



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA ARGENTINA

Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias

Ingeniería Agronómica

Efecto de la fertilización nitrogenada variable y densidad de siembra sobre el rendimiento en maíz tardío en Monte Nievas, La Pampa

Trabajo final de graduación para optar por el título de:
Ingeniero agrónomo

Autor: Alaya Gonzalo.

Tutor: Ing. Agr. Bautista Villarino

Agradecimientos

Me gustaría dedicar este espacio para agradecerle a mi familia por todo el esfuerzo que han llevado a cabo a lo largo de los años, para poder enseñarnos acerca de los valores, respeto y educación. Transitar una carrera universitaria muchas veces tiene complicaciones, que nos generan dudas, pero gracias al respaldo es posible llegar a lograr conseguir el título universitario. También me gustaría agradecer a amigos y compañeros que se vuelven familia en los momentos de la carrera, ya que resulta muy difícil estar lejos del hogar por tantos años. Finalmente agradecer a los profesores y la facultad por brindar una educación de primer nivel, con mucha dedicación, y priorizando siempre los conocimientos.

RESUMEN

El rendimiento del maíz en la planicie con tosca, característica limitante del suelo donde se realizó el ensayo, depende de la correcta selección de factores que influyen en el mismo. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la fertilización nitrogenada variable y la densidad de siembra sobre el rendimiento en maíz tardío, para obtener el máximo beneficio económico. En el ensayo se utilizaron dos densidades de siembra, una densidad baja (50.000 plantas/hectárea) y una densidad media-alta (70.000 pl/ha). A todos los tratamientos, incluidos los testigos, se les realizó una fertilización a la siembra con 65 kg de Fosfato monoamónico (MAP). La fuente de fertilizante nitrogenado utilizado fue UREA 46% (46% de nitrógeno). Luego para cada densidad de siembra, se asignaron 5 tratamientos de fertilización: 1) sin adición de UREA (testigo); 2) 40 kg/N/ha (kilogramos/nitrógeno/hectárea); 3) 80 kg/N/ha; 4) 120 kg/N/ha, 5) 160 kg/N/ha. Los tratamientos se aplicaron en parcelas de 3,12 metros de ancho (o 6 surcos a 0,52 cm) por 40 metros de largo. El método analítico utilizado fue diseño factorial con 2 factores, el factor 1 densidad de siembra con 2 niveles (50.000 y 70.000 pl/ha) y factor 2 dosis de nitrógeno con 5 niveles (0,40,80,120 y 160 kg/N/ha). Los resultados del ensayo para dosis de nitrógeno arrojaron diferencias significativamente superiores en rendimiento para las dosis de 40 y 120 kg/ha, con rendimientos de 6489 kg/ha y 6685 kg/ha respectivamente. Seguidos luego con una diferencia significativamente menor por las dosis de 80 y 160 kg/ha, con 5886 kg/ha y 5912 kg/ha respectivamente. Los resultados en rendimiento con respecto a la densidad de siembra por hectárea no mostraron diferencias significativas, y se obtuvieron rendimientos promedio de 5746 kg/ha para la densidad de 70.000 pl./ha, y 5891 kg/ha con 50.000 pl./ha.

Palabras clave:

Indice

1.Introduccion.....	-pág. 5
1.1 Nitrógeno	-pág.9
1.2 Densidad de población	-pág. 11
1.3 Hipótesis	-pág. 13
1.4 Objetivo general y objetivos específicos	-pág. 14
2. Materiales y métodos	-pág.15
2.1 Diseño del experimento, modelo y análisis estadísticos	-pág. 18
3. Resultados y discusión	-pág. 20
3.1 Comparación de respuesta en rendimiento (kg/ha) para la población de maíz con 50.000 pl./ha según las diferentes dosis de N	-pág. 20
3.2 Comparación de respuesta en rendimiento (kg/ha) para la población de maíz con 70.000 pl./ha según las diferentes dosis de N	-pág. 21
3.3 Comparación de respuesta al rendimiento (kg/ha) del cultivo de maíz para las poblaciones de 50.000 y 70.000 pl/ha	-pág.22
3.4 Comparación de respuesta al Numero de granos/espiga del cultivo de maíz para las densidades de población de 50.000 y 70.000 pl./ha.....	-pág.23
3.5 Comparación de respuesta al NG/espiga del cultivo de maíz para las dosis de nitrógeno de 0,40,80,120 y 160 kg/N/ha	-pág. 24
3.6 Peso 1000 semillas por tratamiento	-pág. 25
4. Conclusiones	-pág. 26
5.1. ANEXO 1	-pág.27
5.2 ANEXO 2	-pág. 32
5.3 ANEXO 3	-pág.35
5.4 ANEXO 4	-pág. 38
6. Bibliografía	-pág.42

Introducción

La población mundial es más de tres veces mayor que a mediados del siglo XX. La población mundial alcanzó los 8000 millones a mediados de noviembre de 2022, (...) Se estima que la población mundial aumentará casi 2000 millones de personas en los próximos 30 años, pasando de los 8000 millones actuales a los 9700 millones en 2050, pudiendo llegar a un pico de cerca de 10.400 millones para mediados de 2080. (Perspectivas de Población mundial 2022 y *Tablero de la Población Mundial*).

La creciente demanda global de alimentos y las limitadas posibilidades de expansión de la frontera agrícola constituyen el marco para la discusión de la intensificación de la producción de los cultivos. Esta intensificación implica la incorporación de tecnologías y el desarrollo de estrategias de manejo para incrementar los rendimientos por unidad de superficie haciendo un uso más eficiente de los recursos que necesita el cultivo para producir (radiación, agua, nutrientes), pero al mismo tiempo reducir los efectos negativos sobre el ambiente. (INTA, “Rendimientos potenciales del maíz”).

Acerca de reducir los efectos negativos sobre el ambiente, la Huella de Carbono “representa la sumatoria de los gases de efecto invernadero, emitidos directa o indirectamente, como consecuencia de la producción, el procesamiento y las fases de transporte y comercialización del producto. De esta forma, la menor magnitud de esta Huella ayuda ante las exigencias ambientales que tienen los países importadores del maíz local.” (...) “en la campaña 2021/22 la huella de carbono promedio del maíz argentino fue de 178 gramos por kilo. Esto es 22% menos que hace 10 años, y además es 61% menos que el promedio mundial, 52% menos que la huella de Brasil y 27% menos que la de Estados Unidos y Canadá, donde se usan fertilizantes nitrogenados en grandes cantidades.”, (Bongiovanni, Congreso Maizar 2023).

A nivel mundial, la importancia del maíz recae en sus múltiples usos, ya que puede ser usado como alimento, forraje y materia prima para la industria. Como alimento, se puede utilizar todo el grano, maduro o no, o bien se puede elaborar con técnicas de molienda en seco para obtener un número relativamente amplio de productos intermedios, como por ejemplo sémola de partículas de diferentes tamaños, sémola en escamas, harina y harina fina, que a su vez tienen un gran número de aplicaciones en una amplia variedad de alimentos. (FAO, Cap. 1, “aplicaciones del maíz”).

Otros avances en el uso del maíz han sido invertir en ciencia y tecnología de transformación de la biomasa del maíz. Por la aplicación del conocimiento a la biomasa se fueron generando nuevos usos que hoy van desde la alimentación humana y animal hasta la producción de polímeros para industrias como la textil, del calzado y de autopartes, pasando por cientos de productos intermedios que son insumos de las industrias de alimentos y bebidas, higiene personal, farmacéutica, papelera, adhesivos, pinturas, porcelanas, combustibles y muchísimas más (Vilella & Vigneau, Congreso Maizar 2023).

Respecto a la producción mundial de maíz, para el ciclo comercial 2022/2023, la producción estimada es 1,151.4 millones de toneladas (mdt). Con dicho volumen habría una baja de 5.3% con respecto al ciclo comercial anterior (2021/2022). Este mismo decremento se estima con una variación anual de 2.4% de la superficie cosechada y una caída del rendimiento promedio mundial en 2.8%, al ubicarse en 5.73 toneladas por hectárea. (...) Los principales productores participarían con 65.2% de la producción mundial de maíz: Estados Unidos con 30.3%, China 24.1% y Brasil 10.9%, respectivamente. (informe USDA Mayo 2023).

El consumo mundial rompería su tendencia alcista observada durante nueve ciclos consecutivos. En 2022/23 se alcanzaría un consumo de 1,158.3 mdt, disminuyendo en 2% el récord registrado en el ciclo anterior. (informe USDA Mayo 2023).

El comercio internacional de maíz se contraerá en el ciclo 2022/23 rompiendo una tendencia alcista de tres ciclos comerciales consecutivos. El volumen de exportaciones sería de 181.1 mdt, una variación anual de 11.6 %. (...) Los principales países que contribuirían con el 86.4% de las exportaciones serían EU, Brasil, Argentina y Ucrania. (informe USDA Mayo 2023).

Respecto a la producción Argentina de maíz, el USDA mantuvo sin cambios su previsión sobre el volumen de la cosecha actual en 37 millones de toneladas, por encima de los 36 millones proyectados por la Bolsa de Cereales de Buenos Aires (BCBA)(...)Para la campaña argentina 2023/2024 el organismo pronosticó un importante repunte de la producción, hasta los 55 millones de toneladas. (informe USDA Mayo 2023).

Según lo estimado por la Bolsa de Comercio de Rosario, para el ciclo 2022/2023 la producción de maíz en Argentina será de 32 millones de toneladas, obtenidos de una superficie cosechada de 5,97 millones de hectáreas, siendo el rinde promedio nacional de 53,6 qq/ha o 5360 kg/ha. Lo producido sumado el stock inicial de 6,3 mill. tn, resulta en una oferta nacional de 38,3 mill.tn de maíz.

A su vez, la demanda del cereal en Argentina para el ciclo 2022/2023 se descompone en:

- Exportaciones: estimadas en 20 mill. tn, representando el 52,2% de la oferta nacional.
- Consumo interno: se subdivide en:
 1. uso industrial (molienda seca, molienda húmeda, etanol y otras industrias) demanda 4,4 mill tn y representa el 11,4% de la oferta.
 2. Forrajes, semilla y residual, estimado en 10,8 mill. tn representando el 28,2% de la oferta nacional. De dicha demanda, 10,6 mill tn o el 27,6% de la oferta nacional es destinada a la producción animal.

La campaña 2022/2023 estima tener un decremento en la producción nacional del 30% comparado con los 5 años anteriores, debido al contexto de sequía histórica que se hizo presente en nuestro país.

En los siguientes gráficos de la Bolsa de Comercio de Rosario con fuentes del Servicio meteorológico Nacional se pueden observar las precipitaciones inferiores a lo normal en el periodo comprendido entre el 1/7 – 12/11 de 2022 comparadas con las precipitaciones medias del periodo del 1/7 al 8/11 desde 1988-2018.

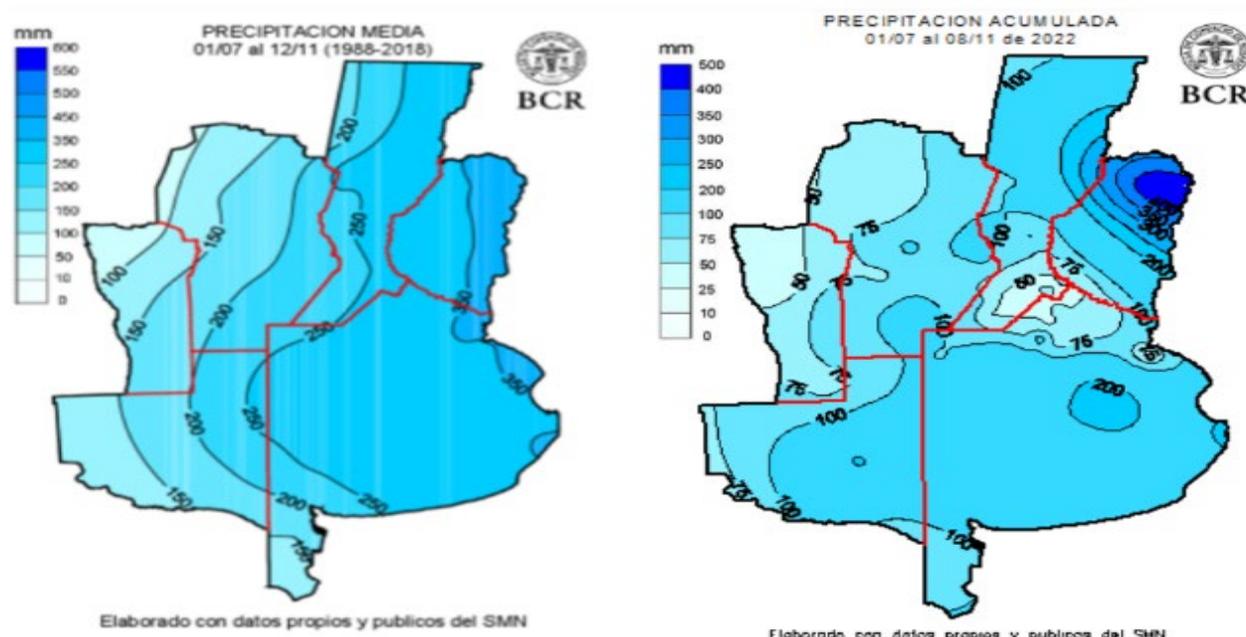


Imagen 1. Promedio precipitaciones medias 1988-2018 y precipitaciones acumuladas del 2022/2023 para el periodo comprendido 1/7 – 12/11. Fuente: Bolsa de Comercio de Rosario y Servicio Meteorológico Nacional.

