

**ÁREA DE CONSOLIDACIÓN
SISTEMAS AGRÍCOLAS DE PRODUCCIÓN
EXTENSIVOS**

**FACULTAD DE CIENCIAS
AGROPECUARIAS
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA**

**“Análisis de las brechas de rendimientos
de maíces en el sur de Marcos Juárez”**

Alumnos:

- **Garis Agustín**
- **Marinangeli Alejo Valentino**
- **Pettinari Agustín Fabián**

Tutor

- **Luque Sergio**

Consultores técnicos:

- **Muñoz Sebastián**
- **Lingua Alejandro**

2021



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons
Atribución – No Comercial – Sin Obra Derivada 4.0 Internacional.

Índice

Índice de Figuras	2
Índice de Tablas.....	3
Resumen	5
Introducción	6
Materiales y métodos	9
Mediciones y estimaciones.....	11
Estimación del rendimiento potencial	11
Determinación del rendimiento limitado por agua y del rendimiento actual	12
Estimación de la brecha de rendimiento	13
Análisis estadístico	13
Resultados.....	15
Caracterización climática.....	15
Rendimiento potencial, real y brechas de rendimiento.....	16
Respuesta de los componentes numéricos del rendimiento al manejo de la fertilización.	19
Discusión y Conclusión	23
Aspectos a considerar.....	26
Agradecimientos	27
Bibliografía	28

Índice de Figuras

Figura 1: Ambientación del lote por rendimiento y vías de escurrimiento. En verde y amarillo, ambiente del alto y medio potencial respectivamente. En rojo, ambiente de esorrentía de bajo potencial. En el inset, se muestra la ubicación del experimento.	9
Figura 2: Distribución de los tratamientos en el ambiente alto (izquierda) y en el ambiente medio (derecha).....	11
Figura 3: Precipitaciones diarias (barras azules), radiación semanal promedio (amarillo) y temperatura semanal promedio (naranja) durante el ciclo del cultivo. El recuadro en verde indica el momento de ocurrencia del periodo crítico del cultivo. La flecha bidireccional indica la duración del ciclo del cultivo desde siembra hasta madurez fisiológica.	15
Figura 4: Evolución del cociente fototérmico durante el ciclo del cultivo en la campaña 2020-2021. La flecha bidireccional indica la duración del ciclo del cultivo desde siembra hasta madurez fisiológica.	16

Figura 5: Rendimiento obtenido en función del porcentaje de nitrógeno aplicado en relación a la dosis necesaria para llegar al rendimiento potencial. Barras en azul ambiente productivo alto y barras en rojo ambiente productivo medio. Línea gris horizontal, indica el rendimiento potencial. Línea azul y línea roja, análisis de regresión de los puntos correspondientes a los ambientes alto y medio respectivamente.	18
Figura 6: Asociación entre el rendimiento y N ^o de granos/m ² (a y b) y entre rendimiento y Peso de mil granos (c y d) para los ambientes productivos alto (azul) y medio (rojo).....	19
Figura 7: Efecto de la fertilización sobre el número de granos/m ² según el nivel de fertilización a la siembra sin refertilización, para el ambiente productivo alto. Letras distintas indican diferencias significativas al 0,05.....	20
Figura 8: Efecto de la fertilización sobre el número de granos/m ² según el nivel de fertilización a la siembra sin refertilización, para el ambiente productivo medio. Letras distintas indican diferencias significativas al 0,05.....	20
Figura 9: Efecto de la refertilización sobre el número de granos/m ² según el nivel de fertilización a la siembra, para el ambiente productivo alto. Letras distintas indican diferencias significativas al 0,05. Los colores agrupan las dosis de fertilización a la siembra.	21
Figura 10: Efecto de la refertilización sobre el número de granos/m ² según el nivel de fertilización a la siembra, para el ambiente productivo medio. Letras distintas indican diferencias significativas al 0,05. Los colores agrupan las dosis de fertilización a la siembra.	21
Figura 11: Efecto de la refertilización sobre el peso de mil granos según el nivel de fertilización a la siembra, para el ambiente productivo alto. Letras distintas indican diferencias significativas al 0,05. Los colores agrupan las dosis de fertilización a la siembra.	22
Figura 12: Efecto de la refertilización sobre el peso de mil granos según el nivel de fertilización a la siembra, para el ambiente productivo medio. Letras distintas indican diferencias significativas al 0,05. Los colores agrupan las dosis de fertilización a la siembra.	22

Índice de Tablas

Tabla 1: Análisis de suelo para los ambientes alto y medio. MO: Materia orgánica, P: Fosforo bray-1, N-NO ₃ : Nitrógeno como nitrato, S-SO ₄ : Azufre como sulfato.....	10
Tabla 2: Rendimiento a la cosecha del cultivo y brechas de rendimiento debida a las prácticas de manejo aplicadas (Y _{ga}) entre el rendimiento limitado por agua (Y _w ; 14,8 tn/ha)	

y los rendimientos actuales obtenidos en los ambientes productivos alto y medio. FS:
Fertilización a la siembra; RF: Refertilización..... 17

Resumen

Cuantificar y analizar las brechas de rendimiento del cultivo de maíz es una actividad clave para detectar factores que limitan el rendimiento y en el diseño de las mejores estrategias de manejo. Para evaluar esto, se realizó un ensayo en la campaña 2020-2021 en un establecimiento ubicado al sur de la ciudad de Marcos Juárez en dos ambientes productivos (media y alta productividad). Se evaluaron tres dosis de fertilización nitrogenada ajustadas a cada ambiente y dos estrategias de aplicación del fertilizante, con y sin re fertilización. Se determinó el rendimiento real, se estimó el rendimiento potencial para la zona y se cuantificaron las brechas de rendimiento debidas a la disponibilidad de agua (Y_{gw}) y a las debidas al manejo del cultivo (Y_{ga}). Se estimó un rendimiento potencial de 25,3 tn/ha, mientras que el rendimiento obtenido a campo osciló entre 9,4 y 14,8 tn/ha. La brecha entre el rendimiento potencial y el obtenido por el productor fue de 15,9 tn/ha, pero la mayor Y_{ga} fue de 5,9 tn/ha en el ambiente medio y de 3,4 tn/ha en el ambiente alto. La respuesta del rendimiento a la fertilización fue mayor en el ambiente medio que en el alto, por lo que el manejo de esta tecnología permitió reducir la brecha de rendimiento en mayor medida en el ambiente más pobre. La refertilización del cultivo no presentó un efecto claro sobre el rendimiento. Las variaciones del rendimiento estuvieron asociadas con cambios en el número de granos/m² y no con el peso de mil granos. Los rendimientos obtenidos a campo son cercanos a los máximos que se pueden lograr con el agua disponible y óptimo manejo. La caracterización del ambiente resulta un factor clave para el correcto manejo de la fertilización.

Palabras claves: *Maíz, brecha de rendimiento, rendimiento, fertilización, refertilización.*

Introducción

En el sur de la provincia de Córdoba, la disponibilidad recursos, tanto hídrico, nutricionales o de tipo de suelos, se caracteriza por ser altamente variable, tanto espacial como temporalmente (Espósito et al., 2012). Este comportamiento se encuentra relacionado con la distribución estacional de las precipitaciones, su variación interanual (Seiler et al., 2008) y aspectos del relieve y del suelo que condicionan el movimiento y almacenamiento del agua en el perfil del suelo (Cisneros et al., 2012). En este sentido, la heterogeneidad de ambientes encontrados en el sur de Córdoba obliga a la necesidad de adecuar las tecnologías de insumos y procesos para optimizar el manejo del cultivo de maíz. El nitrógeno es uno de los nutrientes que con mayor frecuencia limita el rendimiento de maíz en la región pampeana (Alvarez, 2010, Salvagiotti et al., 2010).

La fertilización con nitrógeno es indispensable ya que es uno de los nutrientes primarios que los cultivos requieren en mayores cantidades, éste incrementa el tamaño de las células, área foliar y la actividad fotosintética generando un impacto positivo en el rendimiento del cultivo de maíz (Hashemi et al., 1994). La disponibilidad de nitrógeno regula la tasa de expansión foliar y en consecuencia, la eficiencia en la intercepción de la radiación (Uhart y Andrade, 1995). Durante el periodo crítico, es necesario que el cultivo intercepte la mayor cantidad de radiación incidente posible para asegurar elevadas tasas de crecimiento del cultivo y fijar un elevado número de granos por metro cuadrado.

