

**RESPUESTA EN RENDIMIENTO A DISTINTAS DOSIS Y FUENTES DE
NITRÓGENO EN MAÍZ TARDÍO**

Lucas José Pfeifauf

Trabajo de tesis para ser presentado como requisito parcial para optar al título de
INGENIERO AGRÓNOMO

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
UNIVERSIDAD NACIONAL DE MAR DEL PLATA**

Balcarce, Argentina

Abril de 2024

**RESPUESTA EN RENDIMIENTO A DISTINTAS DOSIS Y FUENTES DE
NITRÓGENO EN MAÍZ TARDÍO**

Lucas José Pfeifauf

Comité consejero:

.....
Ing. Agr. (Dr.) Cecilia Crespo
Directora de Tesis

.....
Ing. Agr. (Dr.) Pablo Barbieri
Asesor

.....
Ing. Agr. Florencia Accame
Asesora

**RESPUESTA EN RENDIMIENTO A DISTINTAS DOSIS Y FUENTES DE
NITRÓGENO EN MAÍZ TARDÍO**

Lucas José Pfeifauf

Aprobado por:

.....
Ing. Agr. (Dr.) Cecilia Crespo
Directora de Tesis

.....
Ing. Agr. (Dr.) Pablo Barbieri
Asesor

.....
Ing. Agr. Florencia Accame
Asesora

.....
Ing. Agr. (Dr.) Lucas Bonelli
Revisor

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo va dedicado a mi familia y amigos que estuvieron presentes durante todo mi recorrido por la facultad, pero especialmente a Agustina Tordó que fue un pilar fundamental. Además, quiero agradecer a Cecilia Crespo, Pablo Barbieri, Florencia Accame y a la red de maíz del sur de la provincia de Buenos Aires de AAPRESID por darme la oportunidad de llevar adelante este trabajo.

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
RESUMEN.....	viii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MATERIALES Y MÉTODOS	6
2.1. Sitio experimental	6
2.2. Descripción de los ensayos y manejo del cultivo	6
2.3. Determinaciones analíticas en muestras de suelo	7
2.4. Determinaciones en maíz	7
2.4.1. Índice de verdor:	7
2.4.2. Rendimiento en grano:	8
2.4.3. Peso de mil granos:	8
2.5. Análisis estadístico	9
2.6. Caracterización climática	9
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	10
3.1. Características meteorológicas de la campaña.....	10
3.2. Características edáficas de los sitios experimentales	12
3.3. Índice de suficiencia de nitrógeno (ISN).....	12
3.3.1. Respuesta a la fertilización con N.....	12
3.3.2. Efecto de la fuente y dosis de N	15
3.4. Rendimiento en grano	15
3.4.1. Respuesta a la fertilización con N.....	15
3.4.2. Efecto de la fuente y dosis de N	16
3.5. Componentes de rendimiento	18
3.5.1. Respuesta a la fertilización con N.....	18
3.5.2. Efecto de la fuente y dosis de N	19
3.6. Nitrógeno en grano	20
3.6.1. Respuesta a la fertilización con N.....	20
3.6.2. Efecto de la fuente y dosis de N	20
3.7. Comentarios finales	20
4. CONCLUSIONES.....	22
5. BIBLIOGRAFÍA.....	23

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Fecha de siembra, híbrido utilizado y densidad de siembra en los tres sitios del experimento.....	7
Tabla 2. Caracterización del suelo a la siembra de maíz para los tres sitios bajo estudio. 12	12
Tabla 3: Índice de suficiencia de nitrógeno (ISN), rendimiento en grano, N en grano, peso de mil granos (PMG) y número de granos (Nro granos) para distintas dosis de N en Fulton, Lobería y Madariaga. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre dosis de N, según el test de mínima diferencia significativa ($p < 0.05$). Los valores entre paréntesis indican error estándar de la media. El valor por debajo de las letras indica el p valor para cada parámetro y sitio.....	14
Tabla 4. Índice de suficiencia de nitrógeno (ISN) para distintas fuentes (Urea y CAN). Letras mayúsculas diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre las fuentes de N, según el test de mínima diferencia significativa ($p < 0.05$). Los valores entre paréntesis indican error estándar de la media.	15
Tabla 5. Rendimiento en grano de maíz para distintas fuentes de N (Urea y CAN) y para distintas dosis de N (30,60,90). Letras minúsculas diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre la dosis de N, y letras mayúsculas diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre las fuentes de N, según el test de mínima diferencia significativa ($p < 0.05$). Los valores entre paréntesis indican error estándar de la media.	17
Tabla 6. Número de granos de maíz para distintas dosis de N (30,60,90). Letras minúsculas diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre la dosis de N, según el test de mínima diferencia significativa ($p < 0.05$). Los valores entre paréntesis indican error estándar de la media.	19
Tabla 7. Nitrógeno en grano de maíz para distintas fuentes de N (Urea y CAN). Los valores entre paréntesis indican error estándar de la media.	20

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de los sitios donde se llevaron a cabo los ensayos.....	6
Figura 2. Descripción de los tratamientos y planteo realizado en cada sitio.	7
Figura 3. Temperatura media mensual del aire del periodo noviembre 2021 a abril 2022 y temperatura media mensual histórica del periodo 1990-2020.	10
Figura 4. Precipitaciones (Pptaciones), evapotranspiración real (ETR) y déficit hídrico decádico durante el ciclo del cultivo de maíz para Fulton, Lobería y Madariaga.	11
Figura 5. Relación entre el rendimiento relativo y la disponibilidad de nitrógeno ($N-NO_3^-$ a la siembra y N del fertilizante) para los tres sitios.	18
Figura 6. Relación entre el rendimiento relativo y el Índice de suficiencia de nitrógeno (ISN) para los tres sitios.....	21

RESUMEN

El avance del maíz tardío en ambientes del sur de Buenos Aires y la alta probabilidad de obtener respuesta al agregado de fertilizantes nitrogenados, hacen que la fertilización con nitrógeno (N) sea una práctica necesaria para maximizar los rendimientos. Actualmente existe poca información sobre la respuesta a la fertilización nitrogenada en el Sudeste Bonaerense para el cultivo de maíz de siembras tardías. Por este motivo, se realizaron experimentos con los siguientes objetivos: 1) evaluar el efecto de dos fuentes y distintas dosis de N en el estatus nitrogenado de maíz tardío; 2) evaluar el efecto de dos fuentes y distintas dosis de N en el rendimiento en grano de maíz tardío; y 3) evaluar el efecto de dos fuentes y distintas dosis de N en componentes de rendimiento de maíz tardío. Durante la campaña 2021/22 se llevaron a cabo ensayos en Fulton, Lobería y Madariaga. En cada sitio, se evaluaron dos fuentes de N: CAN (27-0-0) y UREA (46-0-0); y cuatro dosis de N: 0, 30, 60, y 90 kg N ha⁻¹. En el cultivo de maíz se midió el índice de verdor en el estadio R1, rendimiento en grano a madurez fisiológica, N en grano, número de granos y peso de mil granos (PMG). En el ciclo del cultivo de maíz se observó que en los tres sitios hubo un déficit hídrico, siendo este más marcado en Lobería. Se observaron diferencias significativas en el índice de suficiencia de nitrógeno (ISN) en respuesta a la fertilización únicamente en Fulton. El testigo presentó menor ISN, y las dosis de 60 y 90 kg N ha⁻¹ presentaron los mayores valores de ISN. En Fulton y Lobería hubo efecto de la fuente sobre el ISN, siendo mayor cuando se aplicó CAN. El rendimiento en grano promedio del cultivo de maíz para las tres localidades estuvo en un rango entre 5231 y 13667 kg ha⁻¹. Se observaron diferencias significativas de rendimiento en función de la fertilización en las localidades de Lobería y Madariaga. En Lobería, el rendimiento fue menor en tratamientos con dosis altas de N, mientras que, en Madariaga, se determinó una respuesta positiva a 30 kg N ha⁻¹. No se determinó interacción entre la dosis y la fuente de N aplicada en ninguno de los tres sitios para rendimiento en grano. En la localidad de Fulton, hubo efecto de la fuente, siendo 9% mayor el rendimiento cuando se aplicó CAN. En la localidad de Madariaga, si bien no fue significativo el efecto de la fuente, se observó la misma tendencia que en Fulton. Dentro de los componentes de rendimiento, el PMG mostro respuesta a la dosis de 30 kg ha⁻¹ en Fulton, y no varió entre dosis y fuentes en los otros sitios. Por el contrario, tanto en Lobería como en Madariaga, el número de granos se vio afectado de manera similar al rendimiento por la fertilización nitrogenada. Los resultados de esta tesis permiten concluir que, para las condiciones bajo estudio, las fuentes mostraron

comportamientos similares, y la respuesta a la fertilización nitrogenada fue limitada por las condiciones ambientales de cada sitio.

PALABRAS CLAVE: nutrición nitrogenada, fertilizantes, índice de suficiencia de nitrógeno.

1. INTRODUCCIÓN

El cultivo de maíz (*Zea mays* L.) es el segundo cultivo de granos en superficie sembrada en los sistemas productivos de la Argentina, siendo la misma 10.670.126 ha (MAGyP, 2023) para el ciclo 2021/22. El sistema de producción de maíz puede clasificarse en el tradicional, que usualmente se denomina “Maíz temprano”, donde el cultivo se siembra a inicio de primavera, y en el sistema usualmente denominado “Maíz tardío” en el que el cultivo se siembra a fin de primavera-inicio de verano. En la campaña 2021/22 se ha registrado una superficie sembrada de maíz tardío de 6,48 Millones de ha, siendo 5 veces mayor que hace 10 años atrás (BCR, 2022).