“Como consecuencia de la sequía histórica, que redujo el saldo exportable en un 42,8%, este año (2023) el ingreso de buques graneleros a los puertos argentinos caerá y será la mitad que en 2022. Así lo proyectó la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación, que indicó que entrarán unos 1285 barcos menos que el periodo anterior, donde fueron 2644 embarcaciones las que llegaron para cargar.” (fuente La Nación, tomado de Secretaria de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación, Junio 2023,).

En la región semiárida pampeana el componente más importante de las condiciones ambientales que limita la productividad de los cultivos es la disponibilidad de agua. No obstante, en los cultivos estivales se presentan con frecuencia situaciones de altas temperaturas que también afectan la productividad de los mismos. La combinación de estrés hídrico y térmico produce efectos más severos sobre el rendimiento que cuando se presentan en forma individual (Corró Molas, 2012).

Cabe destacar que, ante situaciones de estrés hídrico, el atraso de la fecha de siembra es una estrategia que permite evitar la coincidencia del periodo crítico con los momentos de mayor demanda atmosférica (Ghironi & Corro Molas, 2012).

“Lo que hace la siembra tardía es ubicar toda su etapa reproductiva, tanto fijación de granos como llenado de granos, en una época de balance hídrico más favorable, aún con temperaturas más frescas que alargan el período” (Otegui, Congreso Maizar 2023)

En lo que respeta a la producción por hectárea, además del atraso en la fecha de siembra, hay siete factores que impactan en el rendimiento del maíz, el clima, nitrógeno, híbrido utilizado, cultivo anterior, densidad de la población, labranza y reguladores de crecimiento son las denominadas 7 maravillas del alto rendimiento(...) las 7 maravillas del alto rendimiento están ordenadas en función de su impacto en el rendimiento, es decir, el clima es el factor que en mayor porcentaje define el rendimiento potencial del maíz. Esto es particularmente importante porque cuanto más alto es un factor en la lista, más control ejerce sobre los factores inferiores. (The Seven Wonders of the Corn Yield World, University of Illinois).

En el siguiente cuadro se pueden observar los 7 factores que presentan mayor influencia en el rendimiento potencial del maíz (los datos fueron obtenidos en investigaciones realizadas por el laboratorio de Fisiología Vegetal de la Universidad de Illinois):

RANGO	FACTOR	VALOR	
		TON/HA	%
1	Clima	4.4 +	27
2	Nitrógeno	4.4	26
3	Híbrido	3.1	19
4	Cultivo anterior	1.6	10
5	Densidad de población	1.3	8
6	Labranza	0.9	6
7	Reguladores de crecimiento	0.6	4
	TOTAL	16.3	100

Tabla 2. Las 7 maravillas del alto rendimiento en maíz. “The Seven Wonders of the Corn Yield World”, Universidad de Illinois.

El clima es el factor que más influye en el rendimiento, influyendo en el éxito de todos los esfuerzos de manejo. La incidencia de estrés hídrico o térmico resulta crítica para el rendimiento cuando tiene lugar durante el período centrado en la floración femenina, afectando la fijación de granos y, en menor medida, el peso de los granos si estos estreses acontecen durante el llenado de los granos. (Adaptado de Hall et al. (1981); Rattalino et al. (2011); Mayer et al. (2014) y Navarrete Sánchez (2017))

En este ensayo los factores que se pusieron a prueba fueron la disponibilidad de nitrógeno y la densidad de siembra. Además, se seleccionó una fecha de siembra tardía para evitar el stress hídrico centrado en floración.

Nitrógeno

El nitrógeno (N) es el nutriente que con más frecuencia limita el crecimiento y el rendimiento del maíz. Esta condición ocurre porque las plantas requieren cantidades relativamente grandes de N (de 1.5 a 3.5% de peso seco de la planta) y porque la mayoría de los suelos no tienen suficiente N en forma disponible para mantener los niveles deseados de producción. Debido a que la deficiencia de N puede disminuir el rendimiento y la calidad del grano, es necesario tomar medidas para asegurar que niveles adecuados de N estén disponibles para las plantas". (Stangel, 1984).

El NO₃⁻ (anión nitrato) es la forma de N absorbida predominantemente por las plantas de maíz, independiente de la fuente de N aplicada. El mismo es absorbido por la corriente transpiratoria de la planta, por lo que es indispensable la provisión de agua para incorporarlo. Independientemente de la forma como haya sido absorbido, una vez dentro de la planta, el N inorgánico tiene que ser asimilado (incorporado) a formas orgánicas, comúnmente aminoácidos. El N se incorpora en numerosos compuestos esenciales a la planta, pero la mayoría (> 90%) está presente en las proteínas. A pesar de lo complejo, el impacto del metabolismo del N en el crecimiento y rendimiento del maíz se puede resumir en dos funciones generales: 1) establecimiento y mantenimiento de la capacidad fotosintética y 2) desarrollo y crecimiento de los sumideros reproductivos.

El establecimiento de la capacidad fotosintética se logra asegurando que la provisión de N no limite el desenvolvimiento del complejo sistema que controla la fotosíntesis (enzimas, pigmentos y otros compuestos). Dentro de ciertos límites, el incremento en la disponibilidad de N aumenta el crecimiento y vigor de la planta, mientras que la deficiencia resulta en plantas pequeñas y de color pálido. La deficiencia de N afecta la captación solar, en consecuencia, la fotosíntesis y en última instancia el rendimiento de granos. Las deficiencias de N se reconocen rápidamente en el campo debido a la coloración verde amarillenta del cultivo, sin embargo, es mucho más difícil identificar el nivel adecuado y excesivo de N en el cultivo. (Below, 1995).

En general, estudios realizados en maíz han mostrado que con deficiencias tanto sea de N, P, K o S, las mayores reducciones se observan en el área foliar. Como fue expresado anteriormente, estas diferencias están dadas principalmente por una reducción en la tasa de expansión foliar y/o una aceleración en la senescencia de las hojas. Esto resulta en una menor intercepción de la radiación incidente que, junto con caídas en la eficiencia de uso de la radiación interceptada (ec), reducen la tasa de crecimiento del cultivo. Si dicha reducción ocurre en el periodo crítico de la determinación del número de granos alrededor de R1, se afecta el rendimiento del cultivo. (García, Correndo, Calvo, Monzon, 2023).

La falta de N es la más común de las deficiencias nutricionales en maíz y se caracteriza por un amarillamiento de la planta. El amarillamiento o clorosis aparece primero en las hojas más antiguas (hojas bajas) o en hojas superiores totalmente expandidas. La planta se torna pálida y empieza una necrosis café en la punta de la hoja que avanza por

la nervadura media en forma de v invertida.(Zambrano, Cartagena, Carrillo, Sangoquiza, Durango, Parra, Campaña. 2021)



Imagen 2. Deficiencias de nitrógeno en maíz. Fuente: Programa Nacional de Maíz y Centro KOPIA-Ecuador. J. L. Zambrano, Y. Cartagena, M. Carrillo, C. Sangoquiza, W. Durango, R. Parra, D. Campaña. 202.

El conocimiento de las cantidades de N en el suelo antes de sembrar es un elemento básico que ayuda a obtener buenas producciones de maíz reduciendo los costes de fertilización, ya que, con dicha información, las aportaciones de N de fondo son frecuentemente innecesarias. Éste es un hecho que los productores de maíz deberían tener siempre presente y que la experiencia dice que se suele obviar. La gran importancia del N residual en el ahorro de N en el maíz. (Isla y Quílez, 2006; Lloveras et al., 2012).

En cultivos de maíz destinados para grano se ha hallado que las respuestas a la fertilización nitrogenada fueron determinadas principalmente por una mayor intercepción de la radiación incidente durante el ciclo del cultivo (Barbieri et al.,2000).

El fertilizante nitrogenado es uno de los principales insumos y costos en la producción de maíz, lo que hace necesario contar con herramientas que permitan determinar la dosis óptima económica de N, es decir, la cantidad de N que maximiza la renta de este cultivo (Pagani et al., 2008, Jaynes et al., 2011).

La necesidad de nitrógeno (N) del maíz es de 22 kg por tonelada de grano producido (García et al., 1997). En el cultivo de maíz se ha demostrado un efecto proporcional de los rendimientos conforme se incrementan los niveles de fertilización (Álvarez et al., 2003). Diferentes investigaciones han demostrado que la aplicación de N vía UREA al voleo conlleva pérdidas de 60% o más de la cantidad aplicada; depende del tipo de suelo esta pérdida aumenta por vías como lixiviación, volatilización y escorrentía, que contaminan el ambiente con óxido nitroso (N₂O) y dióxido de N (NO₂) (Jordan et al., 2008; Sepúlveda et al., 2011).

La demanda de N del cultivo de maíz aumenta marcadamente a partir del estado de 5-6 hojas desarrolladas (30-50 días después de la emergencia). Por esta razón, la aplicación en este estado del cultivo o inmediatamente previa ha sido reportada como la de mayor eficiencia de uso de N (Sainz Rozas et al., 1999).

En esta búsqueda de productividad pocas veces se estima la eficiencia del uso de los nutrientes (EUN), definida como: la biomasa total producida por la planta por unidad del nutriente absorbido (Gourley et al., 1994). La eficiencia agronómica (EA) indica las unidades de incremento en rendimiento por unidad de nutriente aplicado. (IPNI, 2012; Yadav et al., 2017). Reportes en maíz mostraron valores sobre la eficiencia agronómica de N (EAN), que variaron entre 23,6 y 33,3 kg de grano/kg N aplicado. (García y Espinoza, 2009).

En un ensayo realizado en Rio Cuarto, Córdoba, se evaluó el efecto de la dosis de nitrógeno y densidad de siembra sobre el rendimiento. Utilizaron dosis de 0,62, 125 y 187 kg/N/ha y densidades de siembra de 30.000, 60.000, 90.000 y 120.000 plantas/hectárea. Los resultados arrojaron que, a medida que aumentaba la dosis de nitrógeno, el rendimiento no aumentaba, sino que llegaba a un rendimiento máximo con la dosis de 62 kg/N/ha. Respecto a la densidad de siembra, los resultados mostraron que solo la densidad de 30.000 pl/ha tuvo rendimientos significativamente inferiores al resto, mientras que no hubo diferencias significativas entre las densidades de siembra más altas. (Demichelis, Avoledo, Mateo, Correa, Rinaldi, 2018).

En otro ensayo realizado en 9 de Julio, Buenos Aires, se analizó también el efecto de la aplicación variable de fertilizante nitrogenado (0,23,46,92 y 184 kg/N/ha) sobre el rendimiento en grano. Los ensayos se realizaron en un ambiente de alta productividad y de baja productividad. El objetivo era evaluar la dosis variable de nitrógeno por ambiente. Los resultados para el ambiente de alta productividad (bajo) arrojaron que los mayores rendimientos se obtuvieron a partir de la dosis de 46 kg/N/ha, por lo que las dosis mayores no expresaron diferencias de rendimiento significativas. Mientras que para el

ambiente de baja productividad (loma), el aumento en la dosis de nitrógeno no obtuvo diferencias respecto del tratamiento testigo. (Fernández, 2011)

Densidad de población

La densidad de siembra es una herramienta efectiva para obtener canopeos eficientes y aprovechar la luz solar incidente. El cultivo es capaz de alcanzar su máxima tasa de crecimiento cuando el área foliar le permite capturar el 95% de su radiación incidente, alcanzar esa cobertura al inicio del período crítico (floración femenina) y mantenerla durante el mayor tiempo posible es el objetivo del manejo de la densidad, dado que se traduce en mayor producción de biomasa y rendimiento de grano (Andrade et al., 1996).

Particularmente, el rendimiento en grano responde de forma parabólica a la densidad de siembra en maíz, con una densidad óptima por sobre la cual el rendimiento disminuye, debido a la presencia de plantas estériles o con baja fijación de granos (Vega y Sadras, 2003).

En ambientes de mayor potencialidad se busca maximizar la captura de recursos y la fijación de granos por unidad de superficie, principal componente del rendimiento con densidades de siembra superiores a 7,5 pl m⁻² (plantas por metro cuadrado) y niveles de rendimiento superiores a los 90 q ha⁻¹ (quintales por hectárea). Por el contrario, en ambientes restrictivos (ambientes marginales), los agricultores reducen la densidad de siembra ($\leq 6,5$ pl m⁻²) con el objetivo de no penalizar el rendimiento (50- 90 q ha⁻¹) (Maddonni, Parco, Rotili, 2021).