El rendimiento en grano de un cultivo de maíz se compone del número de granos fijados por metro cuadrado y del peso medio de los mismos. Tanto el número como el peso de los granos, responden a los cambios que experimentan las condiciones del ambiente durante el crecimiento del cultivo (Cirilo y Andrade, 1996). El número de granos cosechados responde a las variaciones en la tasa de crecimiento que experimenta el cultivo durante el período crítico (período de cuatro semanas centrada en la floración femenina), con una respuesta positiva del número de granos fijados ante aumentos en la tasa de crecimiento del cultivo hasta un valor a partir del cual el aumento del número de granos fijados se hace sensiblemente menor. Este

comportamiento está relacionado con el estado fisiológico de las plantas individuales en el cultivo alrededor de la floración. Dicho estado se refleja en su tasa de crecimiento, y determina su capacidad para fijar granos durante esa etapa crítica (Vega et al., 2001).

El rendimiento potencial de un cultivo en una determinada región, considerado como tal al que se obtiene en ausencia de limitantes hídricas, nutricionales y bióticas, está determinado por la cantidad de radiación disponible durante la etapa de crecimiento del cultivo, la temperatura en ese periodo y el genotipo. En cambio el rendimiento que se obtiene con el agua disponible en el suelo al momento de la implantación más las precipitaciones durante el ciclo del cultivo y donde factores como la nutrición y la protección vegetal, están controlados adecuadamente, se considera como el rendimiento limitado por el agua. El rendimiento alcanzado por el productor es el que está reducido debido a que algunos de estos factores no han sido satisfechos adecuadamente. La diferencia entre el rendimiento potencial y el alcanzado por el productor se denomina brecha de rendimiento (Gudelj, 2019).

Para Videla Mensegue y Beccari (2018) el rendimiento potencial de maíz temprano en el sudeste de la provincia de Córdoba se encuentra alrededor de las 30 tn/ha, mientras que el rendimiento logrado por el productor ronda las 8 tn/ha, obteniéndose una brecha de rendimiento de aproximadamente 22 tn/ha.

En la actualidad, existen herramientas al alcance del productor que permiten reducir las brechas de rendimiento, como puede ser la correcta elección del lote, la determinación de la fecha de siembra, la densidad y el arreglo de las plantas (estructura del cultivo) en función al ambiente, la fertilización y el control de plagas, malezas y enfermedades. Otras herramientas que permiten optimizar el manejo del agua y nutrientes son la implantación de cultivos de coberturas y las rotaciones con alta diversidad de cultivos (Videla Mensegue y Beccari, 2018).

La magnitud de las brechas de rendimiento en la región sur de Marcos Juárez y las causas que las generan no han sido estudiadas extensamente y su disminución constituye una vía significativa para incrementar los rendimientos. Cuantificar tales brechas y conocer los factores del ambiente y de manejo que las ocasionan, permite

delinear estrategias de manejo que apunten no solo a que aumenten los rendimientos sino también contribuyan con un uso más eficiente de los recursos empleados. En este marco, se plantearon los siguientes objetivos:

Objetivo general:

Cuantificar y analizar las brechas de rendimiento del cultivo de maíz en el sur de Marcos Juárez en condición de secano.

Objetivos específicos:

Determinar el rendimiento potencial del cultivo de maíz en el sur de Marcos Juárez.

Determinar el rendimiento real del cultivo de maíz en un ambiente particular del sur de Marcos Juárez.

Cuantificar la brecha de rendimiento del cultivo de maíz en el sur de Marcos Juárez.

Evaluar el efecto de la aplicación de diferentes dosis de fertilizantes, en diferentes momentos, sobre la determinación del rendimiento y su impacto en la magnitud de la brecha.

Materiales y métodos

En la campaña 2020-2021 se realizó un ensayo en un establecimiento ubicado a 15 kilómetros al sur de la ciudad de Marcos Juárez sobre la Ruta Provincial N° 12 sobre un lote que está dividido en tres ambientes de producción: alto, medio y bajo (Figura 1), definidos según los niveles de rendimientos históricos obtenidos con monitor de rendimiento a la cosecha y por características particulares de cada lote como anegamientos temporales y vías de escurrimiento.



Figura 1: Ambientación del lote por rendimiento y vías de escurrimiento. En verde y amarillo, ambiente del alto y medio potencial respectivamente. En rojo, ambiente de escorrentía de bajo potencial. En el inset, se muestra la ubicación del experimento.

El experimento se realizó en los ambientes de alto y medio (Figura 1, inset) sobre una superficie de 0,75 ha. Para caracterizar la oferta de nutrientes de ambos ambientes, se realizó un análisis químico del suelo previo a la siembra hasta los 20 cm de profundidad. Los resultados se muestran en la Tabla 1. El lote provenía de un barbecho químico realizado con Bicclopirona (Acuron), Glifosato, 2,4 D (2,4 D Dédalo), S-Metolacloro (Dual Gold) y coadyuvantes.

Tabla 1: Análisis de suelo para los ambientes alto y medio. MO: Materia orgánica, P: Fosforo bray-1, N-NO₃: Nitrógeno de nitrato, S-SO₄: Azufre de sulfato.

Ambiente	pH	MO	P	N-NO ₃	S-SO ₄
		(%)	(ppm)	(ppm)	(ppm)
Alto	5,7	3,31	13,9	8,3	8,8
Medio	5,8	2,96	11	4,9	13,8

El 30 de septiembre del 2020 se sembró el híbrido Dekalb 7210 VT3P. La tecnología VT Triple PRO contiene tres proteínas provenientes de la bacteria *Bacillus Thuringiensis* (Bt), un microorganismo que se encuentra de forma natural en el suelo, esto le confiere protección contra insectos de follaje, tallo, raíz y espiga como barrenadora del tallo (*Diatraea saccharalis*), gusano de la espiga (*Helicoverpa zea*), gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*) y contra el gusano de la raíz (*Diabrotica sp.*), para una mayor expresión del potencial de rendimiento.

Se evaluaron diferentes tratamientos de fertilización en cada ambiente los cuales estuvieron definidos según las dosis comúnmente empleadas por el productor y ajustadas para cada ambiente. En el ambiente alto se emplearon las dosis de 89 kg N/ha, 74 kg N/ha, 64 kg N/ha y en el ambiente medio se aplicaron dosis de 86 kg N/ha, 71 kg N/ha, 62 kg N/ha. Todas las dosis fueron aplicadas a la siembra. En el estado V5, se re fertilizó con tres niveles de N a razón de 0 kg N/ha, 45 kg N/ha y 91 kg N/ha. La fuente nitrogenada empleada a la siembra fue urea y SZ MicroEssentials a razón de 50/50 y en la refertilización solmix aplicado con pulverizadora. El detalle de la distribución de los tratamientos en ambos ambientes se muestra en la Figura 2. En cada ambiente se delimitaron 18 parcelas de 16 surcos de ancho cada una con una distancia entre surco de 0,52 m. y por un largo de parcela de 30 m., con excepción de las parcelas con 0 kg/ha de nitrógeno en la refertilización, que contaban con un largo de 15 m., debido al ancho de máquina.

Las densidades empleadas fueron de 83.000 y de 80.000 pl/ha para los ambientes alto y medio respectivamente.

