no se consideró en este estudio. Esta composición química puede aumentar los rendimientos gracias a la provisión de nutrientes (Portela et al., 2009), pero también puede disminuir los rendimientos si produce la salinización del perfil del suelo (Noory et al., 2009). En este estudio no se midió ningún parámetro de calidad del agua, pero es claramente un aspecto a considerar en estudios futuros dada la influencia de la misma sobre el rendimiento.

Los resultados relacionados con la presencia de una napa y su interacción con las precipitaciones tienen importantes consecuencias para la **asignación** de lote. En lotes con la presencia de una napa cercana, los productores deberían sembrar durante los meses de septiembre y octubre, esperando mayores rendimientos en fechas de siembras tempranas evitando las fechas tardías. En este caso, sólo existirían penalizaciones ante altos niveles de precipitaciones.

Los predictores más importantes de manejo difieren entre las siembras tempranas y tardías

Las decisiones de manejo difirieron en importancia y efecto entre fechas de siembras tempranas y tardías. Esto significa que los productores necesitan optimizar diferentes variables de manejo dependiendo de la fecha de siembra. La densidad y la disponibilidad de N fueron los predictores más importantes en fechas tempranas, seguidos por la disponibilidad de S y el P aplicado. El uso de fungicidas, el P del suelo y la disponibilidad de N fueron más relevantes en fechas tardías.

Es sabido que la densidad es una decisión de manejo muy importante para optimizar el rendimiento en maíz (Westgate et al., 1997; Hashemi et al., 2005; Hernández et al., 2014). En este estudio, se debe tener cuidado al interpretar la respuesta descripta (Fig. II. 3A), ya que los productores que usan densidades más altas también son propensos a fertilizar con más N. La respuesta del rendimiento a la densidad debe considerarse como una respuesta a la densidad en conjunto con una mayor disponibilidad de N. Teniendo en cuenta esta dependencia, la magnitud del efecto fue superior a otros estudios en la región (Sarlangue et al., 2007; Antonietta et al., 2014; Amelong et al., 2017). A pesar de ser una práctica de manejo conocida, sigue siendo una de las principales opciones de manejo que los productores necesitan optimizar para aumentar los rendimientos en fechas de siembras tempranas.

Alrededor de la mitad de los sitios analizados se encontraban perdiendo rendimiento porque se sembraron con una densidad inferior a la óptima.

El manejo del N es otra decisión de manejo relevante a la hora de optimizar el rendimiento de maíz en el centro de Argentina (Álvarez, 2008; Salvagiotti et al., 2011), siendo más importante en fechas de siembra tempranas que en fechas tardías. El efecto sobre el rendimiento en fechas tempranas fue de 27,6 kg de grano por kg de N y, nuevamente, debe interpretarse como la respuesta a la disponibilidad de N ante niveles crecientes de densidad (Fig. II. 3H). La respuesta aquí observada es superior a la reportada en estudios previos (Barbieri et al., 2008; Albarenque et al., 2016). La disponibilidad de S también aparece como una opción de manejo relevante en fechas tempranas, lo que sugiere la importancia de una nutrición balanceada en los ambientes más productivos (Pagani et al., 2012; Salvagiotti et al., 2017). La respuesta a la disponibilidad de N en fechas tardías es menor (10,3 kg kgN⁻¹) y comparable a la respuesta informada anteriormente (Gambin et al., 2016; Coyos et al., 2018). La reducción en la tasa de respuesta a la fertilización con N en fechas tardías es consistente con la esperada menor respuesta en ambientes más limitantes **en términos de radiación y temperatura u otro factor limitante del rendimiento** (Salvagiotti et al., 2011). De manera análoga a la densidad, casi la mitad de los productores pueden lograr mayores rendimientos si incorporan más N a sus planteos productivos de fecha temprana o tardía.

La mayoría de los sistemas agrícolas argentinos poseen una larga historia de exportaciones de P sin reabastecimiento, lo que provoca una disminución evidente en los niveles de P del suelo (Rubio et al., 2008; Ciampitti et al., 2011; Sainz-Rozas et al., 2012). Varios cultivos de grano (soja, trigo y maíz) siguen una curva de respuesta de saturación típica ante cambio de niveles de P del suelo (Sucunza et al., 2018). Para fechas de siembra tardías, se encontró la misma respuesta con umbrales críticos de P comparables a otros autores (11,0 frente a 12,5 ppm; Sucunza et al., 2018). La respuesta ante cambios en el P del suelo no se observó en fechas de siembras tempranas, pero el rendimiento sí respondió al P aplicado en fechas tempranas con un patrón de respuesta similar al observado en otros estudios en la región (Salvagiotti et al., 2017). Esta respuesta podría estar relacionada con la importancia del suministro de P durante las primeras etapas de crecimiento (Grant et al., 2001). En fechas tempranas, el maíz se siembra con temperaturas de suelo más bajas, lo que genera una menor disponibilidad inicial de P para el cultivo (Richardson y Simpson, 2011). Esto podría explicar la respuesta del rendimiento al P aplicado en fechas de siembras tempranas independientemente de los valores de P del suelo.

El uso de fungicidas foliares ha demostrado incrementar los rendimientos en varios ambientes (Paul et al., 2011; Ruffo et al., 2015; Abdala et al., 2018a). La respuesta del

rendimiento depende principalmente de las condiciones del cultivo y del genotipo (Munkvold et al, 2001; Ruffo et al., 2015). El maíz sembrado en fechas de siembras tardía suele ser más propenso a enfermedades foliares debido a condiciones climáticas que favorecen el desarrollo de la enfermedad. En este capítulo se encontró una respuesta importante al uso de fungicidas, más de dos veces mayor que el efecto reportado recientemente por otros autores (Abdala et al., 2018a), pero similar a otros estudios regionales específicos que prueban las respuestas a fungicidas en genotipos comerciales (Accame et al., 2019). El uso de fungicidas fue más frecuente en sitios con mayor densidad y disponibilidad de nutrientes (N y S) en fechas tempranas, sugiriendo que esta práctica de manejo también es potencialmente relevante en estas fechas. Experimentos específicos son necesarios para conocer los efectos de esta práctica de manejo en fechas de siembras tempranas.

Implicaciones regionales para la reducción de brechas de rendimiento

Los productores necesitan optimizar el manejo para sus ambientes productivos en particular y reducir las brechas de rendimiento (Lobell et al., 2009). Se demostró que existen posibilidades para optimizar ciertas prácticas de manejo. Los resultados mostraron reducciones en las brechas de rendimiento de 3.397 y 1.646 kg ha⁻¹ para fechas de siembras tempranas y tardías, respectivamente, asociado a mejoras en el manejo **y su aumento en el rendimiento sin considerar variables ambientales**. De esta manera, se rechaza la hipótesis donde se planteó un mayor impacto en el rendimiento al optimizar el manejo en fechas tardías cuando se compara con fechas tempranas.

El 30% de los productores se encuentran sembrando un maíz en fechas de siembras tardías en lotes con presencia de una napa cerca, perdiendo entre 530 y 1.367 kg ha⁻¹ (dependiendo del nivel de precipitaciones), **donde el atraso en la fecha de siembra acentúa la recarga del perfil**. Estos lotes deben sembrarse en fechas tempranas, aumentando los rendimientos hasta en 1.742 kg ha⁻¹ si los niveles de precipitaciones son inferiores a la media. Actualmente se encuentran disponibles herramientas de manejo para decidir la fecha de siembra en función de la disponibilidad de una napa, como mapas de elevación de agua subterránea (Nosetto et al., 2009) o herramientas de software (García et al., 2018). De manera análoga, solo una pequeña proporción de productores aplicaron fungicidas en fechas tardías, otra opción de manejo que genera un efecto positivo de magnitud sobre el rendimiento. Estas dos sencillas decisiones de manejo pueden reducir en un 10% (o 1.140 kg ha⁻¹; efecto promedio la presencia de napa en fechas de siembra tempranas) y en un 9% (o 1.047 kg ha⁻¹

¹; efecto del uso de fungicidas en fechas de siembra tardías) su brecha de rendimiento específica, respectivamente. Estas dos prácticas también pueden aumentar los ingresos netos de los productores. Se estimó un aumento del ingreso neto de alrededor de 166 US\$ ha⁻¹ y 123 US\$ ha⁻¹ (aumento de 153 US\$ ha⁻¹ menos 30 US\$ ha⁻¹ del costo promedio del fungicida), respectivamente, calculado en base a un precio histórico del maíz de US\$ 146 tn⁻¹ (BCR, 2018) y su efecto en el rendimiento. Otra ventaja es definir la fecha de siembra en función de la disponibilidad de una napa cercana, lo que ayuda a estabilizar el rendimiento de maíz y reducir los riesgos asociados a la producción (Rizzo et al., 2018).

Conclusiones

Se identificaron las decisiones de manejo y variables ambientales más importantes utilizando datos recopilados de experimentos realizados con tecnología del productor en lotes de productores. El análisis brindó opciones de manejo para reducir brechas de rendimiento y aumentar el rendimiento de los cultivos de maíz de siembra temprana y tardía. Las decisiones de manejo como la densidad ($\sim 0,28 \text{ kg pl}^{-1}$), la disponibilidad de N ($27,6 \text{ kg kgN}^{-1}$) y la disponibilidad de S ($\sim 110 \text{ kg kgS}^{-1}$) pueden ayudar a aumentar los rendimientos en fechas de siembra tempranas. El uso de fungicidas (1.044 kg ha^{-1}), el P del suelo ($\sim 140 \text{ kg ppmP}^{-1}$, hasta las 11 ppmP) y la disponibilidad de N (10 kg kgN^{-1}) son las decisiones de manejo más relevantes para reducir brechas de rendimiento en fechas de siembra tardías.

Variables ambientales como las precipitaciones presentaron un efecto diferencial en función de la presencia o ausencia de una napa cercana, pero con una tendencia similar para ambas fechas de siembra. La combinación de una napa cercana y precipitaciones excesivas redujeron el rendimiento en ambas fechas de siembras, lo que sugiere que la disponibilidad de agua es excesiva cuando la combinación de estas dos variables se encuentra presentes.

La fecha de siembra adecuada para cada lote debe considerar la presencia o ausencia de una napa cercana al momento de la siembra. Este efecto demostró un comportamiento contrastante en función de la fecha de siembra. Se encontró un efecto positivo para el maíz de fecha de siembra temprana (1.140 kg ha^{-1}), y también se detectó el efecto negativo en fechas de siembra tardías (-938 kg ha^{-1}), en coincidencia con otros autores (Gambin et al., 2016).

CAPÍTULO III

EL EFECTO DE LA ELECCIÓN DEL GENOTIPO SOBRE EL RENDIMIENTO A TRAVÉS DE FECHAS DE SIEMBRAS

Introducción

En el **Capítulo II** se identificó y cuantificó el efecto diferencial de las variables ambientales y de manejo en función de la fecha de siembra. Ese capítulo demostró que las variables que necesitan optimización en cada fecha de siembra son diferentes. Sin embargo, el análisis no cuantificó la importancia y la magnitud de la elección del genotipo sobre el rendimiento en estas fechas de siembra contrastantes. Estudios anteriores (Otegui et al., 1995; Otegui et al. 1996; Cirilo et al., 2011; Caviglia et al., 2014, Bonelli et al., 2016; Abdala et al., 2018b) que exploraron los efectos de la fecha de siembra evaluaron pocos genotipos o pocos ambientes, lo que **limita** estimar de manera efectiva el valor o contribución al rendimiento de cada genotipo. Este paso es fundamental para optimizar la selección de genotipos en cada fecha de siembra.

La elección del genotipo es fundamental para reducir las brechas de rendimiento (Grassini et al., 2011; Gambin et al., 2016), pero el impacto relativo en el rendimiento puede diferir entre ambientes. Hoy en día, los productores eligen sus genotipos a partir de ensayos multi-ambientales regionales. Estos ensayos proporcionan información para ayudar a los productores a decidir la mejor opción de genotipo. Los cultivos de siembra tardía **están más expuestos** a las enfermedades foliares y a una mayor presión de insectos, lo que genera que los genotipos conlleven atributos relacionados con estos problemas. Por el contrario, el maíz de siembra temprana tiene un mayor potencial de rendimiento, pero también son más propensos a una mayor probabilidad de sequía durante la floración y el llenado temprano del grano. Los maíces de fecha de siembra temprana también dependen de un manejo más agresivo en términos de N y de densidad que los maíces de fecha de siembra tardía (**Capítulo II**). Por estas razones, los genotipos probados no siempre coinciden entre fechas de siembra, aunque son en general de similar madurez relativa. En la actualidad, los genotipos comerciales argentinos difieren en su respuesta al N, la densidad, las aplicaciones de fungicidas foliares y el control de insectos (Hernández et al, 2014; Gambín et al., 2016; Abdala et al., 2018a; Accame et al., 2019; Madias et al, 2020). Estas diferencias afectan la importancia de la elección adecuada del genotipo en fechas de siembra temprana vs. tardía.

En el presente capítulo se estudió la influencia relativa de la elección del genotipo en el rendimiento del maíz en fechas de siembra contrastantes. Para ello se recopilaron 118 y 84 ensayos comparativos de rendimiento a campo de fecha de siembra temprana y tardía durante diez años consecutivos, cada uno compuesto entre 7 a 34 genotipos comerciales. El objetivo fue determinar si existe un impacto diferencial en el rendimiento asociado con el genotipo al comparar las dos fechas de siembra contrastantes utilizadas comúnmente en la región.