En ambientes de mediana a baja productividad resultará conveniente optar por bajas densidades de siembra, pues las pérdidas de rendimiento por exceso en años secos son generalmente mayores que el potencial de rendimiento no explotado por densidades subóptimas en los años de buena disponibilidad hídrica (Eyhéabide, 2012).

La mejora en la economía del agua en las etapas reproductivas de maíces de siembra tardía, en conjunto con la baja densidad de siembra, permitirían que, en estos ambientes restrictivos, las plantas del estand alcancen tasas de crecimiento alrededor de floración lo suficientemente elevadas para lograr la fijación de granos y se evite la esterilidad de plantas en años con oferta ambiental promedio o inferior al promedio. Asimismo, en años con oferta ambiental superior al promedio, la fecha tardía y la baja densidad de siembra permitirían a las plantas alcanzar elevadas tasas de crecimiento alrededor de floración, obteniendo una máxima fijación de granos por espiga y más de una espiga por planta, en aquellos genotipos caracterizados como prolíficos. (Maddonni, Parco, Rotili, 2021).

La estabilidad del rendimiento frente a cambios en la densidad de plantas depende de la capacidad de los individuos dentro del cultivo para expresar mecanismos de compensación cuando el número de plantas por metro cuadrado es bajo (plasticidad vegetativa y reproductiva) y para producir granos en situaciones de limitados recursos por planta. El maíz presenta una limitada plasticidad vegetativa ante disminuciones en la densidad (producción de macollos). La plasticidad reproductiva es aún menor ya que en densidad subóptima, el número de granos en la primera espiga alcanza un plateau como resultado de limitaciones en el número potencial de granos por espiga. Híbridos prolíficos presentan mayor estabilidad del rendimiento ante reducciones en la densidad de plantas

por presentar mayor capacidad para fijar granos en una segunda espiga (Duvick, 1974; Andrade et al., 1996; Sarquis, 1998).

Las bajas densidades de plantas afectan significativamente la captura de luz del maíz, por lo que presenta una notable respuesta al aumento de la densidad en términos de producción de biomasa. Esto es así mientras que el número de plantas no supere aquel que permite la cobertura total de suelo al inicio del periodo crítico, ya que el mayor número será compensado por una disminución en la tasa de crecimiento por planta que conlleva a un muy bajo número de granos por planta (Andrade et al., 1996).

El incremento en la densidad de plantas permite obtener mayores coberturas en forma anticipada dentro del ciclo del cultivo alcanzando antes del IAF (índice de área foliar) crítico, lo que favorece la producción de biomasa. La producción total de materia seca por unidad de área se incrementa con el aumento de la densidad de plantas, teniendo una relación inversa la biomasa total por planta respecto de la densidad (Andrade et al., 1996).

A medida que la disponibilidad de recursos por plantas disminuye debido a incrementos en la densidad óptima, se pueden notar las reducciones en el número de granos por espiga ante disminuciones en el crecimiento por planta.

El rendimiento en grano del cultivo de maíz se compone del número de granos producidos por unidad de superficie y del peso medio del mismo. El primero está más estrechamente relacionado con las variaciones en el rendimiento (Cirilo & Andrade, 1994). El número de granos cosechado en el cultivo responde a las variaciones en la tasa de crecimiento que experimentó el cultivo durante el periodo crítico; la relación de este parámetro puede variar para diversas situaciones de densidad de siembra, disponibilidad de agua, radiación, nitrógeno y régimen térmico (Andrade et al., 1999; Cantarero et al., 1999; Otegui & Andrade, 2000).

El rendimiento en granos (Rend) está determinado por la biomasa total (Bt) y el índice de cosecha (IC), y también puede explicarse a partir del número de granos (NG) por el peso de los granos (PG).

Ecuación 1|: $Bt \cdot IC = Rendimiento = NG \cdot PG$ (Adaptado de Andrade et al., 1996).

En un ensayo experimental realizado en el oeste arenoso de la provincia de Buenos Aires se evaluó el efecto de la densidad de siembra de maíz sobre el número de granos por espiga, sobre el peso de 1000 granos y el rendimiento. Las densidades que utilizaron en este experimento fueron 45.000, 60.000, 75.000 y 90.000 pl/ha. Los resultados arrojaron que, a medida que disminuía la densidad de siembra, el número de granos por espiga aumentaba o era mayor en comparación a las demás densidades. Además, el peso de 1000 granos aumentaba, a medida que la densidad de siembra era más baja. Respecto al rendimiento, no observaron diferencias significativas para las densidades de siembra utilizadas. (Cordido Lucas, 2013).

Hipótesis

- El aumento en la dosis de nitrógeno aumenta el rendimiento, cualquiera sea la densidad de población.
- La densidad de población más baja (50.000 pl./ha) permite obtener mejor rendimiento ante condiciones de stress hídrico, en comparación con la población de 70.000 pl./ha.
- Los factores dosis de nitrógeno y densidad de población son independientes, es decir que no existe interacción entre ambos factores.
- El aumento de la dosis de nitrógeno aumenta el número de granos/espiga.
- El aumento en la densidad de población produce una disminución en el número de granos/espiga.

Objetivo principal:

El objetivo principal de este ensayo fue evaluar la respuesta a la fertilización nitrogenada variable y densidad de siembra en rendimiento de granos del híbrido de maíz As740.

Objetivos específicos

- 1- Evaluar el efecto de una aplicación de UREA en diferentes dosis, en estado V4 del maíz, sobre el rendimiento en granos.
- 2- Evaluar el efecto de la densidad de siembra baja para años con baja disponibilidad hídrica, para lograr estabilidad en el rendimiento.
- 3- Determinar si la densidad de siembra más baja provoca un aumento en el número de granos/espiga.
- 4- Determinar si el aumento de la dosis nitrogenada produce un aumento en el número de granos/espiga.

Materiales y métodos

Sitio experimental

El ensayo se llevó a cabo en el establecimiento “Estancia chica” (35°89'18.22” S; 64°01'35.05” O), ubicado cerca de la localidad Monte Nievas, departamento Conhelo, provincia de La Pampa.

El establecimiento se encuentra en la Región Oriental, subregión de las planicies con tosca. En la clasificación taxonómica el suelo dominante es un Haplustol Entico con horizonte Petro cálcico (tosca), familia franco-gruesa mixta térmica (con tosca de 50 cm a 150 cm) En el sitio del ensayo la tosca se ubica a 150 cm de profundidad. Las limitaciones presentes del suelo son: poca profundidad efectiva, drenaje natural excesivo, sequías estacionales, erosión eólica moderada y leve peligro a la erosión hídrica.

La clase de suelo según capacidad de uso es clase IIIs1 (con limitaciones en la zona radicular, profundidad del perfil hasta roca o duripan). VER ANEXO 4

Condiciones del sitio experimental

El lote donde se realizó el ensayo viene de 3 años consecutivos de siembra directa, el cultivo antecesor fue maíz tardío, pero debido a un control químico tardío de Euphorbia davidii o “lecherón” hubo mermas en el rendimiento del 70% aproximadamente, por lo que se decidió sembrar nuevamente maíz.

Las malezas controladas durante el barbecho fueron: Chenopodium album (quinoa), Amaranthus crispus (yuyo colorado), Euphorbia davidii (lecherón), Centaurea solstitialis (abre puño), Carduus nutans (cardo), Taraxacum officinale (diente de león), Urtica chamaedryoides (ortiga), Conyza bonariensis (rama negra), Brassica nigra, B. campestris (nabo), Hirschfeldia incana (mostacilla). El control químico se realizó con una estrategia de doble golpe, para poder eliminar las malezas difíciles como yuyo colorado y rama negra:

1. Primer golpe el 10/10/2022 con dosis por hectárea de Glifosato 2 lts., 2-4D 1,2 lts., Picloram 160 cc, 200 cc corrector PH, LiPlus (coadyuvante) 160 cc.
2. Segundo golpe el 30/10/2022 con dosis por hectárea de Paraquat Quemazon (desecante) 2 lts., Diflufenican Adama Legacy 260 cc, MSO plus (coayuv. Aceite soja) 500 cc, y Choise (corrector PH) 200cc.

La fecha de siembra fue el 28 de noviembre de 2022, fecha de siembra tardía, con una sembradora Masterclass neumática de siembra directa con distancia entre surcos de 52

cm. El híbrido elegido fue el As740 VT3pro vendido por la firma Nutrien Ag solutions. A la siembra se fertilizó con 65 kg de fosfato monoamónico (MAP).

Post siembra se realizó un control químico sobre Sorghum halepense (sorgo de Alepo), Digitaria sanguinalis (pasto cuaresma) y Cenchrus pauciflorus (roseta), con una dosis por hectárea de Glifosato de 2,5 lts, 500cc (centímetros cúbicos) 2-4D, 1 kg atrazina, 200cc corrector de PH, 150 cc coadyuvante.

El lote donde se realizó la siembra del cultivo posee 50 hectáreas. Al momento de la siembra, se realizó una pasada de 70.000 pl./ha para poder aplicar los tratamientos correspondientes, y en el resto del lote se aplicó la densidad de 50.000 pl./ha.

Sobre cada densidad de siembra se aplicaron 5 tratamientos de fertilización variable de la dosis de nitrógeno, 0,40,80,120 y 160 kg/ha respectivamente.

El tamaño de las parcelas donde se aplicó cada tratamiento fue de 40 metros de largo por 3,12 mts. ancho (6 surcos a 0,52 cm). De cada parcela se tomaron 30 muestras (espigas) a las cuales se les contó el número de granos (NG) y se tomó el peso de mil granos (P1000). A partir de estos valores y la densidad de siembra se pudo calcular el rendimiento con la siguiente ecuación:

- **Rinde (kg/ha) = granos/m² x P1000 (gramos) x 0,01***
- ***0,01= factor de conversión**

El número de granos por metro cuadrado se calculó a partir de la fórmula:

- **GRANOS/M²= (GRANOS/PLANTA) X (PLANTAS/M²)**

En total fueron 10 tratamientos:

Tratamiento	Densidad (pl./ha)	Dosis N (kg/N/ha)
1	50000	0
2	50000	40
3	50000	80
4	50000	120
5	50000	160
6	70000	0
7	70000	40
8	70000	80
9	70000	120
10	70000	160

Tabla 1. Asignación de los tratamientos con su respectiva densidad de siembra y dosis de nitrógeno por hectárea.

Las muestras fueron cosechadas manualmente el 20 de mayo de 2023.

En el siguiente grafico podemos observar la distribución de las precipitaciones que afectaron el ciclo del maíz:

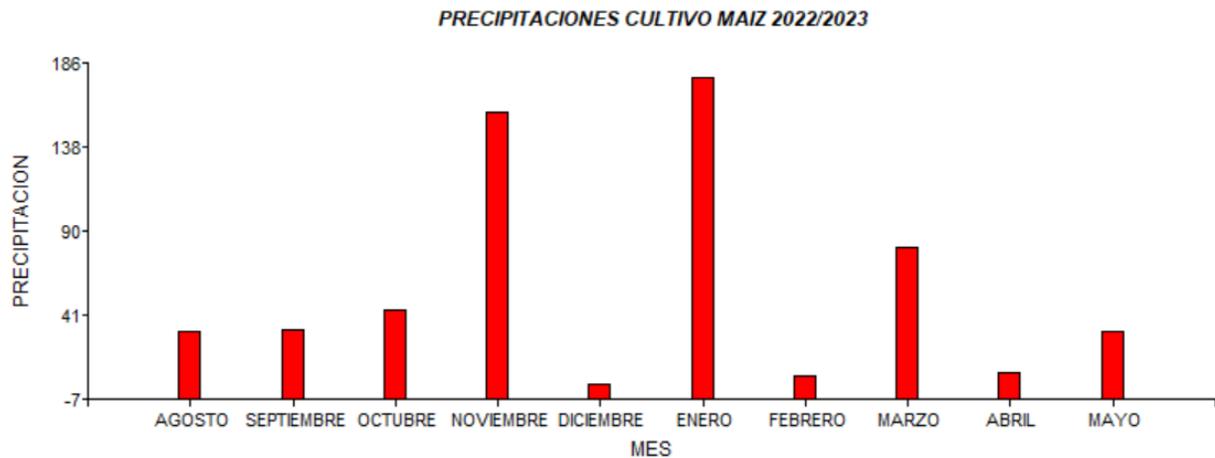


Grafico 1. Distribución de las lluvias 2022/2023 para el cultivo de maíz.

Las precipitaciones acumuladas durante el barbecho fueron buenas, con un acumulado en septiembre (33mm)-octubre (44mm)-noviembre (157mm) de 234mm. Luego en el mes de diciembre las lluvias fueron escasas (2mm). Durante el mes de enero hubo otro buen ciclo de lluvias, con un acumulado de 177 mm, descendiendo luego en el mes de febrero a 6 mm. El mes de marzo-abril-mayo tuvo un acumulado de 121 mm. En el ciclo del cultivo, sumando el barbecho de 3 meses pre-siembra, el acumulado total de precipitaciones fue de 540 mm.

