

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOMAS DE ZAMORA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS



Trabajo Final de Grado

**“Estrategias de fertilización de maíz en la Cuenca del
Salado”**

Cadez Fina Tomas Alejandro

Director: García Stepien, Luis Ezequiel

Lomas de Zamora, Septiembre de 2023

Estrategias de fertilización de maíz en la Cuenca del Salado.
Cadez Fina, T.A.

“Las opiniones expresadas por el autor de este Trabajo no representan necesariamente los criterios de la Carrera de Ingeniería Agronómica de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad de Lomas de Zamora”

Estrategias de fertilización de maíz en la Cuenca del Salado.
Cadez Fina, T.A.

Resumen

La sostenibilidad de los sistemas de producción agrícola es una preocupación cada más importante en la agenda global. El maíz, como uno de los principales cultivos a nivel mundial, es un fiel reflejo de esta demanda insatisfecha. Dentro de las principales cuestiones de manejo que impactan en la producción de este cereal, se destaca la fertilización, el impacto ambiental y los costos de la producción, entre otras. El uso de nuevas estrategias de fertilización, como la aplicación de nano-partículas, podría mejorar el rendimiento de los cultivos con dosis más bajas, además de ser una mejor alternativa económica frente a una estrategia de fertilización convencional. En este sentido el objetivo de este trabajo fue evaluar diferentes alternativas de fertilización de un cultivo de maíz, a nivel de rendimiento y económico, producido en un ambiente representativo de la Cuenca del Salado. El ensayo se realizó durante la campaña 2021/2022 en la localidad de General Belgrano, provincia de Buenos Aires. Se aplicaron cinco tratamientos de fertilización: T1 (testigo, sin fertilización), T2 (120 kg ha⁻¹ MAP + 120 kg ha⁻¹ UREA), T3 (3 l ha⁻¹ Mist P + 3 l ha⁻¹ Mist N), T4 (60 kg ha⁻¹ MAP + 3 l ha⁻¹ Mist P + 3 l ha⁻¹ Mist N + 50 kg ha⁻¹ UREA), T5 (Mist VG + 50 kg ha⁻¹ MAP + 3 l ha⁻¹ Mist P + 50 kg ha⁻¹ UREA + 3 l ha⁻¹ Mist N). Se evaluaron las siguientes variables: número de hileras por espiga, número de granos por hilera, peso de 1000 semillas y rendimiento en grano. Por otro lado, se calcularon los márgenes brutos y rendimientos de indiferencia para cada tratamiento. El mayor rendimiento lo obtuvo el T2 (MAP + UREA) pero necesitó de un costo mucho mayor en comparación con otros tratamientos. Estos rindieron menos, pero tuvieron un costo mucho menor, siendo interesante para planteos en situaciones que suceden en la actualidad.

Abstract

The sustainability of agricultural production systems is an increasingly important concern on the global agenda. Maize, as one of the main crops worldwide, is a faithful reflection of this unsatisfied demand. Among the main management issues that impact the production of this cereal, fertilization, environmental impact and production costs stand out, among others. The use of new fertilization strategies, such as the application of nanoparticles, could improve crop yields with lower doses, as well as being a better economic alternative to a conventional fertilization strategy. In this sense, the objective of this work was to evaluate different fertilization alternatives for a corn crop, at a yield and economic level, produced in a representative environment of the Salado Basin. The trial was carried out during the 2021/2022 campaign in the town of General Belgrano, province of Buenos Aires. Five fertilization treatments were applied: T1 (control, without fertilization), T2 (120 kg ha⁻¹ MAP + 120 kg ha⁻¹ UREA), T3 (3 l ha⁻¹ Mist P + 3 l ha⁻¹ Mist N), T4 (60 kg ha⁻¹ MAP + 3 l ha⁻¹ Mist P + 3 l ha⁻¹ Mist N + 50 kg ha⁻¹ UREA), T5 (Mist VG + 50 kg ha⁻¹ MAP + 3 l ha⁻¹ Mist P + 50 kg ha⁻¹ UREA + 3 l ha⁻¹ Mist N). The following variables were evaluated: number of rows per spike, number of grains per row, weight of 1000 seeds and grain yield. On the other hand, gross margins and indifference yields were calculated for each treatment. The highest performance was obtained by T2 (MAP + UREA) but it required a much higher cost compared to other treatments. These yielded less, but had a much lower cost, being interesting for proposals in situations that occur today.

Contenido

Índice de Figuras.....	6
Índice de Tablas.....	6
Tabla de Acrónomos	8
1-INTRODUCCIÓN	9
1.a. Características del cultivo de maíz	9
1.b. Evolución del Rendimiento de maíz en Argentina.....	10
1.c. Requerimientos hídricos del cultivo y el cambio climático.....	12
1.d. Requerimientos nutricionales y estrategias de fertilización en maíz	13
1.e. Problemática actual de los fertilizantes	14
1.f. Características de los nano-fertilizantes	16
Características de Cuenca del Salado.....	17
2. OBJETIVOS E HIPOTESIS.....	20
2.a. Objetivo General	20
2.b. Objetivos específicos:	20
2.c. Hipotesis general	20
2.d. Hipotesis específicas	21
3. MATERIALES Y MÉTODOS	22
3.a. Ubicación geográfica	22
3.b. Características Edáfo-climáticas:.....	23
Edáficas:	23
Climática	25
3.c. Material genético utilizado.....	27
3.d. Manejo de cultivo y diseño experimental	28
A continuación, se desarrollará una breve descripción de cada uno de los fertilizantes utilizados en los diferentes tratamientos:	29
3.e. Determinaciones en el cultivo	31
Sobre el cultivo de maíz se determinó el número de espigas por planta, el número de hileras por espiga y el peso de 1000 semillas (P1000).....	31
3.f. Análisis Económico	32

Estrategias de fertilización de maíz en la Cuenca del Salado.
Cadez Fina, T.A.

Margen Bruto	32
Rendimiento de Indiferencia	32
3.g. Análisis estadístico	33
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	34
CONCLUSIONES.....	45
BIBLIOGRAFÍA	47

Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama de planta completa de maíz (<i>Zea mays</i> L.).....	10
Figura 2. Evolución de los rendimientos del cultivo de maíz en el período 1970-2019.	12
Figura 3. Cambio climático del fenómeno Niño/Niña en océano Pacífico.	13
Figura 4. Evolución del consumo de fertilizantes, expresados en miles de toneladas de N, P ₂ O ₅ y K ₂ O, en el período 2006 a 2021.	15
Figura 5. Diagrama de comparación entre las distintas formas de nutrición de cultivos.	17
Figura 6. Ubicación de la Cuenca del Salado en el mapa de la República Argentina...	18
Figura 7. Toposecuencia típica Cuenca del Salado.	19
Figura 8. Ubicación de cada uno de los tratamientos en el ensayo	22
Figura 9. Caracterización edáfica ensayo según la carta de suelos de INTA.	23
Figura 10. Precipitaciones durante ciclo del cultivo desde la siembra a la cosecha en Gral. Belgrano, Bs. As.....	26
Figura 11. Caracterización meteorológica durante la realización del ensayo. Precipitaciones diarias, Temperaturas mínima, media y máxima diaria.....	27
Figura 12. Diferencial de rendimiento sobre el testigo para cada uno de los tratamientos.	41

Índice de Tablas

Tabla 1. Características químicas de las series de suelos presentes en el ensayo.....	24
Tabla 2. Características químicas de suelo del ensayo	25

Estrategias de fertilización de maíz en la Cuenca del Salado.
Cadez Fina, T.A.

Tabla 3. Valores medios de N° de hileras espiga-1 para cada tratamiento de fertilización.	35
Tabla 4. Valores medios de N° de granos hilera-1 para cada tratamiento de fertilización.	36
Tabla 5. Valores medios de peso de mil semillas (gr) para cada tratamiento de fertilización.	38
Tabla 6. Rendimientos medios correspondientes a los distintos tratamientos de fertilización.	39
Tabla 7. Correlación de Pearson para los principales componentes de Rendimiento (Coeficientes\probabilidades).....	40
Tabla 8. Margen Bruto de los distintos tratamientos de fertilización	43

Tabla de Acrónimos

% p/p: Porcentaje peso a peso.

Ca: Calcio. Elemento químico.

cc: Centímetro cúbico. Unidad de medida de volumen.

cm: Centímetro. Unidad de medida de distancia.

cv: Coeficiente de variación.

dap: Densidad aparente. Medida de relación entre masa y volumen.

Dms: Valor calculado a un determinado nivel de significancia.

fe: Hierro. Elemento químico.

gr: Gramo. Unidad de medida de peso.

ha: Hectárea. Unidad de medida de superficie.

Lt: Litro. Unidad de medida de volumen.

m: Metro. Unidad de medida de distancia.

Mg: Magnesio. Elemento químico.

mm: Milímetro. Unidad de medida de distancia.

Mtn: Millones de toneladas. Unidad de medida de peso.

N: Nitrógeno. Elemento químico.

nm: Nanómetro. Unidad de medida de tamaño.

Nº: Numeración.

P: Fósforo. Elemento químico.

pH: Unidad de medida del grado de acidez o alcalinidad de una sustancia o una solución

pl: Plantas.

S: Azufre. Elemento químico.

Si: Silicio. Elemento químico.

tn: Tonelada. Unidad de medida de peso.

USD: dólar estadounidense. Moneda.

°C: Grados Celsius. Unidad de medida de temperatura.

1-INTRODUCCIÓN

1.a. Características del cultivo de maíz

El maíz (*Zea mays* L.) es el cereal más producido a nivel mundial, seguido por el trigo (794 millones de toneladas) y el arroz (516 millones de toneladas) (Andrade *et al.*, 2023). Mundialmente se producen 1150 millones de toneladas de grano, en una superficie de 197 millones de hectáreas y con un rendimiento promedio de 5,2 tn ha⁻¹. Los mayores productores son EEUU y China, que ocupan el 58 % de la producción mundial; Argentina se encuentra dentro de los tres principales exportadores mundiales con una producción de 55,2 Mtn (Conde *et al.*, 2023).

En cuanto a sus características botánicas, el maíz, es una especie monocotiledónea, anual, de ciclo estival y metabolismo de carbono C4 (Figura 1). Su reproducción es hermafrodita, diclino monoica. La inflorescencia masculina es en panoja, que se encuentra en posición apical, y la inflorescencia femenina es en espiga que se encuentra en posición axilar, siendo la polinización cruzada y netamente anemófila (Valla, 1996).



Figura 1. Diagrama de planta completa de maíz (*Zea mays* L.).

1.b. Evolución del Rendimiento de maíz en Argentina

El rendimiento del cultivo de maíz fue creciendo de forma sostenida a lo largo del tiempo, debido principalmente a su desarrollo genético (mayor potencial de rendimiento, tolerancia al estrés, enfermedades, vuelco, entre otros) y a mejoras en las tecnologías relacionadas al manejo de cultivo (Figura 2).