Materiales y métodos

Base de datos exploradas

Los ensayos se sembraron en diferentes ambientes y bajo una amplia gama de decisiones de manejo en fechas de siembra contrastantes: temprana (de septiembre y octubre) y tardía (de diciembre). Se analizaron un total de 202 ensayos a campo realizados durante diez años consecutivos (desde la campaña 2010/11 a 2019/20, aquí llamado año 1 al año 10 y simplificado como A1 a A10, respectivamente). Los ensayos se realizaron en lotes de productores agrupados dentro del CREA Sur de Santa Fe. Esta base de datos incluye a la base de datos utilizada en el **Capítulo II**. La Figura III.1 proporciona una representación gráfica de la distribución de los ensayos dentro de la región.

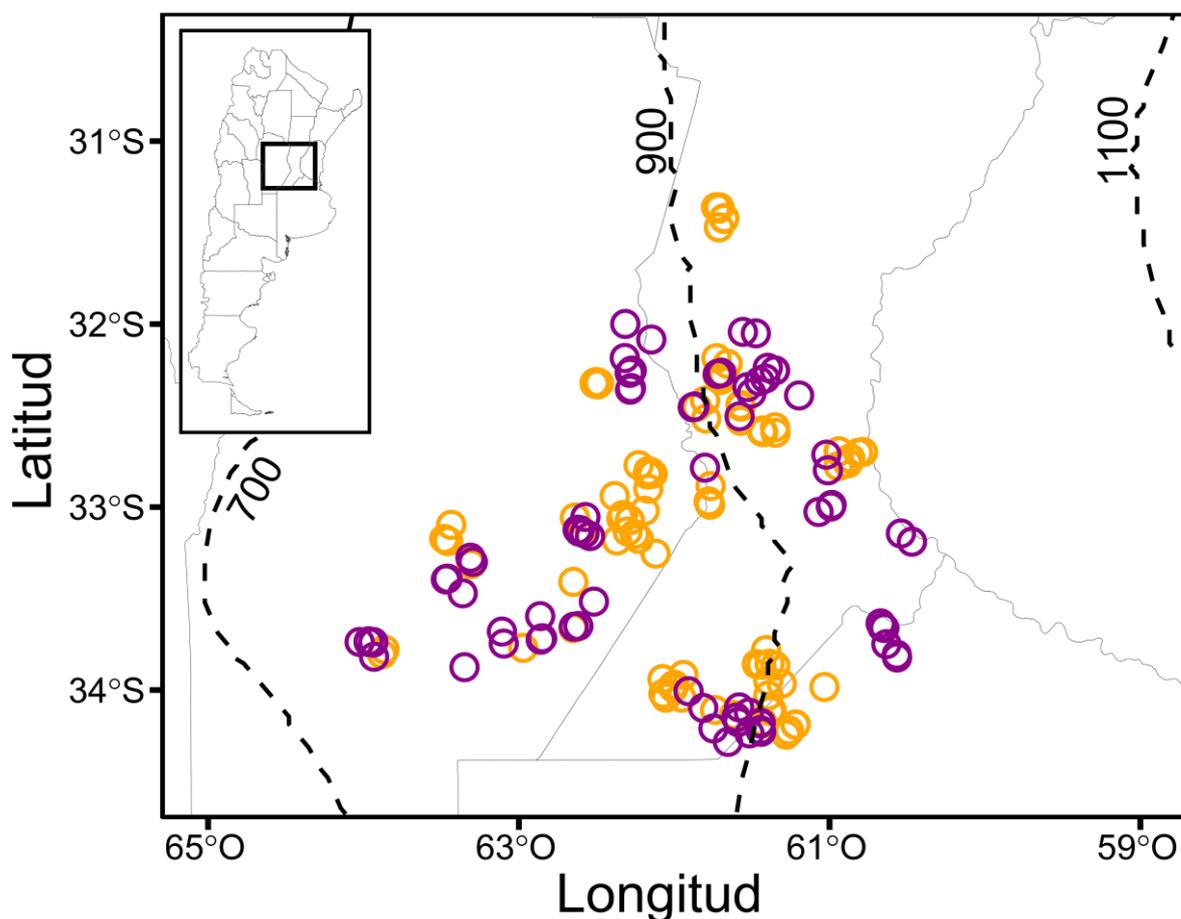


Fig. III. 1. Mapa de la región central Argentina con la ubicación de los sitios explorados. Los círculos amarillos son los 118 sitios de fecha temprana y los círculos violetas son los 84 sitios de fecha tardía. Las líneas discontinuas describen las isohietas de precipitación anual medias (700, 900 y 1100 mm año⁻¹) según promedios desde 1970 a 2000.

Todos los ensayos se realizaron con la tecnología del productor, y el mismo productor en particular decidió la fecha de siembra específica, la densidad, el manejo de los nutrientes y la protección del cultivo. Una descripción del rango explorado para estas decisiones de manejo está disponible en el **Capítulo II**. Cada combinación de fecha de siembra x año exploró un número de genotipo diferentes (desde 14 a 34 y desde 7 a 18 en fechas de siembra temprana y tardía, respectivamente) y un número de sitios diferentes (desde 10 a 14 y desde 5 a 12 en fechas de siembra temprana y tardía, respectivamente). Todos los genotipos testeados fueron genotipos recomendados comercialmente por diferentes compañías de semillas y exploraron un rango de madurez relativa similar.

Cada ensayo tenía un diseño en bloques completamente aleatorizado con dos o tres repeticiones, similar a Gambin et al. (2016) o al **Capítulo II**. El tamaño de la parcela varió

desde las seis a ocho hileras de ancho y desde los 200 a 250 m de largo, dependiendo de la maquinaria agrícola disponible en el sitio, y se sembraron y cosecharon con las sembradoras y cosechadoras comerciales del agricultor. Todos los ensayos fueron manejados en siembra directa y en secano.

Análisis estadístico

Los datos se analizaron utilizando modelos lineales de efectos mixtos (paquete *lme4*, función *lmer*; Bates et al., 2015) en el software R (R Core Team, 2018, versión 3.6.2). Para cada combinación año y fecha de siembra, se consideró un modelo que incluía entre los efectos aleatorios al genotipo (G), al ambiente (A) y a la interacción genotipo por ambiente (GxA). Los modelos se ajustaron utilizando el método de máxima verosimilitud restringida (REML; Zuur et al., 2009). El término de ambiente se consideró como los diferentes sitios, que en realidad pueden involucrar diferentes localidades, lotes, campos, tipos de suelo y/o un manejo diferente.

Los datos **se** analizaron por año y fecha debido al gran desbalance de genotipos (los genotipos en cada fecha cambian de año a año, así como también cambian entre fechas de **siembra**). Teniendo en cuenta esto último, se realizaron dos enfoques con diferencia en el número de genotipos analizados. Un enfoque exploró una variabilidad genotípica más amplia con todos los genotipos probados en cada combinación de fecha de siembra x año. Luego, se examinó una variabilidad genotípica más estrecha comparando sólo los genotipos que se siembran en ambas fechas de siembra para cada año.

El efecto aleatorio de cada genotipo, en mejoramiento llamados predictor lineal insesgado o BLUP por sus siglas en inglés (best linear unbiased predictors) fue usado para estimar el verdadero efecto del genotipo a través de los sitios en cada combinación de año x fecha de siembra (Robinson, 1991). Esto proporciona una estimación adecuada del efecto del rendimiento del genotipo en diferentes condiciones ambientales y de manejo. **Se considero** el efecto de la elección del genotipo como la diferencia de rendimiento entre los BLUP del genotipo de mayor y menor rendimiento por año x combinación de fecha de siembra. Esta diferencia de rendimiento se consideró en valores absolutos (en kg ha^{-1}) y en el porcentaje (%) sobre el rendimiento promedio de cada combinación de año x fecha de siembra. Además, **se realizó** una *prueba t* ("t-test") para comparar estadísticamente la diferencia de rendimiento entre genotipos en cada fecha de siembra (paquete *stats*, función *t.test*; R Core Team, 2019).

Resultados

Variabilidad en el rendimiento

Se analizaron 118 y 84 ensayos a campo de fechas de siembra temprana y tardía, **respectivamente**, realizados durante diez años consecutivos, con un promedio de 17 genotipos comerciales cada uno. Los rendimientos promedio por año variaron desde 8.525 a 13.239 y desde 7.039 a 10.134 kg ha⁻¹ en fechas de siembras tempranas y tardías, respectivamente (Fig. III. 2). A excepción de los años 2, 3 y 4 donde ambas siembras rindieron de manera similar, en los otros siete años analizados la fecha de siembra temprana rindió más que la fecha tardía (interacción significativa año x fecha de siembra, $p < 0,001$; Fig. III. 2 y Tabla III. 1). La variación de rendimiento explorada considerando todos los genotipos, sitios y años fue desde 3.460 a 16.385 y desde 3.927 a 12.901 kg ha⁻¹ para fechas de siembras tempranas y tardías, respectivamente.

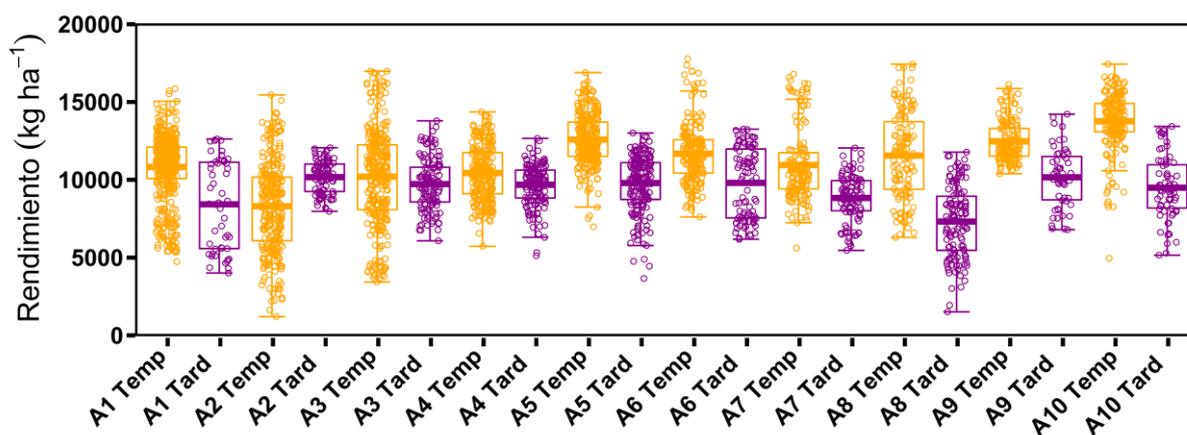


Fig. III. 2. Boxplot del rendimiento de grano para los 202 sitios analizados durante 10 años consecutivos. Los boxplot amarillos representan los años de fecha temprana y los boxplot violetas a los años de fecha **tardía**.

Efecto del genotipo sobre el rendimiento

Considerando todos los genotipos evaluados, siempre existieron diferencias significativas entre genotipos en el rendimiento dentro de cada combinación de año x fecha de siembra ($p < 0,01$). Estas diferencias entre genotipos representaron, en promedio a lo largo de todos los años, entre el 3 y el 9% de la variabilidad del rendimiento total en fechas de siembras tempranas y tardías, respectivamente, y variaron entre 0,8 a 6,1% en fechas de

siembras tempranas y entre 0,9 a 28,5% en fechas de siembras tardías (Tabla III. 1). En ambas fechas de siembra, los efectos del sitio y la interacción genotipo x sitio siempre explicaron una mayor proporción de la variabilidad que la explicada por el genotipo. En promedio a lo largo de los años, el efecto sitio explicó alrededor del 78,8 y 68,2%, y el efecto genotipo x sitio explicó el 11,2 y 14,1% de la variabilidad del rendimiento para fechas de siembras tempranas y tardías, respectivamente. Estos resultados mostraron que dentro de cada año la variación de rendimiento explicada por el sitio, el genotipo y la interacción genotipo x sitio fue similar cuando se compararon las fechas de siembra temprana y tardía ($p=0,16$, $0,07$, y $0,45$ con respecto al sitio, al genotipo y a la interacción genotipo x sitio, respectivamente; Tabla III. 1).

Tabla III. 1. Número de sitios, genotipos evaluados, rendimiento promedio y la proporción de la variabilidad del rendimiento explicada por el sitio, el genotipo y la interacción genotipo x sitio para cada combinación de año x fecha de siembra.