La elección de la fecha de siembra del cultivo es una de las prácticas de manejo con mayor impacto sobre el rendimiento y su estabilidad, siendo el objetivo de la siembra tardía de maíz mejorar la estabilidad del rendimiento, ubicando la floración del cultivo en períodos con mayor probabilidad de ocurrencia de balance hídrico favorable. En ambientes de mayor restricción hídrica, ya sea debido a las escasas precipitaciones y/o a la baja capacidad de almacenaje de los suelos (presencia de tosca), como es el caso del sudeste bonaerense (SEB), la utilización de fechas de siembra tardías permitió mejorar la estabilidad del rendimiento de maíz y así favorecer el incremento de la superficie sembrada con este cultivo (Bonelli *et al.*, 2016). En dicho cultivo, la duración del período crítico para el establecimiento de granos no es sensible a la duración del día (Birch *et al.*, 1998), por lo tanto, un retraso en la fecha de siembra no modificaría la duración del período crítico. A su vez, en el SEB las bajas temperaturas durante la fase de llenado de granos alargan el periodo (Cirilo y Andrade, 1996; Otegui *et al.*, 2021), pero con limitaciones de fuente fotosintética (Bonelli *et al.*, 2016) y probabilidad de heladas tempranas (Maddoni, 2012; Otegui *et al.*, 2021), lo que puede causar efectos negativos sobre el mismo (Andrade *et al.*, 2023).

Cuando la disponibilidad de agua es suficiente, el nitrógeno (N) se considera el factor más limitante para el rendimiento de maíz. Estudios previos identifican al N como un factor con una contribución relevante a la generación de brechas de rendimiento (Ciampitti y Vyn, 2014; Aramburu Merlos *et al.*, 2015; Andrea *et al.*, 2018; Monzon *et al.*, 2022). En general, se ha reportado que la deficiencia de N, reduce la tasa de crecimiento del cultivo alrededor del periodo crítico (Cerrudo *et al.*, 2013) y de esta manera afecta el rendimiento, principalmente, por un efecto sobre el número de granos y no tanto por variaciones en el peso por grano (Leemcoff y Loomis, 1986; Uhart y Andrade, 1995; Andrade *et al.*, 2002; Ciampitti y Vyn, 2011). Los requerimientos de N para el cultivo de

maíz rondan los 18-22kg de N absorbido por tonelada de grano, los cuales pueden ser cubiertos por el aporte del suelo y/o la fertilización nitrogenada (Andrade *et al.*, 2023)

El N en el suelo que se encuentra disponible para ser utilizado por el maíz proviene de la mineralización de la materia orgánica (MO) (Echeverría y Sainz Rozas, 2015). La evolución de la producción agrícola hacia sistemas de cultivos con bajos aportes de residuos y sin alternancia con pasturas, ha producido grandes disminuciones de los contenidos de MO del suelo en la Región Pampeana Argentina. Esto afectó el aporte de N a través de la mineralización desde la fracción orgánica edáfica. A su vez, el incremento en la demanda de N por el cultivo de maíz no ha sido acompañado por un reajuste en el manejo de la fertilización nitrogenada (Sainz Rozas *et al.*, 2011, 2019, Carciochi *et al.*, 2018). Por estos motivos, la frecuencia y magnitud de las deficiencias de N se han incrementado en dicha zona en los últimos años (Pagani *et al.*, 2012; Carciochi *et al.*, 2016; Orcellet *et al.*, 2017). La fertilización nitrogenada es una práctica de manejo necesaria para la realización de una agricultura sustentable. No obstante, dado el costo de los fertilizantes y el impacto ambiental resultante de su aplicación, es necesario el desarrollo de estrategias de manejo tendientes a mejorar la eficiencia de uso de este nutriente.

En maíz la acumulación de nutrientes en planta se anticipa al crecimiento, siendo mayor desde el estadio de 4-6 hojas (V4-6) hasta la floración del cultivo, donde representa entre el 60-70% del total de N absorbido a madurez fisiológica (Uhart y Andrade, 1995). El conocimiento de la dinámica de acumulación de N en maíz es un aspecto clave al momento de definir la estrategia de fertilización, es decir el momento, la fuente y la dosis a utilizar, con el objetivo de maximizar la eficiencia de utilizaciones de dicho nutriente. Para evaluar la disponibilidad de N se recomienda el muestreo de suelo a la siembra del cultivo en los estratos superficiales (0-20 cm) y subsuperficiales (20-40 y 40-60 cm). En maíces de siembra temprana, la determinación del contenido de nitrato en pre-siembra es el método de diagnóstico más utilizado, pero es poco sensible debido a las pérdidas de N que pueden ocurrir antes del período de mayor consumo de dicho nutriente por el cultivo (Herget, 1987). Además, en general, el SEB se caracteriza por mayores contenidos de MO y, por ende, un alto aporte de N por mineralización aspecto que no siempre es evaluado en el muestreo en pre-siembra. En línea con lo mencionado, para dicha zona, Sainz Rozas *et al.* (2008) propusieron el empleo del N incubado en anaerobiosis (Nan) como un indicador del aporte de N por mineralización, el cual permitiría ajustar los niveles críticos de N evaluados en pre-siembra o en el

estadio de V6, y de esta forma mejorar la eficiencia de utilización del fertilizante nitrogenado. Para maíces de siembra tardía aún no hay información suficiente, siendo necesario estudiar con mayor profundidad dado que un diagnóstico correcto de las necesidades de N permitiría disminuir las pérdidas, mejorando así la eficiencia de uso de dicho nutriente.

La magnitud de las pérdidas de N en el sistema de siembra directa (SD) es afectada por factores ambientales (humedad, temperatura y viento), de suelo (pH, capacidad buffer, capacidad de intercambio catiónico, MO) y de cultivo (cantidad y tipo de residuos de cosecha, y fuente y dosis de N) (Ferguson *et al.*, 1984; Barbieri *et al.*, 2003). Teniendo en cuenta las condiciones ambientales en las cuales se realiza la aplicación de N en los maíces tardíos, la volatilización sería el principal mecanismo de pérdida de N del sistema. Específicamente, sobre este mecanismo de pérdida de N, la humedad del suelo tiene gran importancia en el potencial de volatilización de la fuente nitrogenada. Las pérdidas por volatilización son máximas cuando el contenido de humedad del suelo está a capacidad de campo y cuando el mismo se seca lentamente, dado que el secado del suelo aumenta la concentración de NH_3 en la solución. Por otro lado, para una misma condición hídrica, un aumento en la temperatura incrementa las pérdidas por volatilización (Echeverría y Sainz Rozas, 2015) siendo estas más elevadas cuando las temperaturas del suelo se incrementan en un rango de 10 a 50°C (McInnes *et al.*, 1986). Datos históricos del SEB indican que la temperatura del suelo aumenta de 18 a 23 °C entre octubre y diciembre (SIGA, 2024), por lo que siembras tardías favorecerían condiciones predisponentes para la volatilización. Dentro de los factores edáficos que afectan las pérdidas por volatilización, el pH y la capacidad buffer son los más relevantes. Estudios previos han determinado que suelos con pH neutros reducen las pérdidas por volatilización, y para un mismo pH, a mayor capacidad buffer, menor será la volatilización de N. En Argiudoles del SEB, estas características no difieren en gran magnitud entre suelos, por lo que se esperaría que los factores ambientales y la elección de la fuente nitrogenada tenga mayor incidencia en la cantidad de N perdido por volatilización.

Bajo SD, los fertilizantes nitrogenados suelen ser aplicados sobre la superficie del suelo. En estas condiciones, las fuentes de N más utilizadas, como la UREA (0-46-0), pueden resultar poco eficientes debido a las pérdidas por volatilización de amoníaco respecto a otras como el nitrato de amonio calcáreo (CAN 0-27-0) (Barbieri *et al.*, 2003). No obstante, para que la fuente CAN resulte en una mejor performance que la UREA se

tienen que reunir ciertas características: i) que haya deficiencia de N, ii) que el cultivo tenga suficiente disponibilidad hídrica para poder absorber el N proveniente del fertilizante, y iii) condiciones predisponentes para la volatilización, que incrementen las diferencias en eficiencia entre fuentes. Por lo tanto, es necesario evaluar estas fuentes de N para maíces de siembras tardías en el SEB, ya que es probable que las pérdidas varíen entre las mismas, incidiendo en la absorción de N por parte del cultivo y en el rendimiento. Esto llevaría a distintas recomendaciones de fertilización nitrogenada dependiendo de la fuente a usar.

Las recomendaciones de fertilización con N y la dosis a aplicar para el maíz se han basado tradicionalmente en la disponibilidad inicial de N (Bundy y Meisinger, 1994; Sainz Rozas *et al.*, 2008) y en la estimación de la mineralización (Sainz Rozas *et al.*, 2008; Carciocchi *et al.*, 2016; Orcellet *et al.*, 2017). Además de los métodos de diagnóstico de N basados en el análisis del suelo, se desarrollaron diferentes herramientas de diagnóstico, como la lectura del medidor de clorofila (SPAD), para caracterizar el estado del N del maíz durante el ciclo de crecimiento (Barbieri *et al.*, 2013; Zhao *et al.*, 2018). El SPAD es un instrumento que a través del índice de verdor (IV), permite evaluar indirectamente y en forma no destructiva el contenido de clorofila en la hoja y, por ende, el estado nutricional del cultivo a través de una simple lectura. El IV del cultivo está asociado con la concentración de clorofila en hoja, la cual se correlaciona también con la concentración de N (Hoefgen y Nikiforova, 2008; Pagani y Echeverría, 2012; Zhao *et al.*, 2018), pudiendo ser un buen indicador para observar deficiencias de N en la planta cuando se utilizan distintas fuentes o dosis. El índice de suficiencia nitrogenada (ISN) se calcula como una relación entre el IV del área de interés y el IV de un área que no está limitada por N (Barbieri *et al.*, 2013). El ISN se ha propuesto como un diagnóstico preciso de N en maíz temprano. Sin embargo, no hay estudios en el SEB que analicen el uso de esta herramienta en maíces de siembras tardías. En siembras tempranas, Sainz Rozas y Echeverría (1998) determinaron una correlación positiva entre el IV y el rendimiento relativo del maíz. Evaluar la utilidad de esta herramienta en maíz tardío puede ser útil para determinar la disponibilidad de N y su deficiencia en etapas avanzadas del cultivo.