El desarrollo moderno del cultivo de maíz en la Argentina se inició en la década de 1970 con la utilización de híbridos dobles (HD), con los que se alcanzaban rendimientos promedio de 2.700 kg ha^{-1} . A partir de la década del '90, se consolidaron los híbridos simples (HS) de mayor potencial de rendimiento. Esto fue acompañado por la utilización de nuevas tecnologías como el uso de herbicidas para el control de malezas, el uso de insecticidas y fungicidas, la fertilización química, la mejora en la mecanización agrícola, entre otras. Esto permitió que estos genotipos comenzaran a expresar su potencial (Figura 2) (Rossi, 2007). En este sentido, los rendimientos

Estrategias de fertilización de maíz en la Cuenca del Salado.
Cadez Fina, T.A.

promedio obtenidos en las décadas posteriores siguieron en aumento, 6.300 kg ha⁻¹ y 6.960 kg ha⁻¹ para las décadas del 2000 y 2010, las ganancias de rendimiento por año fueron cada vez menores. La variación de esta tendencia se debió a las fluctuaciones interanuales del clima que caracterizó los últimos años (García Stepien, 2020). A su vez, la década del 2010 se caracterizó por un incremento en la superficie sembrada en fechas de siembra tardía, pasando de un 33 % en el 2011 hasta un pico de 60 % en el 2015, para luego estabilizarse alrededor de un 48 % en las campañas posteriores (Gago *et al.*, 2018). El avance genético, los cambios en el ambiente productivo de la mano del mapeo de lote sumado al manejo de fertilización, los cultivos de servicios, y el estudio y difusión de herramientas de manejo tienen su correlato en la exploración de nuevos techos productivos que actualmente llevan a rendimientos de 8.000 a 9.000 kg ha⁻¹ en promedio (Álvarez, 2022). Aunque en este sentido, Ramirez-Cabral *et al.* (2017) resaltan que los rendimientos máximos no se están alcanzando debido a una falta en el entendimiento de procesos y mecanismos relacionados con la determinación del rendimiento, el ambiente donde se encuentra el cultivo es determinante en el resultado final de todo el proceso.

Estrategias de fertilización de maíz en la Cuenca del Salado. Cadez Fina, T.A.

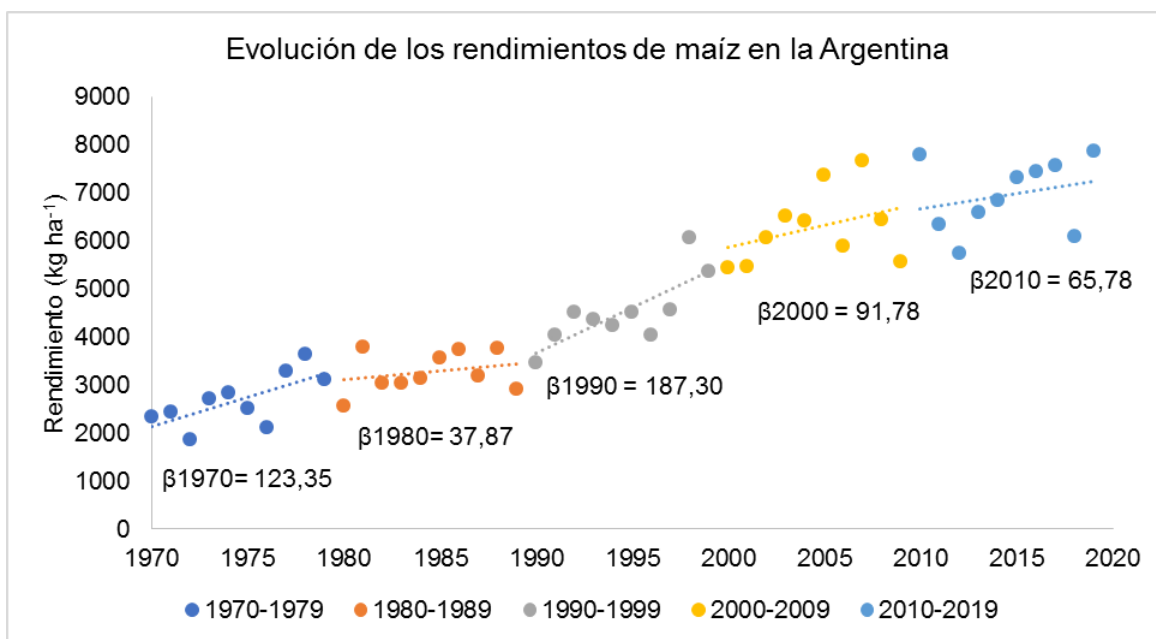


Figura 2. Evolución de los rendimientos del cultivo de maíz en el período 1970-2019.

Referencias: Datos de rendimiento promedio de maíz desde el año 1970 al 2019. Fuente: Ministerio de Agroindustria de la República Argentina (Minagri, 2020), (Adaptado de García Stepien, 2020).

1.c. Requerimientos hídricos del cultivo y el cambio climático

En cuanto a sus requerimientos hídricos, en un ciclo de cultivo se necesitan aproximadamente entre 450 y 900 mm de agua, con picos en el momento cercano a la fase reproductiva del cultivo, donde tiene el máximo requerimiento y pueden necesitarse unos 8 mm diarios. Un rendimiento promedio para la zona de Cuenca del Salado varía entre 6,3 a 6,7 tn ha⁻¹, y resulta importante tener en cuenta las características de la zona que afectan estos valores (Marek *et al.*, 2020).

Actualmente las producciones agropecuarias a nivel mundial, se encuentran afectadas por el fenómeno Climático "Niño/Oscilación del Sur" (ENOS), que alterna años con excesos hídricos "Niño" y años de sequía "Niña". Este es un fenómeno natural está producido por la fluctuación de las temperaturas del océano en la parte central y

Estrategias de fertilización de maíz en la Cuenca del Salado.
Cadez Fina, T.A.

oriental del Pacífico ecuatorial, asociada a cambios en la atmósfera (Bartolomé *et al.*, 2004). En aquellos años con marcadas deficiencias hídricas durante los periodos de cultivo de maíz, resulta clave realizar una adecuada evaluación hídrica y un correcto diagnóstico de la fertilidad para la recomendación de fertilización de cada lote, con el objetivo de aumentar la productividad y rentabilidad siendo eficientes y efectivos, no solo en el uso de los nutrientes, sino también del agua (Giménez, 2012).

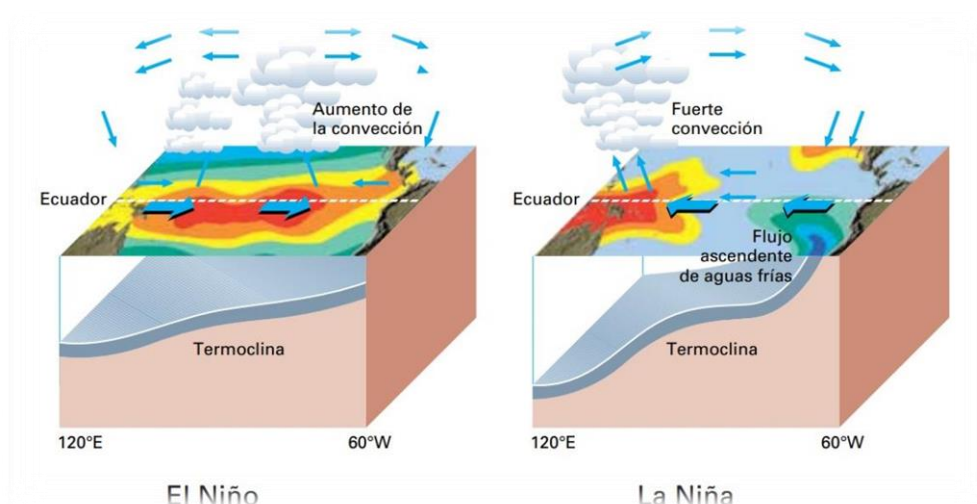


Figura 3. Cambio climático del fenómeno Niño/Niña en océano Pacífico.

Referencias: Esquemas de dinámica del fenómeno El Niño - La Niña, en el océano Pacífico central. Organización Meteorológica Mundial.

1.d Requerimientos nutricionales y estrategias de fertilización en maíz

Un cultivo de maíz de $10.000 \text{ kg ha}^{-1}$ de rendimiento en grano necesita absorber aproximadamente 220 kg ha^{-1} de nitrógeno (N), 40 kg ha^{-1} de fósforo (P) y 40 kg ha^{-1} de azufre (S), siendo su máxima demanda en floración y llenado de granos (García, 2005). La fertilización foliar se ha convertido en una práctica común e importante para los productores, porque corrige las deficiencias nutricionales de las plantas, favorece el buen desarrollo de los cultivos y mejora el rendimiento y la calidad del grano (Gibert *et*

Estrategias de fertilización de maíz en la Cuenca del Salado.
Cadez Fina, T.A.

al., 2005). Esta tecnología consiste en la aplicación, sobre las hojas del cultivo, de fertilizantes que se formulan en base a líquidos, polvos o cristales de alta solubilidad en agua (Fernández, 2015). La fertilización foliar no reemplaza a la fertilización tradicional de los cultivos, pero sirve de respaldo o apoyo para suplementar o completar los requerimientos nutrimentales de un cultivo que no se pueden abastecer mediante la fertilización común al suelo (Trinidad y Aguilar, 1999).

El rendimiento de los cultivos está basado inicialmente en la disponibilidad de nutrientes en el suelo. La adecuada nutrición mineral de un cultivo está influenciada por el conocimiento de los requerimientos de la planta, por la cantidad y disponibilidad nutrientes del suelo en donde se tiene el cultivo (Mengel y Kirkby, 2000). Cuando el suelo no puede suplir adecuadamente los nutrimentos para un normal desarrollo de las plantas, se hace necesario su adición en las cantidades y formas apropiadas (Salas, 2002).

1.e. Problemática actual de los fertilizantes

La creciente población mundial demanda alimentos y otros insumos. El mayor desafío que enfrentan los investigadores agrícolas en el siglo XXI es innovar y generar tecnología para producir la cantidad y calidad de comida suficiente para alimentar a esta población, sin degradar la salud del suelo y de los agroecosistemas (Bharadwaj, 2016). Desde 1990 los fertilizantes comenzaron a tener una mayor adopción por parte de los productores frente a la búsqueda de un mayor rendimiento para suplir la mayor demanda de alimentos.