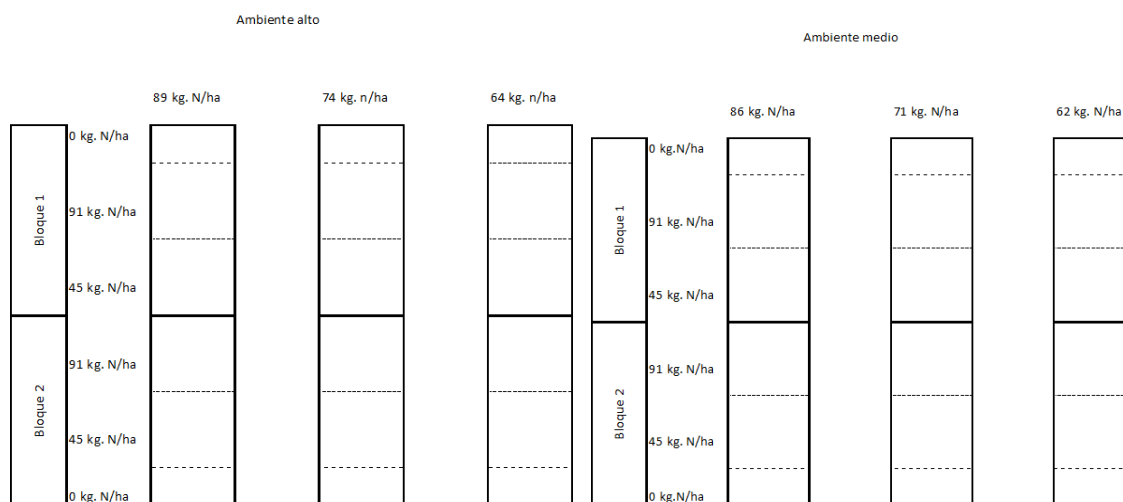


Figura 2: Distribución de los tratamientos en el ambiente alto (izquierda) y en el ambiente medio (derecha).

Se empleó un diseño experimental de tipo strip plot con dos repeticiones donde la parcela principal es la fertilización a la siembra y las subparcelas la refertilización.

Este diseño, es una variante al diseño de parcelas divididas, donde se aplican los tratamientos en subunidades en una banda que cruza todas las unidades de parcelas, lo que genera restricciones en la aleatorización de los tratamientos. El diseño puede ser útil en estudios agrícolas cuando los factores de tratamientos deben usar parcelas grandes (Kuehl R., 2001).

Al igual que en el diseño en parcelas divididas, el strip-plot es un resultado de cómo fue llevado a cabo un experimento que involucra dos o más factores. Estos factores (o sus combinaciones) se aplican en diferentes etapas, generalmente dos y las restricciones a la aleatorización producen las unidades experimentales de diferentes tamaños y por ende diferentes términos de error para cada una de los factores o sus combinaciones (Milliken y Johnson 1992).

Mediciones y estimaciones

Estimación del rendimiento potencial

El rendimiento potencial sin estrés hídrico (Y_p) se calculó según el modelo simplificado de productividad potencial de un cultivo de maíz descrito en Bolaños (1997).

$$Yp = \sum Rad. Inc. * ei * EUR * IC$$

Donde Rad. Inc.: es la radiación fotosintéticamente activa incidente, ei: es la eficiencia de captura de la radiación incidente, EUR: es la eficiencia en el uso de la radiación interceptada acumulada e IC: es la partición a estructuras reproductivas o índice de cosecha.

Los datos de radiación incidente (MJ/m²), precipitaciones y temperatura, se recopilaron de la EEA INTA Marcos Juárez (SIGA INTA). Los valores de ei se obtuvieron mediante la digitalización de curvas de intercepción hipotéticas publicadas por Bolaños (1997). Para digitalizar las curvas y obtener los puntos de las mismas se empleó el software Digitizelt (Bormann, 2012). Los datos diarios de ei del cultivo se determinaron por interpolación entre puntos sucesivos. La cantidad de radiación fotosintéticamente activa acumulada durante el ciclo se obtuvo mediante el producto de la Rad Inc y la ei diaria. Se consideró un valor de EUR de 3,6 g MS/MJ acumulado en el ciclo de acuerdo a los datos publicados por Luque et al. (2021) y un IC de 54% (Cantarero et al., 2020) para maíces modernos de alto potencial productivo y conducidos sin limitantes hídricas ni nutricionales.

Determinación del rendimiento limitado por agua y del rendimiento actual

Se consideró como tales a los obtenidos bajo las condiciones de disponibilidad hídrica normal del año en el que se realizó el experimento y bajo las condiciones de manejo aplicadas. Dado los diferentes ambientes y niveles de nitrógeno empleados, se consideró que el rendimiento limitado por agua (Yw) fue el obtenido bajo la condición de más alta dosis de N aplicado en el ambiente alto, mientras que los rendimientos obtenidos en el ambiente medio o con las menores dosis de N en el ambiente alto, se consideraron como rendimientos actuales (Ya) (GYGA, 2021).

Para todos los casos, el rendimiento en grano, expresado en tn/ha (13,5 % de humedad), se obtuvo de forma mecánica a la cosecha del cultivo. Los datos se obtuvieron a partir de un mapa de rendimiento realizado por la cosechadora. Para obtener el valor alcanzado en cada parcela se empleó el software QGIS (Sistema de Información Geográfica – SIG) que permite extraer datos georeferenciados de cada

pixel generado por el monitor de rendimiento. El rendimiento de cada unidad experimental se obtuvo a partir del promedio de los valores de los píxeles que componen cada parcela.

Los componentes numéricos del rendimiento se obtuvieron a partir de una muestra de 15 espigas por parcela. En cada espiga se contó el número de hileras (nh) y la cantidad de granos por hilera (ng/h) se obtuvo del promedio de granos fijados en dos hileras opuestas de cada espiga. El número de granos por metro cuadrado (NG) se obtuvo a partir del producto de nh x ng/h de cada espiga multiplicado por las 15 espigas y dividido por la densidad de la parcela. Las espigas se trillaron con una desgranadora manual para luego obtener una submuestra de 1.000 granos que fueron secados en estufa hasta peso constante y luego pesados en una balanza de precisión, para obtener el peso de 1.000 granos (PG).

Estimación de la brecha de rendimiento

La brecha de rendimiento debida a la disponibilidad de agua (Y_{gw}) se estimó como la diferencia entre el potencial de rendimiento simulado (Y_p) menos el rendimiento limitado por agua obtenido (Y_w), mientras que la diferencia entre el Y_w y el Y_a se consideró como la brecha de rendimiento debida a la aplicación de prácticas habituales de manejo (Y_{ga}).

$$Y_{gw} = Y_p - Y_w$$

$$Y_{ga} = Y_w - Y_a$$

En ambos casos, las brechas de rendimiento se expresaron en tn/ha. Se estimó el índice de limitación del rendimiento potencial por el agua (ILA) como:

$$ILA = (1 - (Y_w/Y_p)) \times 100\%$$

Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de los datos se realizó un análisis de la variancia utilizando software INFOSTAT y se empleó el test de comparaciones múltiples LSD de Fisher, con un nivel de probabilidad de 0,05.

También se utilizó el coeficiente de Pearson para determinar que incidencia tiene cada uno de los componentes del rendimiento en el mismo.

Resultados

Caracterización climática

Durante el ciclo del cultivo la temperatura media del aire se mantuvo entre los 10 y 25 grados (Figura 3). Estos valores resultaron similares a los promedios históricos de la región para la misma época del año (14,6 y 24,2 grados). No se registraron eventos extremos de temperatura durante el período crítico, aunque las precipitaciones en ese período (78 mm.) fueron inferiores a la media histórica (128 mm).