En el siguiente grafico podemos observar las temperaturas minimas y maximas mensuales para el sitio del experimento:

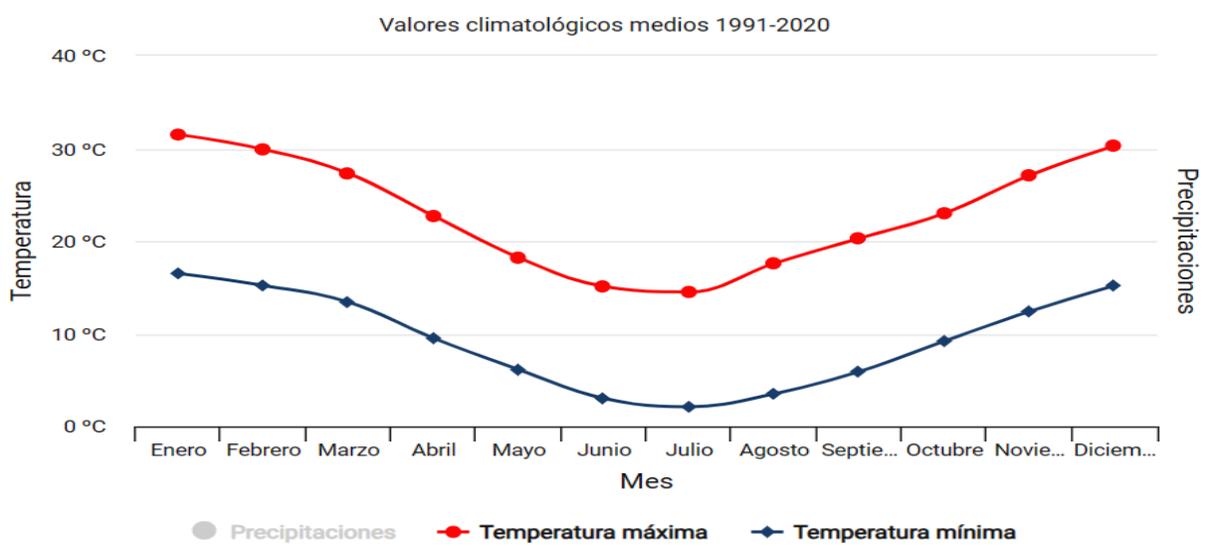


Grafico 2. Temperaturas maximas y minimas promedio mensuales para la localidad de General Pico, La Pampa. Ubicado a 35 km del sitio experimental.

Diseño del experimento

El modelo utilizado para evaluar el efecto sobre el rendimiento de la fertilización nitrogenada y la densidad de siembra en maíz fue un diseño factorial con 2 factores:

1. Factor A: densidad de población con 2 niveles (50.000 y 70.000 pl./ha).
2. Factor B: dosis de nitrógeno con 5 niveles (0,40,80,120 y 160 kg/N/ha).

Modelo estadístico:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

Y_{ijk} = respuesta de rendimiento a los efectos de la fertilización y densidad de población o la interacción entre ambos;

μ = media de la población;

α_i = efecto de la densidad de población sobre las unidades experimentales;

β_j = efecto de la fertilización nitrogenada sobre las unidades experimentales;

γ_{ij} = efecto debido a la interacción entre los factores sobre cada unidad experimental;

ϵ_{ijk} = diferencia entre el valor observado y el valor esperado.

Análisis estadístico

El programa utilizado para el análisis de datos fue Infostat.

Los resultados para la variable rendimiento (kg/ha) fueron analizados mediante análisis de la varianza. Las comparaciones entre densidad de siembra y dosis de nitrógeno se hicieron con la prueba de Tukey. Se consideran significativas con un p-valor < 0,05.

Los datos se analizaron mediante un ANOVA (análisis de la varianza por sus siglas en inglés). Para que las conclusiones del ANOVA fueran válidas, se debieron verificar los supuestos del modelo:

1. Todas las muestras deben ser aleatorias e independientes. Dentro de cada tratamiento las observaciones deben ser independientes entre sí.
 2. Las observaciones de cada tratamiento deben proceder de poblaciones normales.
 3. Los tratamientos deben tener la misma variabilidad (homocedasticidad).
- VER ANEXO 1 (efecto sobre el rendimiento de la fertilización nitrogenada y la densidad de siembra en maíz).

El modelo utilizado para evaluar el efecto de la dosis de nitrógeno sobre el número de granos por espiga (NG/ESPIGA) fue un Diseño experimental para 1 factor.

El mismo modelo se utilizó para evaluar el efecto sobre el número de granos por espiga de la densidad de población.

Modelo estadístico:

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \epsilon_{ij}$$

α_i = Efecto de la dosis nitrogenada sobre el número de granos/espiga.

α_i = efecto de la densidad de población sobre el número de granos/espiga.

Análisis estadístico

Los resultados para la variable número de granos por espiga fueron analizados mediante análisis de la varianza. Las comparaciones entre tratamientos se hicieron con la prueba de Tukey. Se consideran significativas con un p-valor < 0,05.

Los datos se analizaron mediante un ANOVA (análisis de la varianza por sus siglas en inglés). Para que las conclusiones del ANOVA fueran válidas, se debieron verificar los supuestos del modelo:

1. Todas las muestras deben ser aleatorias e independientes. Dentro de cada tratamiento las observaciones deben ser independientes entre sí.
 2. Las observaciones de cada tratamiento deben proceder de poblaciones normales.
 3. Los tratamientos deben tener la misma variabilidad (homocedasticidad).
- VER ANEXO 2 (EFECTO DE LA DENSIDAD DE POBLACION SOBRE NG/ESPIGA)
 - VER ANEXO 3 (EFECTO DE LA DOSIS DE NITROGENO SOBRE NG/ESPIGA)

Resultados y discusión

Comparación de respuesta en rendimiento (kg/ha) para la población de maíz con 50.000 pl./ha según las diferentes dosis de N

Tratamiento (kg/N/ha)	Rendimiento (kg/ha)	Comparación
0 kg/N/ha	4223	A
40 kg/N/ha	6474	B
80 kg/N/ha	6258	B
120 kg/N/ha	6306	B
160 kg/N/ha	6194	B

Tabla 1. Rendimientos según dosis de fertilización para densidad de población de 50.000 pl/ha en maíz.

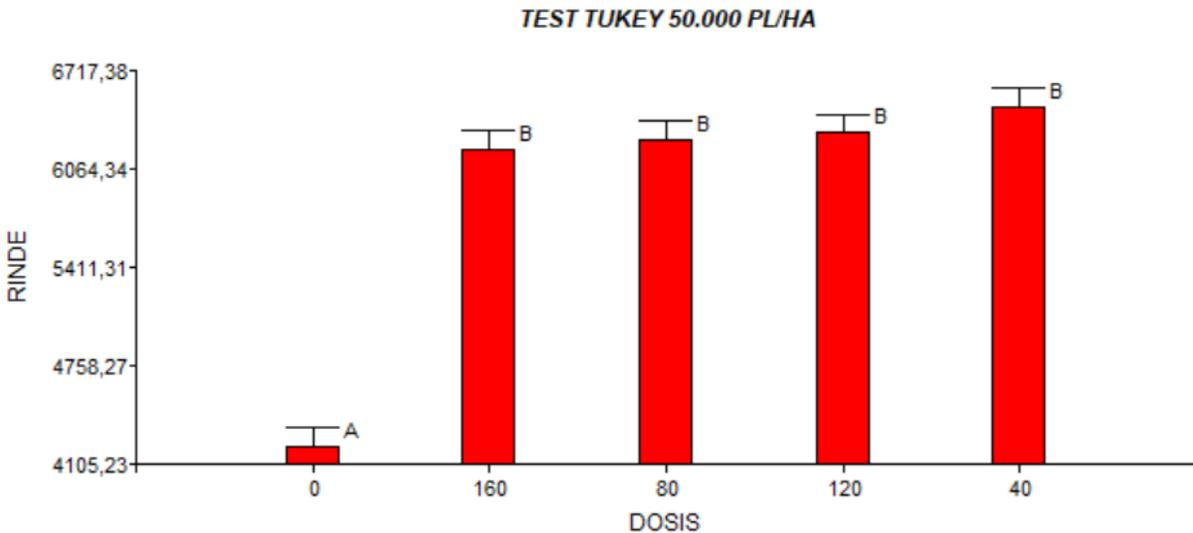


Gráfico 1. Efecto de la dosis nitrogenada (kg/N/ha) sobre el rendimiento (kg/ha) para una población de maíz de 50.000 pl/ha. *Comparación: letras distintas significan diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p -valor < 0,05)*

No se observaron diferencias significativas entre los tratamientos que recibieron las dosis de nitrógeno de 40,80,120 y 160 kg/N/ha, sin embargo, si hubo diferencias significativas con el tratamiento testigo que no recibió fertilización nitrogenada.

Comparación de respuesta en rendimiento (kg/ha) para la población de maíz con 70.000 pl./ha según las diferentes dosis de N.

Tratamiento (kg/N/ha)	Rendimiento (kg/ha)	Comparación
0 kg/N/ha	4015	A
40 kg/N/ha	6505	C
80 kg/N/ha	5514	B
120 kg/N/ha	7063	C
160 kg/N/ha	5631	B

Tabla 2. Rendimientos según dosis de fertilización para densidad de población de 70.000 pl./ha en maíz.

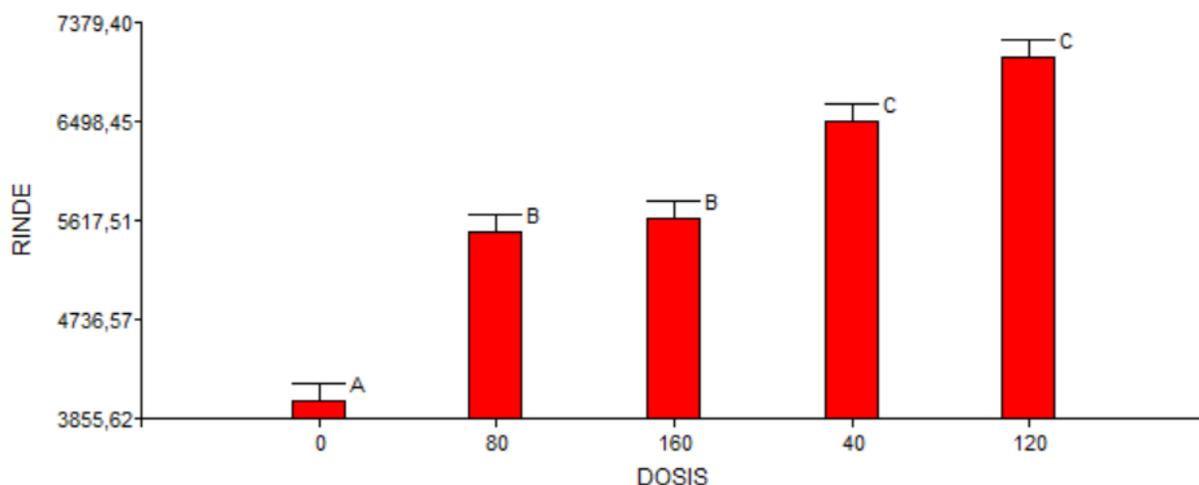


Gráfico 2. Efecto de la dosis nitrogenada (kg/N/ha) sobre el rendimiento (kg/ha) para una población de maíz de 70.000 pl/ha. *Comparación: letras distintas significan diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p-valor < 0,05)*

Los resultados muestran diferencias significativamente superiores al resto en el rendimiento para las dosis de nitrógeno de 40 kg/N/ha y 120 kg/N/ha respectivamente. Las dosis de 80 y 160 kg/N/ha muestran una diferencia significativamente menor a las anteriormente mencionadas, pero sin diferencias significativas entre ellas. Finalmente, el tratamiento que no recibió fertilización nitrogenada tuvo diferencias significativamente menores a todos los otros tratamientos.

Comparación de respuesta al rendimiento (kg/ha) del cultivo de maíz para las poblaciones de 50.000 y 70.000 pl/ha

No se encontraron diferencias significativas en el rendimiento para ambas densidades de siembra. En la siguiente tabla podemos observar los valores de rendimiento para cada densidad, expresado en kilogramos/hectárea:

Tratamiento	Rendimiento (kg/ha)	Comparación*
50000 plantas/ha	5891	A
70000 plantas/ha	5746	A

Tabla 3. Rendimiento según la densidad de población.