Año	Fecha de siembra	Sitios	Genotipos	Rendimiento	Variación del rendimiento		
					Sitio	Genotipo	Genotipo x Sitio
				kg ha ⁻¹	%	%	%
A1	Temprana	13	34	11.061	77,1	6,1	8,1
	Tardía	5	10	8.571	88,7	1,4	4,7
A2	Temprana	10	29	8.525	82,6	3,6	7,8
	Tardía	6	15	10.134	51,8	9,9	13,0
A3	Temprana	11	27	10.110	88,4	1,4	6,5
	Tardía	9	14	9.762	64,8	14,0	14,3
A4	Temprana	12	22	10.335	76,5	3,9	12,5
	Tardía	8	18	9.599	32,9	24,9	34,2
A5	Temprana	13	23	12.471	62,8	5,4	24,9
	Tardía	12	15	9.697	39,6	28,5	27,2
A6	Temprana	13	14	11.459	79,8	3,6	10,0
	Tardía	9	10	9.527	93,1	0,9	4,6
A7	Temprana	11	14	10.580	88,1	0,8	7,3
	Tardía	10	10	8.515	71,3	4,1	16,7
A8	Temprana	10	13	11.222	91,6	2,0	4,3
	Tardía	9	14	7.039	81,6	6,2	7,5
A9	Temprana	11	14	12.108	60,2	3,3	20,2
	Tardía	6	9	9.731	80,6	4,0	8,1
A10	Temprana	14	14	13.239	80,8	3,2	10,8
	Tardía	10	7	9.154	77,5	5,5	10,8
Promedio	Temprana	12	20	11.111	78,8	3,3	11,2
	Tardía	9	12	9.173	68,2	9,9	14,1

Utilizando el enfoque considerando todos los genotipos evaluados en cada combinación de año x fecha de siembra, la diferencia de rendimiento promedio entre el genotipo de mayor rendimiento y el de menor rendimiento osciló entre los 11 y 2.479 kg ha⁻¹ y entre los 111 a 3.294 kg ha⁻¹ en fechas de siembra tempranas y tardías, respectivamente.

La diferencia de rendimiento promedio entre el genotipo de mayor rendimiento y el de menor rendimiento en todas las fechas de siembra tempranas y tardías evaluadas fue de 1.080 vs 1.246 kg ha⁻¹ (Tabla III.2). Cuando esta diferencia de rendimiento se considera en términos relativos al rendimiento promedio obtenido en cada combinación de año x fecha de siembra, representó del 10,1 y 13,3% para las fechas de siembra temprana y tardía, respectivamente (Tabla III.2). Estas diferencias de rendimiento en términos absolutos o relativos no fueron estadísticamente significativas diferentes cuando se compararon entre ambas fechas de siembra (p=0,66 y 0,43 en términos absolutos y relativos, respectivamente).

Tabla III. 2. Diferencia de rendimiento (como kg ha⁻¹ y % de la media) entre el genotipo de mayor y menor rendimiento para cada año en fechas de siembras tempranas y tardías.

Análisis	Año	Diferencia en	Diferencia en	Diferencia en	Diferencia en
		Temprano	Tardío	Temprano	Tardío
		kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	% de la media	% de la media
Diferentes genotipos	A1	2.479	111	22,9	1,3
	A2	1.912	1.099	23,0	10,8
	A3	872	1.980	8,5	20,4
	A4	965	1.935	9,2	20,0
	A5	853	3.294	6,8	33,6
	A6	1.096	235	9,4	2,4
	A7	11	545	0,1	6,2
	A8	1.269	1.423	11,0	19,5
	A9	504	772	4,0	7,6
	A10	838	1.066	6,1	11,2
Iguales genotipos	A1	990	115	9,0	1,3
	A2	562	766	6,7	7,5
	A3	523	2.071	5,2	21,0
	A4	846	1.865	8,1	19,2
	A5	976	2.943	7,6	29,2
	A6	1.023	340	8,7	3,5
	A7	148	203	1,4	2,3
	A8	1.353	1.296	11,7	17,7
	A9	825	0	6,6	0,0
	A10	943	1.173	6,9	12,1
Diferentes genotipos		1.080	1.246	10,1	13,3
Iguales genotipos		819	1.077	7,2	11,4

Debido a que muchos de los genotipos en cada año se repetían entre ambas fechas de siembra (promedio alrededor del 64%, que varía del 29 al 100%), también se evaluó la diferencia de rendimiento entre el genotipo de mayor y menor rendimiento dentro de cada combinación de año x fecha de siembra para los genotipos que coincidían en cada año en

ambas fechas de siembra (Tabla III.2). Por lo tanto, la diferencia de rendimiento promedio entre el genotipo de mayor y menor rendimiento dentro de cada combinación de año x fecha de siembra fue de 819 y 1.077 kg ha⁻¹ para las fechas de siembra temprana y tardía, respectivamente. En términos relativos, estas diferencias de rendimiento fueron del 7,2 y 11,4% para fechas siembras temprana y tardía, respectivamente (Tabla III.2). Estas diferencias de rendimiento, tanto en términos absolutos como relativos, tampoco fueron estadísticamente significativas ($p=0,45$ y $0,23$ en términos absolutos y relativos, respectivamente).

En consecuencia, la diferencia de rendimiento entre los genotipos comerciales disponibles en la región para fechas de siembras temprana y tardía demuestran efectos similares (Tabla 2). La elección de genotipos tiene básicamente el mismo impacto en fechas de siembras temprana y tardía.

Discusión

En el presente capítulo se estimó la influencia de la elección del genotipo sobre el rendimiento en dos fechas de siembras contrastantes para la región. Existe estudios previos que demostraron que los genotipos disponibles comercialmente en la región difieren en el control de insectos, la respuesta a la densidad, la respuesta a la aplicación de N y la respuesta a fungicidas foliares (Sarlangue et al., 2007; Hernández et al., 2014; Gambin et al., 2016; Madias et al., 2020), pero no es claro el impacto sobre el rendimiento que puede tener el genotipo en fechas de siembra contrastante bajo la diversidad de manejo habitual. Los rendimientos demostraron una interacción año x fecha de siembra ($p<0,01$), donde las fechas de siembra temprana fueron mayores o similares a las tardías, y también presentaron una mayor variabilidad de rendimiento. Sin embargo, estos resultados evidenciaron que la elección del genotipo es igualmente de importante en las fechas de siembra temprana y tardía. Estudios previos que estimaron las diferencias de rendimiento entre genotipos ante cambios en las fechas de siembra (Otegui et al., 1995; Otegui et al., 1996; Cirilo et al., 2011; Caviglia et al., 2014; Bonelli et al., 2016) exploraron un número reducido de genotipos y/o ambientes. El análisis planteado exploró una gran cantidad de ensayos bajo el manejo típico y la variabilidad ambiental de la región (**Capítulo II**), por lo que permitió lograr una correcta comparación para evaluar adecuadamente el efecto de la elección del genotipo sobre el rendimiento en fechas de siembra contrastantes actualmente utilizadas.

A modo comparativo y de validación, también se analizó los únicos dos estudios previos de la región que testearon un gran número de genotipos (18 en Abdala et al., 2018b, y 32 Abdala et al., 2018c; Tabla III. 3) en fechas de siembra tempranas y tardías. En ambos estudios se utilizó el mismo manejo en ambas fechas de siembra, y la diferencia máxima de rendimiento entre el genotipo de mayor y menor rendimiento fue aproximadamente la misma, lo que respalda los resultados de este capítulo. En Abdala et al. (2018b) la diferencia de rendimiento máximo promedio entre genotipos extremos dentro de las fechas de siembra temprana y tardía fue de 3.601 y 3.393 kg ha⁻¹, o 28,3 y 30,8% del rendimiento promedio, respectivamente. En Abdala et al. (2018c) la diferencia de rendimiento máximo promedio entre genotipos extremos dentro de las fechas de siembra temprana y tardía fue de 5.520 y 5.370 kg ha⁻¹, o 47,7 y 50,7% del rendimiento promedio, respectivamente. En estos dos estudios la varianza de rendimiento explicada por el genotipo (fue significativamente mayor que las reportadas en nuestro estudio (Tabla III. 1), probablemente relacionada con la menor variación en manejo y ambiental explorada.

La elección del genotipo no solamente está relacionada con las diferencias de rendimiento, sino con otros rasgos como la humedad a la cosecha que no se analizaron aquí y también son relevantes y deberían tenerse en cuenta. Es conocido la existencia de grandes diferencias en el llenado de granos y la humedad a cosecha entre los genotipos comerciales en regiones templadas (Sala et al., 2006; Gambín et al., 2017; Li et al., 2021). Las diferencias en la humedad a la cosecha son siempre más relevantes en cultivos de fecha siembra tardía debido al ambiente climático en el que los granos están perdiendo humedad, donde el déficit de presión de vapor es más bajo luego de la madurez fisiológica en fechas de siembra tardía generando reducción en la tasa de pérdida de humedad de los granos. Otra característica importante para la elección de genotipos es la tolerancia al quebrado y al vuelco, basado en la estabilidad de la caña. Una mala elección podría resultar en eventuales pérdidas de rendimiento, ante imposibilidad de recolectar el maíz al momento de la cosecha. Estos aspectos no fueron abarcados en esta tesis, pero son un aspecto relevante a tener en cuenta en la selección de genotipos para fechas de siembra contratante.

Tabla III. 3. Número de genotipos y sitios evaluados, diferencia de rendimiento entre el genotipo de mayor y menor rendimiento como kg ha⁻¹ y porcentaje (%) de la media, y la proporción de la variabilidad del rendimiento explicada por el genotipo (%) para fechas de siembras tempranas y tardías en los estudios de Abdala et al. (2018b) y Abdala et al. (2018c). El número de sitios se refiere a los ambientes evaluados dentro de cada fecha de siembra.

Fuente	Genotipos	Sitios	Rendimiento promedio en Temprano	Rendimiento promedio en Tardío	Diferencia en Temprano	Diferencia en Tardío	Diferencia en Temprano	Diferencia en Tardío	Variación explicada por el genotipo en Temprano	Variación explicada por el genotipo en Tardío
			kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	%	%	%	%
Abdala et al., 2018b	18	2	12.739	11.003	3.601	3.393	28,3	30,8	36,7	59,9
Abdala et al., 2018c	32	2	11.577	10.591	5.520	5.370	47,7	50,7	73,0	57,1

Conclusiones

Los resultados del presente capítulo permiten concluir que la elección del genotipo es igualmente importante para reducir las brechas de rendimiento de maíz de manera independiente en fechas de siembra temprana y tardía. En consecuencia, los productores deben dedicar una similar relevancia para elegir el genotipo correcto para cada lote en las dos fechas de siembra contrastantes comúnmente utilizadas en la región.

La diferencia de rendimiento entre el genotipo de mayor y menor rendimiento comercialmente disponible fue de alrededor de 1.163 kg ha⁻¹ para ambas fechas de siembra.

CAPÍTULO IV

DISCUSIÓN GENERAL

A lo largo de la presente tesis se generó información innovadora para optimizar el rendimiento de maíz en fechas de siembras contrastantes en la región central templada de la Rep. Argentina. La modificación en la fecha de siembra de Septiembre-Octubre a Diciembre genera importantes alteraciones dentro del sistema productivo del cultivo de maíz, desde cambios en la variabilidad y potencialidad de los rendimientos (Otegui et al., 1996; Maddonni, 2012) hasta las decisiones de manejo óptimas y las variables ambientales que afectan el rendimiento y la humedad a cosecha en cada fecha de siembra. La producción nacional del maíz tiene importantes implicancias económicas para Argentina, ya que ingresan anualmente entre 3.300 a 6.100 millones de dólares gracias a la exportación de este grano (BCR, 2020c). Por lo tanto, optimizar el manejo con el fin de aumentar la producción nacional para ambas fechas de siembras conlleva beneficios económicos para los productores y la Argentina.

La información novedosa generada en la presente tesis se dividió en dos capítulos. En el transcurso del **Capítulo II** y el **Capítulo III** se identificó la importancia relativa de las decisiones de manejo (manejo nutricional, de densidad, protección de cultivo y elección de genotipo) para fechas de siembras tempranas y tardías. En el caso de las variables ambientales se definió su importancia relativa durante el **Capítulo II**. Además, se estimó la producción perdida por un incorrecto manejo en ambos cultivos a lo largo del **Capítulo II**, identificando potenciales mejoras para el manejo de ambos cultivos.

Trabajos previos han estudiado el efecto de diversas decisiones de manejo, como la densidad, la fertilización, la fecha de siembra y la protección de cultivos, sobre el rendimiento de maíz (Uhart y Andrade 1995; Otegui et al., 1995; Otegui, 1997; Presello et al., 2008). Sin embargo, no existen estudios específicos comparativos del impacto del manejo en diferentes fechas de siembra, de manera de determinar la influencia relativa e importancia en cada una. Los resultados del **Capítulo II** y del **Capítulo III** demuestran que existen ciertas decisiones de manejo de igual importancia para cada fecha de siembra y otras decisiones de manejo presentan mayor importancia en alguna fecha de siembra específica (Tabla IV. 1).

Entre las decisiones de manejo evaluadas, la densidad presentó discrepancias en la relevancia para ambas fechas de siembras, ya que fue una variable de importancia (basado en IR) para fechas tempranas y de menor importancia para fechas tardías, **una de las posibles causas se podría deber a las diferencias en el rango explorado (menor**

en fechas tardías en comparación a fechas tempranas). El efecto de la densidad en fechas tempranas fue mayor a los encontrados en trabajos previos (Sarlangue et al., 2007; Antonietta et al., 2014; Amelong et al., 2017) y puede deberse a que no fue una variable estudiada de manera independiente como en la mayoría de los trabajos previos, sino que covarió con otra variable de manejo de importancia como es la fertilización nitrogenada. Esto se basa en la correlación encontrada entre ambas prácticas de manejo, la definición entre la densidad optima por ambiente y el efecto del nitrógeno en modificar el rendimiento de este ambiente. Por lo tanto, es clave ajustar ambas decisiones de manejo en forma simultánea para maximizar el rendimiento en fechas tempranas. En cambio, en las fechas tardías la relevancia de la densidad fue menor, y se evidenció un bajo efecto sobre el rendimiento (Tabla IV. 1). Este comportamiento difiere a estudios previos (Gambin et al., 2016) y puede deberse a diferencias en el menor rango de densidad explorado, en las variables relevadas y en las bases de datos estudiadas. Gambin et al. (2016) exploraron un mayor rango de densidades (23% mayor que en la presente tesis), lo que podría explicar la mayor respuesta.