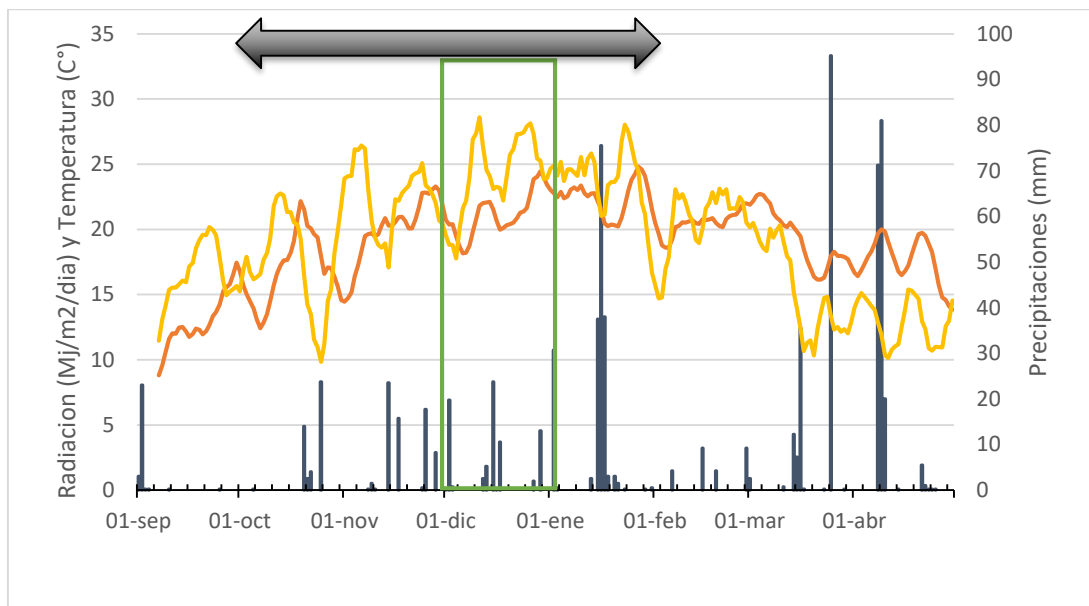


Figura 3: Precipitaciones diarias (barras azules), radiación semanal promedio (amarillo) y temperatura semanal promedio (naranja) durante el ciclo del cultivo. El recuadro en verde indica el momento de ocurrencia del periodo crítico del cultivo. La flecha bidireccional indica la duración del ciclo del cultivo desde siembra hasta madurez fisiológica.

En el periodo crítico hubo menos precipitaciones, por lo tanto hubo menos nubosidad y la oferta radiativa fue de 763 MJ/m², valor coincidente con la máxima oferta radiativa para ese periodo del ciclo del cultivo (766 MJ/m²) (Figura 3).

Los valores diarios del cociente fototérmico (Q) con una temperatura base de 8° C, se encontraron entre 2,8 y 0,4 MJ/m²/día/°C durante el ciclo del cultivo (Figura 4).

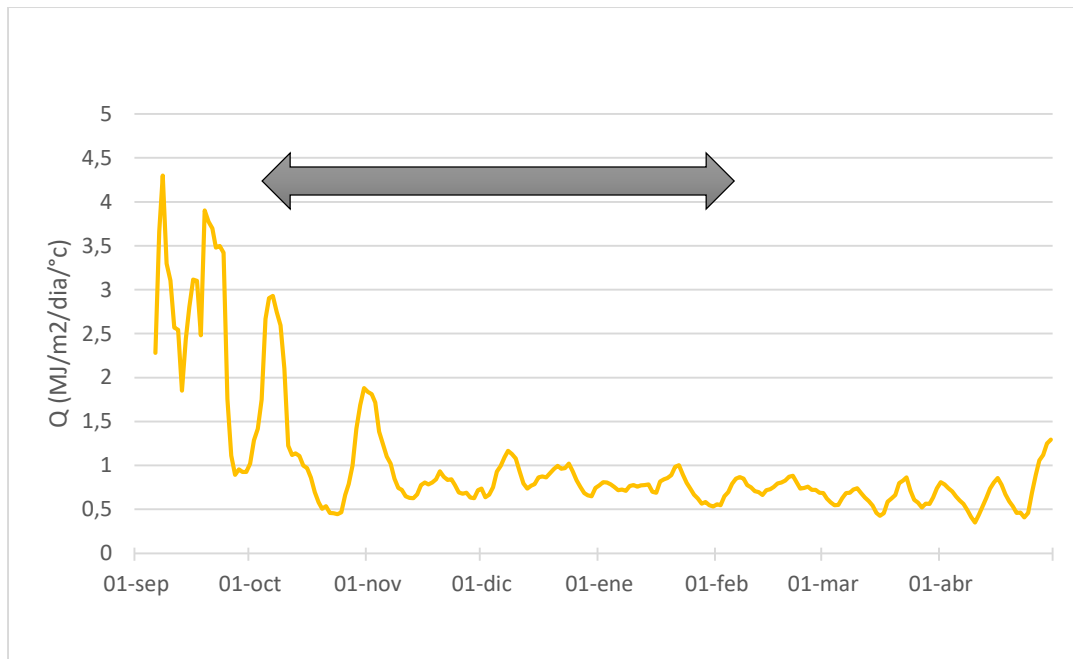


Figura 4: Evolución del cociente fototérmico durante el ciclo del cultivo en la campaña 2020-2021. La flecha bidireccional indica la duración del ciclo del cultivo desde siembra hasta madurez fisiológica.

Rendimiento potencial, real y brechas de rendimiento

El rendimiento potencial simulado que se obtuvo para la zona de Marcos Juárez fue de 25,3 tn/ha con 13,5 % de humedad.

El incremento en la dosis de N aplicado a la siembra y en la refertilización produjo incrementos significativos del rendimiento tanto en el ambiente alto como en el ambiente medio. En el ambiente alto, los rendimientos obtenidos variaron entre 11,4 tn/ha y 14,8 tn/ha, mientras que los rendimientos obtenidos en el ambiente medio oscilaron entre los 9,4 y 13,8 tn/ha para la menor y mayor dosis de N aplicada respectivamente (Tabla 2).

Tabla 2: Rendimiento a la cosecha del cultivo y brechas de rendimiento debida a las prácticas de manejo aplicadas (Yga) entre el rendimiento limitado por agua (Yw; 14,8 tn/ha) y los rendimientos actuales obtenidos en los ambientes productivos alto y medio. FS: Fertilización a la siembra; RF: Refertilización.

Ambiente	FS (kg N/ha)	RF (kg N/ha)	Rendimiento (tn/ha)	Yga (tn/ha)
Alto	64	91	13,9 ab	0,9 ab
		45	12,7 d	2,1 d
		0	11,4 e	3,4 e
	74	91	14,4 ab	0,4 ab
		45	13,7 bc	1,1 bc
		0	13,2 cd	1,6 cd
	89	91	14,8 a	0 a
		45	13,6 bc	1,2 bc
		0	13,2 cd	1,6 cd
Medio	62	91	12,7 c	2,1 c
		45	11,5 e	3,3 e
		0	9,4 f	5,9 f
	71	91	13,8 a	1 a
		45	12,4 c	2,4 c
		0	12 d	2,8 d
	86	91	13,4 b	1,4 b
		45	12,8 c	2 c
		0	11,5 e	3,3 e

Letras distintas dentro de cada ambiente indican diferencias significativas al 0,05.

El máximo rendimiento limitado por agua se obtuvo en el ambiente alto y este valor no difirió entre las tres dosis con el máximo nivel de refertilización. En consecuencia la Ygw se calculó considerando el promedio de estos tres valores con el rendimiento potencial y fue de 10,9 tn/ha, lo que representa un ILA del 43 %. La máxima brecha de rendimiento, calculada como la diferencia entre el Yp y el menor rendimiento obtenido en el ambiente medio con menor dosis de fertilizante, fue de 15,9 tn/ha, mientras que el Yga osciló entre valores de 0 y 3,4 tn/ha para el ambiente alto, mientras que para el ambiente medio oscilaron entre 1 y 5,9 tn/ha (Tabla 2).

Para analizar el efecto de la aplicación del N sobre la magnitud de las brechas, se calculó qué porcentaje del requerimiento máximo de N necesario para alcanzar el Yp representaba cada dosis total aplicada y se observó qué rendimiento se obtenía en cada caso (Figura 5). Para realizar este cálculo, la dosis de N necesaria para alcanzar el máximo rendimiento se obtuvo considerando un requerimiento de 22

kgN/tn grano (IPNI, 2016). Las dosis de N aplicadas cubrieron hasta un 31% del máximo requerimiento (Figura 5). La respuesta al agregado de N, fue lineal positiva en todo el rango de dosis empleadas, sin que se detectara un plateau en la respuesta. En todos los casos, el rendimiento obtenido ante el agregado de N en cada rango de dosis fue siempre mayor en el ambiente alto que en el medio. No obstante, la tasa de incremento del rendimiento ante al agregado de N fue mayor en el ambiente medio que en el alto (0.41 vs. 0.33 kg grano/%N, respectivamente).