*Estrategias de fertilización de maíz en la Cuenca del Salado.
Cadez Fina, T.A.*

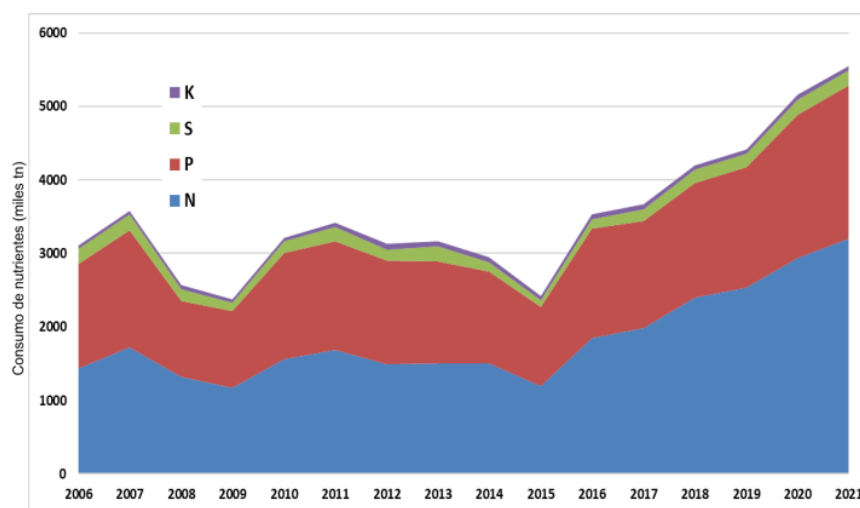


Figura 4. Evolución del consumo de fertilizantes, expresados en miles de toneladas de N, P2O5 y K2O, en el periodo 2006 a 2021.

Referencias: Adaptado de García (2022).

Los fertilizantes más demandados son los nitrogenados, como la Urea y el Nitrato de amonio y los fosforados, como el MAP y DAP (FAO, 2021). Esta situación en ciertas regiones del mundo derivó en un uso excesivo de fertilizantes, generando efectos adversos como la eutrofización, la toxicidad en el agua, la contaminación de aguas subterráneas y la contaminación de aire. La mayor problemática se debe a la lixiviación de estos productos a la napa. Por otro lado, los precios de los fertilizantes durante los últimos años llegaron a un máximo registrado en el 2021. El aumento más notable se registra en el precio de los fertilizantes nitrogenados, por ejemplo, la urea triplicó su precio en los últimos 12 meses, mientras que los fosfatados duplicaron su precio en promedio (FAO, 2023). La expansión y el desarrollo de las producciones agrícolas actuales se basan en la búsqueda de prácticas agrícolas sustentables, que intenten incrementar los niveles de producción y a su vez, mitiguen los daños sobre el agroecosistema.

1.f. Características de los nano-fertilizantes

La nano-tecnología se define como la comprensión y el control de materia en dimensiones de aproximadamente 1-100 nm, donde sus propiedades físicas únicas hacen posibles nuevas aplicaciones (Vila Seoane y Carullo, 2012). Los nano-fertilizantes forman parte de esta búsqueda de desarrollo a nivel de cultivo mejorando las calidades y en nivel de producción. Es un producto compuesto por nano-partículas o que emplea la nano-tecnología para mejorar la eficiencia nutricional en las plantas (Figura 5). Se emplean formulaciones con algún tipo de material nano-estructurado, con tamaños en el rango del nanómetro (nm) equivalente a la mil millonésima parte de un metro (Pérez de Luque, 2018). Las nano-tecnologías se basan en la utilización de partículas cada vez más pequeñas, que buscan aumentar la superficie específica, generar reacciones en mayor cantidad y más eficientes, bajar costos de aplicación y de logística. Representan una nueva frontera para la comunidad investigadora, mejorando la productividad agrícola a través de la resolución de problemas no solucionados convencionalmente (Lira-Saldivar y Méndez-Arguello, 2016).

Los fertilizantes convencionales se caracterizan generalmente por tener una baja eficiencia, cercana al 20 %, en cuanto a la cantidad que realmente aprovecha la planta (Gliessman, 2002). La mayor parte de las pérdidas se pueden asociar a la disposición de aplicación. Generalmente vienen en forma de sales solubles, que en contacto con agua del suelo y los microorganismos pueden ser lavados fácilmente, y también pueden ser adsorbidos por las arcillas cuando se encuentran como iones solubles (Barbieri *et al.*, 2018). Por otro lado, los nano-materiales se descomponen más lentamente y dan una fuente continua de iones a la cercanía de la raíz o la propia

Estrategias de fertilización de maíz en la Cuenca del Salado.
Cadez Fina, T.A.

planta; algunos de estos materiales pueden ser absorbidos y ser almacenados en los tejidos, descomponiéndose, evitando las pérdidas por lavado, descomposición e inmovilización comentado en los fertilizantes convencionales (Boraste *et al.*, 2009).

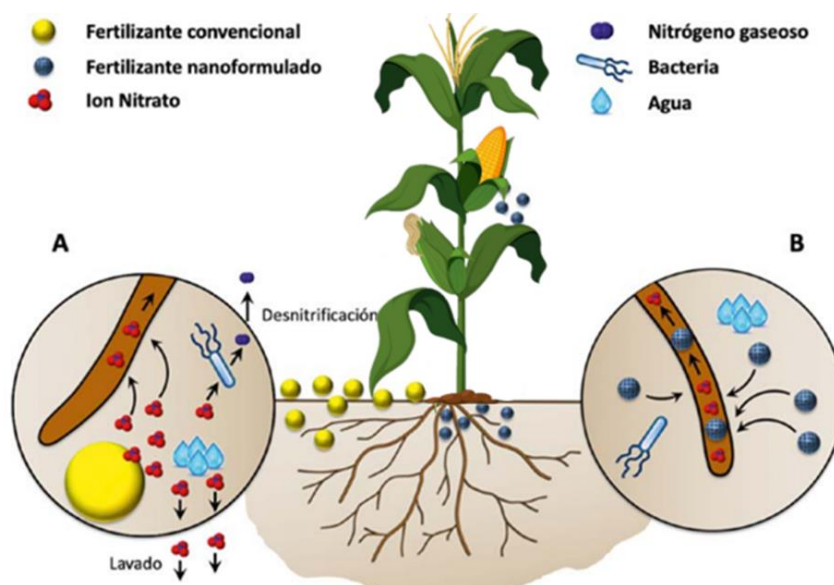


Figura 5. Diagrama de comparación entre las distintas formas de nutrición de cultivos.

Referencias: Adaptado de Pérez de Luque, 2020.

Caraterísticas de Cuenca del Salado

La Cuenca del Río Salado (Figura 6) se desarrolla en el área central y norte de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Se encuentra dentro de la Pampa Deprimida, ubicándose a lo largo del cauce del Río Salado. Comprende alrededor de 9 millones de hectáreas equivalentes a un 30 % de la superficie de la provincia (Iglesias de Cuello, 1982). El área es típicamente ganadera, pero hay zonas donde se pudo incorporar la agricultura. Esto se corresponde a los lugares con los mejores suelos y con el desplazamiento de la ganadería a los ambientes más restrictivos.

Estrategias de fertilización de maíz en la Cuenca del Salado.
Cadez Fina, T.A.



Figura 6. Ubicación de la Cuenca del Salado en el mapa de la República Argentina.

Referencia: En azul se indica la superficie que abarca la Cuenca del Río Salado, incluyendo las provincias de Buenos Aires y Sur de Santa Fé. Adaptado de Iglesias de Cuello, 1982.

La Cuenca del Río Salado se caracteriza por tener un horizonte de topografía plano con relación al mar. Es un ambiente de pastizales, predominantemente, de herbáceas, variando entre bajos, media lomas y lomas. Cada una de estas ubicaciones se encuentran a lo largo de toda la cuenca modelando el tipo de suelo y de esta manera las condiciones de crecimiento. Las comunidades han sido definidas mediante el método fitosociológico de Braun-Blanquet (1979) que combina los parámetros de abundancia-cobertura de los grupos florísticos. Éstas se modelan de acuerdo con la posición topográfica en el terreno y a la mayor o menor influencia del hidromorfismo y halomorfismo en los suelos (Moyano, 2012). Las comunidades han sido denominadas A (Loma), B (Media loma), C (Bajo dulce) y D (Bajo salino) (León, 1975; Fernández Grecco, 1997) como puede verse en la Figura 7.

Estrategias de fertilización de maíz en la Cuenca del Salado. *Cadez Fina, T.A.*

Los suelos de la cuenca, presentan grandes problemas de hidromorfismo y halomorfismo, características de los lotes que son condicionantes a la hora de querer encarar un proyecto productivo.



Figura 7. Toposecuencia típica Cuenca del Salado.

Referencia: Adaptado de Batista *et al.* 2005.

En cuanto al clima, presenta una temperatura templada promedio de entre 13 y 16 °C durante el año. Presenta picos de temperaturas máximas de 32 °C en verano y .las temperaturas mínimas durante el mes de julio se encuentran entre 7 y 9 °C. El régimen de precipitaciones es isohigro con unos 1.100 mm anuales, variando desde los 1.300 hasta los 800 mm. En los últimos años, el número y porcentaje de precipitaciones durante el invierno, fue decreciendo abruptamente (García *et al.*, 2018).

Debido a las condiciones tan complejas encontradas en la zona de Cuenca del Salado, resulta importante y de gran interés el estudio de la aplicación de nuevas tecnologías de nutrición en cultivos como el maíz de gran importancia económica, buscando resultados en rendimiento y alternativas frente a situaciones variadas. Estas nuevas tecnologías aportarían una mayor eficiencia de uso para la planta y de aplicación,

además de una reducción del efecto negativo que se produce a nivel ecológico con la fertilización convencional (García *et al.*, 2018).

2. OBJETIVOS E HIPOTESIS

2.a. Objetivo General

- Evaluar el efecto de diferentes alternativas de fertilización en un cultivo de maíz, producido en un ambiente representativo de la Cuenca del Salado, sobre los componentes de rendimiento en planta y el beneficio económico.

2.b. Objetivos específicos:

- I. Comparar los efectos de diferentes alternativas de fertilización, con la inclusión de los nano-fertilizantes, sobre el número de hileras por espiga, número de granos por hilera, peso de 1000 semillas, el rendimiento en grano de un cultivo de maíz y la diferencia de rendimiento.
- II. Evaluar económicamente a través de un margen bruto y el rendimiento de indiferencia, diferentes alternativas de fertilización, con la inclusión de los nano-fertilizantes, en el cultivo de maíz.

2.c. Hipotesis general

- El uso de diferentes alternativas de fertilización de un cultivo de maíz producido en un ambiente representativo de la Cuenca del Salado afecta el nivel de rendimiento en planta y el rendimiento económico.

2.d. Hipotesis específicas

- I. El uso de estrategias de fertilización con nano-fertilizantes en la producción de maíz incrementa el número de hileras por espiga, número de granos por hilera, peso de 1000 semillas, rendimiento en grano y la diferencia de rendimiento frente a una fertilización convencional.
- II. Los nano-fertilizantes presentan como beneficio un menor riesgo económico frente a una fertilización convencional.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.a. Ubicación geográfica

El ensayo fue realizado en la campaña 2021/2022 en el campo experimental perteneciente a Kioshi Stone S.A, llamado “El Chulengo” situado en la localidad de Newton, partido de General Belgrano, Provincia de Buenos Aires (Lat. 35° 90.4’ S – Long. 58° 67.4’ O) (Figura 8).