Tabla IV. 1: Ranking en base a IR de los predictores para fechas de siembra tempranas y tardías. En negrita se destacan las variables más relevantes dentro de cada fecha.

Fecha temprana		Fecha tardía	
Variable	Importancia	Variable	Importancia
Densidad/Nitrógeno	++++	Precipitaciones	++++
Napa		Napa	
Precipitaciones		Fungicida	
Azufre		P suelo	
P aplicado		Nitrógeno	
Agua a la siembra		Agua a la siembra	
Fecha de siembra		Fecha de siembra	

		Azufre	

El efecto de la nutrición, en base a N, S y P, también presentó diferencias entre fechas de siembras. Generalmente, la demanda nutricional aumenta en ambientes de mayor potencial (Salvagiotti et al., 2011; Pagani et al., 2012; Coyos et al., 2018; Maltese et al., 2019). En la presente tesis, se observó un comportamiento similar para el N y S, donde en fechas tempranas se evidenció una mayor importancia y efecto, en comparación a fechas tardías (Tabla IV. 1). Estos resultados son consistentes con ambientes de mayor rendimiento potencial en fechas de siembra tempranas (Otegui et al., 1996; Mercau y Otegui, 2014). En el caso del P, se encontró una clásica respuesta de saturación del rendimiento para fechas tardías con un valor de umbral similar a los

reportados anteriormente (Sucunza et al., 2018). En cambio, para fechas tempranas no se observó respuesta al P del suelo, ya que el rango explorado fue superior al valor de umbral de respuesta (12,5 ppm de P; Sucunza et al., 2018). Sin embargo, es importante tener en cuenta que para optimizar el rendimiento en fechas tempranas también se debe aplicar P con el objetivo de mantener o aumentar los niveles del suelo por encima del umbral crítico (Rubio et al., 2008; Ciampitti et al., 2011). En el caso de la base de datos utilizada, se encontró que antes aumentos del P del suelo, los productores aplicaron menos fertilizante fosforado ($p = -0,30$ y $-0,42$ para fechas de siembras tempranas y tardías, respectivamente; Tablas S2 y S3).

Una decisión de manejo que acompañó el atraso en la fecha de siembra fue el uso de fungicidas foliares, principalmente a causa de las condiciones ambientales durante el ciclo del cultivo. En general, el maíz tardío es más proclive a enfermedades foliares en comparación al maíz temprano. Por lo tanto, la relevancia y el efecto del fungicida en fechas tardías es acorde con lo reportado en estudios anteriores (Abdala et al., 2018a; Accame et al., 2019; Madias et al., 2020). En cambio, para las fechas tempranas no se pudo evaluar su efecto debido a que esta variable presentó multicolinealidad con otras (por ejemplo, una correlación positiva con densidad y nutrición **mencionado en el Capítulo II**). **Esta multicolinealidad hubiera ocasionado una incorrecta interpretación de los resultados debido a los mayores niveles de densidad y nitrógeno cuando se utilizó fungicidas foliares en fechas tempranas.** Sin embargo, es esperable que antes condiciones de alto potencial el uso de fungicidas también sea necesario para proteger el rendimiento **ante reductores del rendimiento como las enfermedades.**

Otra decisión de manejo clave es la elección de genotipo. Esta decisión demostró tener el mismo impacto en el rendimiento tanto en fechas de siembra tempranas como en fechas tardías, tal como se demostró en el **Capítulo III**. Estos resultados no coinciden con trabajos anteriores donde determinaron que el efecto de la elección del genotipo presentó un efecto diferencial ante cambios en la fecha de siembra (Otegui et al., 1995, Cirilo et al., 2011; Caviglia et al., 2014, Bonelli et al., 2016). Sin embargo, estos estudios exploraron un rango en número de genotipos mucho menor al explorado en la presente tesis. Por lo tanto, los resultados presentados poseen una mayor representatividad de la región demostrando que la elección de genotipo merece la misma relevancia tanto en fechas de siembras tempranas como tardías. **Los resultados también exploraron un mayor número de situaciones bióticas y abióticas que los trabajos anteriores.** En consecuencia, los productores deberían dedicarle igual importancia a la elección del mejor genotipo para optimizar el rendimiento en cada fecha de siembra, el cual ha mostrado un efecto promedio de 1.163 kg ha^{-1} . **Este efecto no modifica las respuestas**

de las prácticas de manejo y variables ambientales ya que estos híbridos fueron parte del análisis del **Capítulo II**.

En Argentina, es conocida la importancia de las variables ambientales para maximizar el rendimiento de maíz (Hall et al., 1992; Nosoetto et al., 2009; Maddonni et al., 2012). De acuerdo a esto, los resultados presentados en el **Capítulo II** confirman la dependencia al agua disponible (Tabla IV. 1). Sin embargo, el agua a la siembra no presentó gran importancia en ambas fechas de siembras. Esto puede deberse a la presencia de napas y/o a los niveles de precipitaciones exploradas. En cambio, la presencia de una napa cercana tiene implicancias en la designación de la fecha de siembra, donde en lotes con influencia de napa los productores deberían sembrar en fechas tempranas y evitar las fechas tardías. El efecto de las precipitaciones se diferenció ante la presencia o ausencia de una napa, pero con comportamiento similar en ambas de fechas de siembras. Estos resultados sugieren que las altas precipitaciones en presencia de una napa producen una sobreoferta de agua en el perfil, afectando negativamente el rendimiento. En cambio, ante la ausencia de una napa el efecto de las precipitaciones afecta positivamente en el rendimiento siendo el único suministro de agua. Por lo tanto, los productores deben atender a los pronósticos de precipitaciones y las condiciones de la napa al momento de la siembra para ambas fechas de siembras.

A partir de estos resultados se pudo estimar la ganancia en rendimiento a través de una mejora en el manejo (sin considerar la elección del genotipo) a lo largo del **Capítulo II**. La optimización del manejo tiene como objetivos reducir las brechas de rendimiento y mejorar el ingreso neto de los productores (Lobell et al., 2009). La optimización del manejo en fechas tardías presentó una menor ganancia de rendimiento a pesar de ser un cultivo más reciente respecto a las fechas de siembra tempranas. Esta diferencia se debió principalmente al manejo de la densidad y la nutrición nitrogenada en fechas tempranas. Es clave entender que la densidad óptima para cada situación productiva es una decisión de gran incertidumbre por su relación directamente proporcional con el rendimiento (respuesta de comportamiento óptimo, Hernandez et al., 2014). Por lo tanto, es esperable que los productores prefieran implantar una densidad “defensiva” por debajo del óptimo para evitar posibles riesgos antes cambios en las expectativas de disminución del rendimiento. Sin embargo, fue posible identificar ciertas decisiones de manejo simples que reducen las brechas de rendimiento y aumentan el ingreso neto a través de la elección de la fecha de siembra antes condiciones de presencia o ausencia de napa, el uso de nitrógeno y el uso de fungicidas en fechas tardías. Estos resultados describen decisiones de manejo específicas y

variables ambientales para optimizar el rendimiento a lo largo de fechas de siembras contrastantes.

CONTRASTE DE HIPÓTESIS ASOCIADAS A LOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Durante el desarrollo de esta tesis se han presentado y analizado evidencias según los objetivos inicialmente planteados, lo cual permite responder a las hipótesis originales como se indica a continuación a modo de resumen:

Objetivo específico 1: Identificar la importancia relativa de diferentes variables de manejo y del ambiente sobre el rendimiento de maíz en la región central para fechas de siembra tempranas y tardías.

Hipótesis 1: Las variables de manejo y ambiente de mayor impacto sobre el rendimiento no son las mismas en fechas de siembra tempranas y tardías.

Esta hipótesis es ACEPTADA PARCIALMENTE (ver Capítulo II).

Hipótesis 2: La fecha de siembra interacciona con variables de manejo como la densidad, y con variables de ambiente como tipo de suelo y agua a la siembra.

Esta hipótesis es ACEPTADA PARCIALMENTE (ver Capítulo II).

Hipótesis 5: El efecto del genotipo sobre el rendimiento es mayor en siembras tempranas que en fechas tardías.

Esta hipótesis es RECHAZADA (ver Capítulo III).

En el **Capítulo II** se observó que las variables de manejo de mayor impacto fueron diferentes para cada fecha de siembra. En fechas tempranas, las variables de manejo que mostraron mayor influencia sobre el rendimiento fueron la densidad y el N, mientras que en fechas tardías fueron el uso de fungicidas, el P del suelo y el N. En cambio, las variables ambientales de mayor impacto para ambas fechas de siembra fueron las mismas, siendo éstas la presencia de napa y las precipitaciones. Las evidencias encontradas en el **Capítulo II** permiten *aceptar parcialmente la hipótesis 1*.

Los resultados obtenidos en el **Capítulo II** también permitieron observar las interacciones entre fecha de siembra y decisiones de manejo o variables ambientales. Esta interacción entre la densidad, la disponibilidad de N y de S evidenció una diferencia en importancia entre fechas de siembra. Sin embargo, variables como la presencia de napa, las precipitaciones, la fecha de siembra y el agua a la siembra no presentaron diferencias en importancia antes fechas de siembras contrastantes. En el caso del tipo de suelo, no se evidenciaron efectos sobre el rendimiento durante el análisis exploratorio, de modo que no se determinó su efecto en el rendimiento. Por lo tanto, estas evidencias me permiten *aceptar parcialmente la hipótesis 2*.

El efecto del genotipo sobre el rendimiento en ambas fechas de siembras fue explorado en el **Capítulo III** a través de un amplio rango de ambientes y años. Los

resultados demostraron que la selección del genotipo posee similar efecto e importancia en ambas fechas de siembras. En consecuencia, el productor debe seleccionar el mejor genotipo para cada fecha de siembra sin priorizar ninguna fecha de siembra **en particular**. Las evidencias encontradas en el **Capítulo III** permiten *rechazar la hipótesis 5*.

Objetivo específico 2: Estimar el mejor modelo y la magnitud de la respuesta de las diferentes variables sobre el rendimiento en maíces tempranos y tardíos.

Hipótesis 3: Todas las variables relacionadas con agua disponible tienen un efecto mayor en fechas tempranas que en fechas tardías.

ACEPTADA PARCIALMENTE (ver **Capítulo II**).

Se definieron dos mejores modelos, uno para cada fecha de siembra. De esta manera, **se pudo** estimar la magnitud de los efectos sobre el rendimiento en maíces tempranos y tardíos. En base a estos modelos, se observó comportamientos dispares para las variables relacionadas con agua disponible. Las precipitaciones y el agua útil a la siembra presentan similar efecto para ambas fechas de siembra. Sin embargo, el efecto de la presencia de una napa cercana fue diferente ante cambios en la fecha de siembra. El efecto de la napa en fechas tempranas fue mayor, en términos absolutos, que en fechas tardías sin considerar la dirección del efecto. Por lo tanto, las evidencias encontradas en el **Capítulo II** permiten *aceptar parcialmente la hipótesis 3*.

Objetivo específico 3: Estimar los rendimientos esperables de los productores bajo el manejo ideal en base al modelo propuesto. Estimar la producción perdida por un incorrecto manejo en ambos cultivos.

Hipótesis 4: El manejo ideal para cada fecha de siembra tiene un efecto mayor sobre el rendimiento en fechas tardías que en fechas tempranas.

RECHAZADA (ver **Capítulo II**).

En base a los modelos obtenidos en el objetivo 2, se estimó con éxito el impacto del manejo ideal para cada fecha de siembra (**Capítulo II**). A pesar de que el maíz tardío es un cultivo más novedoso, se observó que presentó menores incrementos en el rendimiento ante cambios en el manejo del cultivo. El aumento en el rendimiento gracias a la optimización en el manejo repercutió con mayores incrementos en fechas tempranas que en fechas tardías. Esta mayor respuesta se debió principalmente a la mejora en las decisiones de la densidad y la disponibilidad de N en fechas tempranas. Las evidencias encontradas en el **Capítulo II** permiten *rechazar la hipótesis 4*.