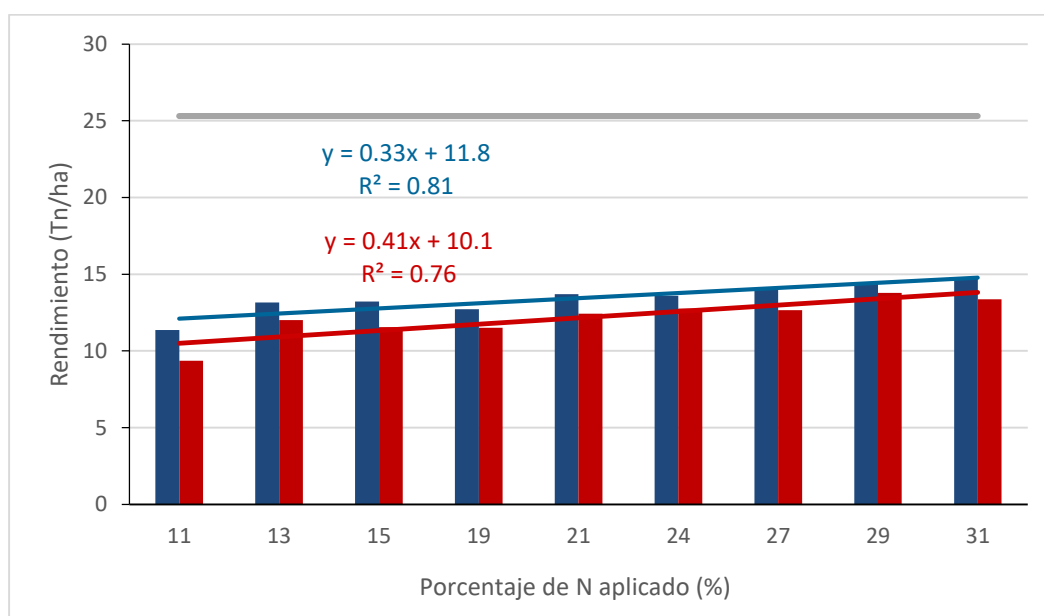


Figura 5: Rendimiento obtenido en función del porcentaje de nitrógeno aplicado en relación a la dosis necesaria para llegar al rendimiento potencial. Barras en azul ambiente productivo alto y barras en rojo ambiente productivo medio. Línea gris horizontal, indica el rendimiento potencial. Línea azul y línea roja, análisis de regresión de los puntos correspondientes a los ambientes alto y medio respectivamente.

Asociaciones entre el rendimiento y sus componentes numéricos

Las variaciones del rendimiento fueron explicadas por cambios del NG en ambos ambientes ($R^2= 0,63$; $p<0,05$ y $R^2= 0,79$; $p<0,05$ para el ambiente productivo alto y medio respectivamente); y no por cambios del PG (Figura 6).

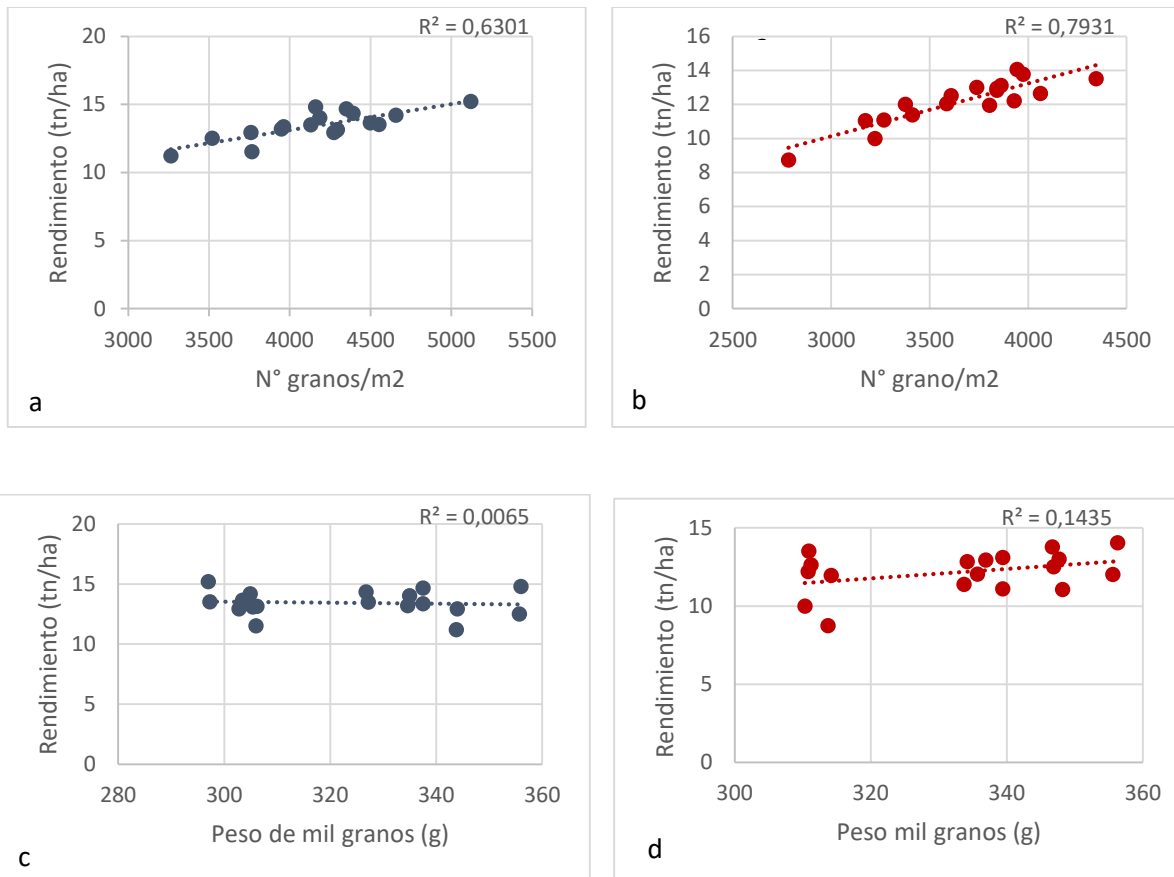


Figura 6: Asociación entre el rendimiento y N^o de granos/m² (a y b) y entre rendimiento y Peso de mil granos (c y d) para los ambientes productivos alto (azul) y medio (rojo).

Respuesta de los componentes numéricos del rendimiento al manejo de la fertilización.

La respuesta del NG al agregado de N se evaluó primeramente en los tratamientos sin refertilización. Para ambos ambientes, esta respuesta adoptó una forma del tipo lineal plateau (Figuras 7 y 8).

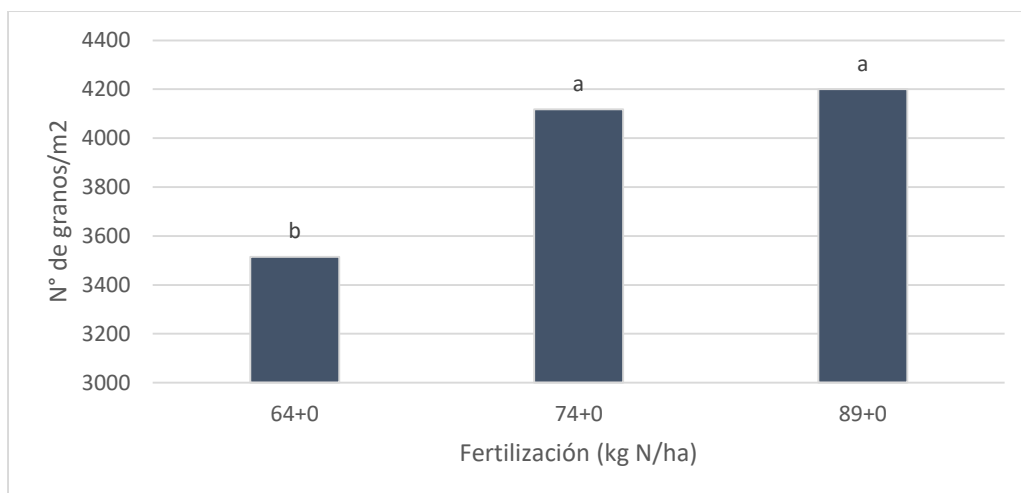


Figura 7: Efecto de la fertilización sobre el número de granos/m² según el nivel de fertilización a la siembra sin refertilización, para el ambiente productivo alto. Letras distintas indican diferencias significativas al 0,05.