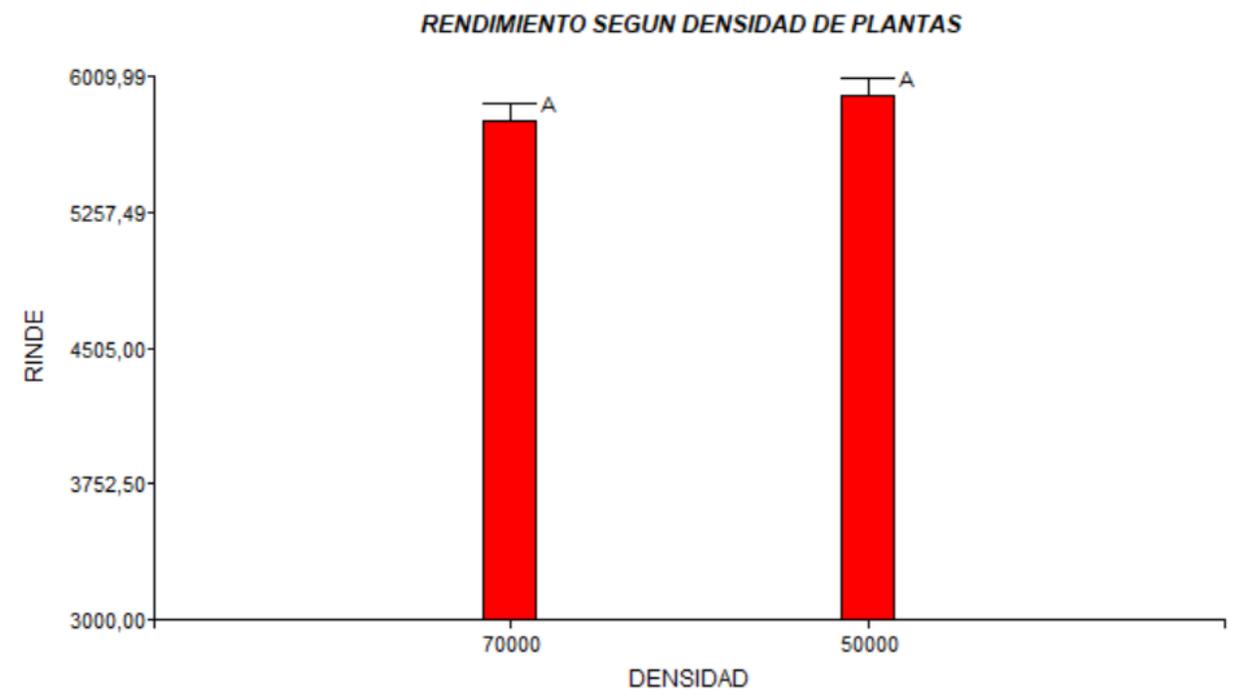


Gráfico 3. Efecto de la densidad de plantas (plantas/hectárea) en función del rendimiento (kg/ha). Comparación: letras distintas significan diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p-valor < 0,05)

No se observaron diferencias significativas en el rendimiento para las densidades de siembras de 50.000 y 70.000 plantas/hectárea. (p-valor > 0,05)

Comparación de respuesta al Numero de granos/espiga del cultivo de maíz para las densidades de población de 50.000 y 70.000 pl./ha

Se encontraron diferencias significativamente superiores para el tratamiento compuesto por 50.000 pl./ha. En la siguiente tabla se pueden observar ambos valores, cuya comparación se efectuó mediante la prueba de Tukey.

Tratamiento	numero de granos/ espiga	Comparación
50000 pl./ha	535	<u>A</u>
70000 pl./ha	451	<u>B</u>

Tabla 4. Efecto de la densidad de población de maíz sobre el número de granos (NG) por espiga.

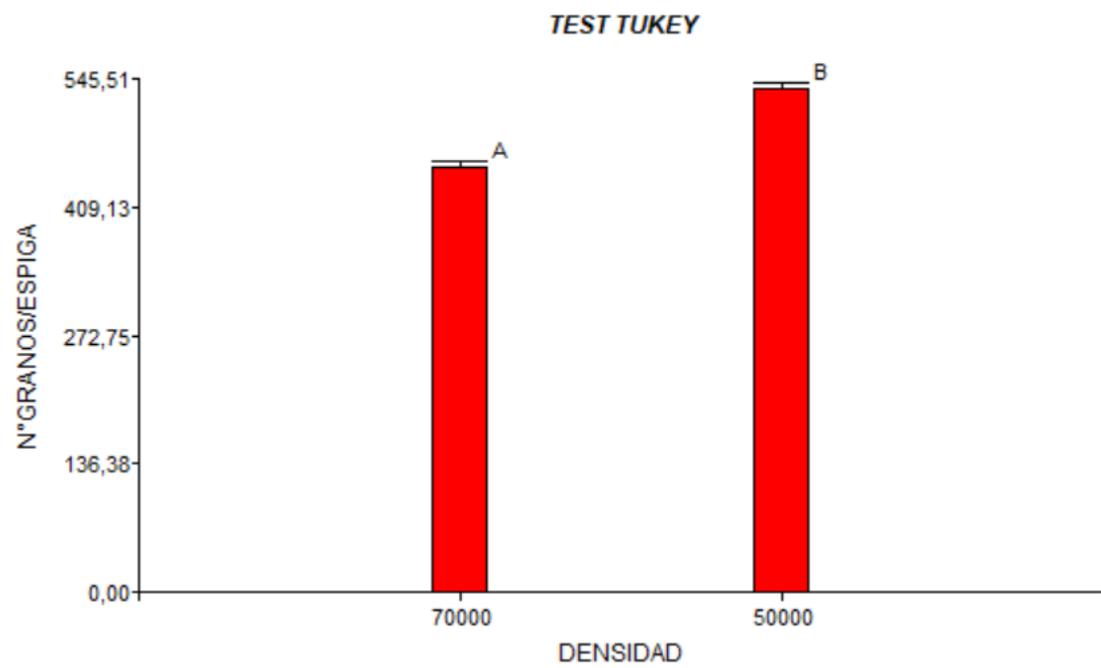


Gráfico 4. Efecto de la densidad de población sobre el número de granos por espiga. Comparación: letras distintas significan diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p -valor < 0,05).

Se puede observar que existen diferencias significativas en el número de granos por espiga entre las densidades de población ensayadas.

Comparación de respuesta al NG/espiga del cultivo de maíz para las dosis de nitrógeno de 0,40,80,120 y 160 kg/N/ha

Se puede observar que existen diferencias significativas para el NG/espiga para las diferentes dosis de nitrógeno, por lo que existe efecto debido a la dosis de nitrógeno. Se puede observar que entre los tratamientos de 0,40 y 80 kg/N/ha no existe una diferencia significativamente importante. En cambio, el tratamiento que recibió 120 kg/N/ha muestra una diferencia superior al tratamiento que no recibió dosis de nitrógeno, y levemente superior a los tratamientos que recibieron 40 y 80 kg/N/ha. Solo el tratamiento que recibió 160 kg/N/ha tuvo diferencias significativamente superiores al resto de los tratamientos, excepto al tratamiento que recibió 120 kg/N/ha. Se puede observar en la siguiente tabla:

Tratamiento	Numero de granos/espiga	Comparación
0 kg/N/ha	468	A
40 kg/N/ha	482	AB
80 kg/N/ha	479	AB
120 kg/N/ha	513	BC
160 kg/N/ha	523	C

Tabla 5. Efecto de la dosis de nitrógeno sobre el NG/espiga.

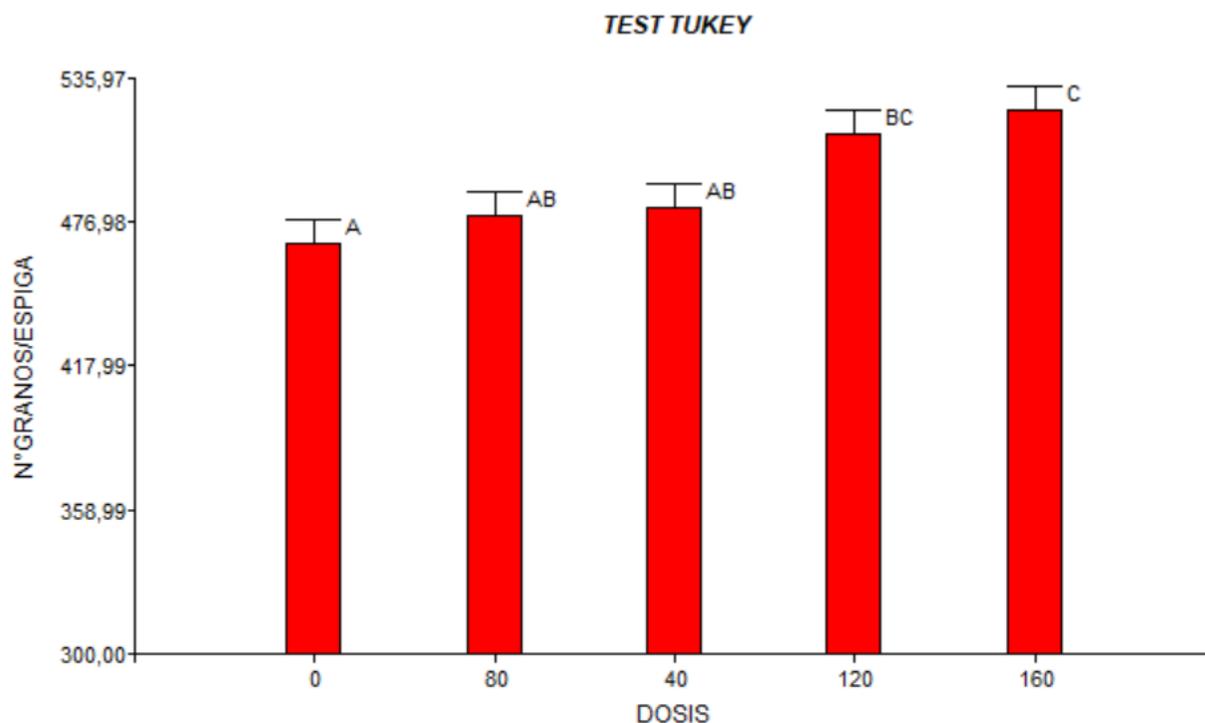


Gráfico 5. Efecto de la dosis de nitrógeno sobre en NG/espiga. Comparación: letras

distintas significan diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p -valor < 0,05).

En el siguiente grafico podemos observar el peso de mil granos para cada tratamiento, valores expresados en gramos.

TRATAMIENTO	P1000
T1	159
T2	250
T3	238
T4	231
T5	223
T6	143
T7	207
T8	182
T9	210
T10	164

Tabla 6. Peso de 1000 granos para cada tratamiento.

Discusión

Pudimos observar en nuestro ensayo que a medida que disminuía el número de plantas por hectárea, aumentaba el número de granos por espiga. También se pudo observar que el peso de 1000 granos aumentaba igualmente a medida que disminuía la densidad de siembra. También se observó un resultado similar respecto al rendimiento y densidad de siembra, ya que, un aumento en la densidad de siembra no incremento el rendimiento, y viceversa, tal como se observó en el ensayo de Cordido, 2013 (página 12). Esto último puede ocurrir debido a las características del ambiente donde se realizaron los ensayos y la disponibilidad hídrica del cultivo, ya que, en ambientes de alta productividad como el del ensayo de “Demichelis, Avoledo, Mateo, Correa, Rinaldi, 2018” (página 10), la menor densidad de siembra obtuvo rendimientos inferiores a los ensayos con densidad de población más altos.

Respecto a las dosis de nitrógeno, tal como observaron “Demichelis, Avoledo, Mateo, Correa, Rinaldi, 2018”, la dosis de nitrógeno que brinda el mayor rendimiento no es la más elevada, sino que dicha dosis llega a un máximo sobre la cual el rendimiento no aumenta. Solo hubo diferencias estadísticamente significativas respecto de los testigos que no recibieron fertilización nitrogenada.

Si comparamos nuestros resultados con los obtenidos por Fernández, 2011 (página 10), respecto de la fertilización variable nitrogenada, podemos observar también que el aumento en la dosis de nitrógeno por hectárea aumenta el rendimiento hasta llegar a una dosis máxima, sobre la cual, el rendimiento no aumenta significativamente. Por lo que, en dicho caso, aumentar la dosis nitrogenada, sería tan solo aumentar los costos.

Conclusiones

En la población de maíz de 50.000 pl./ha se pudo observar que, a medida que aumento la dosis de nitrógeno por hectárea, no aumenta el rendimiento de manera significativa. Sino que el rendimiento se mantiene sin importar la dosis de nitrógeno utilizada. Solo posee diferencias significativas con el tratamiento testigo.

En la población de maíz de 70.000 pl/ha se observó que al aumentar la dosis de nitrógeno aumentaba el rendimiento. Sin embargo, el tratamiento que recibió 40 kg/N/ha obtuvo un rendimiento similar al tratamiento al cual se le aplicaron 120 kg/N/ha, ambos obtuvieron los rendimientos máximos del ensayo. Seguidos luego, con un rendimiento menor, del tratamiento fertilizado con 80 y 160 kg/N/ha respectivamente. La diferencia pudo haberse debido a la disponibilidad hídrica al momento de llenar granos, ya que los tratados con mayor dosis de nitrógeno presentaban mayor número de granos por unidad de superficie, pero menor peso de los mismos.