Figura 8. Ubicación de cada uno de los tratamientos en el ensayo

Referencias: Imagen satelital extraída de google earth. Coordenadas: 35° 90,4' de latitud sur y 58° 67,4' de longitud oeste.

3.b. Caracterización ambientales:

Características edáficas:

El campo se encuentra ubicado dentro de la carta de suelos 3560-36-4 CHAS (MAYG. Carta de Suelos de la República Argentina) y se distinguen dos unidades cartográficas (Figura 9):

- **Sa5:** Consociación series Saladillo (50 %), Saladillo, fase algo pobremente drenada (30 %) y Monte (20 %).
- **Tyu:** Complejo series Tuyutí (60 %), Tronconi (30 %) y Videla Dorna (10 %).

Los suelos varían entre clase II y VI, siendo los de clase II netamente con capacidad agrícola y los de clase VI netamente ganaderos. Ambas unidades cartográficas con una subclase “ws”, lo que se corresponde con problemas de presencia de sales, baja capacidad de drenaje y profundidad.

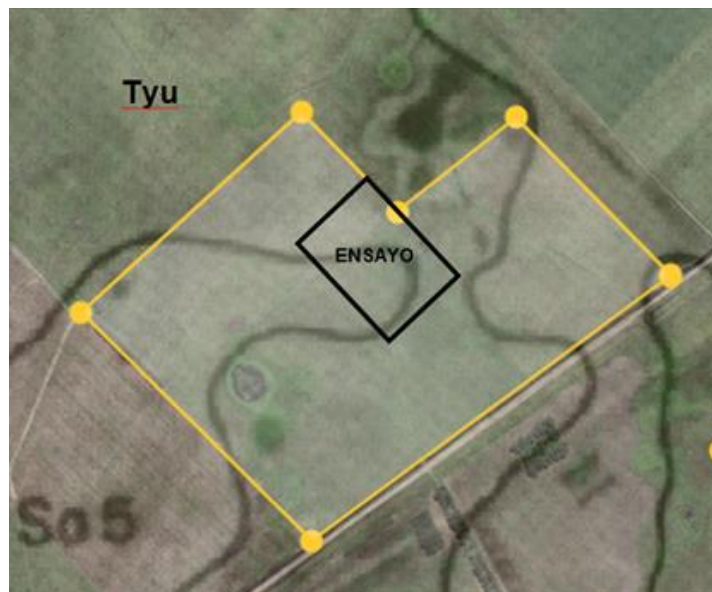


Figura 9. Caracterización edáfica ensayo según la carta de suelos de INTA.

Referencias: Visor Geolnta, Carta de suelos 3560-36-4 CHAS Escala 1:50.000.

Estrategias de fertilización de maíz en la Cuenca del Salado.
Cadez Fina, T.A.

El ensayo se realizó sobre las series Tuyutí y Saladillo. La serie Tuyutí (Tabla 1) es un suelo grisáceo, poco profundo, de aptitud ganadera, se encuentra en un paisaje de planicies bajas, en posición de bajo, pobremente drenado, formado sobre sedimentos loésicos, fuertemente alcalino y salino desde la superficie. Mientras que la serie Saladillo (Tabla 1), es un suelo muy oscuro, profundo, de aptitud agrícola que se encuentra en un paisaje ondulado a suavemente ondulado de la Subregión Pampa Arenosa, ocupa la media loma baja, no alcalino y tampoco salino (INTA, 1974).

Variable	Unidad	Serie	
		Tuyutí	Saladillo
Profundidad	Cm	5 a 20	5 a 20
pH actual (1:2.5 agua)	s/u	10,50	6,30
Materia Orgánica	%	1,51	5,25
Nitrógeno Orgánico	%	0,07	0,39
C/N	s/u	9,00	10,00

Tabla 1. Características químicas de las series de suelos presentes en el ensayo.

s/u: sin unidad

Para determinar con mayor exactitud las propiedades químicas del suelo donde se realizó el ensayo, se llevó a cabo un análisis utilizando la tecnología SoilOptix®. Este es un sistema de mapeo de nutrientes de suelo de alta definición, que permite generar mapas con 1000 datos de cada nutriente por hectárea. Los valores promedio figuran en la Tabla 2.

Variable	Unidad	Valor
Profundidad	Cm	20
pH	pH	6,04
Cond	dS/m	0,107
MO	%	4,953
P	Ppm	11,709
N Total	%	0,248
N-NO3	Ppm	8,244
S	Ppm	21,38
K	meq/100 gr	0,887
Ca	meq/100 gr	5,966
Mg	meq/100 gr	1,32
Na	meq/100 gr	0,359
CIC	meq/100 gr	12,281

Tabla 2. Características químicas de suelo del ensayo

Caracterización meteorológica:

Para esta caracterización se utilizó la base de datos agrometeorológicos de INTA Castelar. La temperatura media de la zona es de 15,5 °C, la temperatura máxima media registrada fue de 30 °C y la mínima media fue de 4 °C. Durante la realización del ensayo la temperatura media del aire fue de 18,9 °C, la temperatura máxima registrada se produjo el 14/1/2022 con 42,3°C y la mínima fue el 31/5/2022 con -2,6 °C. De este modo se considera que la temperatura media estuvo por debajo de la óptima para el cultivo de maíz que se ubica aproximadamente entre 27 a 33°C (Warrington y Kanemasu, 1983). Es puede considerarse como una limitante. Por lado, la máxima registrada pudo haber afectado el rendimiento potencial de forma que disminuye a esa temperatura la capacidad fotosintética (Kiniry, 1991).

*Estrategias de fertilización de maíz en la Cuenca del Salado.
Cadez Fina, T.A.*

Las precipitaciones promedio del campo son de 970 mm con mayor porcentaje en los meses cálidos. Las precipitaciones acumuladas durante el periodo de cultivo fueron 402 mm (Sistema Meteorológico Nacional, 2022).

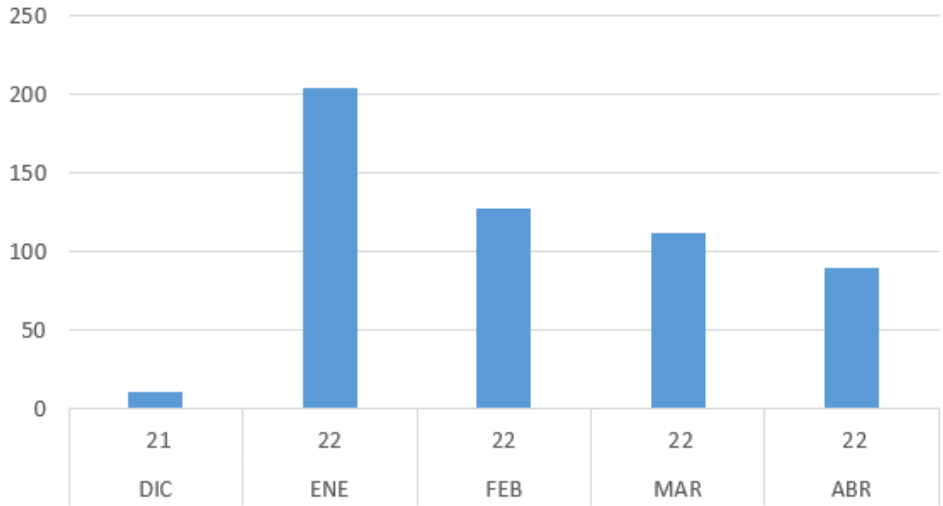


Figura 10. Precipitaciones durante ciclo del cultivo desde la siembra a la cosecha en Gral. Belgrano, Bs. As.

Referencia: Datos extraídos de www.siga.inta.gob.ar

Según la bibliografía, el cultivo precisa de 450-900 mm de agua según sean las condiciones ambientales (Marek *et al.*, 2020), de modo que se encontraría como otra limitante aunque particularmente para este caso, la mayor proporción de las lluvias se dieron durante el periodo crítico del cultivo, mediados de enero comienzos de febrero, como puede observarse en la Figura 10, aportando de esta forma la humedad necesaria para cumplir el ciclo. En cuanto al periodo de heladas comienza

Estrategias de fertilización de maíz en la Cuenca del Salado. Cadez Fina, T.A.

aproximadamente el 14 de mayo y finalizaría el 15 de septiembre (INTA Las Flores, 2012).

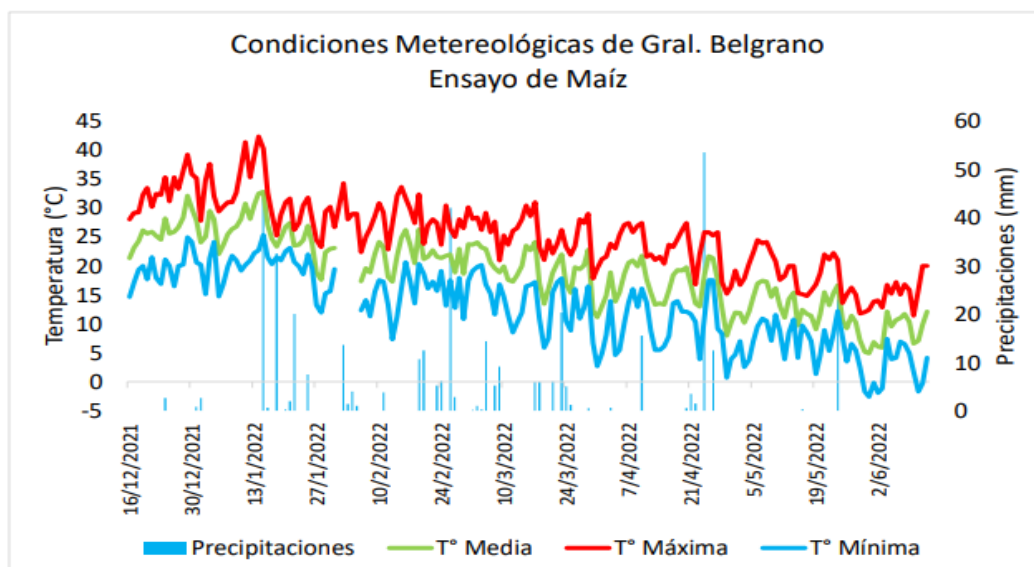


Figura 11. Caracterización meteorológica durante la realización del ensayo. Precipitaciones diarias, Temperaturas mínima, media y máxima diaria.

Referencia: Datos extraídos de www.siga.inta.gob.ar

3.c. Material genético utilizado

El híbrido de maíz utilizado fue el LT 718VT3PRO (La Tijereta), destacándose por su comportamiento en fechas de siembra temprana, su competitividad y rendimiento, el buen comportamiento frente al vuelco y quebrado del 0-1 % (Gambin y Borrás, 2021). Es un tipo de maíz dentado de cruzamiento simple, material de ciclo corto con un alto potencial de rendimiento, con una gran capacidad de adaptación en cada ambiente, estabilidad y buen rendimiento. Por otra parte, se destaca por su capacidad de pérdida de humedad que permite una cosecha más favorable, frente a diferentes híbridos competidores (Gallo y Marccasini, 2021). En múltiples ensayos de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola (CREA) (Giorgis, *et al.*, 2022) y el INTA

Estrategias de fertilización de maíz en la Cuenca del Salado.
Cadez Fina, T.A.