En función a lo expuesto, y destacando la necesidad de contar con información respecto al efecto del manejo de la fertilización nitrogenada sobre la productividad del cultivo de maíz tardío, este proyecto propone evaluar el uso de distintas fuentes y dosis de N en maíz tardío en el SEB.

Hipótesis:

Para cultivos de maíz tardío en el SEB se hipotetiza que:

1. A igual dosis de N, la fuente CAN presenta un mayor ISN que la fuente UREA.
2. A igual dosis de N, la fuente CAN presenta una mayor respuesta en rendimiento que la fuente UREA.
3. A igual dosis de N, la fuente CAN presenta mayor número de granos y peso de mil granos que la fuente UREA.

Objetivos:

1. Evaluar el efecto de dos fuentes y distintas dosis de N en el ISN de maíz tardío.
2. Evaluar el efecto de dos fuentes y distintas dosis de N en el rendimiento en grano de maíz tardío.
3. Evaluar el efecto de dos fuentes y distintas dosis de N en componentes de rendimiento de maíz tardío.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Sitio experimental

La experiencia se llevó a cabo en tres sitios del SEB en el periodo comprendido entre noviembre de 2021 y agosto de 2022 (Figura 1). El primer sitio correspondió a la localidad Fulton (37°27'54" S, 58°38'60" O), partido de Tandil, Provincia de Buenos Aires, Argentina. El segundo, ubicado en Lobería (38°4'19" S, 58°50'12" O), Provincia de Buenos Aires, Argentina. El último sitio se ubicó en el partido de General Madariaga (37°3'1" S, 57°25'16" O), Provincia de Buenos Aires, Argentina. Los tres sitios bajo estudios corresponden a miembros de la Asociación Argentina de Productores bajo SD (AAPRESID), por lo tanto el híbrido y densidad de siembra en cada sitio fue elección del productor.



Figura 1. Ubicación de los sitios donde se llevaron a cabo los ensayos.

2.2. Descripción de los ensayos y manejo del cultivo

Se empleó un diseño en bloques completos aleatorizados con tres repeticiones. Cada bloque estaba compuesto por 7 unidades experimentales de 5 surcos de ancho por 10

m de largo. Los tratamientos evaluados consistieron en dos fuentes de N: CAN (27-0-0) y UREA (46-0-0); y cuatro dosis de N: 0, 30, 60, y 90 kg N ha⁻¹ como se muestra en la Figura 1. La fertilización se realizó al voleo, en cobertura total en el estadio V4-6 (Ritchie y Hanway, 1982) del cultivo. Los ensayos se realizaron bajo siembra directa (Tabla 1) en condiciones no limitantes de otros nutrientes como fósforo (P), zinc (Zn) y azufre (S). Por otra parte, las malezas, plagas y enfermedades fueron controladas adecuadamente.

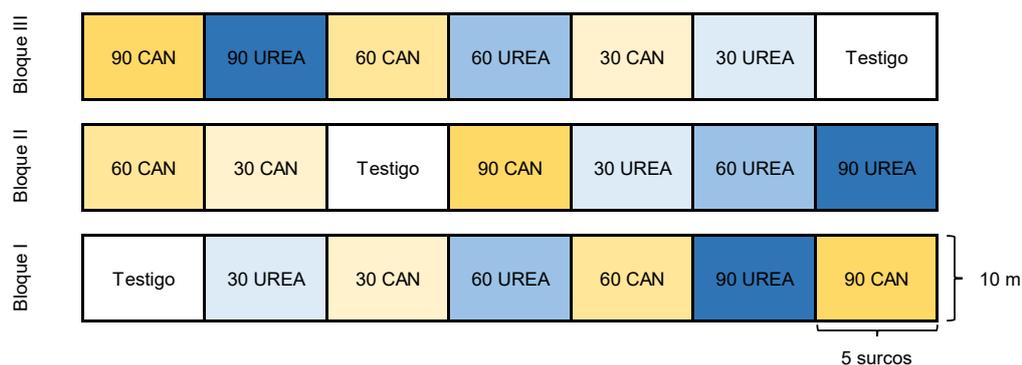


Figura 2. Descripción de los tratamientos y planteo realizado en cada sitio.

Tabla 1. Fecha de siembra, híbrido utilizado y densidad de siembra en los tres sitios del experimento.

Sitio	Siembra	Híbrido	Densidad (plantas/ha)
Fulton	30-nov	LG 6620	64000
Lobería	16-nov	KM 3916	50000
Madariaga	18-dic	DK 7220	68000

2.3. Determinaciones analíticas en muestras de suelo

A la siembra del cultivo de maíz, con la finalidad de caracterizar cada sitio, se tomaron muestras de suelo de los estratos 0-20 cm y 20-40 cm. Las muestras fueron secadas en estufa a 30 °C, posteriormente fueron molidas y tamizadas por 2 mm. Sobre las mismas se determinó en el estrato 0-20 cm: pH, MO (Walkey y Black, 1934), Nan (Waring y Bremner, 1964), P extractable (P-Bray, Bray y Kurtz, 1945) y en ambos estratos S-SO₄²⁻ (Johnson, 1987) y N-NO₃⁻ (Keeney and Nelson, 1982). Para convertir la concentración de N-NO₃⁻ y S-SO₄²⁻ a masa (kg ha⁻¹) se utilizaron valores de densidad aparente del suelo estimados para la zona, siendo de 1.09 Mg m⁻³ para 0-20 cm y 1.22 Mg m⁻³ para 20-40 cm.

2.4. Determinaciones en maíz

2.4.1. Índice de verdor:

En el estadio de inicio de floración del maíz (R1; Ritchie y Hanway, 1982) se determinó el IV con el medidor de clorofila Minolta SPAD 502 (Konica Minolta, Ramsey, New Jersey, USA). Este instrumento mide la concentración relativa de clorofila por medio de la luz transmitida a través de la hoja en 650 nm (longitud de onda fotosintéticamente activa) y 940 nm. El valor IV resultó del promedio de 20 lecturas efectuadas sobre la hoja de la espiga de las plantas de maíz. Los valores de IV se relativizaron utilizando el ISN, el cual se obtuvo de la siguiente forma:

$$ISN = \frac{SPAD \text{ de la unidad experimental}}{\text{mayor valor de SPAD del sitio}} \times 100$$

2.4.2. Rendimiento en grano:

En el estadio de madurez fisiológica (R6, Ritchie y Hanway, 1982) se cosecharon manualmente las plantas presentes en 5 m lineales de los 2 surcos centrales de cada parcela y se trillaron en una trilladora estacionaria. Posteriormente, se pesaron los granos obtenidos y se les determinó el contenido de humedad con un higrómetro. El rendimiento se expresó en kg ha⁻¹ de grano corregido a 14,5% de humedad.

2.4.3. Peso de mil granos:

Se tomaron tres alícuotas de 100 granos cada una, sobre las cuales se determinó el peso en base seca para luego estimar el peso de mil granos (PMG). A partir del dato de PMG y el rendimiento en grano, se estimó el número de granos.

2.4.4. N en grano:

Sobre las muestras de grano se determinó el contenido de N según el método NIR (por sus siglas en inglés de *near infrared sensor*). Este método permite la obtención de valores de concentración de N por espectroscopia. Los resultados de concentración fueron transformados en contenido utilizando el rendimiento en grano en base seca.

2.5. Análisis estadístico

Los resultados obtenidos fueron analizados mediante el uso de análisis de la varianza utilizando el procedimiento ANOVA incluido en el programa estadístico INFOSTAT (Di Rienzo, 2011). Se realizaron dos análisis para las variables de estudio. El primero consistió en evaluar la respuesta a la fertilización nitrogenada. Para ello, cada tratamiento constó del promedio de ambas fuentes de N para cada dosis, incluyendo también el testigo sin N (4 tratamientos). Posteriormente, se evaluaron las diferencias entre fuentes, para lo cual no se incluyó en el análisis al testigo, y se separaron los efectos de la Dosis y la Fuente, analizando también su interacción. Cuando las diferencias entre tratamientos fueron significativas se empleó el test de la diferencia mínima significativa, con un nivel de significancia de 0,05. Se estudiaron las relaciones entre las variables evaluadas a través de regresiones lineales.

2.6. Caracterización climática

La caracterización climática se llevó a cabo utilizando los datos de temperatura y precipitación del Sistema de Información y Gestión Agrometeorológica del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) (SIGA, 2024) de dos estaciones meteorológicas más cercanas a los sitios.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Características meteorológicas de la campaña

Las temperaturas medias mensuales durante la campaña fueron muy similares a la media histórica en los tres sitios (Figura 3), permitiendo un adecuado crecimiento y desarrollo del cultivo de maíz (Otegui, 1992; Cirilo, 1994). La temperatura media se encontró en un rango de 15° y 23° con una máxima en el mes de enero (30,1°C).