Se observo que al aumentar la población de plantas por hectárea se obtiene el mismo rendimiento, por lo que, se puede concluir que en zonas que presentan limitaciones edáficas (tosca en este caso) y de posibles sequias estacionales, es conveniente seleccionar una baja densidad de plantas por hectárea para lograr estabilidad del rendimiento.

Se puede concluir también que el aumento de la dosis de nitrógeno aumenta el número de granos/espiga, por lo que, al aumentar el número de granos por unidad de superficie, debería aumentar el rendimiento. Sin embargo, al haber coincidido el llenado de granos con un periodo (Febrero 2023) de escasas precipitaciones, el peso de 1000 granos fue bajo, y por lo tanto el rendimiento por hectárea no tuvo diferencias significativas con el resto, solo con el testigo.

Otra conclusión validada es que, el aumento en la densidad de población produce una disminución en el número de granos/espiga debido al menor crecimiento individual de la planta de maíz. Sin embargo, cuando lo convertimos a granos por unidad de superficie, al aumentar la densidad de población aumenta el número de granos, por lo que debería aumentar el rendimiento. En este ensayo, con déficit hídrico en el llenado de granos, la población de 70.000 pl./ha tuvo un rendimiento levemente inferior (no significativo) a la población de 50.000 pl./ha, debido al bajo peso de 1000 granos. En años con buen balance hídrico, sin déficits, el rendimiento por hectárea seria mayor para la densidad de población más alta.

Se pudo observar que existe una interacción entre la dosis de nitrógeno y la densidad de población. Es decir, que, si quiero obtener rendimientos más elevados con altas densidades de población, en años sin déficits hídricos, va a ser necesario aumentar la dosis de nitrógeno que incorporo al sistema. Otra alternativa es el uso de densidades de siembra bajas, con híbridos prolíficos, y buena disponibilidad de nitrógeno para lograr un buen crecimiento de la planta, lograr el IAF crítico, aumentar la fijación de granos, y con ello buscar un alto rendimiento en zonas marginales.

Bibliografía

García, Correndo, Calvo, Monzon, Ciampitti, Salvagiotti, 2023, Eco fisiología y manejo del cultivo de maíz, cap. 7, paginas 181-186.

Andrade, Maddoni, Vega, 1996, Eco fisiología del cultivo de maíz, cap.9, pagina 247-252.

Martínez de la Cuesta, Yakoub, Maresma, Santiveri y Lloveras. 2015. “La fertilización nitrogenada del maíz y el nitrógeno residual del suelo”. Universidad de Lleida.

Fernando O. García - INPOFOS/PPI/PPIC Cono Sur, “Criterios para el manejo de la fertilización del cultivo de Maíz”.

Zambrano, Cartagena, Carrillo, Sangoquiza, Durango, Parra, Campaña, 2021, “Deficiencias nutricionales en maíz”

Ing. Agr. Facundo Fernández, Proyecto OPTIMUS, 2012, “Evaluación de la respuesta por zona de manejo a la fertilización nitrogenada variable en el cultivo de Maíz (Zea mays L.)”.

Eyhérbide, 2012, “Bases para el manejo del cultivo de maíz”.

Sosa-Rodríguez, Breno Augusto; García-Vivas, Yuly Samanta, 2018, “Eficiencia de uso del nitrógeno en maíz fertilizado de forma orgánica y mineral”.

Maddoni, Parco y Rotili, 2021, “Manejo de la estructura del cultivo de maíz en ambientes marginales de la Argentina”.

Ing. Agr. Sellart, 2015, “Evaluación de la respuesta a la fertilización variable nitrogenada en maíz en el norte de la provincia de Buenos Aires”.

INTA y UNLP, 2004, “Inventario integrado de los recursos naturales de la provincia de La Pampa”.

FAO, 1993, “El maíz en la nutrición humana”, capítulo 1.

Vilella & Vigneau, 2023, Congreso Maizar “Cocreando la bioeconomía”.

Noticias ONU, 2022, informe “Perspectivas de la Población Mundial”. USDA, 2023, Informe mensual Mayo.

Dr. Fred Below, 2012, The Seven Wonders of the Corn Yield World, Universidad de Illinois.

Stangel, 1984, “The use of nitrogen fertiliser in agriculture. Where do we go practically and ecologically?”

Corró Molas A, Ghironi E. 2012. Avances de la agricultura por ambientes en la región semiárida pampeana, INTA Argentina.

Cordido Lucas, 2013, Trabajo Final de Graduación; universidad Católica Argentina, 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.

ANEXO 1

RENDIMIENTO SEGÚN DENSIDAD DE POBLACION Y FERTILIZACION NITROGENADA

Medidas resumen

DENSIDAD	DOSIS	Variable	n	Media	D.E.	Var(n-1)	CV	Min	Máx	Q1	Q3
50000	0	RINDE	29	4223,97	266,98	71278,46	6,32	3784,00	4706,00	4062,00	4365,00
50000	40	RINDE	29	6474,14	668,84	447342,98	10,33	5400,00	8000,00	6000,00	6825,00
50000	80	RINDE	30	6258,67	746,26	556898,37	11,92	4998,00	7426,00	5569,00	6831,00
50000	120	RINDE	30	6306,40	773,61	598465,01	12,27	4851,00	7762,00	5660,00	6953,00
50000	160	RINDE	30	6194,27	748,81	560715,31	12,09	5084,00	7493,00	5620,00	6958,00
70000	0	RINDE	29	4015,79	393,20	154603,38	9,79	3433,00	4765,00	3744,00	4224,00
70000	40	RINDE	30	6505,13	909,96	828028,33	13,99	4869,00	8520,00	5912,00	7100,00
70000	80	RINDE	30	5514,03	871,55	759598,59	15,81	3669,00	7338,00	4994,00	6064,00
70000	120	RINDE	30	7063,80	1115,94	1245325,61	15,80	4763,00	10114,00	6350,00	7615,00
70000	160	RINDE	30	5631,37	785,13	616436,31	13,94	4179,00	7164,00	4982,00	6245,00

ANALISIS DE LA VARIANZA

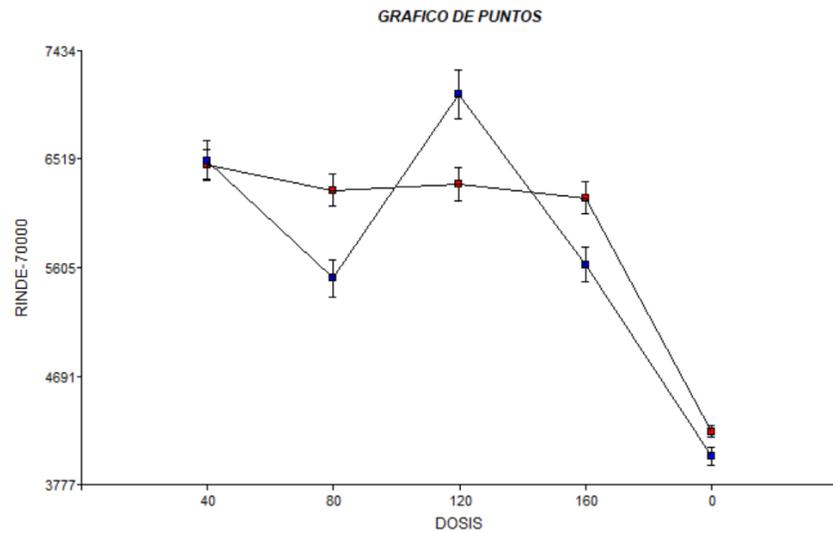
Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
RINDE	297	0,56	0,55	13,84

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	241361731,28	5	48272346,26	74,17	<0,0001
DENSIDAD	1574913,88	1	1574913,88	2,42	0,1209
DOSIS	239881812,81	4	59970453,20	92,14	<0,0001
Error	189391323,69	291	650829,29		
Total	430753054,97	296			

PARALELISMO

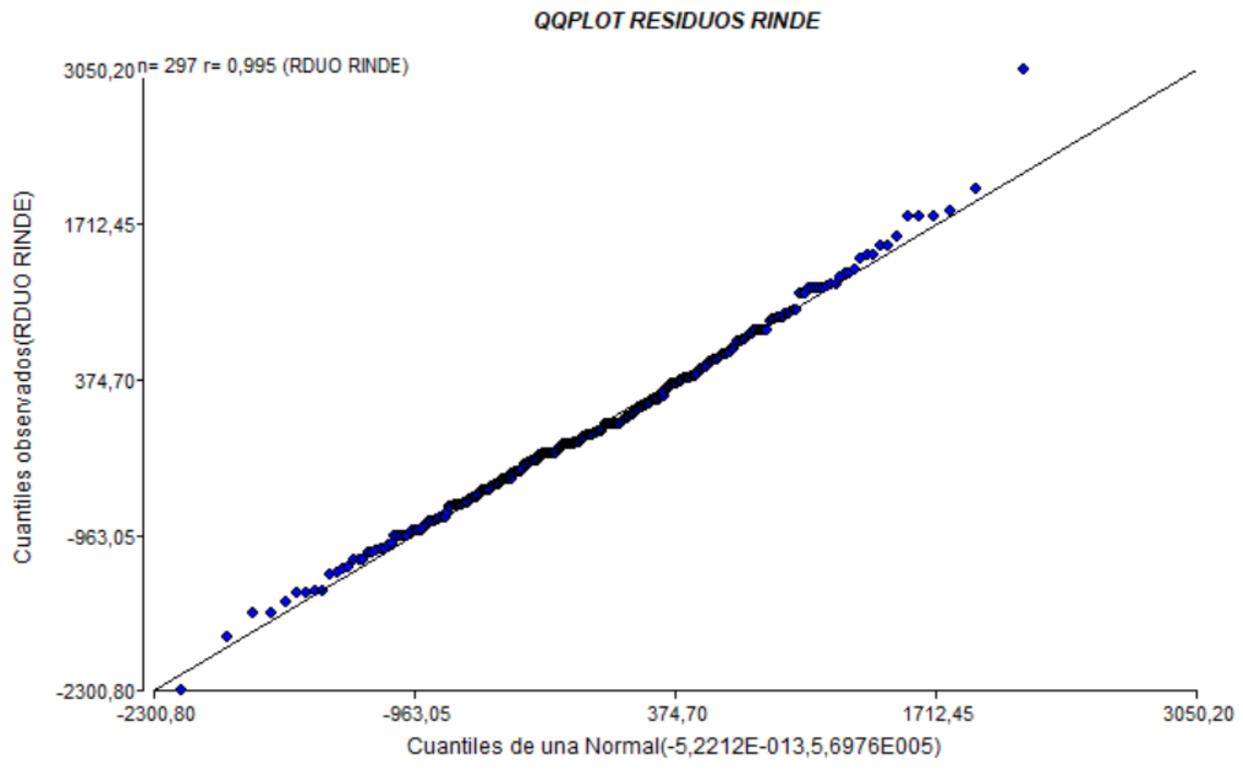


Los tratamientos no parecen comportarse de manera paralela, por lo que demuestra que existe interacción entre densidad de población y dosis de nitrógeno.

SUPUESTOS DE ANOVA DE 2 FACTORES DEL DISEÑO FACTORIAL

Supuesto de Normalidad

QQPLOT



H0= Los residuos se ajustan a una distribución normal.

H1= Los residuos no se ajustan a una distribución normal.

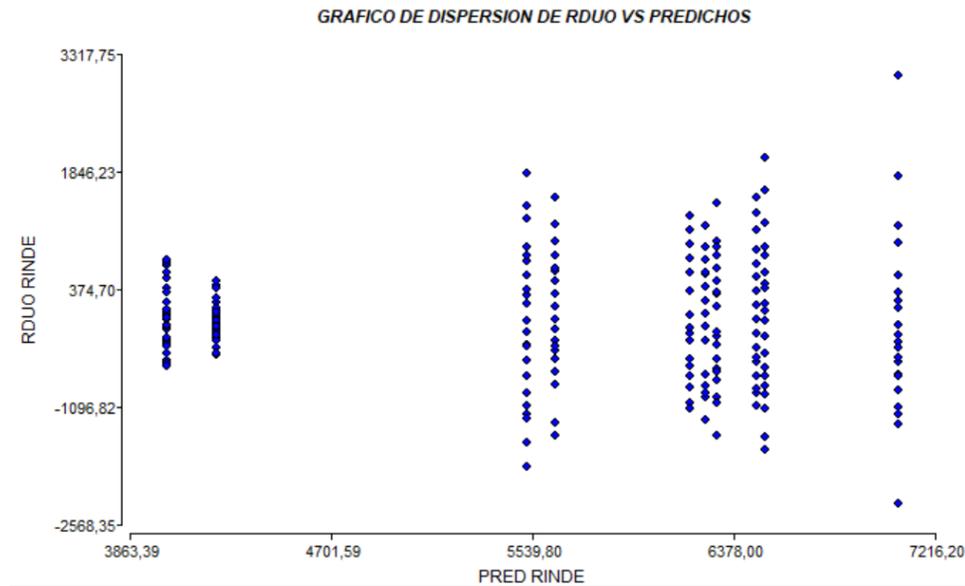
Shapiro-Wilks (modificado)

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
RDUO RINDE	297	0,00	754,82	0,99	0,9056

Como el valor-p (0,9056) es mayor al nivel de significación (0,05) no rechazo la H0. Por lo tanto, existen evidencias que los residuos se ajustan a una distribución normal.