APORTES ORIGINALES AL CONOCIMIENTO CIENTÍFICO

A partir de los capítulos de esta tesis se estudiaron diferentes aspectos del manejo de los cultivos de maíz temprano y maíz tardío. Los resultados obtenidos conforman avances importantes en la mejora de rendimiento en base a la optimización del manejo. Esto se logró analizando ensayos con manejo del productor en lotes de productores abarcando la región central templada de la Rep. Argentina. Por lo tanto, los resultados obtenidos son de gran valor representativo y predictivos para la región estudiada. Los aportes originales al conocimiento de la presente tesis son:

1. Las decisiones de manejo y las variables ambientales más importantes para el cultivo de maíz difieren con la fecha de siembra. Por lo tanto, el manejo que debe realizar el productor debe adecuarse a cada fecha de siembra.
2. Las decisiones de manejo más importante para el maíz temprano son la elección de densidad, la disponibilidad de nitrógeno y la disponibilidad de azufre. En cambio, las decisiones más importantes para el maíz tardío son el uso de fungicidas foliares, el fósforo del suelo y la disponibilidad de nitrógeno.
3. La elección del genotipo demostró similar efecto e importancia en el rendimiento para ambas fechas. Por lo tanto, los productores deben dedicarle la misma relevancia al momento de seleccionar el mejor genotipo por rendimiento para cada fecha de siembra.
4. Una variable ambiental clave identificada para ambas fechas de siembras fue la presencia de una napa cercana a la siembra, pero su efecto sobre el rendimiento difirió dependiendo de la fecha de siembra particular. El efecto una napa cercana fue positivo sobre el rendimiento en fechas tempranas, mientras que fue negativo en fechas tardías.
5. La determinación de una correcta fecha de siembra se encuentra condicionada por la presencia o ausencia de una napa cercana al momento de la siembra. Por lo tanto, un lote con presencia de napa debe sembrarse en fechas tempranas para aumentar el rendimiento y evitar pérdidas en fechas tardías.
6. Las precipitaciones presentaron un efecto diferencial ante la presencia o ausencia de una napa cercana, pero con tendencia similar en ambas fechas de siembras. De esta manera, la presencia de una napa cercana y altas precipitaciones producen pérdidas de rendimiento en ambas fechas de siembras. En cambio, para obtener altos rendimiento en ambientes de

ausencia de napa es necesario altas precipitaciones durante el ciclo del cultivo.

7. El agua a la siembra y la fecha de siembra no fueron importante para ninguna de las fechas de siembra. La densidad y la disponibilidad de azufre fueron decisiones importantes en fechas tempranas, pero no lo fueron en fechas tardías.
8. La presente tesis aporta decisiones de manejo que permiten aumentar el rendimiento y el ingreso neto en ambas fechas de siembras. Para fechas tempranas el ajuste de densidad, disponibilidad de nitrógeno y elección del lote con napa lograron aumentar el rendimiento. En cambio, para fechas tardías las decisiones de manejo fueron el uso de fungicidas, la elección del lote y la disponibilidad de nitrógeno.
9. Finalmente, cabe destacar que un aporte fundamental de esta tesis es el de fomentar el uso de bases de datos existentes a nivel de productor para asistir en decisiones de manejo. En combinación con herramientas estadísticas adecuadas, estas bases actualmente inutilizadas representan un gran aporte para contestar de manera eficiente y representativa preguntas de interés de alto impacto a nivel productivo.

IMPLICANCIAS PARA FUTURAS INVESTIGACIONES

A partir de los resultados obtenidos de la presente tesis **se ha** podido reconocer nuevos interrogantes que necesitan ser estudiados con mayor detalle al fin de esclarecer temas de interés productivo y académico en el futuro. Es necesario explorar nuevos abordajes para continuar optimizando el sistema productivo de la región, tanto desde la visión productiva como desde el uso eficiente en los recursos.

1. Explorar el efecto del fungicida a través de distintas decisiones de manejo en fechas de siembra tempranas y tardías para la región central de Argentina

Resultaría de interés un proyecto que explore distintas combinaciones de decisiones de manejo en ambas de fechas de siembras para conocer cómo interactúan ante el uso de fungicidas. Como se comentó en el **Capítulo II**, la importancia de la protección del cultivo es clave para reducir las brechas de rendimiento y optimizar el manejo. Por lo tanto, explorar posibles interacciones entre decisiones de manejo y el

uso de fungicida podría potenciar ambientes de alto potencial o proteger el rendimiento en ambientes de bajo potencial. La respuesta al uso de fungicida interacciona con el potencial del ambiente (Paul et al., 2011) y se debería esperar diferentes respuestas ante cambios en las condiciones dentro de cada fecha de siembra.

De esta manera, sería importante estudiar qué decisiones de manejo afectan la respuesta del uso de fungicida sobre el rendimiento. La elección del genotipo, por ejemplo, es una decisión que interacciona con el uso de fungicida (Accame et al., 2019; Madias et al., 2020). **También existen varios trabajos donde evaluaron inicialmente (Maltese et al., 2019; 2020; 2021) como** otras decisiones de manejo que pueden condicionar la respuesta como la densidad y la fertilización nitrogenada que demostraron alta influencia en el rendimiento. **Sin embargo, estas líneas de trabajos se deben seguir profundizando para optimar el manejo en fechas tardías.** Esta información permitiría mejorar el rendimiento en ambas fechas de siembras.

2. Explorar diversas prácticas de manejo y ambientales en ambientes con napa cercana

Ante el aumento de cultivos de granos en la región y su efecto elevando los niveles de napa (Viglizzo et al., 2011; García et al., 2018) es necesario explorar manejos adecuados que mejoren la producción en estas condiciones. También resulta importante entender las consecuencias del incremento del uso de fertilizantes, debido a una potencial lixiviación de los nutrientes hacia las napas (Austin et al., 2006). En ambientes con una napa cercana se ha estudiado que el efecto del N es superior con respecto a ambientes sin una napa cercana (Ruiz et al., 2021). Por lo tanto, los productores suelen aplicar una mayor cantidad de fertilizante, aumentando el riesgo de lixiviación. También es esperable que en estos ambientes la densidad de siembra óptima también sea superior, debido su relación con el índice ambiental (Al-Kaisi y Yin, 2003; Hernández et al., 2014). No obstante, para optimizar el rendimiento en estos ambientes es necesario conocer la combinación de densidad y N que maximice el rendimiento y la eficiencia en el uso del N, con el objetivo de reducir las pérdidas de N y la contaminación de nitratos hacia las napas (Liu et al., 2010; Maltese et al., 2019).

La presencia de una napa cercana tiene otros efectos dentro del perfil del suelo tanto como la provisión de nutrientes (Portela et al., 2009), la salinización (Noory et al., 2009) y/o la pérdida momentánea de oxígeno. Por lo tanto, la elección de un genotipo tolerante a estas condiciones puede ser interesante en estos ambientes. Existen ciertos atributos genotípicos que pueden mejorar la tolerancia para estos ambientes, por ejemplo, el crecimiento y la estructura de radical (Maiti et al., 1996; Wang et al., 2020) ante suelos con mayor concentración de sales. Mientras que, en el caso de la hipoxia

momentánea se encuentran beneficios ante una mayor acumulación de hidratos de carbono en las raíces y una mayor porosidad radicular (Zaidi et al, 2003; Zaidi et al., 2004). Estos atributos deben ser considerados de importancia al momento de la elección de un genotipo o para un programa de mejoramiento para estas condiciones. Por lo tanto, ante el aumento de los niveles de la napa, es importante conocer y anticipar el comportamiento de los genotipos actuales ante estas condiciones estresantes.

3. Explorar el efecto del tipo de suelo ante cambios en la fecha de siembra.

En la región central de Argentina, coexisten una gran variedad de tipos de suelo, logrando que el cultivo de maíz experimente distintas condiciones y propiedades edáficas. El tipo de suelo más usado en la región es Argiudol típico que posee buenas condiciones productivas, mientras que también se utilizan suelos con horizontes superficiales de menor espesor que le confieren una menor productividad como es el caso de los Hapludoles Thaptico ubicado al oeste de la región central de Argentina. Otro tipo de suelo frecuente son los Hapludoles típicos o entícos que poseen moderadas restricciones productivas debido a su baja capacidad de almacenaje de agua (Díaz-Zorita et al., 2002). Entre los atributos más importantes del suelo para la producción agrícola se encuentran la capacidad de almacenamiento de agua y el suministro de nutrientes. En el caso de la capacidad de almacenamiento de agua es importante conocer la textura y la profundidad del suelo ya que afectan el rendimiento del maíz (Calviño et al., 2003). Debido a la dependencia del cultivo a las precipitaciones ante la falta de una napa cercana (como se demostró en el **Capítulo II**), entra en consideración el almacenamiento de agua en el perfil para suplir la demanda del cultivo en momentos críticos de definición del rendimiento. Es de esperar entonces que, en ambientes más demandantes, como fechas de siembras tempranas, se encuentre una respuesta mayor antes distintos tipos de suelos con capacidad de almacenamiento disímiles. Mientras que, en ambientes menos demandantes, como las fechas tardías, no se verá afectado el rendimiento ante cambios en la capacidad de almacenamiento de agua en el perfil.

4. Utilizar modelos de simulación para estimar los efectos de la elección del genotipo para fechas de siembras contrastantes

A partir de los resultados del **Capítulo III**, se observó que no existen diferencias en el impacto de la elección de genotipos entre ambas fechas de siembra. Sin embargo, el universo de estudio observado se encontró relacionado con ambientes y con prácticas de productores en lotes de productores CREA. Estas condiciones pueden no

representar a la totalidad de ambientes y productores posibles de la región. Por lo tanto, gracias a los modelos de simulación (CERES-Maíz; Jones y Kiniry, 1986) y la parametrización de genotipos, es posible explorar una mayor variabilidad de genotipos y ambientes en fechas de siembras contrastantes. Se podría generar un amplio rango de ambientes, en base a distintos manejos y fechas de siembra, y probar diversos números de genotipos. Los genotipos a estudiar se podrían obtener mediante una compilación de parámetros genotípicos de trabajos anteriores (Otegui et al., 1996; Bert et al., 2007; Monzon et al., 2012; Mercau y Otegui, 2014), sembrar genotipos actuales para obtener nuevos parámetros genotípicos o generar genotipos virtuales en base a genotipos conocidos, pero con modificaciones en aspectos de interés. Una aproximación con este tipo de análisis permitiría establecer el efecto de la elección del genotipo en un universo más amplio y comparar el efecto del genotipo solo ante cambios en la fecha de siembra, extrapolando las conclusiones de la presente tesis.

5. Reconocer los atributos genotípicos favorables para una fecha de siembra tardía.

En base a lo observado en el **Capítulo III**, se halló que no existen diferencias en rendimiento para la elección de genotipos ante ambas de fechas. Sin embargo, no se exploró cuáles son los atributos genotípicos que deben considerar los productores al momento de elegir el mejor genotipo para fechas de siembras tardías. En estas fechas de siembra se exploran condiciones climáticas que predisponen al cultivo a vuelco, quebrado, pérdida de calidad y una lenta pérdida de humedad de los granos (Maddonni, 2012). Por lo tanto, es esperable que los genotipos con mejor performance sean aquellos que presentan una mayor estabilidad de caña, una calidad consistente ante un atraso en la fecha de siembra, menor concentración de micotoxinas en los granos, mayor tolerancia a enfermedades de espiga y foliares, y menor duración del secado del grano en post cosecha (Presello et al., 2008; Blandino et al., 2009; Ferraguti et al., 2016; Abdala et al., 2018a, 2018b; Chazarreta et al., 2018). De esta manera, evaluando el comportamiento de estos atributos en los genotipos se lograría una mejor recomendación de genotipos y un aumento en el rendimiento en fechas de siembra tardías.

6. Generar un mapa de rendimiento zonal **e interanual** y de posible mejora basado en los efectos de las variables de manejo y ambientales

A lo largo del **Capítulo II**, se cuantificó el efecto de diversas variables de manejo y ambientales para luego calcular las posibles ganancias de rendimiento mediante una

optimización del manejo en la región central de Argentina. Teniendo en cuenta esto, y sumado a la existencia de diversas estaciones meteorológicas que miden variables ambientales en la región y al relevamiento de tecnología agrícola aplicada (ReTAA) de la Bolsa de Cereales de Buenos Aires (BCBsAs, 2020), es posible plantear un modelo que genere mapas de rendimiento estimados y posibles ganancias ante mejoras en el manejo. En el caso de las estaciones meteorológicas, estas proveen las precipitaciones durante el ciclo y cómo afectaría el rendimiento en forma zonal e interanual. En cambio, el ReTAA nos informa que prácticas de manejo realizan los productores en base a su planteo tecnológico. Con esta información, se especula que existen zonas donde pueden existir mayores brechas de rendimiento por un planteo de baja tecnología o incorrecto y zonas que se encuentran fuertemente afectadas por las condiciones ambientales. De esta manera, se podría priorizar zonas donde una mejora en el manejo puede resultar en mayores rendimientos de maíz y mejorar la rentabilidad de los productores y la producción regional, siguiendo las líneas de trabajo de mapas de brechas de rendimiento a nivel global.

Otra herramienta de valor que puede surgir de los mapas regionales propuestos anteriormente y el modelo estadístico planteado durante el **Capítulo II**, es una aplicación web o de celular que permita estimar el rendimiento en base a su ubicación geográfica y al manejo deseado. El funcionamiento básico se basaría en las estimaciones que surgen del párrafo anterior y agregarle la respuesta de distintas decisiones de manejo. En base al rendimiento y el manejo zonal promedio suministrado por ReTAA, el usuario podría modificar este manejo y ver como se fue afectado el rendimiento estimado. Además, si se poseen datos económicos del precio de maíz y de los insumos se podría conseguir un margen bruto estimado que podría facilitar las decisiones del productor de la región.