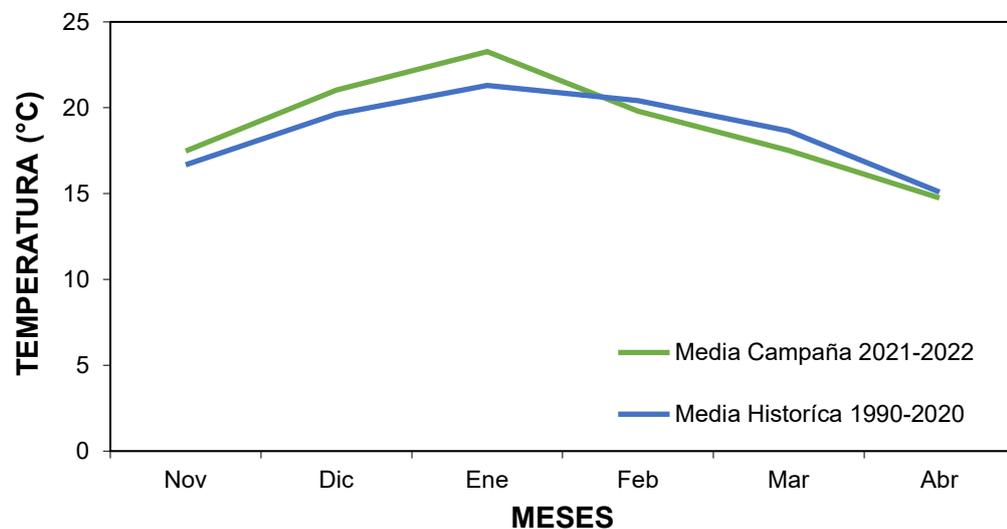


Figura 3. Temperatura media mensual del aire del periodo noviembre 2021 a abril 2022 y temperatura media mensual histórica del periodo 1990-2020.

En cuanto a las precipitaciones, se observó que fueron inferiores a la media histórica en todos los sitios bajo estudio. La mediana de precipitaciones históricas en el periodo noviembre-abril para la zona es de 497 mm. En la campaña bajo estudio, las precipitaciones durante el ciclo del cultivo de maíz fueron 308, 232 y 357 mm para los sitios Fulton, Lobería, y Madariaga, respectivamente. En el ciclo del cultivo de maíz se observó que en los tres sitios hubo un déficit hídrico desde fines de diciembre a marzo (Figura 4), siendo este más marcado en Lobería. Este déficit se debió principalmente a las bajas precipitaciones que hubo en los meses de enero y febrero, y a principios de marzo (Figura 4). Dichas deficiencias pueden haber tenido un efecto negativo sobre el rendimiento del maíz, especialmente considerando que ocurrieron durante el periodo crítico de definición del rendimiento. Para el SEB, Calviño *et al.* (2003) destacaron que bajas precipitaciones durante el período crítico de determinación del número de granos promovían fuertes reducciones del rendimiento. La alta sensibilidad del rendimiento del

maíz ante las deficiencias hídricas destaca la importancia de comprender la influencia del recurso agua en la determinación del rendimiento (Shaw, 1988).

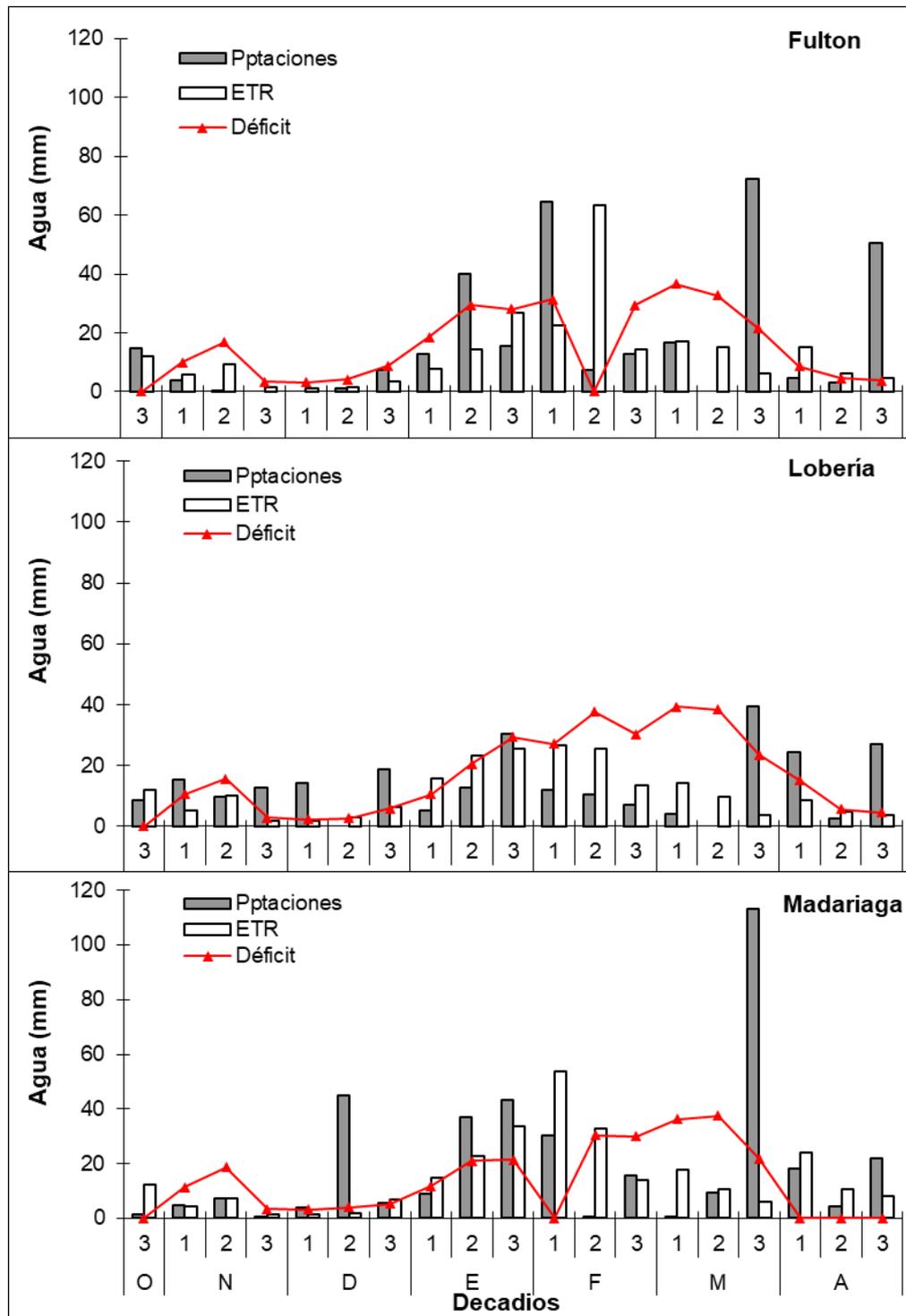


Figura 4. Precipitaciones (Pptaciones), evapotranspiración real (ETR) y déficit hídrico decádico durante el ciclo del cultivo de maíz para Fulton, Lobería y Madariaga.

3.2. Características edáficas de los sitios experimentales

En la Tabla 2 se muestra la caracterización edáfica para los tres sitios bajo estudio. Los valores de pH observados estuvieron dentro del rango reportado por Sainz Rozas *et al.* (2011) para suelos agrícolas de la zona. El nivel de P-Bray en todos los sitios bajo estudio es igual o levemente superior al nivel crítico por encima del cual no se obtendría respuesta a la fertilización fosfatada (Andrade *et al.*, 2023). En cuanto a los valores obtenidos de Zn-DTPA, en la localidad de Lobería hay déficit de este nutriente, siendo el umbral de suficiencia de 1 mg kg^{-1} (Martínez Cuesta *et al.*, 2021). No obstante, se aplicó Zn para evitar que este nutriente interaccione con la respuesta a N.

Los valores de MO observados en los sitios de este trabajo son semejantes a los valores de carbono orgánico (CO) medidos en trabajos de Sainz Rozas *et al.* (2011) y de Reussi Calvo *et al.* (2014) para el SEB. Los valores de Nan determinados en los tres sitios fueron similares a los obtenidos por Reussi Calvo *et al.* (2014) para la zona bajo estudio. En base a los valores de MO y Nan observados en cada sitio, es esperable un importante aporte de N y S por mineralización (Carciochi *et al.*, 2018; Reussi Calvo *et al.*, 2018) que permitiría obtener rendimientos de aproximadamente 10, 11 y 9 Mg ha^{-1} para Fulton, Lobería y Madariaga respectivamente (Reussi Calvo *et al.*, 2018). Por último, los tres sitios tuvieron a la siembra más de 100 kg ha^{-1} de N-NO_3^- , presentándose en Fulton la mayor disponibilidad. Estos valores representan una alta disponibilidad de N inicial para el cultivo de maíz.

Tabla 2. Caracterización del suelo a la siembra de maíz para los tres sitios bajo estudio.