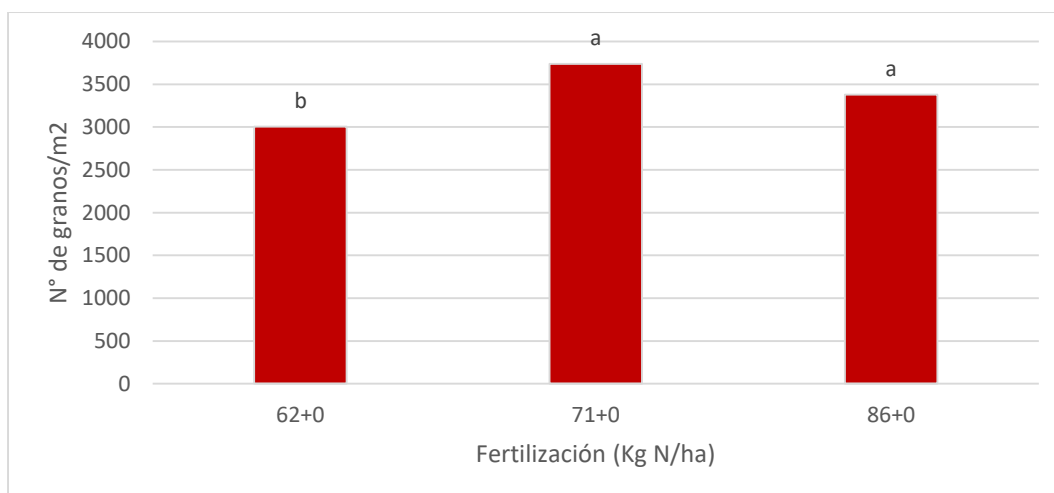


Figura 8: Efecto de la fertilización sobre el número de granos/m² según el nivel de fertilización a la siembra sin refertilización, para el ambiente productivo medio. Letras distintas indican diferencias significativas al 0,05.

En ambos ambientes, el NG aumentó significativamente ante el aumento en la dosis de fertilizante, pero solo en la mayor dosis de refertilización sobre la menor dosis de fertilizante aplicado a la siembra hubo un claro efecto sobre el NG. En el resto de los tratamientos, este comportamiento no fue tan evidente (Figuras 9 y 10).

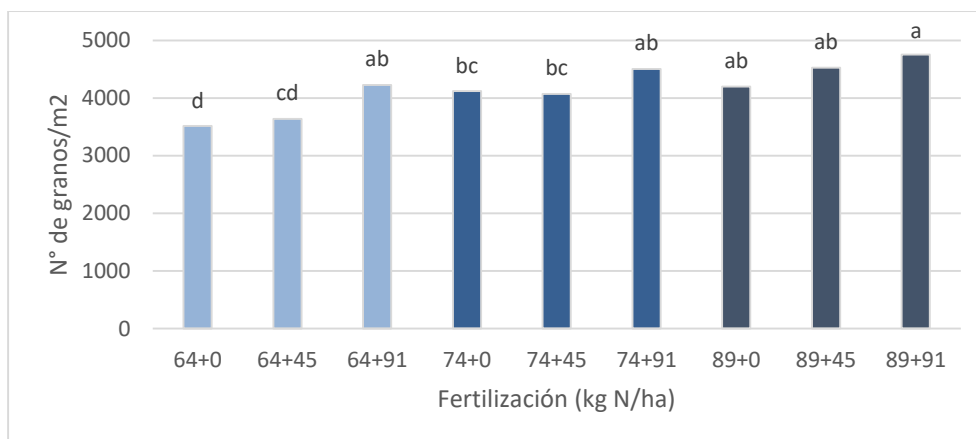


Figura 9: Efecto de la refertilización sobre el número de granos/m² según el nivel de fertilización a la siembra, para el ambiente productivo alto. Letras distintas indican diferencias significativas al 0,05. Los colores agrupan las dosis de fertilización a la siembra.

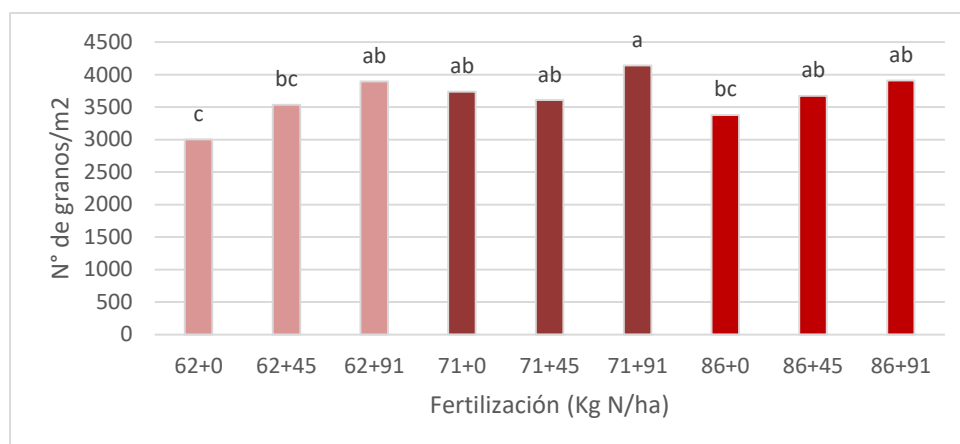


Figura 10: Efecto de la refertilización sobre el número de granos/m² según el nivel de fertilización a la siembra, para el ambiente productivo medio. Letras distintas indican diferencias significativas al 0,05. Los colores agrupan las dosis de fertilización a la siembra.

El componente PG no fue afectado por el manejo de la fertilización, tanto por la dosis inicial a la siembra como por el agregado de N en refertilización (Figuras 11 y 12).

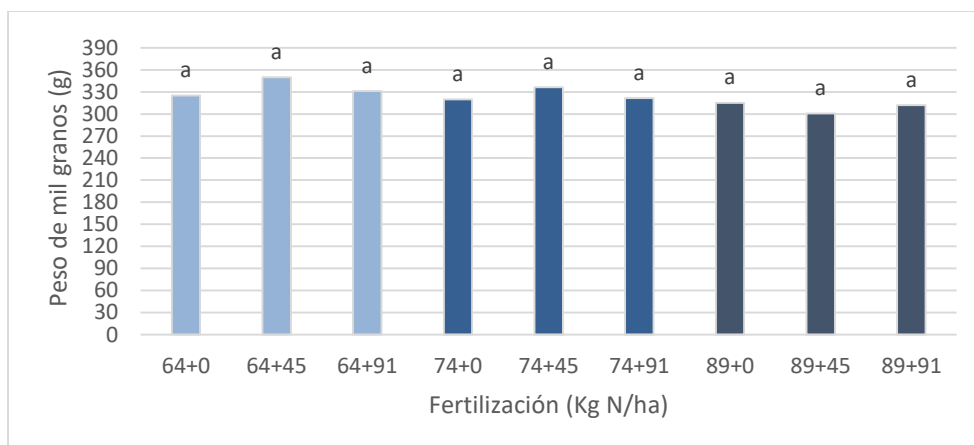


Figura 11: Efecto de la refertilización sobre el peso de mil granos según el nivel de fertilización a la siembra, para el ambiente productivo alto. Letras distintas indican diferencias significativas al 0,05. Los colores agrupan las dosis de fertilización a la siembra.