7. Balance nutricional para los cultivos de maíz temprano y tardío a nivel regional

De cara al futuro, se deben encontrar prácticas de manejo que aumenten la producción de manera sostenible en el tiempo sin degradar el sistema suelo. El manejo nutricional es clave para el éxito del cultivo de maíz y tiene importantes consecuencias en el balance nutricional del suelo. Existen estudios previos que exploraron el balance nutricional de algunos nutrientes (Ciampitti et al., 2011; Álvarez et al., 2016; Martínez-Cuesta et al., 2020), pero no evaluaron la distribución espacial de estos balances. Por lo tanto, en base a los resultados de rendimientos zonales estimados en el punto anterior se podría estimar tanto los ingresos y como los egresos de nutrientes, logrando un mapa regional del balance nutricional para ambos cultivos. De esta manera, se lograría

conocer con mayor detalle regiones con superávit o déficit nutricional para luego recomendar prácticas de manejo que mejoran la producción y la sostenibilidad del sistema. Luego, a partir de políticas y prácticas de manejo adecuadas, estas podrían mejorar el equilibrio entre los rendimientos y el medio ambiente

BIBLIOGRAFÍA

- Abdala, L.J., Gambín, B.L., Borrás, L., 2018b. Sowing date and maize grain quality for dry milling. *Eur. J. Agron.* 92, 1–8.
- Abdala, L.J., Gerde, J.A., Gambin, B.L., Borrás, L., 2018a. Fungicide applications and grain dry milling quality in late-sown maize. *Crop Sci.* 58, 892–899.
- Abdala, L.J., Vitantonio-Mazzini, L.N., Gerde, J.A., Martí Ribes, F., Murtagh, G., Borrás, L., 2018c. Dry milling grain quality changes in Argentinean maize genotypes released from 1965 to 2016. *Field Crop. Res.* 226, 74–82.
- Accame, F., Madias, A., Borrás, L., Gambin, B.L., 2019. Comportamiento sanitario y respuesta a la aplicación de fungicida en genotipos de maíz en fecha de siembra tardía en la Región Pampeana. *Red Maíz Tardío AAPRESID 2018-2019*, 19–25. Disponible en: www.aapresid.org.ar/sistemachacras/revista-red-de-maiz-tardio-2018-2019.
- Aho, K., Derryberry, D., Peterson, T., 2014. Model selection for ecologists: the worldviews of AIC and BIC. *Ecology* 95, 631–636.
- Albarenque, S.M., Basso, B., Caviglia, O.P., Melchiori, R.J.M., 2016. Spatio-temporal nitrogen fertilizer response in maize: Field study and modeling approach. *Agron. J.* 108, 2110–2122.
- Alexandratos, N., Bruinsma, J., 2012. *World Agriculture Towards 2030/2050: the 2012 Revision*. ESA Working paper 12-03. Rome, FAO.
- Al-Kaisi, M.M., Yin, X., 2003. Effects of nitrogen rate, irrigation rate, and plant population on corn yield and water use efficiency. *Agron. J.* 95, 1475-1482.
- Álvarez, R., 2008. Analysis of yield response variability to nitrogen fertilization in experiments performed in the Argentine Pampas. *Commun. Soil Sci. Plan.* 39, 1235–1244.
- Álvarez, R., Steinbach, H.S., De Paepe, J.L., 2016. Historical balance of nitrogen, phosphorus, and sulfur of the Argentine pampas. *Ciencia del suelo* 34, 231–244.
- Amelong, A., Hernández, F., Novoa, A.D., Borrás, L., 2017. Maize stand density yield response of parental inbred lines and derived hybrids. *Crop Sci.* 57, 32–39.
- Andrade, F.H., Vega, C., Uhart, S., Cirilo, A., Cantarero, M., Valentinuz, O., 1999. Kernel number determination in maize. *Crop Sci.* 39, 453–459.
- Antonietta, M., Fanello, D.D., Acciaresi, H.A., Guiamet, J.J., 2014. Senescence and yield responses to plant density in stay green and earlier-senescing maize hybrids from Argentina. *Field Crop. Res.* 155, 111–119.
- Aramburu Merlos, F., Monzon, J.P., Mercau, J.L., Taboada, M., Andrade, F.H., Hall, A.J., Jobbagy, E., Cassman, K.G., Grassini, P., 2015. Potential for crop production

- increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Field Crop. Res.* 184, 145–154.
- Arlot, S., Celisse, A., 2010. A survey of cross-validation procedures for model selection. *Statistics Surveys* 4, 40–79.
- Austin, A.T., Piñeiro, G., Gonzalez-Polo, M., 2006. More is less: agricultural impacts on the N cycle in Argentina. *Biogeochemistry* 79, 45–60.
- Barbieri, P.A., Echeverría, H.E., Saínz Rozas, H.R., Andrade, F.H., 2008. Nitrogen use efficiency in maize as affected by nitrogen availability and row spacing. *Agron. J.* 100, 1094–1100.
- Barton, K., 2018. MuMIn: Multi-Model Inference. R package version 1.42.1. Disponible en: <https://CRAN.R-project.org/package=MuMIn>
- Bates, D., Maechler, M., Bolker, B., Walker, S., 2015. lme4: linear mixed-effects models using Eigen and S4. R package version 1.0-5. <http://CRAN.R-project.org/package=lme4>.
- BCBsAs, Bolsa de Cereales de Buenos Aires, 2020. Relevamiento de tecnología agrícola aplicada (ReTAA). Disponible en: <https://www.bolsadecereales.com/retaa>
- BCR, Bolsa de Comercio de Rosario, 2018. Precios Históricos. Maíz. Disponible en: <https://www.bcr.com.ar/Pages/Granos/Historicos/default.aspx>.
- BCR, Bolsa de Comercio de Rosario, 2020a. Estimaciones de producción. Disponible en: <https://www.bcr.com.ar/es/mercados/gea/estimaciones-nacionales-de-produccion/estimaciones>
- BCR, Bolsa de Comercio de Rosario, 2020b. Informe Semanal Zona Núcleo, 86. Disponible en: <https://www.bcr.com.ar/es/mercados/gea/estimaciones-nacionales-de-produccion/estimaciones/mayo-con-ajustes-positivos-el-maiz>
- BCR, Bolsa de Comercio de Rosario, 2020c. Disponible en: <https://www.bcr.com.ar/es/mercados/investigacion-y-desarrollo/informativo-semanal/noticias-informativo-semanal/el-valor-bruto>
- Benett, J.M., Mutti, L.S.M., Rao, P.S.C., Jones, J.W., 1989. Interactive effects of nitrogen and water stresses on biomass accumulation nitrogen uptake, and seed yield of maize. *Field Crops Res.* 19, 297–311.
- Bert, F., Satorre, E., 2012. Sistemas de producción de maíz: maíz temprano y tardío. En: “Revista técnica en SD. Revista Aapresid Maíz” 19-24.
- Bert, F.E., Laciana, C.E., Podestá, G.P., Satorre, E.H., Menéndez, A.N., 2007. Sensitivity of CERES-Maize simulated yields to uncertainty in soil properties and daily solar radiation. *Agr. Syst.* 94, 141–150.

- Berzsenyi, Z., Tokatlidis, I.S., 2012. Density dependence rather than maturity determines hybrid selection in dryland maize production. *Agron. J.* 104, 331-336.
- Black, C.A., 1965. *Methods of soil analysis: Part I. Physical and mineralogical properties.* ASA, Madison, WI.
- Blandino, M., Reyneri, A., Vanara, F., 2009. Effect of sowing time on toxigenic fungal infection and mycotoxin contamination of maize kernels. *J. Phytopathol.* 157, 7–14.
- Bonelli, L.E., Monzon, J.P., Cerrudo, A., Rizzalli, R.H., Andrade, F.H., 2016. Maize grain yield components and source-sink relationship as affected by the delay in sowing date. *Field Crop. Res.* 198, 215–225.
- Boote, K.J., Jones, J.W., Pickering, N.B., 1996. Potential uses and limitations of crop models. *Agron. J.* 704–716.
- Buckland, S.T., Burnham, K.P., Augustin, N.H., 1997. Model selection: an integral part of inference. *Biometrics* 53, 603–618.
- Burnham, K.P., Anderson, D.R., 2004. *Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach.* Second edition. Springer Science and Business Media.
- Burnham, K.P., Anderson, D.R., Huyvaert, K.P., 2011. AIC model selection and multimodel inference in behavioral ecology: some background, observations, and comparisons. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 65, 23–35.
- Calviño, P.A., Andrade, F.H., Sadras, V.O., 2003. Maize yield as affected by water availability, soil depth, and crop management. *Agron. J.* 95, 275–281.
- Calviño, P.A., Sadras, V.O., 1999. Interannual variation in soybean yield: Interaction among rainfall, soil depth and crop management. *Field Crops Res.* 63, 237–246.
- Carciochi, W.D., Salvagiotti, F., Pagani, A., Reussi Calvo, N.I., Eyherabide, M., Sainz Rozas, H.R., Ciampitti, I.A. 2020. Nitrogen and sulfur interaction on nutrient use efficiencies and diagnostic tools in maize. *Eur. J. Agron.* 116, 126045.
- 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 Crop. Res.* 168, 27–37.
- Cerrato, M.E., Blackmer, A.M., 1990. Comparison of models for describing corn yield response to nitrogen fertilizer. *Agron. J.* 82, 138–143.
- Chazarreta, Y.D., Amas, J.I., Cirilo, A.G., Otegui, M.E., 2018. Llenado y secado del grano en híbridos de maíz liberados entre 1980 y 2016: efectos de la fecha de siembra. *Ediciones INTA–Revista de tecnología agropecuaria*, 10, 22–29. Disponible en: <https://inta.gob.ar/documentos/llenado-y-secado-del-grano-en-hibridos-de-maiz-liberados-entre-1980-y-2016-efectos-de-la-fecha-de-siembra>.

- Ciampitti, I.A., García, F.O., Picone, L.I., Rubio, G., 2011. Phosphorus budget and soil extractable dynamics in field crop rotations in mollisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75, 131–142.
- Cirilo, A.G., Actis, M., Andrade, F.H., Valentinuz., O.R., 2011. Crop management affects dry-milling quality of flint maize kernels. *Field Crop. Res.* 122, 140–150.
- Cirilo, A.G., Andrade, F.H., 1994a. Sowing date and maize productivity: I. Crop growth and dry matter partitioning. *Crop Sci.* 34, 1039-1043.
- Cirilo, A.G., Andrade, F.H., 1994b. Sowing date and maize productivity: II. Kernel number determination. *Crop Sci.* 34, 1044-1046.
- Coyos, T., Borrás, L., Gambín, B.L., 2018. Site-specific covariates affecting yield response to Nitrogen of late-sown maize in central Argentina. *Agron. J.* 110, 1–10.
- de la Vega, A.J., de la Fuente, E.B., 2003. Elección de genotipos. En: “Producción de granos. Bases funcionales para su manejo”. (Editor: Pascale, A.J.) 319-345. Editorial: Facultad de Agronomía, Bs.As., Argentina.
- DeLacy, I.H., Basford, K.E., Cooper, M., Bull, J.K., McLaren, C.G., 1996. Analysis of multi-environment trials – An historical perspective. En: “Plant adaptation and crop improvement”. (Editores: Cooper, M., Hammer, G.L.) 39-124. Editorial: CAB International, Wallingford, Reino Unido.
- Díaz Valdez, S., García, F., Caviglia, O., 2014. Maíz tardío en Entre Ríos, Argentina: Calibración de umbrales críticos en nitrógeno. En: “Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica” 13, 18-20.
- Díaz-Zorita, M., Duarte, G.A., Grove, J.H., 2002. A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the sub-humid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 65, 1-18.
- Echarte, L., Luque, S., Andrade, F.H., Sadras, V.O., Cirilo, A., Otegui, M.E., Vega, C.R.C., 2000. Response of maize kernel number to plant density in Argentinean hybrids released between 1965 and 1995. *Field Crop. Res.* 68, 1-8.
- Echeverría, H.E., Reussi Calvo N.I., Pagani, A., 2015. Azufre. En: “Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos” (Editores: Echeverría, H.E., García, F.O.) 287-315. INTA, Buenos Aires, Argentina.
- FAO, Food and Agricultural Organization of the United Nations, 2020. Statistics of farming production. Maíz. Disponible en: <http://faostat3.fao.org/home/E>.
- Ferraguti, F., Castellarín, J.M. Papa, J.C., Mendez, J.M., Cristos, D., Moschini, R. 2016. Determinación del momento óptimo de cosecha en maíz tardío. *Red de Innovadores Revista técnica de maíz 2016 de Aapresid*, 110–118.