(Rausch y Trossero, 2022) fue destacado por su capacidad de secado. El material genético cuenta con una tecnología llamada VT3PRO que presenta tolerancia a herbicida glifosato, control sobre el barrenador del tallo (*Diatraea saccharalis*). Sin embargo, presenta fallas a campo en control de gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*) y no controla la oruga de la espiga (*Heliothis zea*).

3.d. Manejo de cultivo y diseño experimental

El híbrido fue sembrado el día 16/12/2021 con sembradora mecánica de placas con una densidad final promedio de 76.762 pl ha⁻¹, con una distancia entre surcos de 52,5 cm. El ensayo se sembró en franjas de cultivo de un ancho de 36 m y largo variable. Se utilizó un diseño es de Bloques Completos Aleatorizados (DBCA), ubicando los bloques de manera perpendicular a la pendiente, con 4 repeticiones para cada uno de los tratamientos. Se utilizaron cinco tratamientos con distintas alternativas de fertilización:

- T1 (testigo, sin fertilización)
- T2 (120 kg ha⁻¹ MAP + 120 kg ha⁻¹ UREA)
- T3 (3 l ha⁻¹ Mist P + 3 l ha⁻¹ Mist N)
- T4 (60 kg ha⁻¹ MAP + 3 l ha⁻¹ Mist P + 3 l ha⁻¹ Mist N + 50 kg ha⁻¹ UREA)
- T5 (Mist VG + 50 kg ha⁻¹ MAP + 3 l ha⁻¹ Mist P + 50 kg ha⁻¹ UREA + 3 l ha⁻¹ Mist N)

Para cada uno de los productos, el momento de aplicación es estratégico para obtener una mayor eficiencia y correlacionarlo con el momento fenológico clave. El Mist-P fue incorporado con pulverizadora en pre-emergencia del cultivo, MAP fue incorporado al

Estrategias de fertilización de maíz en la Cuenca del Salado.
Cadez Fina, T.A.

momento de la siembra, la UREA fue dispersada con voleadora en estado V3, mientras que el Mist-N fue pulverizado en el mismo estado fenológico.

A continuación, se desarrollará una breve descripción de cada uno de los fertilizantes utilizados en los diferentes tratamientos:

- **Fosfato Mono Amónico (MAP):** Es una fuente de fósforo (P) y nitrógeno (N). Es un fertilizante granulado, soluble en agua y que se disuelve rápidamente en el suelo con la humedad adecuada. Tras la disolución, los dos componentes básicos del fertilizante se separan nuevamente liberando amonio (NH_4^+) y ortofosfato (H_2PO_4^-). Su composición general es de 11-52-0.
- **Fosfato Di amónico (DAP):** Es fuente de N y P. Es un fertilizante granulado para aplicación del suelo. Su composición general es de 11-46-0.
- **Urea:** Es una fuente de N. La mayor desventaja que tiene es la pérdida de N en forma de gas amoníaco (NH_3), proveniente de su descomposición al ser aplicada al suelo. Su composición general es de 46-0-0.
- **Mist-P:** Es fuente de diversos nutrientes como P, azufre (S), calcio (Ca) y silicio (Si), entre otros. Es una dispersión de nano-partículas. Da una incorporación de P de alta eficiencia, además de una rápida asimilación del Ca. Su composición es de P: 20,5 %, Ca: 45,9 %, S: 22,1 %, Si: 11,5 %.
- **Mist-N:** Es fuente de N, Ca, magnesio (Mg) y S. Es una dispersión de nano-partículas minerales que aloja en sus poros el N, el *carrier* almacena y dosifica este elemento en la medida que la planta o suelo lo precise, compone una sinergia entre los

Estrategias de fertilización de maíz en la Cuenca del Salado.
Cadez Fina, T.A.

nutrientes que acompaña el crecimiento y no provocar un tipo de estrés en la planta. Su composición es de N: 27,0 %, Ca: 14,1 %, Mg: 6,5 %, S: 5,8 %.

- **Mist-VG:** Contiene múltiples elementos, N, S, Ca, Mg, Fe y Si. Es una suspensión de nano-partículas minerales. Es un vivificante de semillas que, darán una zona de confort en la rizosfera permitiendo la máxima expresión del Poder Germinativo de la semilla, dando un mayor desarrollo de la plántula. Su composición es de N: 4,7 %, S: 22,4 %, Ca: 26,7 %, Mg: 10,4 %, Fe: 10,3 %, Si: 1,6 %.

Control de malezas en el ensayo:

Las principales malezas presentes en el cultivo previo a la realización del barbecho fueron:

Rama negra (*Conyza bonariensis*).

Yuyo colorado (*Amaranthus quitensis*).

Pasto cuaresma (*Digitaria sanguinalis*)

Gramón (*Cynodon dactylon*).

El control de malezas en el barbecho se realizó con 2 lt ha⁻¹ de Glifosato, 1,5 lt ha⁻¹ 2,4D y 150 cc ha⁻¹ Dicamba. Con la finalidad de evitar la competencia de malezas durante el cultivo, en presiembra se aplicó 1 lt ha⁻¹ de Cletodim, 2 lt ha⁻¹ de Glifosato y y 1 kg ha⁻¹ de Atrazina como herbicidas de amplio espectro. Debido a la aparición de un

Estrategias de fertilización de maíz en la Cuenca del Salado.
Cadez Fina, T.A.

foco de Yuyo colorado (*Amaranthus quitensis*) y Rama negra (*Conyza bonariensis*) resistentes a Glifosato, en preemergencia se aplicó 1 lt ha⁻¹ de 2,4D, 2 kg ha⁻¹ Atrazina y 2 lt ha⁻¹ de Paraquat+Diuron. Por último, en postemergencia se realizó una aplicación de 100-cc ha⁻¹ de Topramezona por un escape de Yuyo colorado (*Amaranthus quitensis*).

3.e. Determinaciones en el cultivo

Sobre el cultivo de maíz se determinó el número de espigas por planta, el número de hileras por espiga y el peso de 1000 semillas (P1000).

El número de hileras por espiga (N° de hileras espiga⁻¹) se determinó realizando el recuento de las hileras desde la parte central de la espiga en cada una de las espigas cosechadas.

El número de granos por hilera (N° grano hilera⁻¹) se determinó contando el número de granos presente en cada hilera completar.

El peso de mil semillas (P1000) se determinó a partir del recuento de 1000 semillas, previamente trilladas con trilladora experimental, y el posterior pesado de las mismas, realizando dos repeticiones por tratamiento.

Para estimar el rendimiento en grano (R) se tuvieron en cuenta los componentes de rendimiento número de hileras por espiga, número de granos por hileras y peso de mil semillas.

El rendimiento se determinó con la siguiente ecuación:

$$\text{Rendimiento (kg ha}^{-1}\text{)} = \text{Rendimiento trilla (kg ha}^{-1}\text{)} \times \text{merma}$$

Estrategias de fertilización de maíz en la Cuenca del Salado.
Cadez Fina, T.A.

Por otro lado, la diferencia de rendimiento (Δ , refiere a la diferencia en kg gr^{-1} entre el testigo y el tratamiento estudiado, se determinó utilizando la siguiente ecuación:

$$\Delta \text{ Rendimiento } (\text{kg ha}^{-1}) = \text{Rendimiento testigo } (\text{kg ha}^{-1}) - \text{Rendimiento Tratamiento } (\text{kg ha}^{-1})$$

3.f. Análisis Económico

Margen Bruto:

Con el objetivo de comparar los distintos tratamientos desde su lado económico para una visión administrativa se elaboró un margen bruto para cada tratamiento.

La recolección de los datos generales se hizo a partir de datos brindados por el productor y se tomó en cuenta el valor de la tonelada a cosecha para ese momento, junio de 2022, 229,10 USD tn^{-1} (Bolsa de cereales 2022). Para la elaboración se tomaron en cuenta los costos directos (labores e insumos) e indirectos (gastos de comercialización y cosecha) para cada tratamiento. En los costos directos hubo una variación por la cuestión de la fertilización o insumos, pero el valor de labores fue el mismo. Mientras que los indirectos fueron similares para todos los tratamientos para hacer representativo el margen bruto, haciendo enfoque en la parte de costos directos del cultivo. Además, para el ingreso se comercializó a valor fijo el precio del grano de maíz.

Rendimiento de Indiferencia:

Estrategias de fertilización de maíz en la Cuenca del Salado.
Cadez Fina, T.A.

Con el objetivo de comparar los distintos tratamientos desde el riesgo productivo se utilizó rendimiento de Indiferencia (tn ha^{-1}), el cual se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Rendimiento de Indiferencia (kg tn}^{-1}\text{)} = \frac{\text{Costos Directos (USD ha}^{-1}\text{)}}{\text{Precio del maíz (USD tn}^{-1}\text{)}}$$

3.g. Análisis estadístico:

Los datos generados durante el ensayo fueron analizados utilizando en programa estadístico InfoStat 2020, se tuvo en cuenta el número de espigas por planta, número de hileras por espiga, número de granos por hilera, y peso de 1000 semillas y del rendimiento en grano.

Posteriormente, se realizó un análisis de varianza para determinar diferencias significativas entre los tratamientos al 1 % y al 5 %. Se realizó un test de comparación de medias de Diferencias Mínimas Significativas (DMS o LSD en inglés) para detectar grupos homogéneos.

Por último, se realizó un análisis de Correlación de Pearson para analizar la relación entre los distintos componentes de rendimiento y el Rendimiento en grano.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los resultados del trabajo realizado, donde se analizan las respuestas a los tratamientos basados en estrategias de fertilización, sobre las principales variables de rendimiento en un cultivo de maíz.

Número de hileras por espiga.

Al estudiar N° de hileras espiga⁻¹ no se encontraron diferencias estadísticas significativas ($p > 0,05$ o $0,01$) entre los tratamientos evaluados. Estos resultados coinciden con los de Velázquez, (2019) quien estableció que, la variación en el número de hileras por factores ambientales y de manejo es de escasa magnitud debido a que es un componente con un elevado peso genético. Barrios y Basso (2018) no encontraron una correlación significativa entre la cantidad de fertilizante aportado al cultivo y el componente de rendimiento número de hileras por espiga. El mismo puede llegar a ser afectado por la temperatura en el período fase de iniciación de la yema axilar que dará origen a la espiga, hasta el comienzo de la diferenciación floral (Bertrand, 1991). Sin embargo, la planta de maíz es poco sensible a variaciones en la radiación incidente (Bertrand, 1991), disponibilidad de nitrógeno (Uhart y Andrade, 1995), densidad de plantas y fecha de siembra (Andrade *et al.*, 1996) durante este periodo.