Supuesto de Homocedasticidad

GRAFICO DE DISPERSION



PRUEBA DE LEVENNE

H0= las varianzas de los distintos tratamientos son iguales. $\sigma^2_1 = \sigma^2_2 = \dots = \sigma^2_i$

H1= la varianza de alguno de los tratamientos difiere del resto. $\sigma^2_i \neq \sigma^2$

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
RABS RINDE	297	0,14	0,11	76,66

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	9206953,37	9	1022994,82	5,08	<0,0001
DOSIS	8164956,15	4	2041239,04	10,15	<0,0001
DENSIDAD	746781,89	1	746781,89	3,71	0,0550
DOSIS*DENSIDAD	293356,78	4	73339,19	0,36	0,8338
Error	57745582,26	287	201204,12		
Total	66952535,64	296			

Como el valor-p (0,8338) de dosis*densidad es mayor al nivel de significación (0,05), no rechazo H0. No existen evidencias significativas de que las varianzas de alguno de los tratamientos difieran del resto. No hay evidencias que exista heterocedasticidad.

RESULTADOS DE ANOVA DE 2 FACTORES DEL DISEÑO FACTORIAL

H₀= LA DENSIDAD DE POBLACION NO PRODUCE EFECTO SOBRE EL RENDIMIENTO. $\alpha_i = 0$

H₀= LA DOSIS DE NITROGENO NO PRODUCE EFECTO SOBRE EL RENDIMIENTO. $\beta_j = 0$

H₀= NO EXISTE INTERACCION ENTRE LA DENSIDAD DE POBLACION Y LA DOSIS DE NITROGENO. $\gamma_{ij} = 0$

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
RINDE	297	0,61	0,60	13,15

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	262104201,86	9	29122689,10	49,56	<0,0001
DENSIDAD	1570692,47	1	1570692,47	2,67	0,1032
DOSIS	239758883,03	4	59939720,76	102,00	<0,0001
DENSIDAD*DOSIS	20742470,59	4	5185617,65	8,82	<0,0001
Error	168648853,11	287	587626,67		
Total	430753054,97	296			

- Como el p-valor de la interacción densidad*dosis es menor a 0,05 rechazo H₀. Existen evidencias significativas de que existe interacción entre densidad de población y dosis de nitrógeno, por lo tanto, el efecto de la dosis de nitrógeno depende de la densidad de población.
- Como el p-valor (0,1032) de la densidad de población es mayor a 0,05, no rechazo H₀. No existen evidencias significativas que demuestren que la densidad de población tenga un efecto sobre el rendimiento.
- Como el p-valor de la dosis de nitrógeno es menor a 0,05, rechazo H₀. Existen evidencias significativas de que la dosis de nitrógeno produce un efecto sobre el rendimiento.

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=174,57379

Error: 587626,6659 gl: 287

DENSIDAD	Medias	n	E.E.	
70000	5746,03	149	62,81	A
50000	5891,49	148	63,02	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

1- Comparación del efecto de las densidades de población sobre el rendimiento.

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=384,42705

Error: 587626,6659 gl: 287

DOSIS	Medias	n	E.E.	
0	4119,88	58	100,66	A
80	5886,35	60	98,96	B
160	5912,82	60	98,96	B
40	6489,64	59	99,81	C
120	6685,10	60	98,96	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

2- Comparación de los efectos de las dosis de nitrógeno sobre el rendimiento.

ANEXO 2

El modelo utilizado es Diseño experimental de 1 factor

NUMERO DE GRANOS/ESPIGA SEGÚN DENSIDAD DE SIEMBRA

Medidas resumen

DENSIDAD	Variable	n	Media	D.E.	CV	Mín	Máx	Q1	Q3
50000	NºGRANOS/ESPIGA	148	535,66	59,28	11,07	420,00	672,00	492,00	576,00
70000	NºGRANOS/ESPIGA	149	451,81	71,12	15,74	288,00	688,00	401,00	490,00

ANÁLISIS DE LA VARIANZA

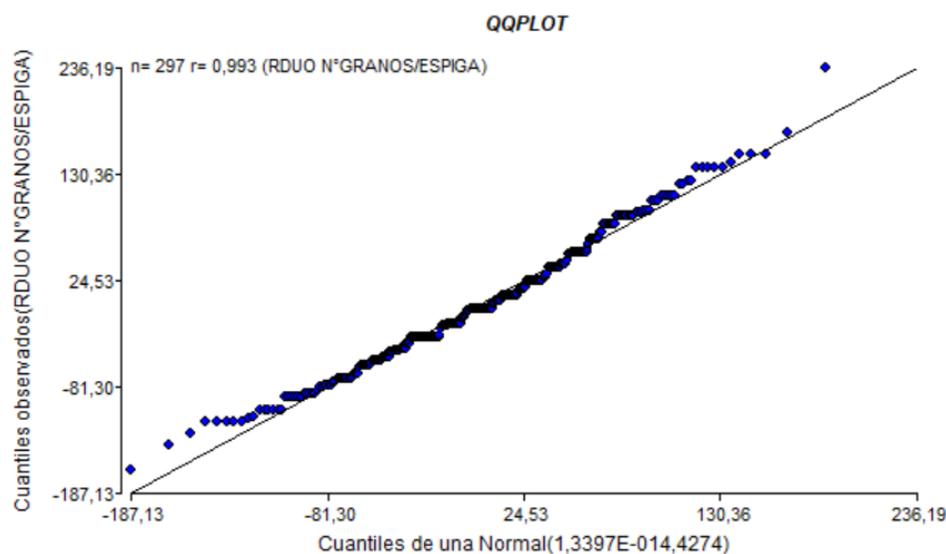
Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
NºGRANOS/ESPIGA	297	0,29	0,29	13,27

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	522117,24	1	522117,24	121,75	<0,0001
DENSIDAD	522117,24	1	522117,24	121,75	<0,0001
Error	1265096,46	295	4288,46		
Total	1787213,70	296			

SUPUESTO DE NORMALIDAD



H0= Los residuos se ajustan a una distribución normal.

H1= Los residuos no se ajustan a una distribución normal.

Shapiro-Wilks (modificado)

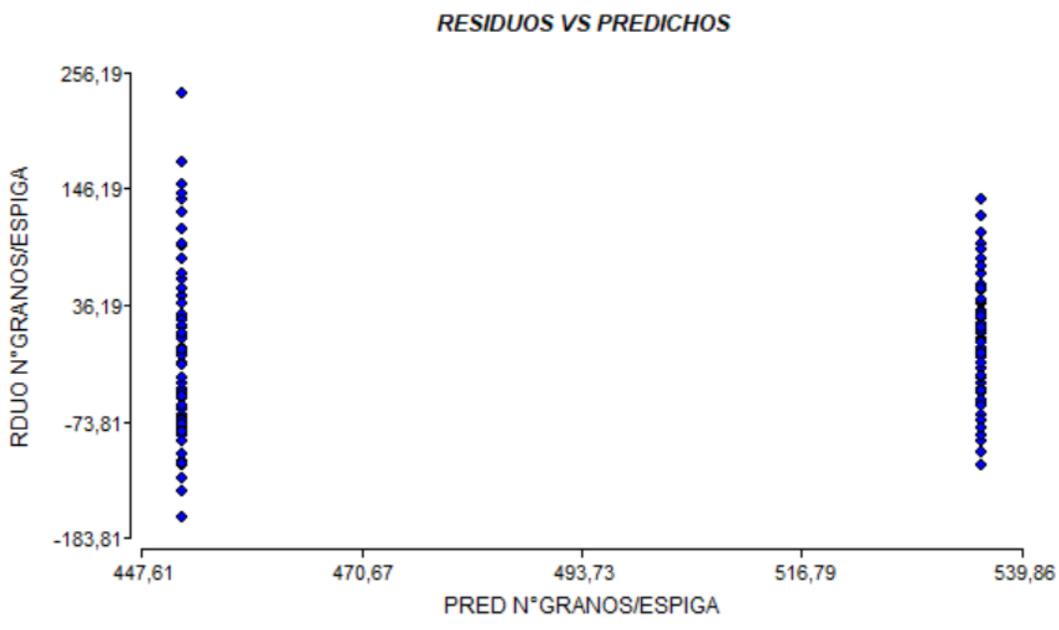
Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
RDUO N°GRANOS/ESPIGA	297	0,00	65,38	0,98	0,0400

Para la prueba se utilizo un nivel de significación de 0,01 (α).

Como el valor-p es mayor a 0,01, no rechazo H_0 . Por lo tanto, la variable presenta un buen ajuste a una distribución normal.

SUPUESTO DE HOMOCEASTICIDAD

DIAGRAMA DE DISPERSION:



PRUEBA DE LEVENNE

H_0 = las varianzas de los distintos tratamientos son iguales. $\sigma^2_1 = \sigma^2_2 = \sigma^2_i$

H_1 = la varianza de alguno de los tratamientos difiere del resto. $\sigma^2_i \neq \sigma^2$

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
RABS N°GRANOS/ESPIGA	297	0,01	4,6E-03	76,54

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	3737,05	1	3737,05	2,38	0,1243
DENSIDAD	3737,05	1	3737,05	2,38	0,1243
Error	463963,90	295	1572,76		
Total	467700,95	296			

Como el p-valor es mayor a 0,01, no rechazo H0. No existen evidencias que las varianzas de los tratamientos no sean iguales, o de que existe heterocedasticidad.

Resultado de ANOVA de 1 factor para número de granos/espiga según densidad de población

H0= LA DENSIDAD DE POBLACION NO PRODUCE EFECTO SOBRE EL NUMERO DE GRANOS/ESPIGA. $\alpha_i = 0$

H1= LA DENSIDAD DE POBLACION PRODUCE UN EFECTO SIGNIFICATIVO SOBRE EL NUMERO DE GRANOS/ESPIGA.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
N°GRANOS/ESPIGA	297	0,29	0,29	13,27

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	522117,24	1	522117,24	121,75	<0,0001
DENSIDAD	522117,24	1	522117,24	121,75	<0,0001
Error	1265096,46	295	4288,46		
Total	1787213,70	296			

- Como el valor-p es menor a 0,01, rechazo H0. Por lo tanto, existen evidencias que muestran que la densidad de población produce un efecto significativo sobre el numero de granos por espiga.

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=14,91348

Error: 4288,4626 gl: 295

DENSIDAD	Medias	n	E.E.
70000	451,81	149	5,36 A
50000	535,66	148	5,38 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

ANEXO 3

El modelo estadístico utilizado es Diseño experimental de 1 factor.