- Ferraris, G.N., Mousegne, F., 2017. Ensayo comparativo de híbridos comerciales de maíz en Colón. En: "Red de Innovadores: Maíz de última generación" Aapresid 156, 23-33.
- Fischer, K.R., Palmer, F.E., 1984. Tropical maize. En: "The physiology of tropical field crops". (Editores: Goldsworthy P.R., Fischer N.M.) 213-248. Editorial: John Wiley & Sons, Chichester, Inglaterra.
- Florio, E.L., Mercau, J.L., Jobbágy, E.G., Nosetto, M.D., 2014. Interactive effects of water-table depth, rainfall variation, and sowing date on maize production in the Western Pampas. *Agr. Water Manage.* 146, 75–83.
- Foley, J.A., Ramankutty, N., Brauman, K.A., Cassidy, E.S., Gerber, J.S., Johnston, M., Mueller, N.D., O'Connell, C., Ray, D.K., West, P.C., Balzer, C., Bennett, E.M., Carpenter, S.R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, P., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., Tilman, D., Zaks, D.P.M., 2011. Solutions for a cultivated planet. *Nature* 478, 337–342.
- Gambin, B.L., Borrás, L., 2015. Red de ensayos de maíces tardíos (campaña 2014-2015): ELECCIÓN DE GENOTIPO. En "Campaña 2014-2015. Red de Evaluación de Maíz en fechas de siembras tardías" Aapresid, 5-9.
- 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. *Agr. Syst.* 146, 11–19.
- Gambin, B.L., Madias, A., Borrás, L., 2019. Red de ensayos de maíces tardíos (campaña 2018-2019): ensayos comparativos de rendimiento. En "Red de maíz tardío. Campaña 2018-2019" Aapresid, 7–17.
- Gambin, B.L., Madias, A., Borrás, L., 2020. Red de Maíz Tardío. Ensayos comparativos de rendimiento. En "Red de maíz tardío. Campaña 2019-2020" Aapresid, 6–19.
- García, G.A., García, P.E., Rovere, S.L., Bert, F.E., Schmidt, F., Menéndez, A., Nosetto, M.D., Verdín, A., Rajagopalan, B., Arora, P., Podestá, G.P., 2018. A linked modelling framework to explore interactions among climate, soil water, and land use decisions in the Argentine Pampas. *Environ. Model. Software* 111, 459–471.
- Grant, C.A., Flaten, D.N., Tomasiewicz, D.J., Sheppard, S.C., 2001. The importance of early season phosphorus nutrition. *Can. J. Plant Sci.* 81, 211–224.
- Grassini, P., Thorburn, J., Burr, C., Cassman, K.G., 2011. High-yield irrigated maize in the Western U.S. Corn Belt: I. On-farm yield, yield potential, and impact of agronomic practices. *Field Crops Res.* 120, 142–150.
- Hall, A.J. 1984. Tolerancia a estrés hídrico en maíz: bases fisiológicas y morfológicas. En: "Asociación Ingenieros Agrónomos del Norte de la Provincia de Buenos Aires". Actas III, Congreso Nacional del Maíz, Conferencias, 11-23.

- Hall, A.J., Rebella, C.M., Ghera, C.M., Culot, J.P., 1992. Field-crop systems of the Pampas. In: Pearson, C.J. (Ed.), *Field Crop Ecosystems*. Elsevier, Amsterdam, 413–450.
- Hall, A.J., Villela, F., Trapani, N., Chimenti, C.A., 1982. The effect of water stress and genotype on the dynamics of pollen shedding and silking in maize. *Field Crop Res.* 5, 349-363.
- Hammer, G.L., McLean, G., Chapman, S., Zheng, B., Doherty, A., Harrison, M.T., van Oosterom, E., Jordan, D., 2014. Crop design for specific adaptation in variable dry-land production environments. *Crop Pasture Sci.* 65, 614–626.
- Hashemi, A.M., Helbert, S.J., Putnam, D.H., 2005. Yield response of corn to crowding stress. *Agron. J.* 97, 839–846.
- Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman J.H., 2001. *The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction*. Springer. New York
- Hatfield, J.L., Walthall, C.L., 2015. Meeting global food needs: Realizing the potential via genetics x environment x management interactions. *Agron. J.* 107, 1215–1226.
- Hernández, F., Amelong, A., Borrás, L., 2014. Genotypic differences among Argentinean maize hybrids in yield response to stand density. *Agron. J.* 106, 2316–2324.
- Jones, C.A., Kiniry, J.R., 1986. *CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development*. Texas A&M Univ. Press, College Station.
- Karlen, D.L., Camp, C.R., 1985. Row spacing, plant population and water management effects on corn in the Atlantic coastal plain. *Agron. J.* 77, 393-398.
- Klingebiel, A.A., Montgomery, P.H., 1961. *Land-capability classification*. Soil conservation service, USDA. Agriculture Handbook No. 210.
- Kuppel, S., Houspanossian, J., Noretto, M.D., Jobbagy, E. G., 2015. What does it take to flood the Pampas?: Lessons from a decade of strong hydrological fluctuations. *Water Resour. Res.*, 51, 2937–2950.
- Li, L., Ming, B., Xie, R., Wang, K., Hou, P., Gao, S., Chu, Z., Zhang, W., Huang, Z., Li, H., Zhou, X., Li, S. 2021. The stability and variability of maize kernel moisture content at physiological maturity. *Crop Science* 61, 704-714.
- Liu, J., You, L., Amini, M., Obersteiner, M., Herrero, M., Zehnder, A.J., Yang, H., 2010. A high-resolution assessment on global nitrogen flows in cropland. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 107, 8035–8040.
- Lobell, D.B., Cassman, K.G., Field, C.B., 2009. Crop yield gaps: their importance, magnitudes, and causes. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 34, 1–26.
- Lone, A.A., Warsi, M., 2009. Response of maize (*Zea mays* L.) to excess soil moisture (ESM) tolerance at different stages of life cycle. *Bot. Res. Int.* 2, 211–217.

- Lukacs, P.M., Burnham, K.P., Anderson, D.R., 2010. Model selection bias and Freedman's paradox. *Ann. I. Stat. Math.* 62, 117–125.
- Maddonni, 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.
- Maddonni, G.A., Ruiz, R.A., Villariño, P., Garcia de Salomon, I., 2003. Fertilización en los cultivos para grano. En: "Producción de granos. Bases funcionales para su manejo". (Editor: Pascale, A.J.) 501-563. Editorial: Facultad de Agronomía, Bs.As., Argentina.
- Madias, A., Gambin, B.L., Borrás, L., Penco, R., Fleisa, M., Rively, M., Avedano, L., Reyes, M., Zorza, F. 2020. Fungicidas en maíz tardío: resultados de la campaña 2019-2020. *Revista red Maiz Tardío* 2020, 22-28. Disponible en: aapesid.org.ar/sistemachacras/redes-tematicas/maiztardio.
- MAGyP. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de Argentina, 2021. 200 Millones de Toneladas de Cereales, Oleaginosas y Legumbres. Fertilidad y Nutrición de Suelos. Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/informe-fertilidad-nutricion-suelos-200mt-magyp.pdf>
- Maiti, R.K., Amaya, L.E.D., Cardona, S.I., Dimas, A.M.O., De La Rosa-Ibarra, M., De León Castillo, H., 1996. Genotypic variability in maize cultivars (*Zea mays* L.) for resistance to drought and salinity at the seedling stage. *J. Plant Physiol.* 148, 741–744.
- Malosetti M., Ribaut, J., van Eeuwijk, F.A., 2013. The statistical analysis of multi-environment data: modeling genotype by environment interaction and its genetic basis. *Front. Physiol.* 4, 44.
- Maltese, N.E., Melchiori, R., Maddonni, G.A., Ferreyra, J.M., Caviglia, O.P. 2019. Nitrogen economy of early and late-sown maize crops. *Field Crop. Res.* 231, 40-50.
- Maltese, N.E., Maddonni, G.A., Melchiori, R., Ferreyra, J.M., Caviglia, O.P. 2020. Crop nitrogen status of early- and late-sown maize at different plant densities. *Field Crop. Res.* 258, 107965.
- Maltese, N.E., Maddonni, G.A., Melchiori, R., Caviglia, O.P. 2021. Plant nitrogen status at flowering and kernel set efficiency in early- and late-sown maize crops. *Field Crop. Res.* 270, 108216.
- Martínez-Cuesta, N., Carciochi, W., Sainz-Rozas, H., Salvagiotti, F., Colazo, J.C., Wyngaard, N., Eyherabide, M., Ferraris, G., Barbieri, P., 2020. Effect of zinc application strategies on maize grain yield and zinc concentration in mollisols. *J. Plant Nutr.* 44, 486–497.

- Mendiburu, F.D., 2017. agricolae: Statistical procedures for agricultural research. R Package Version 1.2-8. <http://CRAN.R-project.org/package=agricolae>
- 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. En: "Practical Applications of Agricultural System Models to Optimize the Use of Limited Water". (Editores: Ahuja, L.R., Ma, L., Lascano, R.J.) 351-374. *Adv. Agric. Systems Model.* 5., ASA, SSSA, CSSA, Madison, WI, pp. 351–374.
- Mercau, J.L., Nosoetto, M.D., Bert, F., Gimenez R., Jobbágy, E.G., 2016. Shallow groundwater dynamics in the Pampas: Climate, landscape and crop choice effects. *Agr. Water Manage.* 163, 159–168.
- Messina, C.D., Hansen, J. W., Hall, A.J., 1999. Land allocation conditioned on El Niño-Southern Oscillation phases in the Pampas of Argentina. *Agr. Syst.* 60, 197–212.
- Monzon, J.P., Sadras, V. O., Andrade, F.H., 2012. Modelled yield and water use efficiency of maize in response to crop management and Southern Oscillation Index in a soil-climate transect in Argentina. *Field Crop. Res.* 130, 8–18.
- Munkvold, G.P., Martinson, C.A., Shriver, J. M., Dixon, P.M., 2001. Probabilities for profitable fungicide use against gray leaf spot in hybrid maize. *Phytopathology*, 91, 477–484.
- Nakazawa, M., 2014. fmsb: Functions for medical statistics book with some demographic data. R package version 0.5.1. Disponible en: <http://CRAN.R-project.org/package=fmsb>.
- Noory, H., Liagat, A-M., Chaichi, M.R., Parsinejad, M. 2009. Effects of water table management on soil salinity and alfalfa yield in a semi-arid climate. *Irrig. Sci.* 27, 401-407.
- Nosoetto, M.D., Jobbágy, E.G., Jackson, R.B., Sznaider, G.A., 2009. Reciprocal influence of crops and shallow ground water in sandy landscapes of the Inland Pampas. *Field Crop. Res.* 113, 138–148.
- Otegui, M.E., 1997. Kernel set and flower synchrony within the ear of maize: II. Plant population effects. *Crop Sci.* 37, 448–455.
- Otegui, M.E., Nicolini, M.G., Ruiz, R.A., Dodds, P.A., 1995. Sowing date effects on grain yield components for different maize genotypes. *Agron. J.* 87, 29–33.
- Otegui, M.E., Ruiz, RA., Petruzzi, D., 1996. Modeling hybrid and sowing date effects on potential grain yield of maize in a humid temperate region. *Field Crop. Res.* 47, 167–174.

- Pagani, A., Echeverría, H.E., Andrade, F.H., Sainz Rozas, H.R., 2012. Effects of nitrogen and sulfur application on grain yield, nutrient accumulation, and harvest indexes in maize. *J. Plant Nutr.* 5, 1080–1097.
- Pagani, A., Echeverría, H.E., Sainz Rozas, H.R., Barbieri, P.A., 2008. Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz bajo siembra directa en el sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo* 26, 183–193.
- Paradis, E., Schliep, K., 2019. ape 5.0: an environment for modern phylogenetics and evolutionary analyses in R. *Bioinformatics* 35, 526–528.
- PAS. Panorama Agrícola Semanal, 2018. Bolsa de Cereales, Argentina. Available in <https://www.bolsadecereales.org>
- Passioura, J.B., 1996. Simulation models: science, snake oil, education, or engineering? *Agron. J.* 88, 690–694.
- Paul, P.A., Madden, L.V., Bradley, C.A., Robertson, A.E., Munkvold, G.P., Shaner, G., Wise, K.A., Malvick, D.K., Allen, T.W., Grybauskas, A., Vincelli, P., Esker, P., 2011. Meta-analysis of yield response of hybrid field corn to foliar fungicides in the U.S. corn belt. *Phytopathology*, 101, 1122–1132.
- Pinheiro, J., Bates, D., DebRoy, S., Sarkar, D., 2018. nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3.1-137. Disponible en: <https://CRAN.R-project.org/package=nlme>
- Podestá, G.P., Messina, C.D., Grondona, M.O., Magrin, G.O., 1999. Associations between grain crop yields in central-eastern Argentina and El Niño-Southern Oscillation. *J. Appl. Meteorol. Clim.* 38, 1488-1498.
- Portela, S.I., Andriulo, A.E., Jobbágy, E.G., Sasal, M.C., 2009. Water and nitrate exchange between cultivated ecosystems and groundwater in the Rolling Pampas. *Agr. Ecosyst. Environ.* 134, 277–286.
- Presello, D.A., Botta, G., Iglesias, J., Eyherávide, G.H., 2008. Effect of disease severity on yield and grain fumonisin concentration of maize hybrids inoculated with *Fusarium verticillioides*. *Crop Prot.* 27, 572–576.
- R Core Team, 2018. R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponible en: <http://www.R-project.org>.
- Richardson, A.E., Simpson, R.J., 2011. Soil microorganisms mediating phosphorus availability update on microbial phosphorus. *Plant Physiol.* 156, 989–996.
- Rizzo, G., Rattalino Edreira, J.I., Archontoulis, S.V., Yang, H.S., Grassini, P., 2018. Do shallow water tables contribute to high and stable maize yields in the US Corn Belt? *Glob. Food Secur.* 18, 27–34.