Sitio	pH	MO %	P-Bray -----	Nan mg kg^{-1} -----	Zn-DTPA	N- NO_3^- --- kg ha^{-1} ---	S- SO_4^-
Fulton	5,3	5,7	27	53	1,35	156	12
Lobería	7,1	5,7	26	93	0,77	138	27
Madariaga	5,5	4,4	17	60	2,16	104	11

3.3. Índice de suficiencia de nitrógeno (ISN)

3.3.1. Respuesta a la fertilización con N

Se observaron diferencias significativas en el ISN en respuesta a la fertilización únicamente en la localidad de Fulton (Tabla 3). El testigo presentó menor ISN, diferenciándose del resto de los tratamientos. Los aumentos en el ISN derivados del agregado de N fueron entre 5 y 13%. Los tratamientos que obtuvieron mayor ISN fueron

los correspondientes a las dosis de 60 y 90 kg ha⁻¹. La ausencia de diferencias significativas en Lobería podría estar asociada a las bajas precipitaciones en dicha localidad (Figura 4) que podrían haber limitado la respuesta a la fertilización con N. Por su parte, en Madariaga las lluvias fueron algo superiores, pero tampoco se encontraron diferencias en ISN entre dosis de N. Esto podría indicar que el aporte de N desde el suelo habría sido suficiente para cubrir los requerimientos del cultivo de maíz hasta floración. Sin embargo, en la localidad de Madariaga, si bien las diferencias entre dosis no fueron significativas, se determinó una tendencia ($p=0.07$) a mayores valores de ISN en las dosis de 60 y 90 kg N ha⁻¹. Es importante recordar que el maíz continúa absorbiendo N durante estadios reproductivos (Uhart y Andrade, 1995), por lo que, si las condiciones ambientales no fueran limitantes, se podría esperar encontrar respuestas al agregado de N en rendimiento en grano.

Tabla 3: Índice de suficiencia de nitrógeno (ISN), rendimiento en grano, N en grano, peso de mil granos (PMG) y número de granos (Nro granos) para distintas dosis de N en Fulton, Lobería y Madariaga. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre dosis de N, según el test de mínima diferencia significativa ($p < 0.05$). Los valores entre paréntesis indican error estándar de la media. El valor por debajo de las letras indica el p valor para cada parámetro y sitio.

Sitio	Dosis (kg N ha ⁻¹)	ISN	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	N grano (kg ha ⁻¹)	PMG (g)	Nro granos					
Fulton	0	0,85 (0,02)	c	9138 (141)	69,2 (2,7)	c	262 (5,2)	b	2976 (43)		
	30	0,90 (0,01)	b	9445 (384)	87,2 (5,5)	b	282 (3,4)	a	2869 (141)		
	60	0,97 (0,01)	a	9899 (454)	100,5 (4,4)	a	282 (3,1)	a	3003 (153)		
	90	0,94 (0,02)	a	9884 (316)	96,6 (2,5)	ab	279 (2,8)	a	3030 (113)		
		0,0002		>0,05		0,003		0,01	>0,05		
Lobería	0	0,92 (0,04)		6793 (354)	a	74,1 (2,7)	270 (10,3)		2159 (173)	a	
	30	0,93 (0,02)		6440 (432)	ab	58,2 (11,7)	273 (5,8)		2010 (103)	a	
	60	0,92 (0,03)		5680 (141)	bc	65,8 (3,2)	275 (6,4)		1766 (33)	b	
	90	0,91 (0,02)		5231 (186)	c	59,4 (2,4)	266 (8,1)		1679 (52)	b	
		>0,05		0,009		>0,05		>0,05	0,004		
Madariaga	0	0,94 (0,02)		7646 (1298)	b	77,7 (14,4)	b	303 (11,1)		2184 (450)	b
	30	0,94 (0,01)		13096 (601)	a	126,0 (8,1)	a	312,8 (3,1)		3585 (176)	a
	60	0,97 (0,01)		12874 (558)	a	128,7 (4,2)	a	308,1 (3,5)		3568 (148)	a
	90	0,97 (0,01)		13667 (382)	a	136,3 (4,7)	a	301,8 (3,0)		3878 (130)	a
		>0,05		0,0002		0,001		>0,05	0,0008		

3.3.2. Efecto de la fuente y dosis de N

En el análisis de fuentes y dosis de N, la interacción fuente*dosis no fue significativa para ningún sitio. Se determinó un efecto de la dosis solo en Fulton, coincidente con lo analizado previamente (Tabla 3, Tabla 4). No hubo diferencias en el ISN ante la variación de la dosis de N aplicada en los otros dos sitios. El efecto de la fuente fue significativo en Fulton y Lobería, donde se vio un incremento en el ISN en tratamientos con CAN respecto a Urea (Tabla 4). Esto se condice con lo hipotetizado, y permite concluir una mayor eficiencia de la fuente CAN.

Tabla 4. Índice de suficiencia de nitrógeno (ISN) para distintas fuentes (Urea y CAN). Letras mayúsculas diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre las fuentes de N, según el test de mínima diferencia significativa ($p < 0.05$). Los valores entre paréntesis indican error estándar de la media.

	Fuente	Fulton		Lobería		Madariaga
	Urea	0,92 (0,01)	B	0,90 (0,02)	B	0,97 (0,01)
	CAN	0,95 (0,01)	A	0,94 (0,01)	A	0,95 (0,01)
Análisis de varianza						
	<i>Fuente</i>	0,03		0,02		0,27
	<i>Dosis</i>	0,002		0,62		0,08
	<i>Fuente*Dosis</i>	0,17		0,13		0,84

3.4. Rendimiento en grano

El rendimiento en grano promedio del cultivo de maíz para la localidad de Fulton estuvo en un rango entre 9138 y 9899 kg ha⁻¹, siendo valores normales para este cultivo en seco en la zona. Para la localidad de Lobería, el rendimiento se encontró entre 5231 y 6793 kg ha⁻¹, siendo valores bajos con respecto a los rendimientos típicos de la zona debido al déficit hídrico que se presentó en el lugar durante la mayor parte del ciclo de crecimiento del cultivo. En la localidad de Madariaga, el rendimiento en grano se encontró entre 7646 y 13667 kg ha⁻¹, siendo valores normales de la zona en seco.

3.4.1. Respuesta a la fertilización con N

Se observaron diferencias significativas de rendimiento en función de la dosis de N aplicada en las localidades de Lobería y Madariaga, aunque con tendencias distintas para cada sitio (Tabla 3). En la primera localidad se pudo observar que la fertilización con las dosis más altas redujo el rendimiento del cultivo respecto al testigo sin N. Debido al déficit hídrico presentado en esta campaña, es probable que se haya dado una interacción negativa con la fertilización, lo cual se da porque, en estadios iniciales sin limitaciones de N y agua, el cultivo crece normalmente, pero cuando las precipitaciones empezaron a escasear, el cultivo no logró cubrir los requerimientos necesarios para su

mantenimiento y el rendimiento en grano comienza a decaer, en mayor medida en aquellos tratamientos con altas dosis de N que habían acumulado mayor biomasa vegetativa. Esto coincide con lo observado por Andrade y Satorre (2015), quienes sugirieron que en años con restricciones hídricas es aconsejable realizar un manejo conservador que disminuya el consumo de agua en etapas vegetativas y transfiera parte del recurso al período reproductivo. En la localidad de Madariaga, se observó que hubo efecto positivo de la fertilización con N, aumentando el rendimiento en grano cuando se aplicaba fertilizante (Tabla 3). La respuesta se dio con 30 kg N ha⁻¹, y no se observaron diferencias significativas con respecto a dosis más altas, indicando que la menor dosis de N aplicada más el N aportado por el suelo cubrió los requerimientos de N del cultivo.

3.4.2. Efecto de la fuente y dosis de N

No se determinó interacción entre la dosis y la fuente de N aplicada en ninguno de los tres sitios (Tabla 5). No obstante, en la localidad de Fulton, hubo efecto de la fuente, siendo 9% mayor el rendimiento cuando se aplicó CAN. En la localidad de Madariaga, si bien no fue significativo el efecto de la fuente, se observa la misma tendencia que en Fulton. Por último, en la localidad de Lobería, no se observa efecto de la fuente debido a las bajas precipitaciones ocurridas durante el ciclo del cultivo de maíz, siendo este el principal factor que limita el crecimiento del mismo. Dichas diferencias entre sitios, pueden deberse a que la fuente CAN presenta menor pérdida por volatilización que la fuente UREA, siempre y cuando las condiciones ambientales permitieran que se manifieste la respuesta. En caso de no existir diferencias entre fuentes puede deberse a que el rendimiento este limitado por otro factor que no sea N, o que el aporte de N desde el suelo sea suficiente para cubrir los requerimientos del cultivo (Figura 4), entonces utilizar una fuente nitrogenada u otra no genera diferencias significativas.

Tabla 5. Rendimiento en grano de maíz para distintas fuentes de N (Urea y CAN) y para distintas dosis de N (30,60,90). Letras minúsculas diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre la dosis de N, y letras mayúsculas diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre las fuentes de N, según el test de mínima diferencia significativa ($p < 0.05$). Los valores entre paréntesis indican error estándar de la media.

Dosis	Fuente	Fulton		Lobería		Madariaga
	Urea	9289 (287)	B	5651 (175)		12713 (516)
	CAN	10197 (258)	A	5917 (357)		13713 (201)
30		9446 (384)		6440 (432)	a	13097 (601)
60		9900 (455)		5680 (141)	ab	12874 (558)
90		9884 (316)		5231 (186)	b	13668 (382)
<i>Fuente</i>		0,05		0,47		0,14
<i>Dosis</i>		0,62		0,05		0,58
<i>Fuente*Dosis</i>		0,79		0,85		0,57

En cuanto a la dosis, en Fulton no se observó que tenga efecto alguno sobre el rendimiento en grano, lo cual indica que el N disponible en el suelo a la siembra, cubrió los requerimientos nutricionales del cultivo en dicha campaña, por ende, al aumentar la dosis de N aplicada no presentó aumento en el rendimiento en grano. En Lobería, hubo efecto de la dosis de N aplicada (Tabla 5), obteniendo resultados similares a los de ISN, dado que, a mayor dosis, menor fue el rendimiento en grano. Esto, como fue explicado previamente, se debió al déficit hídrico ocurrido durante la estación de crecimiento de maíz. Por último, para la localidad de Madariaga, no se observó efecto de la dosis ni de la fuente de N utilizada (Tabla 5). Dichos resultados pueden observarse en la Figura 5, donde tanto en Fulton como en Madariaga, el rendimiento relativo del maíz no varió ante cambios en la disponibilidad de N. Por lo contrario, la relación fue significativa y negativa para Lobería.