Estrategias de fertilización de maíz en la Cuenca del Salado.
Cadez Fina, T.A.

Tratamiento	Medias (kg ha ⁻¹)	Grupos homogéneos*
T1	13,8	A
T2	13,9	A
T3	13,7	A
T4	14,4	A
T5	13,7	A

Tabla 3. Valores medios de N° de hileras espiga⁻¹ para cada tratamiento de fertilización.

CV: 5,18 % DMS: 1,10 hileras espiga⁻¹

* Las letras distintas señalan diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$ o $p < 0,01$).

Referencias: T1 (testigo, sin fertilización), T2 (120 kg ha⁻¹ MAP + 120 kg ha⁻¹ UREA), T3 (3 l ha⁻¹ Mist P + 3 l ha⁻¹ Mist N), T4 (60 kg ha⁻¹ MAP + 3 l ha⁻¹ Mist P + 3 l ha⁻¹ Mist N + 50 kg ha⁻¹ UREA), T5 (Mist VG + 50 kg ha⁻¹ MAP + 3 l ha⁻¹ Mist P + 50 kg ha⁻¹ UREA + 3 l ha⁻¹ Mist N).

Número de granos por hilera.

Se encontraron diferencias significativas al 1 % para N° de granos hilera⁻¹ (Tabla 4). Si bien todos los tratamientos superaron al testigo (T1) los tratamientos que más se destacaron fueron el T2, T5 y T4. El número de granos hilera⁻¹ como puede verse reflejado en la tabla 7 constituye un factor importante en el rendimiento del maíz y es afectado por la fertilización nitrogenada (Díaz et al., 2009). Un déficit de N en el cultivo puede resultar en una disminución del tamaño celular y de la síntesis de proteínas, produciéndose granos con menor contenido de materia seca y por ende con menos peso, y mazorcas más pequeñas con menor número de granos/hilera (Cantarero et al., 2000). De los componentes de rendimiento en el cultivo de maíz, el número de

Estrategias de fertilización de maíz en la Cuenca del Salado.
Cadez Fina, T.A.

granos maduros es el que está más estrechamente relacionado con las variaciones en el rendimiento del maíz a campo (Cirilo, 1994; Otegui, 1995). Resulta importante llegar a fijar la mayor cantidad de granos posible durante el periodo crítico. La utilización de nanopartículas como estrategia de fertilización foliar radica en su eficiencia y velocidad de acción (García, 2018), sin embargo, debido a que las dosis utilizadas son muy bajas con respecto a una fertilización convencional, su respuesta absoluta en el cultivo es menor. Aunque también, hay que tener en cuenta que influyen múltiples factores ambientales, relacionados al clima, suelo overo presente de la zona, etc. (Gambin y Borrás, 2021).

Tratamiento	Medias	Grupos Homogéneos*
T2	31,05	A
T5	30,10	AB
T4	29,75	AB
T3	28,95	B
T1	28,20	B

Tabla 4. Valores medios de N° de granos hilera-1 para cada tratamiento de fertilización.

CV: 4,42 % DMS: 2,017 granos por hilera.

*Las letras distintas señalan diferencias estadísticas significativas ($p < 0,01$).

Referencias; T1 (testigo, sin fertilización), T2 (120 kg ha⁻¹ MAP + 120 kg ha⁻¹ UREA), T3 (3 l ha⁻¹ Mist P + 3 l ha⁻¹ Mist N), T4 (60 kg ha⁻¹ MAP + 3 l ha⁻¹ Mist P + 3 l ha⁻¹ Mist N + 50 kg ha⁻¹ UREA), T5 (Mist VG + 50 kg ha⁻¹ MAP + 3 l ha⁻¹ Mist P + 50 kg ha⁻¹ UREA + 3 l ha⁻¹ Mist N).

Peso de 1000 semillas.

La Tabla 5 presenta los valores medios de peso de mil semillas correspondientes a diferentes tratamientos de fertilización en el cultivo de maíz. Los resultados revelan que no hubo diferencias significativas ($p > 0,01$) entre los tratamientos, con valores que oscilan entre 297,68 gr y 274,85 gr. Estos hallazgos sugieren que la variación en la fertilización no influyó de manera significativa en el tamaño de las semillas de maíz.

Un estudio similar realizado por Borrás *et al.* (2004) respalda estos resultados al indicar que el peso de 1000 semillas de maíz no responde de manera marcada a modificaciones nutricionales. Esto implica que las condiciones adversas durante la etapa de fijación de los granos, así como las variaciones en la fertilización, pueden tener un impacto negativo en el rendimiento del cultivo sin poder ser compensadas a través de aumentos en el peso de los granos. El hallazgo de que el peso de 1000 semillas no es afectado significativamente por la fertilización puede estar relacionado con la importancia relativa de otros factores, como la genética de la variedad de maíz y las condiciones ambientales durante el desarrollo de los granos. Estos factores pueden tener un papel más influyente en la determinación del tamaño y peso de los granos de maíz que las modificaciones nutricionales a través de la fertilización.

Además, se ha observado que el tamaño de las semillas de maíz, representado por el peso de 1000 semillas, no es necesariamente un indicador confiable del rendimiento del cultivo. Un estudio realizado por Otegui *et al.* (2010) encontró que la variación en el

*Estrategias de fertilización de maíz en la Cuenca del Salado.
Cadez Fina, T.A.*

peso de 1000 granos no siempre se correlaciona directamente con el rendimiento de grano.

Tratamiento	Medias	Grupos Homogéneos*
T2	297,68	A
T5	293,93	A
T3	290,38	A
T1	277,88	A
T4	274,85	A

Tabla 5. Valores medios de peso de mil semillas (gr) para cada tratamiento de fertilización.

CV: 7,13% DMS: 31,54 gr.

*Las letras distintas señalan diferencias estadísticas significativas ($p < 0,01$ o $0,05$).

Referencias: T1 (testigo, sin fertilización), T2 (120 kg ha⁻¹ MAP + 120 kg ha⁻¹ UREA), T3 (3 l ha⁻¹ Mist P + 3 l ha⁻¹ Mist N), T4 (60 kg ha⁻¹ MAP + 3 l ha⁻¹ Mist P + 3 l ha⁻¹ Mist N + 50 kg ha⁻¹ UREA), T5 (Mist VG + 50 kg ha⁻¹ MAP + 3 l ha⁻¹ Mist P + 50 kg ha⁻¹ UREA + 3 l ha⁻¹ Mist N).

Rendimiento

Se encontraron diferencias significativas al 1 % para los tratamientos de fertilización en la variable Rendimiento (Tabla 6), siendo todos los tratamientos superiores a T1 (Testigo, Sin fertilización). La media general del ensayo fue de 7853 kg ha⁻¹, siendo el Tratamiento 2 (MAP + UREA) el que obtuvo el mayor rinde con 8710 kg ha⁻¹ (Tabla 6) y una diferencia sobre el Testigo de 1710 kg ha⁻¹ (Figura 5). El siguiente fue el Tratamiento 5 (Mist VG + MAP + Mist P + UREA + Mist N) con un valor de 8015 kg y un diferencial sobre T1 de 1015 kg ha⁻¹. Si bien, los Tratamientos 3 y 4 no difirieron significativamente del T1, el Tratamiento 3 (Mist P + Mist N) con 7776 kg ha⁻¹ y una

*Estrategias de fertilización de maíz en la Cuenca del Salado.
Cadez Fina, T.A.*

diferencia de 776 kg/ha sobre T1 y por último, el Tratamiento 4 (MAP + MIST P + UREA + MIST N) con 7766 kg ha⁻¹ y 766 kg ha⁻¹ de diferencia. El escaso nivel de respuesta de los tratamientos con respecto al testigo sobre lo esperado, puede deberse por las precipitaciones registradas durante la campaña.

En la Tabla 6 se presentan los resultados del rendimiento en grano para el cultivo de maíz. Asimismo, junto con estos resultados en la Figura 11 se presenta la diferencia de rendimiento

Tratamiento	Medias (kg ha ⁻¹)	Grupos Homogéneos*
2	8709,53	A
5	8015,24	AB
3	7776,19	BC
4	7765,71	BC
1	7000,00	C

Tabla 6. Rendimientos medios correspondientes a los distintos tratamientos de fertilización.

CV: 6,69 % DMS: 845,45 kg ha⁻¹.

*Letras iguales dentro de las filas indican grupos homogéneos. Las letras distintas señalan diferencias estadísticas significativas (p<0,01).

Referencias: T1 (testigo, sin fertilización), T2 (120 kg ha⁻¹ MAP + 120 kg ha⁻¹ UREA), T3 (3 l ha⁻¹ Mist P + 3 l ha⁻¹ Mist N), T4 (60 kg ha⁻¹ MAP + 3 l ha⁻¹ Mist P + 3 l ha⁻¹ Mist N + 50 kg ha⁻¹ UREA), T5 (Mist VG + 50 kg ha⁻¹ MAP + 3 l ha⁻¹ Mist P + 50 kg ha⁻¹ UREA + 3 l ha⁻¹ Mist N).

Los resultados de los tratamientos para la variable Rendimiento, se condicen con la respuesta observada en el N° de granos hilera⁻¹, siendo el principal componente de rendimiento por su correlación con el rendimiento final (r = 0,83) (Tabla 7). Puede

*Estrategias de fertilización de maíz en la Cuenca del Salado.
Cadez Fina, T.A.*

observarse una clara respuesta al incremento en dosis de insumo típica del cultivo de maíz coincidiendo con los resultados de (Salvagiotti, 2010). Sin embargo, es notoria la expresión a partir de las nuevas tecnologías como el vivificante de semillas y nano-fertilizantes utilizados en el Tratamiento 5 (Mist VG + MAP + Mist P + UREA + Mist N), donde combinado con la mitad de dosis de fertilizantes convencionales obtuvieron rendimientos similares que no difirieron estadísticamente de Tratamiento 2 (MAP + UREA). Por último, el Tratamiento 3 (Mist P + Mist N) obtuvo importantes resultados considerando su menor impacto ambiental. Estos resultados coinciden con los de distintos autores (Álvarez-Solís, 2010; Sosa *et al.*, 2019) quienes en su trabajo remarcan la mayor eficiencia de estas nuevas tecnologías de nutrición de cultivos además de su versatilidad, menor impacto ambiental y menores costos.

En la Tabla 7 se presenta la correlación de Pearson entre el número de hileras por espiga, grano por hilera, peso de 1000 semillas y el rendimiento en grano.

Coeficientes\probabilidades	N° hileras espiga ⁻¹	N° granos hilera ⁻¹	P1000	R
N° hileras espiga ⁻¹	1	0,22	0,96	0,9
N° granos hilera ⁻¹	0,34	1	3,50E-03	5,40E-06
P1000	0,62	-0,01	1	0,02
R	0,83	0,03	0,51	1

Tabla 7. Correlación de Pearson para los principales componentes de Rendimiento (Coeficientes\probabilidades).