- Robinson, G.K. 1991. That BLUP is a good thing: The estimation of random effects. *Stat. Sci.* 6:15–32.
- Rotili, D.H., Abeledo, L.G., deVoil, P., Rodríguez, D., Maddonni, G.A., 2021. Exploring the effect of tillers on the water economy, plant growth and kernel set of low-density maize crops. *Agr. Water Manage.* 243, 106424.
- Rubio, G., Cabello, M.J., Gutiérrez Boem, F.H., Munaro, E., 2008. Estimating available soil phosphorus increases after phosphorus additions in Mollisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72, 1721–1727.
- Ruffo, M.L., Gentry, L.F., Henninger, A.S., Seebauer, J.R., Below, F.E., 2015. Evaluating management factor contributions to reduce corn yield gaps. *Agron. J.* 107, 495–505.
- Ruiz, A., Salvagiotti, F., Gambín, B.L., Borrás, L., 2021. Maize nitrogen management in soils with influencing water tables within optimum depth. *Crop Sci.* 61, en prensa.
- Russell, W.A., 1968. Test crosses of one and two-ear types of corn belt maize inbreds. I. Performance at four plant stand densities. *Crop Sci.* 8, 244-247.
- Sadras, V.O., Denison, R.F., 2016. Neither crop genetics nor crop management can be optimised. *Field Crop. Res.* 189, 75–83.
- Sain, G.E., Jauregui, M.A., 1993. Deriving fertilizer recommendations with a flexible functional form. *Agron. J.* 85, 934-937.
- Sainz Rozas, H.R., Echeverría, H.E., Angelini, H., 2012. Fósforo disponible en suelos agrícolas de la región Pampeana y extra Pampeana Argentina. *Rev. Inv. Agr.* 38, 33–39.
- Sala, R.G., Andrade, F.H., Camadro, E.L., Ceroni, J.C. 2006. Quantitative trait loci for grain moisture at harvest and field grain drying in maize (*Zea mays*, L.). *Theoretical and Applied Genetics*, 112:462-471.
- Salvagiotti, F., Castellarín, J.M., Ferraguti, F.J., Pedrol, H.M., 2011. Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz según potencial de producción y disponibilidad de nitrógeno en la región pampeana norte. *Ciencia del Suelo* 29, 199-212
- Salvagiotti, F., Ferraguti, F., Enrico, J., Prieto, G., 2014. Fertilización nitrogenada en maíz de fecha tardía según cultivo antecesor. Informe de actualización técnica. EEA Marcos Juárez, 31.
- Salvagiotti, F., Pedrol, H.M., Castellarin, J., Capurro, J., Felizia, J. C., Gargicevich, A., Trentino, N., 2002. Diagnóstico de la fertilización nitrogenada en maíz. Relación entre la respuesta en rendimiento y la disponibilidad de nitrógeno a la siembra. *Para Mejorar la Producción* 20, 67-70.
- Salvagiotti, F., Prystupa, P., Ferraris, G., Couretot, L., Magnano, L., Dignani, D., Gutiérrez-Boemoem, F.H., 2017. N:P:S stoichiometry in grains and physiological

- attributes associated with grain yield in maize as affected by phosphorus and sulfur nutrition. *Field Crop. Res.* 203, 128–138.
- Sarlangue, T., Andrade, F.H., Calviño, P. A., Purcell, L.C., 2007. Why do maize hybrids respond differently to variations in plant density? *Agron. J.* 99, 984–991.
- Satorre, E.H., 2016. Claves del manejo agronómico del maíz tardío: Oportunidades para crecer y consolidar el sistema de cultivo. En: “El mismo maíz, un nuevo desafío” *Compendio 1° Congreso de Maíz Tardío*, 104-109.
- Smith, A.B., Cullis, B.R., Thompson, R., 2005. The analysis of crop cultivar breeding and evaluation trials: An overview of current mixed model approaches. *J. Agr. Sci.* 143, 449-462.
- Smith, A.B., Cullis, B.R., Thompson. R., 2001. Analyzing variety by environmental data using multiplicative mixed models and adjustments for spatial field trend. *Biometrics* 57, 1138-1147.
- Soil Survey Staff. 2014. Keys to soil taxonomy. 12th edition. USDA–NRCS, Washington, DC.
- Steinbach, H.S., 2013. Funciones de producción. En: “Fertilización de cultivos y pasturas. Diagnóstico y recomendación en la región pampeana”. 33-44. Editorial: Facultad de Agronomía, Bs. As., Argentina.
- Sucunza, F.A., Gutierrez Boem, F.H., Garcia, F.O., Boxler, M., Rubio, G., 2018. Long-term phosphorus fertilization of wheat, soybean and maize on Mollisols: Soil test trends, critical levels and balances. *Eur. J. Agron.* 96, 87–95.
- Tollenaar, M., Dywer, L.M., Stewart, D.W., 1992. Ear and kernel formation in maize hybrids representing three decades of grain yield improvement in Ontario. *Crop Sci.* 32, 432-438.
- Uhart, S., Andrade, F.H., 1995. Nitrogen deficiency in maize: II. Carbon-Nitrogen interaction effects on kernel number and grain yield. *Crop Sci.* 35, 1384–1389.
- Vega, C.R.C., Andrade, F.H., Sadras, V.O., Uhart, S., Valentinuz, O.R., 2001. Seed number as a function of growth. A comparative study in soybean, sunflower, and maize. *Crop Sci.* 41, 748-754.
- Viglizzo, E.F., Frank, F.C., Carreño, L.V., Jobbágy, E.G., Pereyra, H., Clatt, J., Ricard, M.F., 2011. Ecological and environmental footprint of 50 years of agricultural expansion in Argentina. *Global Change Biol.* 17, 959–973.
- Walkley, A., Black, A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37, 29–38.
- Wang, H., Liang, L., Liu, S., An, T., Fang, Y., Xu, B., Zhang, S., Deng, X., Palta, J.A., Siddique, K.H.M., Chen, Y., 2020. Maize genotypes with deep root systems

- tolerate salt stress better than those with shallow root systems during early growth. *J. Agron. Crop Sci.* 206, 711–721.
- Westgate, M.E., Forcella, F., Reicosky, D.C., Somsen, J., 1997. Rapid canopy closure for maize production in the northern US corn belt: radiation-use efficiency and grain yield. *Field Crop. Res.* 49, 249–258.
- Zaidi, P.H., Rafique, S., Rai, P.K., Singh, N.N., Srinivasan, G., 2004. Tolerance to excess moisture in maize (*Zea mays* L.): Susceptible crop stages and identification of tolerant genotypes. *Field Crop. Res.* 90, 189–202.
- Zaidi, P.H., Rafique, S., Singh, N.N., 2003. Response of maize (*Zea mays* L.) genotypes to excess soil moisture stress: Morpho-physiological effects and basis of tolerance. *Eur. J. Agron.* 19, 383–399.
- Zuur, A.F., Ieno, E.N., Walker, N.J., Saveliev, A.A., Smith, G.M., 2009. Mixed effects models and extensions in ecology with R. Springer, New York.

ANEXO I: TABLAS SUPLEMENTARIAS

Tabla S1. Lista de genotipos comerciales testeados. La madurez relativa (MR), cuando está disponible, indica diferencias relativas en la duración del ciclo, *n* representa el número de ensayos en cada fecha de siembra (fecha de siembra temprana y tardía) donde se probó cada genotipo en particular.

Genotipo	Compañía	MR	<i>n</i> en Temprano	<i>n</i> en Tardío
ADV_8101	Advanta	124	12	0
ADV_8319	Advanta	118	0	3
ADV_EXP8111	Advanta	-	13	0
ARV_2155	Arvales	121	20	8
ARV_2180	Arvales	117	25	0
ARV_2183	Arvales	119	18	0
ARV_2194	Arvales	122	25	14
ARV_2310	Arvales	116	36	0
ARV_2489	Arvales	118	6	0
BIOCERES_620	Bioceres	119	36	0
DK_670	Dekalb	117	12	2
DK_692	Dekalb	119	122	11
DK_699	Dekalb	119	13	0
DK_7010	Dekalb	120	18	8
DK_7210	Dekalb	122	51	24
DK_7250	Dekalb	122	9	0
DK_7310	Dekalb	123	22	18
DK_7320	Dekalb	123	5	0
DK_747	Dekalb	124	79	37
DM_2738	Don Mario	119	58	0
DM_2741	Don Mario	120	13	7
DM_2771	Don Mario	125	20	24
DOW_495	DOW	119	13	4
DOW_505	DOW	121	33	18
DOW_507	DOW	123	15	12
DOW_508	DOW	122	16	6
DOW_510	DOW	125	43	38
DOW_512	DOW	124	6	0
DOW_515	DOW	-	12	3
ILL_880	Illinois	118	25	4
ILL_887	Illinois	120	36	0
ILL_893	Illinois	124	25	0
ILL_898	Illinois	119	13	0
KWS_3800	KWS	118	9	7
KWS_4020	KWS	120	27	7
KWS_4200	KWS	122	15	28
KWS_4252	KWS	-	12	0
KWS_4321	KWS	123	34	13
KWS_4350	KWS	123	12	0
KWS_4500	KWS	125	30	0
LT_618	La Tijereta	118	13	4
LT_621	La Tijereta	121	27	17
LT_623	La Tijereta	123	7	6
LT_626	La Tijereta	126	36	9
LT_632	La Tijereta	123	26	7
LT_6909	La Tijereta	-	6	0
LT_719	La Tijereta	119	3	12
LT_7218	La Tijereta	-	6	0
LT_722	La Tijereta	122	9	12
MAVERA_400	Cargill	-	13	0
MOR_AVALON	Morgan	123	22	18
MOR_BUYAN	Morgan	122	0	5
MOR_EXP	Morgan	-	11	8
NID_AX7822	Nidera	118	15	12
NID_AX7918	Nidera	119	6	0
NID_AX852	Nidera	118	0	6

NID_AX886	Nidera	118	0	3
NID_AX887	Nidera	119	18	13
PAN_4842	Pannar	119	7	0
PAN_502	Pannar	118	13	0
PAN_6502	Pannar	119	23	8
PAN_6503	Pannar	121	0	11
PAN_6607	Pannar	118	7	6
PAN_EXP503	Pannar	-	0	4
PIO_160	Pionner	116	13	0
PIO_1778	Pionner	117	0	21
PIO_1780	Pionner	116	0	7
PIO_1845	Pionner	118	43	0
PIO_1979	Pionner	119	13	0
PIO_2053	Pionner	120	25	0
PIO_2058	Pionner	120	22	0
PIO_2067	Pionner	120	13	0
PIO_2069	Pionner	120	29	4
SEM.MT_221	Semillero María Teresa	-	13	0
SEMWEST_5148	SemWest	-	25	0
SRM_539	Sursem	117	13	0
SRM_565	Sursem	123	25	0
SRM_566	Sursem	125	44	12
NK_860	Syngenta	122	25	7
NK_880	Syngenta	123	0	3
NK_900	Syngenta	127	52	14
NK_910	Syngenta	128	25	0
SPS_2721	Syngenta	122	0	7
SPS_2736	Syngenta	124	12	13
SPS_2879	Syngenta	129	43	0
SYN_840	Syngenta	122	27	26
SYN_860	Syngenta	122	0	8
SYN_875	Syngenta	123	6	0
SYN_960	Syngenta	128	24	7
SYN_969	Syngenta	127	27	0
SYN_EXP.NX9918	Syngenta	-	12	0

Tabla S2. Coeficientes de correlación de Pearson entre variables predictoras cuantitativas para fechas de siembra temprana.

	P aplicado	P suelo	N disponible	S disponible	Precipitaciones durante el ciclo	Agua a la siembra	Densidad	Materia orgánica	Latitud	Longitud
Fecha de siembra	0.29*	-0.04	0.24	0.15	-0.05	-0.48***	0.04	0.01	-0.34**	-0.34**
P aplicado		-0.30*	0.30*	0.26	-0.03	-0.18	-0.06	0.08	-0.64***	-0.05
P suelo			-0.01	0.06	0.15	0.08	0.07	0.34**	0.58***	-0.01
N disponible				0.36**	0.20	-0.16	0.48***	0.17	-0.36**	0.07
S disponible					0.17	0.08	0.21	0.55***	-0.12	0.21
Precipitaciones durante el ciclo						0.04	0.38**	0.15	0.14	0.02
Agua a la siembra							0.13	0.32*	0.35**	0.58***
Densidad								0.01	-0.08	0.05
Materia orgánica									0.23	0.29*
Latitud										-0.01

* Significant at $p < 0.05$; ** Significant at $p < 0.01$; *** Significant at $p < 0.001$

Tabla S3. Coeficientes de correlación de Pearson entre variables predictoras cuantitativas para fechas de siembra tardía.

	P aplicado	P suelo	N disponible	S disponible	Precipitaciones durante el ciclo	Agua a la siembra	Densidad	Materia orgánica	Latitud	Longitud
Fecha de siembra	-0.36*	0.27	0.04	-0.38*	-0.05	0.45**	0.12	0.20	0.59***	0.12
P aplicado		-0.42*	0.48**	0.40*	-0.25	-0.35*	-0.03	-0.06	-0.44*	0.25
P suelo			-0.11	-0.30	0.04	0.24	0.11	0.29	0.66***	-0.28
N disponible				0.22	-0.19	0.02	0.12	0.26	-0.10	0.40*
S disponible					0.08	-0.12	0.27	0.14	-0.40*	0.36*
Precipitaciones durante el ciclo						0.11	0.19	0.10	-0.02	0.03
Agua a la siembra							0.28	0.35*	0.45*	0.48**
Densidad								0.48**	0.33	0.50**
Materia orgánica									0.34	0.37*
Latitud										0.09

* Significant at $p < 0.05$; ** Significant at $p < 0.01$; *** Significant at $p < 0.001$