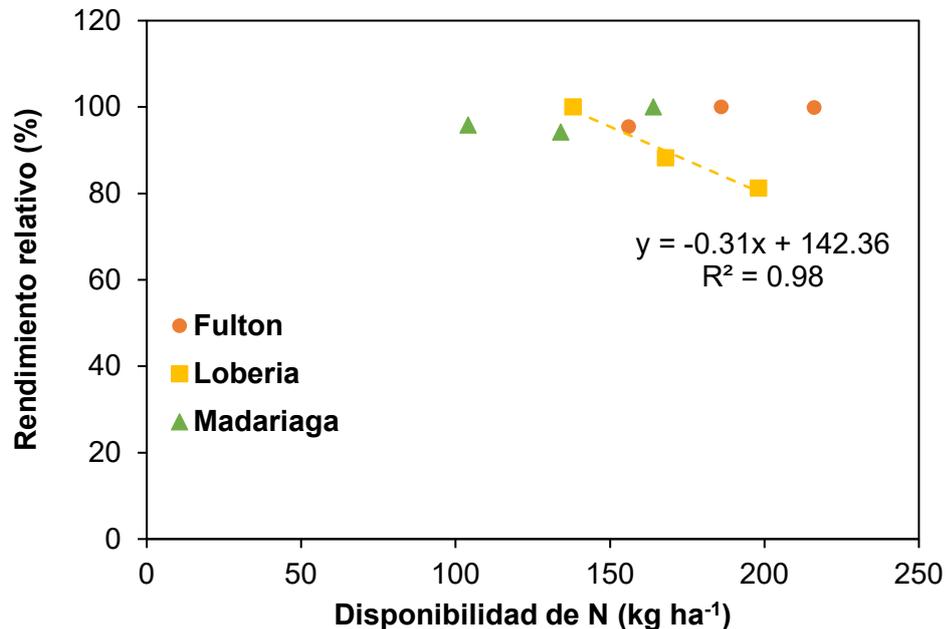


Figura 5: Relación entre el rendimiento relativo y la disponibilidad de nitrógeno ($N-NO_3^-$ a la siembra y N del fertilizante) para los tres sitios.

3.5. Componentes de rendimiento

3.5.1. Respuesta a la fertilización con N

Se determinó un efecto significativo de la dosis de N sobre el PMG en Fulton (Tabla 3). En este sitio, el agregado de N, independientemente de la dosis, incrementó el PMG respecto al testigo sin fertilizar. Esto indica que, si bien para este sitio el rendimiento no difirió entre dosis de N, el agregado de fertilizante tuvo un efecto sobre el peso de los granos. En los otros dos sitios, el PMG no se vio afectado por la dosis de N aplicada. Trabajos recientes también han encontrado un efecto del N sobre el peso por grano cuando las deficiencias fueron moderadas (Ning *et al.*, 2017; Hisse *et al.*, 2019; Olmedo y Vyn, 2021). En las localidades de Lobería y Madariaga hubo efecto de la fertilización con N sobre el número de granos, de forma similar a lo ocurrido en rendimiento en grano, ya que en Lobería al aumentar la dosis de N el número de granos disminuyó y en la localidad de Madariaga, al aumentar la dosis de N aumentó el número de granos, no diferenciándose el número de granos entre dosis de N. Esto coincide con lo investigado por varios autores, los cuales mencionan que, para la mayoría de condiciones ambientales y de manejo, la variación en el rendimiento del maíz se explica en gran medida por la variación en el número de granos por unidad de superficie (Cirilo y

Andrade, 1996; Otegui y Andrade, 2000; D'Andrea et al., 2013; Cerrudo *et al.*, 2020). El peso del grano individual contribuye menos a la variación del rendimiento ya que es, en general, más estable que el número de granos en la mayoría de las condiciones de crecimiento (Borrás et al., 2004) y tiene escasa plasticidad para compensar potenciales pérdidas en el número de estructuras reproductivas (Gambín y Borrás, 2010; Cerrudo et al., 2013).

3.5.2. Efecto de la fuente y dosis de N

El PMG no fue afectado por la fuente y dosis de N aplicada en ningún sitio estudiado (datos no mostrados). En cuanto al número de granos, no hubo interacción entre fuente y dosis de N en ninguna de las localidades. Solo en la localidad de Lobería, se encontró diferencia significativa en el número de granos en función de la dosis de N utilizada. Para este sitio se observó el mismo patrón que rendimiento mencionado anteriormente que al aumentar la dosis de N se reduce el número de granos (Tabla 6). Los valores obtenidos de número de granos en las localidades de Fulton y Madariaga fueron similares a los obtenidos por Barbieri (2008), siendo en Lobería los valores obtenidos inferiores debido al déficit hídrico severo ocurrido en dicha campaña. La ausencia de diferencias entre fuentes sobre el PMG se corresponde a lo observado en el rendimiento en grano para Lobería y Madariaga. Mientras que en Fulton el rendimiento varió entre fuentes, pero el PMG no. Es probable que las condiciones ambientales de la campaña, así como también las características edáficas de los sitios bajo estudio, no hayan permitido evidenciar diferencias significativas entre fuentes para los componentes de rendimiento. Sin embargo, se esperaría que ante otras condiciones edáficas, como suelos con baja capacidad buffer, o menor aporte de N desde su fracción orgánica, así como también ante ciclos de crecimiento del cultivo más favorables, el CAN hubiese resultado más eficiente que la UREA.

Tabla 6. Número de granos de maíz para distintas dosis de N (30,60,90). Letras minúsculas diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre la dosis de N, según el test de mínima diferencia significativa ($p < 0.05$). Los valores entre paréntesis indican error estándar de la media.

Dosis	Fulton	Lobería		Madariaga
30	2900 (141)	2026 (103)	a	3648 (176)
60	3003 (153)	1776 (33)	b	3568 (148)
90	3030 (113)	1679 (52)	b	3878 (130)
<i>Fuente</i>	0,06	0,39		0,19
<i>Dosis</i>	0,67	0,03		0,37
<i>Fuente*Dosis</i>	0,85	0,96		0,81

3.6. Nitrógeno en grano

3.6.1. Respuesta a la fertilización con N

El N en grano varió entre 58 y 136 kg N ha⁻¹ para los sitios bajo estudio. En Fulton y Madariaga se determinó un efecto significativo de la dosis de N sobre el contenido de N en los granos de maíz (Tabla 3). Esto coincide con lo reportado por Barbieri *et al.* (2013), y Uhart y Andrade (1995), los cuales mencionan que el umbral de concentración de N en el grano por debajo del cual comienza a caer el rendimiento relativo es 1,2%. Para Fulton, los mayores valores de N se determinaron con la dosis de 60 kg N ha⁻¹ mientras que, para Madariaga, todas las dosis incrementaron el contenido de N respecto al testigo, sin diferenciarse entre sí.

3.6.2. Efecto de la fuente y dosis de N

El análisis de la interacción dosis * fuentes de N sobre el contenido de N en grano de maíz no resultó significativo, así como tampoco los efectos de las fuentes para ninguno de los sitios estudiados. Sin embargo, en Fulton se vio una tendencia a mayor contenido de N en grano ($p=0.06$) con CAN respecto a Urea (Tabla 7).

Tabla 7. Nitrógeno en grano de maíz para distintas fuentes de N (Urea y CAN). Los valores entre paréntesis indican error estándar de la media.

	Fulton	Lobería	Madariaga
Fuente			
Urea	89,86 (3,10)	64,75 (1,78)	126,01 (5,57)
CAN	99,72 (3,95)	57,56 (7,79)	134,70 (3,62)
Análisis de varianza			
<i>Fuente</i>	0,06	0,72	0,50
<i>Dosis</i>	0,11	0,39	0,20
<i>Fuente*Dosis</i>	0,66	0,40	0,70

3.7. Comentarios finales

Se determinó una baja relación entre el ISN y el rendimiento en grano (Figura 6). Esto es así, ya que las diferencias entre tratamientos detectadas por el SPAD en floración, no se vieron reflejadas en el rendimiento en grano. En Fulton, el ISN dio significativamente diferente entre tratamientos fertilizados y testigo, lo cual no se vio reflejado con los valores obtenidos de rendimiento en grano. Esto puede estar dado por el aporte de N del suelo al cultivo post floración. Contrariamente, en Lobería el ISN fue similar para todos los tratamientos, mientras que el rendimiento disminuyó con la

fertilización nitrogenada. Finalmente, en Madariaga los tratamientos con N presentaron rendimientos similares (y superiores al testigo), pero estas diferencias no se vieron reflejadas en el ISN.