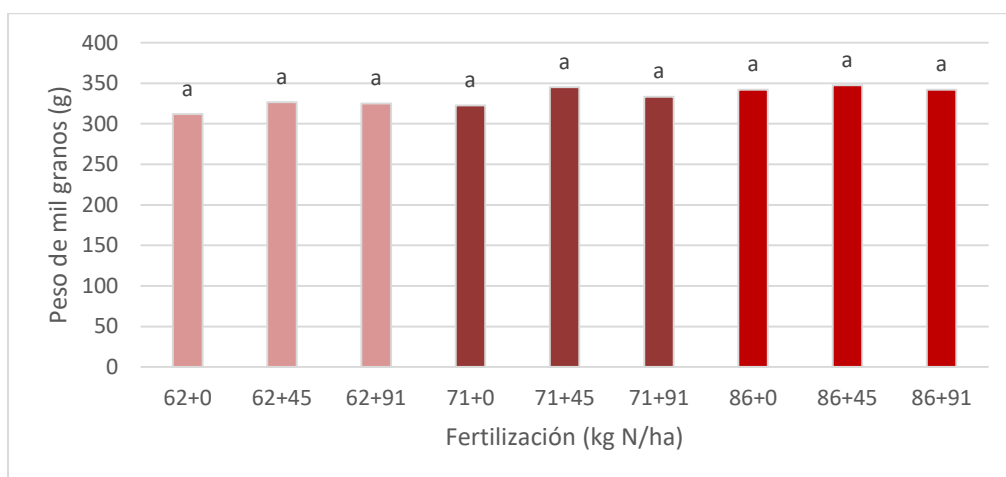


Figura 12: Efecto de la refertilización sobre el peso de mil granos según el nivel de fertilización a la siembra, para el ambiente productivo medio. Letras distintas indican diferencias significativas al 0,05. Los colores agrupan las dosis de fertilización a la siembra.

Discusión y Conclusión

Los resultados obtenidos de rendimiento potencial, basados en el promedio de datos climáticos de diez años fue de 25,3 tn/ha. Este valor resulta inferior al calculado por quienes citan un rendimiento potencial de 30 tn/ha, pero similar al estimado en GYGA (2021) considerando la máxima productividad posible del agua en la zona. Las diferencias con estos autores se pueden explicar debido a que el valor que obtienen corresponde a la simulación de un cultivo de maíz sembrado 30 días antes de la fecha de siembra empleada en este experimento, el método de simulación es diferente y a que la serie de datos empleados en los cálculos tiene otro lugar de origen. No obstante, es interesante destacar que si ambos estudios se consideran en conjunto, surge que el manejo de la fecha de siembra constituye un elemento fundamental en la estimación de los potenciales de rendimiento para la región. Los valores de rendimiento real obtenido en el experimento, en ambos ambientes, fueron considerablemente mayores al reportado por Beccari y Videla Mensegue (2018) incluso en el ambiente menos favorable y con la menor dosis de N aplicado. Estas diferencias pueden atribuirse a la distribución de las precipitaciones, como así también a la ubicación específica de este ensayo, debido a que se encuentra en una región de mayor productividad que la analizada por estos autores, aunque en su trabajo mencionan haber encontrado rindes máximos de hasta 14 tn/ha, similares a los reportados por nosotros.

La brecha entre el Y_p y el Y_w fue de 10,9 tn/ha lo que significó un ILA del 43%. Sin embargo, cuando se calculó la brecha entre el Y_p y el mínimo rendimiento obtenido en nuestro experimento, que representaría los niveles obtenidos por los productores, lo que arrojó un resultado de 15,9 tn/ha (Figura 5), solo 5,9 tn/ha más. Esta brecha es menor que los 22 tn/ha estimados por Beccari y Videla Mensegue (2018), producto del mayor potencial de rendimiento estimado y los menores valores de rendimiento real registrados por estos autores.

La brecha de 5,9 tn/ha, que representa la Y_g y fue obtenida en el ambiente medio con la menor dosis de fertilizante (Tabla 2), es similar a lo reportado por Aramburu Melos et al. (2016), que indican brechas en el orden de 6,6 t/ha para esta región.

Este valor de brecha es relativamente pequeño y mostró una tendencia a achicarse de manera importante con el manejo de la fertilización. Sin embargo, los registros Yga del ambiente alto fueron consistentemente menores que los del ambiente medio. A pesar de estas diferencias, la brecha entre los rendimientos logrados a nivel de campo y los máximos limitados por la oferta hídrica no son cercanos, lo que podría estar relacionado con el menor nivel de precipitaciones recibidas durante el ciclo del cultivo, particularmente en el período crítico (Figura 3). Reportes previos (Aramburu Melos et al., 2015) señalan que en escenarios con escasas precipitaciones estos dos niveles de rendimientos tienden a ser similares.

La respuesta a la fertilización tuvo un impacto diferencial según el tipo de ambiente en el que se aplicó. En el ambiente alto la condición nutricional es mejor, por lo tanto hay menos respuesta al agregado de N lo que sugiere la presencia otros factores limitantes, por ejemplo el agua. En cambio, la respuesta del rendimiento por unidad de fertilizante aplicado fue mayor en el ambiente medio (Figura 5), principalmente debido a la menor oferta natural de N del suelo (Tabla 1). En este ambiente de menor calidad, la siembra de una menor cantidad de plantas junto al manejo de la fertilización, pudieron contribuir a mejorar la condición fisiológica del cultivo durante el período crítico permitiendo que cada individuo fije un elevado número de granos. Entonces se puede concluir que, en el ambiente analizado, el ajuste por ambientes de la densidad de plantas y de la dosis de fertilizante a aplicar, son herramientas de bajo costo que contribuyen a reducir las brechas de rendimiento y mejorar la eficiencia de uso de los recursos, aspectos clave para contrarrestar los factores limitantes y reductores de la producción.

Las variaciones del rendimiento observadas estuvieron asociadas con cambios en el número de granos/m² y no en el peso de los granos (Figura 6). Esto coincide con resultados reportados por Cirilo y Andrade (1994), aunque otros autores (Cantarero et al., 2020) señalan que bajo condiciones de estrés hídrico, el PG puede explicar cambios importantes del rendimiento. En nuestro experimento se empleó un material genético diferente al empleado por Cantarero et al (2020) y además, el cultivo no presentó una severa limitante de agua especialmente durante el llenado de los granos. Se sabe que existen híbridos de maíz con una importante plasticidad para ajustar el PG ante mejoras en el ambiente productivo (Cordido Lucas, 2013).

La elección del genotipo entonces, se vislumbra como una importante herramienta para complementar el manejo con el objetivo de disminuir las brechas de rendimiento.

Aspectos a considerar

- Determinar el agua útil en el perfil de suelo previo a la siembra ya que la misma es un determinante fundamental en el rendimiento y permite ajustar el planteo productivo.
- Ajustar la fertilización según el ambiente productivo debido a que el ambiente medio tiene mayor respuesta al agregado de N y de esta forma se puede reducir las brechas de rendimiento.
- Determinar las densidades óptimas para cada ambiente productivo, lo que permitiría aumentar el NG/m^2 y siendo este el principal componente numérico del rendimiento permitiría incrementar el mismo.
- Hacer un análisis de suelo más amplio que permita encontrar otro factor químico o físico que este limitando el rendimiento.
- Optar por genética que se adapte a la región donde se lleva a cabo el desarrollo del cultivo.

Agradecimientos

Agradecemos al productor Fabián José Pettinari y su familia por poner a disposición el campo donde se llevó a cabo el ensayo y los insumos para realizar el mismo.

Como así también a los ingenieros agrónomos a cargo del campo, Alejandro Lingua y Gastón Favaro por su ayuda en el diseño del ensayo, el monitoreo durante el ciclo de cultivo y consultas técnicas. Y a Alberto Favaro por la maquinaria de pulverización para realizar la refertilización del ensayo.

A la cátedra de Sistema de Producción de Cultivos Extensivos (Cereales y Oleaginosas), en especial a nuestro tutor Sergio Luque que nos acompañó en todo el desarrollo del ensayo.

A la cooperativa General Paz de Marcos Juárez por prestarnos los instrumentos para la medición de humedad de los granos.

Además queremos agradecer a EEA INTA Marcos Juárez, más específicamente a su técnico Ing. Agro. Sebastián Muñoz por su constante colaboración en el armado del trabajo final, en la obtención y análisis de los datos y mapas generados por las maquinarias, a la Licenciada en Estadística Belén Conde por su colaboración en el diseño estadístico para expresar los resultados del ensayo y Alvaro Andreucci por facilitarnos los datos climáticos.