NUMERO DE GRANOS/ESPIGA SEGÚN DOSIS DE NITROGENO

Medidas resumen

DOSIS	Variable	n	Media	D.E.	CV	Mín	Máx	Q1	Q3
0	NºGRANOS/ESPIGA	58	468,43	74,97	16,00	339,00	591,00	401,00	532,00
40	NºGRANOS/ESPIGA	59	482,85	67,56	13,99	336,00	640,00	448,00	532,00
80	NºGRANOS/ESPIGA	60	479,37	80,24	16,74	288,00	624,00	432,00	532,00
120	NºGRANOS/ESPIGA	60	513,27	78,28	15,25	324,00	688,00	462,00	574,00
160	NºGRANOS/ESPIGA	60	523,03	74,77	14,30	364,00	672,00	468,00	560,00

ANALISIS DE LA VARIANZA

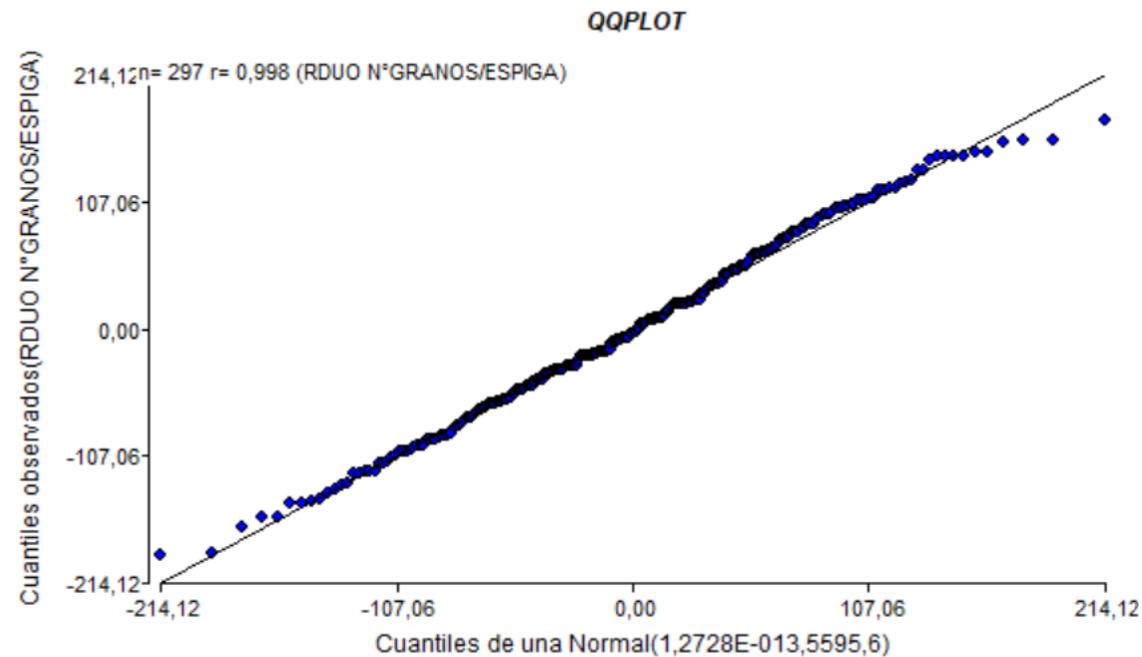
Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
NºGRANOS/ESPIGA	297	0,07	0,06	15,26

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	130904,25	4	32726,06	5,77	0,0002
DOSIS	130904,25	4	32726,06	5,77	0,0002
Error	1656309,45	292	5672,29		
Total	1787213,70	296			

SUPUESTO DE NORMALIDAD



PRUEBA DE SHAPIRO WILKS

H0= Los residuos se ajustan a una distribución normal.

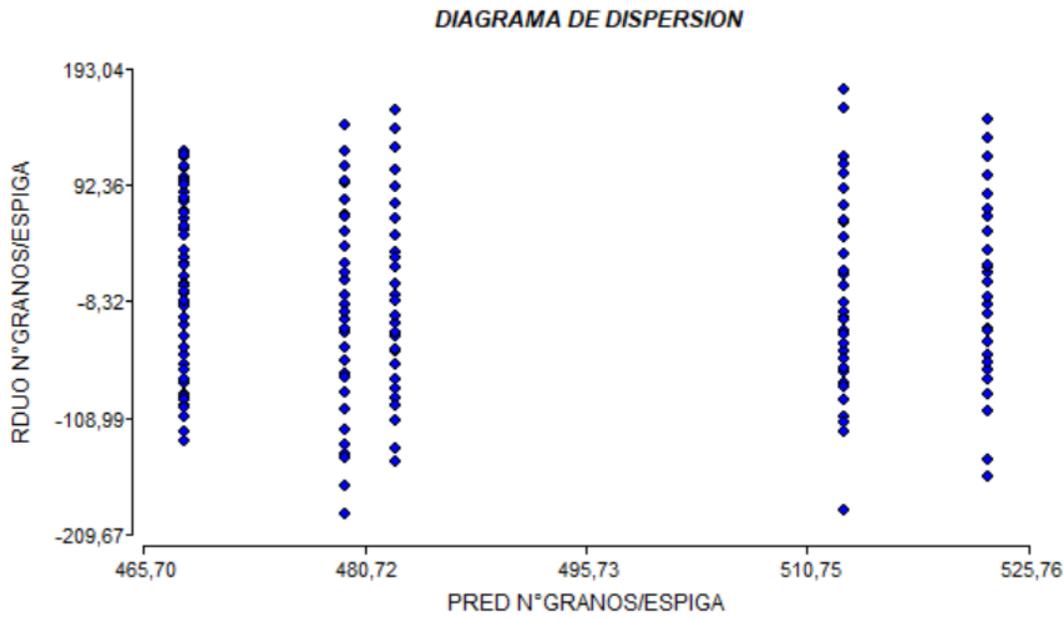
H1= Los residuos no se ajustan a una distribución normal.

Shapiro-Wilks (modificado)

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
RDUO N°GRANOS/ESPIGA	297	0,00	74,80	0,98	0,0529

Nivel de significación utilizado 0,05. Como el valor-p es mayor a 0,05, no rechazo H0. Por lo tanto, los residuos se ajustan a una distribución normal.

SUPUESTO DE HOMOCEASTICIDAD



PRUEBA DE LEVENNE

H0= las varianzas de los distintos tratamientos son iguales. $\sigma^2_1 = \sigma^2_2 = \sigma^2_3$

H1= la varianza de alguno de los tratamientos difiere del resto. $\sigma^2_1 \neq \sigma^2_2$

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
RABS N°GRANOS/ESPIGA	297	0,01	0,00	71,52

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	6360,21	4	1590,05	0,84	0,5001
DOSIS	6360,21	4	1590,05	0,84	0,5001
Error	552134,12	292	1890,87		
Total	558494,33	296			

Como el valor-p es mayor a 0,05, no rechazo H0. No existen evidencias significativas de que exista heterocedastidad. Las varianzas de los tratamientos son iguales.

Resultado de ANOVA de 1 factor para número de granos/espiga según dosis de nitrógeno

H0= LA DOSIS DE NITROGENO NO PRODUCE EFECTO SOBRE EL NUMERO DE GRANOS/ESPIGA. $\alpha_i = 0$

H1= LA DOSIS DE NITROGENO PRODUCE UN EFECTO SIGNIFICATIVO SOBRE EL NUMERO DE GRANOS/ESPIGA.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
N°GRANOS/ESPIGA	297	0,07	0,06	15,26

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	130904,25	4	32726,06	5,77	0,0002
DOSIS	130904,25	4	32726,06	5,77	0,0002
Error	1656309,45	292	5672,29		
Total	1787213,70	296			

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=37,76961

Error: 5672,2926 gl: 292

DOSIS	Medias	n	E.E.	
0	468,43	58	9,89	A
80	479,37	60	9,72	A B
40	482,85	59	9,81	A B
120	513,27	60	9,72	B C
160	523,03	60	9,72	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

- Como el p-valor es menor a 0,05, rechazo H0, por lo que existen evidencias que demuestran que la dosis de nitrógeno produce un efecto significativo sobre el número de granos.

ANEXO 4
IMÁGENES

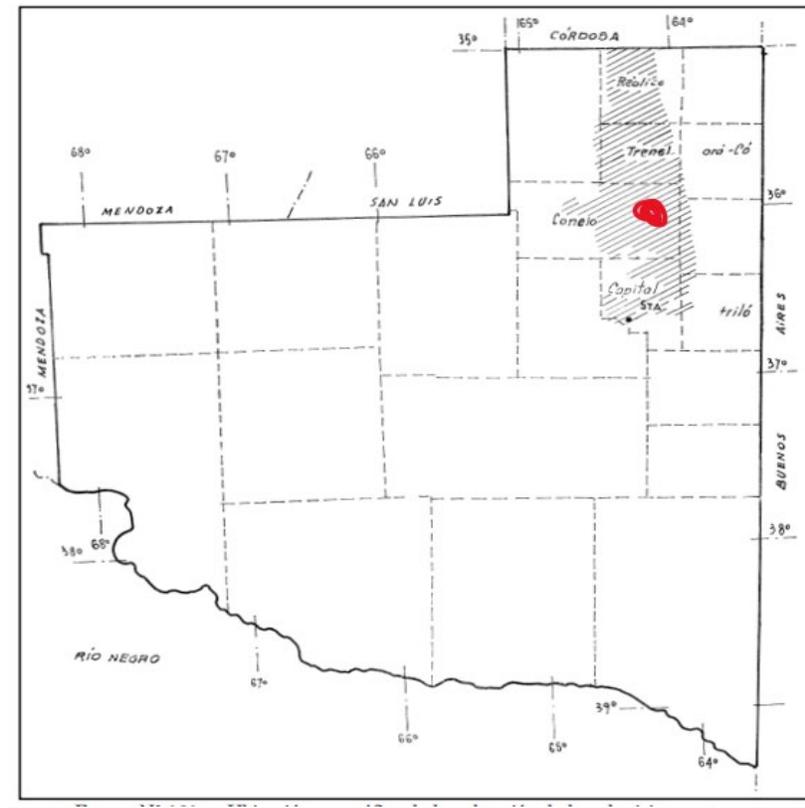


Imagen 1: la zona rayada representa la planicie con tosca en la provincia de La Pampa, la zona coloreada de rojo representa el sitio donde se realizó el ensayo.

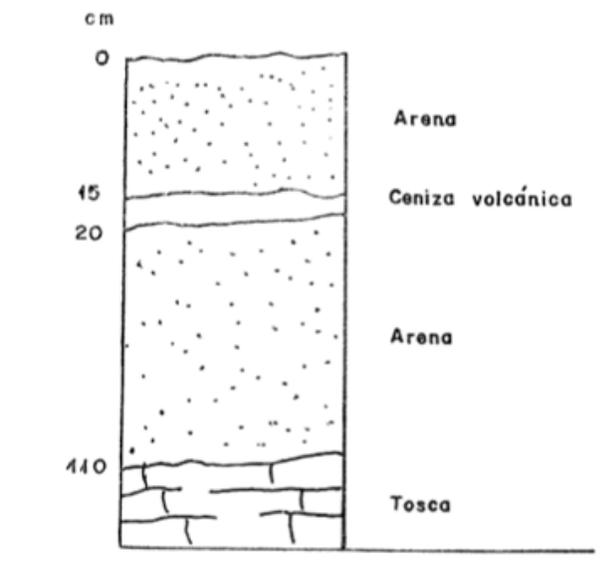


Imagen 2. Representa el perfil típico observado en las planicies con tosca.

DATOS ANALÍTICOS DEL PERFIL N° 423C - "QUEMÚ QUEMÚ"

HORIZONTE	Ap	A12	AC	Tosca
Profundidad de la muestra, en cm.	3-12	20-30	40-60	
Materia orgánica, %	1,81	1,26	0,77	—
Carbono orgánico, %	1,05	0,75	0,45	—
Nitrógeno total, %	0,094	0,083	0,063	—
Relación C/N	11	9	7	—
Arcilla, 2 µ, %	12,79	13,73	12,02	—
Limo, 2-50 µ, %	29,15	28,54	27,34	—
Arena muy fina, 50-74 µ, %	11,86	12,36	12,42	—
Arena muy fina, 74-100 µ,%	22,75	22,23	22,68	—
Arena fina, 100-250 µ, %	19,84	19,59	21,62	—
Arena media, 250-500 µ, %	2,84	2,75	3,11	—
Arena gruesa, 500-1.000 µ, %	0,62	0,61	0,61	—
Arena muy gruesa, 1-2 mm, %	0,15	0,09	0,20	—
Calcáreo, CaCO ₃ , %	0	0	0	—
Equivalente de humedad, %	10,04	16,21	15,81	—
pH en pasta	6,4	6,6	6,8	—
pH en agua, 1:2,5	7	7	7,5	—
Conductividad (mmhos/cm)	—	—	—	—
Cationes de cambio, m.e./100 g:				
Ca ⁺⁺	7,65	8,67	11,73	—
Mg ⁺⁺	3,84	3,32	3,76	—
Na ⁺	0,45	0,53	0,57	—
K ⁺	2,29	2,35	0,97	—
H ⁺	2,04	1,84	0,82	—
Suma de bases, m.e./100 g (S)	14,23	14,87	17,03	—
Capacidad de intercambio de cationes, m.e./100 g (T)	14,08	15,50	15,71	—
Saturación con bases, % (S/T)	100	96	100	—

Tabla 1. Serie de suelo "Quemu Quemu", serie a la cual pertenece el sitio experimental.



Imagen 3. Momento de división de parcelas para aplicar tratamientos y fertilización con UREA, en estado V4 del maíz. Fecha: 23/12/2023.

T10. 160 kg/N/ha. 70.000 Pl./ha		T5. 160 kg/N/ha 50.000 Pl./ha	
T8. 80 kg/N/ha. 70.000 Pl./ha	T9. 120 kg/N/ha 70.000 Pl./ha	T3. 80 kg/N/ha 50.000 pl./ha	T4. 120 kg/N/ha 50.000 pl./ha
T6. TESTIGO SIN FERTILIZAR. 70.000 Pl./ha	T7. 40 kg/N/ha 70.000 Pl./ha	T1. TESTIGO SIN FERTILIZAR. 50.000 pl./ha	T2. 40 kg/N/ha 50.000 pl./ha

Tabla 2. Disposición de tratamientos en el lote. Parte superior orientación Sur, parte inferior orientación Norte. Tamaño parcelas 3,12 mts ancho (6 surcos) por 40 metros largo.



Imagen 4. Tratamiento T2 al momento de la cosecha. Fecha: 20/05/2023