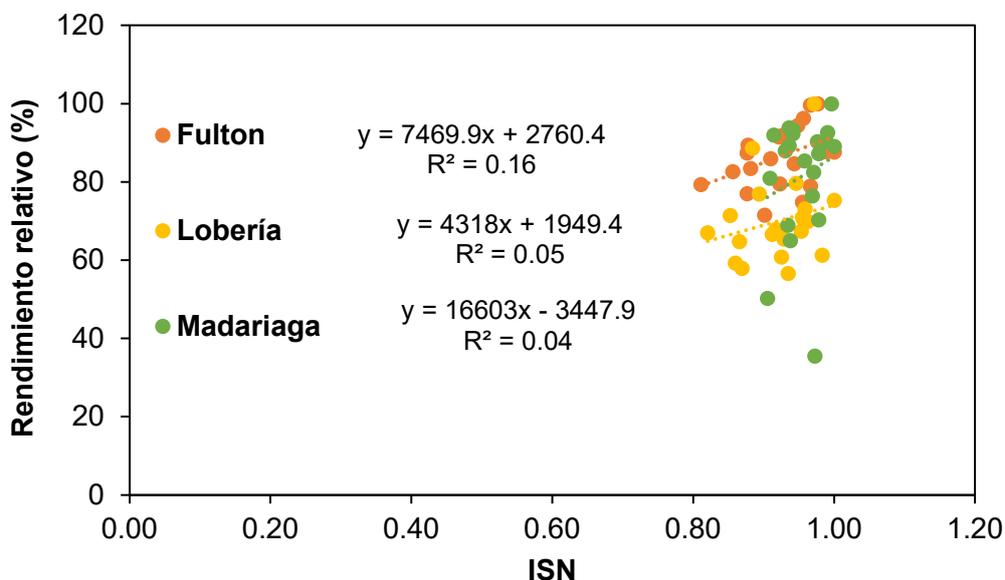


Figura 6: Relación entre el rendimiento relativo y el Índice de suficiencia de nitrógeno (ISN) para los tres sitios.

En cuanto a la dosis de N aplicado, no se vio una tendencia clara entre las localidades. Los tres sitios se comportaron de manera diferente, ya que, para el caso de Lobería, el aumento de la dosis de N tuvo efecto negativo en el rendimiento debido al déficit hídrico que se dio en estadios reproductivos del cultivo. Por otra parte, en la localidad de Fulton, el aporte de N del suelo cubrió los requerimientos del cultivo, no existiendo respuesta a la fertilización. Por último, en Madariaga, con 30 kg ha⁻¹ de N más la disponibilidad de N a la siembra se alcanzaron los máximos rendimientos en dicha campaña.

Las fuentes de N utilizadas no tuvieron una respuesta estadísticamente significativa para los sitios evaluados, sin embargo, se observó una tendencia positiva en los valores de ISN y rendimiento en grano al utilizar CAN como fuente nitrogenada. Bajo las condiciones ambientales de este estudio no se considera relevante utilizar CAN como fuente nitrogenada, dado que el mismo no mejoró los valores de rendimiento en grano, y tiene un costo superior al de la UREA.

4. CONCLUSIONES

En función de los resultados de esta tesis no se reunieron evidencias suficientes para rechazar la primera hipótesis, que planteaba que, a igual dosis de N, la fuente CAN presenta un mayor ISN que la fuente UREA. Se determinó un efecto significativo de la fuente sobre el ISN en dos de los tres sitios bajo estudio, y en el tercer sitio, ambas fuentes presentaron valores de ISN similares.

Por su parte, tampoco se reunieron evidencias suficientes para rechazar la segunda hipótesis. La misma proponía que, a igual dosis de N, la fuente CAN presenta una mayor respuesta en rendimiento que la fuente UREA. Este resultado solo fue así para uno de los sitios bajo estudio, mientras que, en los otros dos, la fertilización produjo efectos negativos sobre el rendimiento o ausencia de diferencias con respecto al testigo sin N.

Finalmente, para la tercera hipótesis, que planteaba que, a igual dosis de N, la fuente CAN presenta mayor número de granos y peso de mil granos que la fuente UREA, se juntaron evidencias suficientes para rechazarla. Para las condiciones evaluadas en esta tesis, en ningún sitio se determinaron diferencias entre las fuentes estudiadas sobre los componentes de rendimiento.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Andrade, J.F., Satorre, E.H., 2015. Single and double crop systems in the Argentine Pampas: Environmental determinants of annual grain yield. *Field Crops Research*. DOI: 10.1016/j.fcr.2015.03.008
- Andrade, F.H.; Otegui, M.E; Cirilo, A.G.; Uhart, S. 2023. Ecofisiología y manejo del cultivo de maíz. *Fac. de Ciencias Agrarias UNMdP - Fac. de Ciencias Agrarias UBA - CONICET - INTA - MAIZAR*. 467 p.
- Andrade, F.H.; Echarte, L.; Rizalli, R.; Della Maggiora, A.; Casanovas, M. 2002. Kernel number prediction in maize under nitrogen water stress. *Crop Science*. 42: 1173-1179. DOI: 10.2135/cropsci2002.1173
- Andrea, M.C.S.; Boote, K.J.; Sentelhas, P.C.; Romanelli, T.L. 2018. Variability and limitations of maize production in Brazil: Potential yield, water-limited yield and yield gaps. *Agricultural Systems*. 165: 264-273. DOI: 10.1016/j.agsy.2018.07.004
- Aramburu Merlos, F.; Monzon, J. P.; Mercuro, J. L.; Taboada, M.; Andrade, F. H.; Hall, A. J.; (...); Grassini, P. 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Field Crops Research*. 184: 145-154. DOI: 10.1016/j.fcr.2015.10.001
- Barbieri, P.; Echeverría, H.E.; Sainz Rozas, H. R.; Andrade, F.H. 2013. Nitrogen status in maize grown at different row spacings and nitrogen availability. *Canadian Journal of Plant Science*. 93:1049-1058. DOI: 10.4141/cjps2012-170
- Barbieri, P.; Echeverría, H.; Sainz Rozas, H. 2003. Respuesta del cultivo de maíz bajo siembra directa a la Fuente y al método de aplicación de nitrógeno. *Ciencia del suelo*. 21: 18-23.
- BCR. 2022. [en línea] < <https://www.bcr.com.ar/es/mercados/> > [consulta 23 de abril 2022]
- Birch, C.J.; Hammer, G.L.; Rickert, K.G. 1998. Temperature and photoperiod sensitivity of development in five cultivars of maize (*Zea mays* L.) from emergence to tassel initiation. *Field crops research*. 55: 93-107. DOI: 10.1016/S0378-4290(97)00062-2
- Bonelli, L.E.; Monzon, J.P.; Cerrudo, A.; Rizzalli, R.H.; Andrade, F.H. 2016. Maize grain yield components and source-sink relationship as affected by the delay in sowing date. *Field Crops Research*. 198: 215-225. DOI: 10.1016/j.fcr.2016.09.003
- Borrás, L.; Gambín, B.L. 2010. Trait dissection of maize kernel weight: Towards integrating hierarchical scales using a plant growth approach. *Field Crops Research*. 118: 1-12. DOI: 10.1016/j.fcr.2010.04.010
- Borrás, L.; Slafer, G.A.; Otegui, M.E. 2004. Seed dry weight response to source-sink manipulations in wheat, maize and soybean: A quantitative reappraisal. *Field Crops Research*. 86: 131-146. DOI: 10.1016/j.fcr.2003.08.002
- Bray, R.H.; Kurtz, L.T. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science*. 59:39-45. DOI: 10.1097/00010694-194501000-00006
- Bundy, L.G.; Meisinger, J.J. 1994. Nitrogen availability indices. In: R.W. Weaver et al., editors, *Methods of soil analysis. Part 2. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI*. p. 951-984.
- Calviño P.A.; Andrade, F.; Sadras, V. 2003. Maize yield as affected by water availability, soil depth, and crop management. *Agronomy journal*, 95: 275-281. DOI: 10.2134/agronj2003.2750
- Carciochi, W.D.; Wyngaard, N.; Divito, G.A.; Cabrera, M.; Reussi Calvo, N.I.; Echeverría, H.E. 2018. A comparison of indexes to estimate corn S uptake and S mineralization in the field. *Biology and Fertility of Soils*. 54: 349-362. DOI: 10.1007/s00374-018-1266-9