Referencias: N° hileras espiga⁻¹: número de hileras por espigas; N° granos hilera⁻¹: número de granos por hilera, P1000: peso de mil semillas y R: rendimiento en grano del cultivo de maíz. La diagonal principal está señalada en color amarillo. Por debajo, se encuentra el coeficiente de correlación entre las variables y por encima los valores de probabilidad. Significancia $p < 0,05$.

Estrategias de fertilización de maíz en la Cuenca del Salado.
Cadez Fina, T.A.

Se encontró correlación significativa ($p < 0,05$ o $0,01$) entre el número de granos por hilera y el peso de mil semillas y, entre el número de granos por hilera y el rendimiento en grano. El número de granos por hilera constituye un factor importante en el rendimiento del maíz (Díaz *et al.*, 2009).

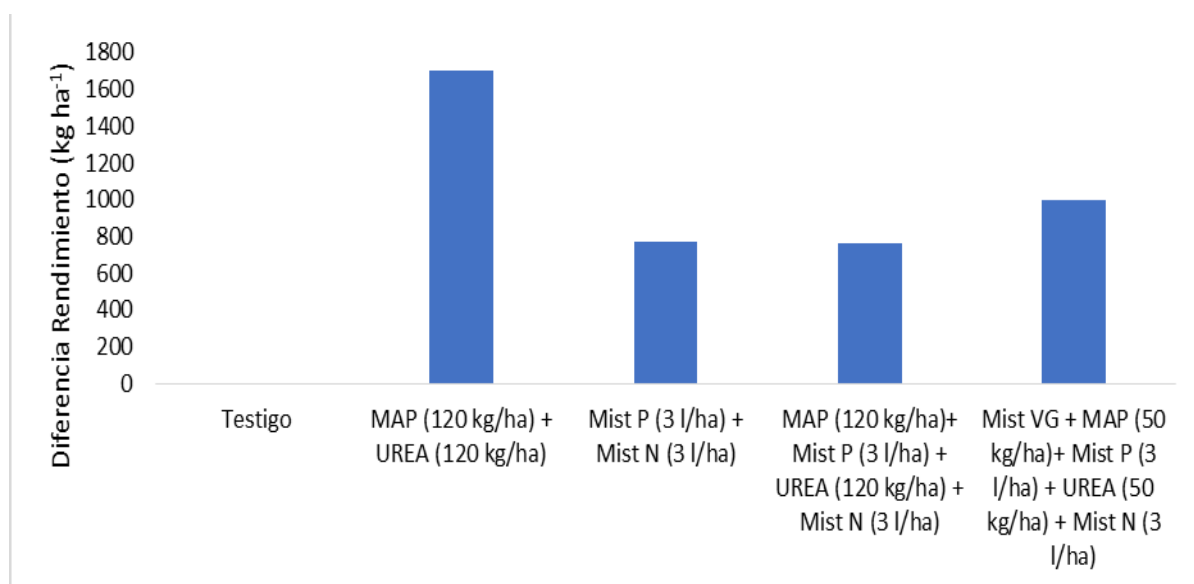


Figura 12. Diferencial de rendimiento sobre el testigo para cada uno de los tratamientos.

En la Figura 12 se puede observar un gradiente en la respuesta a la aplicación de tecnología, lo cual coincide con los resultados de otros autores (Daza, et al. 2016) que remarcan la elevada dependencia de insumos del cultivo de maíz y su alta expresión en ambientes limitantes como es el caso del ensayo. Sin embargo, diferentes situaciones presentan que la mayor aplicación de insumos no tienen una respuesta equivalente a la cantidad aportada; como explican Ferreira *et al.* (2017) sobre la ley de los rendimientos máximos decrecientes de Mistcherlich “a medida que se aumentan las

Estrategias de fertilización de maíz en la Cuenca del Salado.
Cadez Fina, T.A.

dosis de un elemento fertilizante “ab” disminuye el incremento de cosecha que se consigue por cada unidad fertilizante suministrada, hasta llegar un momento en que los rendimientos no solo no aumentan sino que disminuyen”, no necesariamente el aumento de insumos llevará a un valor de rendimiento mayor sino que hay un ambiente y condiciones que acompañan; en la determinación del rendimiento óptimo o económico intervienen una serie de factores ajenos a la naturaleza y rendimiento del cultivo, tales como el precio de los fertilizantes utilizados y el precio de los productos agrícolas.

Análisis económico, Margen Bruto:

Finalmente, se presentan los resultados económicos de la aplicación de distintas estrategias de fertilización. En la Tabla 8, puede observarse el margen bruto y el rendimiento de indiferencia.

*Estrategias de fertilización de maíz en la Cuenca del Salado.
Cadez Fina, T.A.*

Tratamientos		T1	T2	T3	T4	T5
INGRESOS						
Precio	USD tn ⁻¹	229,10	229,10	229,10	229,10	229,10
Rendimiento	tn ha ⁻¹	7,00	8,70	7,77	7,76	8,00
INGRESO BRUTO	USD tn⁻¹	1603,70	1993,17	1780,11	1777,82	1832,80
COSTOS DIRECTOS						
Labores	USD ha ⁻¹	76,70	76,70	76,70	76,70	76,70
Insumos	USD ha ⁻¹	320,96	603,92	425,06	557,44	542,96
TOTAL LABORES E INSUMOS	USD ha⁻¹	397,66	680,62	501,76	634,14	619,66
COSTOS INDIRECTOS						
Gastos de Cosecha	USD ha ⁻¹	89,00	89,00	89,00	89,00	89,00
Gastos de Comercialización	USD ha ⁻¹	131,09	131,09	131,09	131,09	131,09
TOTAL DE GASTOS		220,09	220,09	220,09	220,09	220,09
MARGEN BRUTO	USD ha⁻¹	985,95	1092,46	1058,26	923,59	993,05
RENDIMIENTO DE INDIFERENCIA	tn ha⁻¹	2,70	3,93	3,15	3,73	3,67

Tabla 8. Margen Bruto de los distintos tratamientos de fertilización.

T1 (testigo, sin fertilización), T2 (120 kg ha⁻¹ MAP + 120 kg ha⁻¹ UREA), T3 (3 l ha⁻¹ Mist P + 3 l ha⁻¹ Mist N), T4 (60 kg ha⁻¹ MAP + 3 l ha⁻¹ Mist P + 3 l ha⁻¹ Mist N + 50 kg ha⁻¹ UREA), T5 (Mist VG + 50 kg ha⁻¹ MAP + 3 l ha⁻¹ Mist P + 50 kg ha⁻¹ UREA + 3 l ha⁻¹ Mist N).

El T2 (MAP + UREA) obtuvo un margen bruto de 1092,5 USD ha⁻¹, siendo el tratamiento con mejor resultado económico. Esto pudo deberse a una mayor respuesta del cultivo a un planteo intensivo con un elevado uso de insumos. Por debajo se ubican el T3 (MIST P + MIST N) con 1058,26 USD ha⁻¹, el T5 (Mist VG + MAP + Mist P + UREA + Mist N) con un margen de 993,05 USD ha⁻¹, el T1 con un margen de 985,9

Estrategias de fertilización de maíz en la Cuenca del Salado.
Cadez Fina, T.A.

USD ha⁻¹ y por último el T4 (MAP + Mist P + UREA + Mist N) con un margen de 923,59 USD ha⁻¹. Si bien, el T2 (MAP + UREA) obtuvo el mayor margen bruto, principalmente por lograr los mayores rendimientos, fue el tratamiento con los mayores costos de insumos, lo cual produjo que presente los mayores Rendimiento de indiferencia (3,93 tn ha⁻¹) y el mayor riesgo productivo. Por otro lado, el T 3 (Mist P + Mist N) presentó un costo de insumos menor al tratamiento 2 (MAP + UREA), que a pesar de rendir aproximadamente 1000 kg ha⁻¹ más, tuvo un margen bruto similar y con un Rendimiento de indiferencia de 3,10 tn ha⁻¹, casi 800 kg ha⁻¹ menos, el T4 (MAP+ Mist P + UREA+ Mist N) presentó un rendimiento de indiferencia de 3,72 tn ha⁻¹ con rendimiento similar que el tratamiento 3 (Mist P + Mist N) pero con un valor de 600 kg más, finalmente el T5 (Mist VG + MAP + Mist P + UREA + Mist N) con un rendimiento de indiferencia de 3,66 tn ha⁻¹. El uso de tecnologías que disminuyen el riesgo económico, debido a un menor rendimiento de indiferencia, colaboran a la sostenibilidad de los sistemas productivos, sobre todo en años con deficiencias hídricas. Se debe tener en cuenta que, ante estos escenarios climáticos y económicos, el productor generalmente buscará no invertir tantos recursos en un cultivo tan demandante como el maíz.

CONCLUSIONES

El presente trabajo permitió evaluar distintas estrategias de fertilización en un ambiente productivo de la Cuenca del Salado, tanto en la parte productiva como económica.

La Hipótesis I. “El uso de estrategias de fertilización con nano-fertilizantes en la producción de maíz incrementa el rendimiento frente a una fertilización convencional”. fue rechazada en forma parcial, ya que se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos, siendo mayor el nivel de respuesta en rendimiento a favor de la aplicación convencional de fertilizantes. Sin embargo, las alternativas mixtas (T5: Mist VG + MAP + Mist P + UREA + Mist N) pertenecen al mismo grupo homogéneo de Diferencias Mínimas Significativas, por lo que podría considerarse como un estrategia para reducir el impacto ambiental, económico y de logística, logrando producciones más sostenibles.

La Hipótesis II. “Los nano-fertilizantes presentan como beneficio un menor riesgo económico frente a una fertilización convencional” fue aceptada, debido a que el T3 (Mist P + Mist N) fue el tratamiento con menores costos directos y menor rendimiento de indiferencia, reflejando ser una estrategia valiosa desde el punto de vista económico para el productor.

Estrategias de fertilización de maíz en la Cuenca del Salado.
Cadez Fina, T.A.

Frente a la situación actual y el advenimiento de mayores controles en la producción agrícola, el uso estrategias de fertilización foliar con nanopartículas presenta una alternativa sostenible para la producción de cultivos. También así puede considerarse en situaciones restrictivas a los fertilizantes foliares con nanopartículas como alternativa que permite generar una respuesta en el rendimiento con un menor costo. Asimismo, pueden ser incorporados como complemento dentro de un plan de fertilización base convencional pudiendo fertilizar en periodos claves de cultivo.

BIBLIOGRAFÍA

Álvarez, A. (2022). Tendencias en el rendimiento del cultivo de maíz en Argentina. *Revista CREA*, 105, 12-14.

Álvarez-Solís, J. (2010). Enmiendas orgánicas y actividad metabólica del suelo en el rendimiento de maíz. *Terra Latinoamericana*, 28(3), 239-245.

Andrade, F.; Cirilo, A.; Uhart, S. y Otegui, M. (1996). Crecimiento del cultivo. En “Ecofisiología del cultivo de maíz”. Editorial La Barrosa EEA Balcarce, CERBAS, INTA-FCA, UNMP (Eds.). Buenos Aires.