A nuestras familias, tanto a los que están presente como a los que ya no, que a lo largo de toda la carrera son un pilar fundamental y nos brindan un apoyo constante.

Bibliografía

- Agrofy. (n.d.). *agrofy*. From Maíz DK 7210 RR2 / VT3PRO / VT3PRO RIB - Dekalb: <https://www.agrofy.com.ar/maiz-dekalb-dk72-10.html>
- Alvarez, R., 2010. Análisis económico de la metodología del balance y la de umbrales fijo para recomendar la fertilización nitrogenada de maíz. IX Congreso Nacional de Maíz. Argentina, Actas, pag. 261-263
- Aramburu Melos, 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 Crops Research*. 184, 145-154.
- Aramburu Melos, F; Monzón, J.P.; ANDRADE, F.H.; Grassini, P. (2016). Rendimientos Potenciales y Brechas de Rendimiento en Argentina. XXIV Congreso AAPRESID —Resiliarll. 3 al 5 de Agosto de 2016. Rosario, Argentina.
- Beccari, A. y Videla Mensegue, H. (2018) Brecha de rendimiento de maíz temprano y tardío en la región sudeste de Córdoba. Obtenido de https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_maiz_rendimiento_secba_lab.pdf
- Bolaños, J. (1997) Programa regional de maíz para centro América y el Caribe - Síntesis de resultados experimentales 1993-1995. CIMMYT-PRM. Obtenido de: <https://repository.cimmyt.org/xmlui/bitstream/handle/10883/3665/73111.pdf> Pág.: 291-296.
- Bormann, I. (2012). Digitizelt (version 2.0). Obtenido de: <http://www.digitizeit.de/>.
- Cantarero, M.G.; Luque, S.F.; Canal, G.; Zgrablich, S.; Viotti, G. (2020). Rendimiento del cultivo de maíz tardío ante la modificación de la oferta hídrica. Obtenido de: <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/nexoagro/article/view/30520>
- Cirilo A.G. y Andrade F.H. (1996). Sowing date and kernel weight in maize. *Crop Science*. 36:325-331.
- Cisneros, J; Cholaky, C; Cantero Gutiérrez, A; González, J; Reynero, M; Diez, A y Bergesio, L. (2012). Erosión hídrica: principios y técnicas de manejo. 1a ed. Río Cuarto: UniRío editora.
- Cordido, L. 2013. Efecto de densidad de siembra y ambiente, sobre el rendimiento de tres híbridos de maíz de siembra tardía en el oeste arenoso, Provincia de Buenos Aires. Trabajo Final de Ingeniería en Producción Agropecuaria. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Católica Argentina. Disponible en:

- <http://bibliotecadigital.uca.edu.ar/repositorio/tesis/efecto-densidad-siembra-ambiente-rendimiento.pdf>
- Dekalb. (2021). Dekalb. Obtenido de: <https://www.dekalb.com.co/es-co/tecnologias/vtriplepro.html>
- Dekalb. (2021). Productos. Obtenido de <https://www.dekalb.com.ar/es-ar/novedades/productos-dekalb.html>
- Donadío, N. M. (2019). Efecto de la densidad de siembra y dosis de fertilización nitrogenada sobre el rendimiento en cultivo de maíz. Extraído de: <https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/17121/Efecto%20de%20la%20densidad%20de%20siembra%20y%20dosis%20de%20fertilizaci%3b3n%20nitrogenada%20sobre%20el%20rendimiento%20en%20cultivo%20de%20ma%3adz%20%28Zea%20mays%20L.%29.pdf?sequence=1&isAllowed=>
- Espósito, G; Balboa, A; Castillo, C; Balboa, R y Degioanni, A. (2012). Fecha de siembra y fertilización variable de maíz sobre Haplustoles de Córdoba. XIX Congreso Latinoamericano y XXIII Congreso Argentino y Latino Americano de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata. Buenos Aires. Argentina. Obtenido de: https://www.produccionvegetalunrc.org/images/fotos/135_FECHA%20DE%20SIEMBRA%20Y%20FERTILIZACION%20VARIABLE%20DE%20MAIZ%20SOBRE%20HAPLUSTOLES%20DE%20CoRDOBA.pdf Pág.: 1-6.
- GYGA (2021) Global Yield Gap and Water Productivity Atlas. Disponible en URL: www.yieldgap.org
- Gudelj, V. (2019). Fertilización y brecha de rendimiento del cultivo de maíz. Cordoba. Obtenido de: https://inta.gov.ar/sites/default/files/inta_marcosjuarez_actualizacionmaiz_2019.pdf Pág: 43-45.
- Hashemi, D.A.; Kocheiki, A. and Banaiyan, A. (1994). Increase Crop Yield. Translation. Mashmad University Press. 76 p. Obtenido de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342015000801903
- INTA. Sistema de información y gestión agrometeorologica. Obtenido de: <http://siga2.inta.gov.ar/#/data>
- IPNI 2016. Cálculo de Requerimientos Nutricionales - Versión 2016. Obtenido de <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1024>. Con acceso el 20/1/2022

- Kuehl R. (2001) Diseño de experimentos - Principios estadísticos de diseño y análisis de investigación. THOMSON - LEARN ING.
Obtenido de: <https://wiartur.files.wordpress.com/2010/04/kuehl-diseno-de-experimentos.pdf> Pág.: 496
- Luque S.F., Canal G., Cantarero M.G (2021) Respuesta del rendimiento a la fertilización con nitrógeno y azufre en siembra tardía de maíz. IX Jornadas Integradas de Investigación, Extensión y Enseñanza de la Facultad de Ciencias Agropecuarias - UNC- Año 2021.
- Mashmad University Press. 76 p. Recuperado el (07 de julio de 2020) de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342015000801903
- Milliken G.A., Johnson D.E. (1992). Analysis of Messy Data, Vol. 1. Chapman and Hall: Londres.
- Nanni L., R. J. (2012). Variabilidad de la respuesta del maíz según. Obtenido de: https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-variabilidad_de_respuesta_al_nitrogeno_segun_zon.pdf
- Ruiz, A. C. (2018). Manejo de la fertilización nitrogenada y densidad de siembra de maíz en ambientes del sudeste de Córdoba – Experiencias de la Chacra Justiniano Posse. Obtenido de: <https://repositorio.inta.gob.ar/xmlui/handle/20.500.12123/3052#>
- Salvagiotti, F; J. Castellarin, F Ferraguti, D. Dignani y H. Pedrol. 2010. Umbrales de respuesta a la fertilización nitrogenada en maíz y dosis óptimas económicas según potencial de producción. Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Pág.: 5.
- Seiler R; Wehbe, A.M; Vinocur, M y Tarasconi, E.L. (2008). Efectos del cambio climático y de la variabilidad climática sobre la producción agropecuaria: impactos y adaptación. XII Reunión Argentina de Agrometeorología, 8 al 10 de octubre de 2008. San Salvador de Jujuy. Argentina. Obtenido de: https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_d6-_evaluacin_de_diferentes_densidades_de_planta.pdf
- Uhart, S.A.; Andrade, F.H. 1995. Nitrogen deficiency in maize. I. Effects on crop growth development, dry matter partitioning and kernel set. Crop Science 35:1376-13835.

Vega, C.R.C., Andrade F.H., Sadras V.O., Uhart S.A., y Valentinuz O.R. 2001. Seed number as a function of growth. A comparative study in soybean, sunflower, and maize. *Crop Science* 41:748-754.

Videla Mensegue, H. (2018). Brecha de rendimiento de maíz temprano y tardío en la región sudeste de Córdoba. Córdoba.

https://repositorio.inta.gob.ar/xmlui/bitstream/handle/20.500.12123/3175/INTA_CR_Cordoba_EEAMarcosJuarez_Videla_H_Brecha_rendimiento_ma%C3%ADz_temprano_tard%C3%ADo.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Videla Mensegue, H., y Canale, A. (2014). Evaluación de diferentes densidades de plantas de maíz en siembras. Obtenido de:

https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_d6-_evaluacin_de_diferentes_densidades_de_planta.pdf