- Carciochi, W.D.; Wyngaard, N.; Divito, G.A.; Reussi Calvo, N.I.; Cabrera, M.; Echeverría, H.E. 2016. Diagnosis of sulfur availability for corn based on soil analysis. *Biology and Fertility of Soils*. 52: 917-926. DOI: 10.1007/s00374-016-1130-8
- Cerrudo, D.; Hernández, M.; Tollenaar, M.; Vega, C.R.C.; Echarte, L. 2020. Kernel number response to plant density in tropical, temperate, and tropical × temperate maize hybrids. *Crop Science*. 60: 381-390. DOI: 10.1002/csc2.20077
- Cerrudo, A.; Di Matteo, J.; Fernandez, E.; Robles, M.; Olmedo Pico, L.; Andrade, F.H. 2013. Yield components of maize as affected by short shading periods and thinning. *Crop & Pasture Science*, 64: 580-587. DOI: 10.1071/CP13201
- Ciampitti, I.A.; Vyn, T.J. 2014. Understanding global and historical nutrient use efficiencies for closing maize yield gaps. *Agronomy Journal*. 106: 2107-2117. DOI: 10.2134/agronj14.0025
- Ciampitti, I. A.; Vyn, T. J. 2011. A comprehensive study of plant density consequences on nitrogen uptake dynamics of maize plants from vegetative to reproductive stages. *Field Crops Research*. 121: 2–18. DOI: 10.1016/j.fcr.2010.10.009
- Cirilo A.G. 1994. Desarrollo, crecimiento y partición de materia seca en cultivos de maíz sembrados en diferentes fechas. Tesis Magister Scientiae. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Mar del Plata. 86 pp.
- Cirilo A.G.; Andrade, F. 1996. Sowing date and kernel weight in maize. *Crop Sci*. 36: 325– 331. DOI: 10.2135/cropsci1996.0011183X003600020019x
- D’Andrea, K.E.; Otegui, M.E.; Cirilo, A.G.; Eyhéabide; G.H. 2013. Parent-progeny relationships between maize inbreds and hybrids: Analysis of grain yield and its determinants for contrasting soil nitrogen conditions. *Crop Science*. 53: 2147-2161. DOI: 10.2135/cropsci2013.02.0111
- Di Rienzo, J.A.; Casanoves, F.; Balzarini, M.G.; Gonzalez, L.; Tablada, M.; Robledo, C.W. 2011. InfoStat. Córdoba, Argentina. Retrieved from. Universidad Nacional de Córdoba. <http://www.infostat.com.ar/>.
- Echeverría, H.E.; Sainz Rozas, H.R. 2015. Nitrógeno. En Echeverría, H.E.; Garcia, F.O. (eds.) *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*. Ediciones INTA. Buenos Aires, Argentina, pp. 189-228
- Ferguson, R.B.; Kissel, D.E.; Koelliker, J.K., Basel, W. 1984. Ammonia Volatilization from Surface-Applied Urea: Effect of Hydrogen Ion Buffering Capacity. *Soil Science Society of America Journal*. 48: 578-582. DOI: 10.2136/sssaj1984.03615995004800030022x
- Gambín B.L.; Borrás; L. 2010. Resource distribution and the trade-off between seed number and seed weight: A comparison across crop species. *Annals of Applied Biology*. 156: 91-102. DOI: 10.1111/j.1744-7348.2009.00367.x
- Herget, G.W. 1987. Status of residual nitrate-nitrogen soil tests in the United State of America. p. 73-79. In: Brown, J.R. (eds). *Soil Testing: sampling, correlation, calibration, and interpretation*. Spec. Publ. 21. SSSA, Madison, WI.
- Hisse, I.R.; D’Andrea, K.E.; Otegui, M.E. 2019. Source-sink relations and kernel weight in maize inbred lines and hybrids: Responses to contrasting nitrogen supply levels. *Field Crops Research*. 230: 151–159. DOI: 10.1016/j.fcr.2018.10.011
- Hoefgen, R.; Nikiforova, V.J. 2008. Metabolomics integrated with transcriptomics: assessing systems response to sulfur-deficiency stress. *Physiologia Plantarum*. 132:190-198. DOI: 10.1111/j.1399-3054.2007.01012.x
- Johnson, G.V. 1987. Sulfate: Sampling testing, and calibration. In: Brown, J.R. (ed.). *Soil testing: Sampling correlation, calibration and interpretation*. Madison, Wisconsin. Soil Science Society of America. pp. 89-96.
- Keeney, D.R.; Nelson, D.W. 1982. Nitrogen inorganic forms. In: Page, A.L.; Miller, R.H.; Keeney D.R. (eds.). *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*. Madison, Wisconsin: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America. pp. 643-698.

- Lemcoff, J.H.; Loomis, R.S. 1986. Nitrogen influences on yield determination in maize. *Crop Science*. 26: 1017-1022. DOI: 10.2135/cropsci1986.0011183X002600050036x
- Maddonni, G.A. 2012. Analysis of the climatic constraints to maize production in the current agricultural region of Argentina, a probabilistic approach. *Theoretical and Applied Climatology*. 107: 325-345.
- MAGyP. 2023. Estimaciones agrícolas. [en línea] < <https://datos.magyp.gob.ar/dataset/estimaciones-agricolas/> [consulta 23 de noviembre 2023]
- Martínez Cuesta, N.; Wyngaard, N.; Sainz Rozas, H.; Reussi Calvo, N.; Carciochi, W.; Eyherabide, M.; (...); Barbieri, P. 2021. Determining Mehlich-3 and DTPA extractable soil zinc optimum economic threshold for maize. *Soil Use and Management*, 37: 736-748. DOI: 10.1111/sum.12657
- McInnes K.J.; Ferguson, R.B.; Kissel, D.E.; Kanemasu, E.T. 1986. Field measurements of ammonia loss surface applications of urea solution to bare soil. *Agronomy Journal*. 78: 192-196. DOI: 10.2134/agronj1986.00021962007800010038x
- Monzon, J.P.; Grassini, P.; Andrade, J.F. 2022. Widespread Soil Nutrient Mining in the South American Pampas [Abstract]. ASA, CSSA, SSSA International Annual Meeting, Baltimore, MD.
- Ning, P.; Fritschi, F.B.; Li, C. 2017. Temporal dynamics of post-silking nitrogen fluxes and their effects on grain yield in maize under low to high nitrogen inputs. *Field Crops Research*. 204: 249–259. DOI: 10.1016/j.fcr.2017.01.022
- Olmedo Pico, L.B., Vyn, T.J., 2021. Dry matter gains in maize kernels are dependent on their nitrogen accumulation rates and duration during grain filling. *Plants*. DOI: 10.3390/plants10061222
- Orcellet, J.; Reussi-Calvo, N.I.; Sainz Rozas, H.R.; Wyngaard, N.; Echeverria, H.E. 2017. Anaerobically incubated nitrogen improved nitrogen diagnosis in corn. *Agronomy Journal*. 109: 291–298. DOI: 10.2134/agronj2016.02.0115
- Otegui ME. 1992. Incidencia de una sequía alrededor de antesis en el cultivo de maíz. Consumo de agua, producción de materia seca y determinación del rendimiento. Tesis de *Magister Scientiae*. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata. 93 pp
- Otegui M.E.; Riglos, M.; Mercau, J. 2021. Genetically modified maize hybrids and delayed sowing reduced drought effects across a rainfall gradient in temperate Argentina. *Journal of Experimental Botany*. 72: 5180–5188. DOI: 10.1093/jxb/erab139
- Otegui M.E.; Andrade, F.H. 2000. New relationships between light interception, ear growth, and kernel set in maize. In: M.E. Westgate y K.J. Boote (Eds.), *Physiology and Modeling Kernel Set in Maize*. CSSA and ASA, Madison, WI. p. 89-102.
- Pagani, A.; Echeverria, H.; Andrade, F.; Sainz Rosas, H. 2012. Effects of nitrogen and sulfur application on grain yield, nutrient accumulation, and harvest indexes in maize. *Journal of Plant Nutrition*. 35:1080-1097. DOI: 10.1080/01904167.2012.671410
- Pagani, A.; Echeverria, H. 2012. Influence of sulfur deficiency on chlorophyll-meter readings of corn leaves. *Journal of Plant Nutrition*. 175:604-613. DOI: 10.1002/jpln.201100161
- Reussi Calvo, N.I.; Wyngaard, N.; Orcellet, J.; Sainz Rozas, H.R.; Echeverría, H. 2018. Predicting field-apparent nitrogen mineralization from anaerobically incubated nitrogen. *Soil Science Society of America Journal*, 82: 502-508
- Reussi Calvo, N.I.; Studdert, G.A.; Calandrone, M.B.; Diovisalvi, N.V.; Cabria, F.N.; Berardo, A. 2014. Anaerobically incubated nitrogen and organic carbon in cropped soils of Buenos Aires province. *Ciencia Del Suelo*, 32: 189–196.

- Ritchie, S.W.; Hanway, J.J. 1982. How a corn plant develops. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Service. Ames, Iowa, USA. Special Report 48. 21 p.
- Sainz Rozas, H. 2019. Resumen. Relevamiento y determinación de propiedades químicas en suelos de aptitud agrícola de la Región Pampeana. Simposio de Fertilidad, Rosario, pp. 8-9.
- Sainz Rozas, H.; Echeverría, H.; Angelini, H. 2011. Niveles de materia orgánica y pH en suelos agrícolas de la región pampeana y extrapampeana argentina. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 2:6-12.
- Sainz Rozas, H.R.; Calviño, P.A.; Echeverría, H.E.; Barbieri, P.A.; Redolati, M. 2008. Contribution of anaerobically mineralized nitrogen to the reliability of planning or presidedress soil nitrogen test in maize. *Agronomy Journal*. 100:1020–1025. DOI: 10.2134/agronj2007.0077
- Sainz Rozas, H.R.; Echeverría, H.E. 1998. Relación entre las lecturas del medidor de clorofila (Minolta SPAD 502) en distintos estadíos del ciclo del cultivo de maíz y el rendimiento en grano. *Revista de la Facultad de Agronomía. La Plata*. 103:37-44.
- SIGA- Sistema de informacion y gestión agrometeorológica. 2024. [en línea] < <https://siga.inta.gob.ar/#/> / > [consulta 26 de abril 2024]
- Shaw, R.H. 1988. Climate requirement. p. 609–638. In G.F. Sprague and J.W. Dudley (ed.) *Corn and corn improvement*. 3rd ed. Agron. Monogr. 18. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.
- 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: 1376–1383. DOI: 10.2135/cropsci1995.0011183X003500050020x
- Walkley, A.; Black, Y. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and proposed codification of the chromic acid titration method. *Soil Science*. 37:29– 38. DOI: 10.1097/00010694-193401000-00003
- Waring, S.A.; Bremner, J.M. 1964. Ammonium production in soil under waterlogged condition as an index of nitrogen availability. *Nature*. 201:951-952.
- Zhao, B.; Ataul-Karim, S.T.; Liu, Z.; Zhang, J.; Xiao, J.; Liu, Z.; (...); Duan, A. 2018. Simple assessment of nitrogen nutrition index in summer maize by using chlorophyll meter readings. *Frontiers in Plant Science*. 9:1–13.