Andrade, F.; Otegui, M.; Uhart, S. y Cirilo, A. (2023) *Ecofisiología y Manejo del cultivo de maíz*. Maizar 1ed. ISBN 978-987-88-8326-7.

Barbieri, P. A., Echeverría, H. E., y Saíenz Rozas, H. R. (2018). Pérdidas por volatilización y eficiencia de uso de nitrógeno en maíz en función de la fuente, dosis y momento de aplicación. *Revista De La Facultad De Agronomía*, 117(1), 111–116. Recuperado a partir de <https://revistas.unlp.edu.ar/revagro/article/view/7323>

Barrios, M. y Basso, C. (2018). Efecto de la fertilización nitrogenada sobre componentes del rendimiento y calidad nutricional del grano de seis híbridos de maíz. *Bioagro-*, 30(1), 39–48.

Bartolomé, M., Caputo, M. G., Celis, A., Herzer, H. y Rodríguez, C. (2004). El clima y otros factores de riesgo productivo en la pampa húmeda argentina. *Realidad Económica*, 202(88), 107.

Batista, P. D. y Mulato, M. (2005). ZnO extended-gate field-effect transistors as pH sensors. *Applied Physics Letters*, 87(14).

Estrategias de fertilización de maíz en la Cuenca del Salado.
Cadez Fina, T.A.

Bertrand, M. (1991). Mécanismes de l'élaboration du nombre de grains du maïs. Valeur prédictive d'indicateurs écophysologiques. Thèse Dr. Institute National Agronomique Paris-Grignon, 185 págs.

Bharadwaj, D. N. (2016). Sustainable agriculture and plant breeding. Advances in plant breeding strategies: agronomic, abiotic and biotic stress traits, 3-34.

Boraste, A., Vamsi K. K., Jhadav, A., Khairnar, Y., Gupta, N., Trivedi, S., Patil, P., Gupta, G., Gupta, M., Mujapara, A. K. y Joshi, B. (2009). Biofertilizers: A novel tool for agriculture. International Journal of Microbiology Research, 1(2), 23.

Borrás, L., Slafer, G. A. y 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.

Braun Blanquet, J. 1979. Fitosociología. Bases para el estudio de las comunidades vegetales. H. Blume Ediciones, Madrid. 820 pp.

Cantarero, M. G., Luque, S. F. y Rubiolo, O. J. (2000). Sowing date and plants density effect on kernel number and grain yield in a maize hybrid in the central region of Córdoba (Argentina). Agriscientia, XVII, 3-10.

Conde, C. Venturino, D. Pellejero, J. y Podestá, A. (2023) Panorama Agrícola Semanal. Relevamiento al 19/07/2023. Bolsa de Cereales de Buenos Aires. P 1-10.
<https://www.bolsadecereales.com/estimaciones-informes>

Díaz-Chuquizuta, P., Hidalgo-Melendez, E., Cabrejo-Sánchez, C., y Valdés-Rodríguez, O. A. (2022). Respuesta del maíz (*Zea mays* L.) a la aplicación foliar de abonos orgánicos líquidos. Chilean journal of agricultural & animal sciences, 38(2), 144-153.

Estrategias de fertilización de maíz en la Cuenca del Salado.
Cadez Fina, T.A.

FAO. (2023). Perspectivas de cosechas y situación alimentaria. Informe trimestral mundial N.o 1, marzo 2023. Roma. <https://doi.org/10.4060/cc4665es>

FAO. (2021). World fertilizer trend and Outlook to 2022. Roma. ISBN 978-92-5-131894-2

Fernandez Grecco, R. y Viviani Rossi, E.- 1997. Guía de Reconocimiento de Especies de Campo Natural. Materiales Didácticos N° 13. 2ª Edic., CERBAS-INTA Balcarce, ISSN 0328-1280, 67 Pg.

Fernández, V., Sotiropoulos, T. y Brown, P. (2015). Fertilización foliar. Principios científicos y prácticas de campo. Asociación Internacional de la Industria de Fertilizantes (IFA). Paris, Francia, 49-82.

Ferreira, I. E., Zocchi, S. S. y Baron, D. (2017). Reconciling the Mitscherlich's law of diminishing returns with Liebig's law of the minimum. Some results on crop modeling. *Mathematical Biosciences*, 293, 29-37.

Gago, A., Gianatiempo, J. P. y López, M. (2018). La cadena del maíz en la Argentina: Evolución del cultivo durante las últimas campañas. Bolsa de Cereales. Retrieved from <https://www.bolsadecereales.com/imagenes/retaa/2018/12/16109>, 11.

Gallo, S. y Marccasini, G. (2021). Informe de la Red de Híbridos de Maíz en Fecha Tardía 2020-2021 CREA-SSF. <https://www.creasurdesantafe.com.ar/wp-content/uploads/2021/09/Informe-Maiz-Tard%C3%ADo-2020-21.pdf>

Gambin, B. L. y Borrás, L. (2021). Maize nitrogen management in soils with influencing water tables within optimum depth. *Crop Science*, 61(2), 1386-1399.

Estrategias de fertilización de maíz en la Cuenca del Salado.
Cadez Fina, T.A.

García, F. O. (2005). Criterios para el manejo de la fertilización del cultivo de maíz.
<https://www.profertil.com.ar/wp-content/uploads/2020/08/nutricion-en-el-cultivo-de-maiz-ipni-f-garcia-2005.pdf>

García, P. E., Badano, N. D., Menéndez, A. N., Bert, F., García, G., Podestá, G., Rovere, S., Verdin, A., Rajagopalan, B., y Arora, P. (2018). Influencia de los cambios en el uso del suelo y la precipitación sobre la dinámica hídrica de una cuenca de llanura extensa. Caso de estudio: Cuenca del Río Salado, Buenos Aires, Argentina. *Ribagua*, 5(2), 92-106.

García Rodríguez, D. A. (2018). *NANO FERTILIZANTES Y PROMOTORES DEL CRECIMIENTO DE PLANTAS PARA UNA AGRICULTURA SUSTENTABLE USANDO NANOPARTICULAS METALICAS Y GRAFENOS*. Instituto tecnológico de colima.

Gibert, C., Lescourret, F., Genard, M., Vercambre, G. y Perez Pastor, A. (2005). Modelling the effect of fruit growth on surface conductance to water vapour diffusion. *Annals of Botany*, 95(4), 673-683.

Giménez, L. (2012). Producción de maíz con estrés hídrico provocado en diferentes etapas de desarrollo. *Agrociencia (Uruguay)*, 16(2), 92-102.

Gliessman, S. (2002). *Agroecología: procesos ecológicos en agricultura sostenible*. Catie. Litocat, Turrialba, Costa Rica. 359 p. ISBN 9977-57-385-9.

González-Melendi, P., Fernández-Pacheco, R., Coronado, M. J., Corredor, E., Testillano, P. S., Risueño, M. C., Marquina, C., Ibarra, M. R., Rubiales, D. y Pérez de Luque, A. (2008). Nanoparticles as smart treatment-delivery systems in plants:

Estrategias de fertilización de maíz en la Cuenca del Salado.
Cadez Fina, T.A.

assessment of different techniques of microscopy for their visualization in plant tissues.

Annals of Botany, 101(1), 187–195.

Iglesias de Cuello, A. (1982). Atlas físico de la República Argentina. Buenos Aires: Atlas total de la República Argentina, Centro Editor de América Latina.

INTA. (1974) Cartas de suelos de la República Argentina. Centro de Investigación de recursos naturales. Reconocimiento de suelos. Hoja 3560-36-4.

Kiniry, J.R. 1991. Maize Phasic Development. Modeling Plant and Soil System. p. 55–70

León, R. (1975). Las comunidades herbáceas de la Región de Castelli-Pila. Monografía 5. CIC, La Plata, Pcia. de Bs. As. Pg. 75-107.

Lira Saldivar, R. H. y Méndez-Arguello, R. (2016). Nanotechnology in agriculture and livestock production: An overview. Livestock Research for Rural Development, 28(11).

Marek G.W., Marek, T.H.; Evett, S.R.; Bell, J.M.; Colaizzi, P.D.; Brauer, D.K. y Howell, T.A. (2020). Comparison of Lysimeter-Derived Crop Coefficients for Legacy and Modern Drought-Tolerant Maize Hybrids in the Texas High Plains. Transactions of the ASABE. 63(5): 1243-1257. doi: 10.13031/trans.13924

Giorgis, P. Cignetti, N., Martin, G., Nicola, C., Turchi, D.. (2022) Ensayos comparativos de rendimiento maíz temprano. Mesa agrícola CREA. Región Santa Fe 1-29.

Mengel, K. y Kirkby, E. A. (2000). Principios de nutrición vegetal. Instituto Nacional del Potasio P.O. Box 1609 CH-4001 Basilea/Suiza.

Otegui, M. E., Andrade, F. H., Suero, E. E., & Cirilo, A. G. (2010). Seed set, development and abortion among maize hybrids differing in heat tolerance. Field Crops

Estrategias de fertilización de maíz en la Cuenca del Salado.
Cadez Fina, T.A.

Research, 119(2-3): 297-305. Pérez de Luque, A. (2018). Nanopartículas y nanotecnología en la agricultura. CIDEU, 10(3), 225-230.

Quiroga, M., Agüero, D., Zapata, R., Busilacchi, H. y Bueno, M. (2015). Activadores de crecimiento y biofertilizantes como alternativa al uso de fertilizantes químicos en cultivo de chía (*Salvia hispanica* L.). Energías Renovables y Medio Ambiente, 35, 31–40.

Ramirez-Cabral, N. Y., Kumar, L. y Shabani, F. (2017). Global alterations in areas of suitability for maize production from climate change and using a mechanistic species distribution model (CLIMEX). *Scientific reports*, 7(1), 5910.

Rausch, A. y Trossero, M. (2022) Evaluación de cultivares de maíz en siembras tardías en la localidad de Ceres, Santa Fe. Producción vegetal, 49.

Rossi, R. (2007). El maíz en Argentina: Estado actual y perspectivas. Revista CREA, 17(187), 24-27.

Trinidad, A. y Aguilar, D. (1999) Fertilización foliar, un respaldo importante en el rendimiento de los cultivos Terra Latinoamericana, vol. 17, núm. 3, julio-septiembre, 1999, pp. 247-255

Uhart, S. A. y Andrade, F. H. (1995). Nitrogen deficiency in maize: II. Carbon-nitrogen interaction on kernel number and grain yield. *Crop Science*, 35: 1384-1389.

Vila Seoane, M. F. y Carullo, J. C. (2012). Nanotecnología: su desarrollo en Argentina, sus características y tendencias a nivel mundial.

Warrington I.J., y Kanemasu. E.T. (1983). Corn growth response to temperature and photoperiod I. Seedling emergence, tassel initiation, and anthesis. *Agron. J.* 75(5): 794–754.