

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

Instituto de Ciencias Agrícolas



EFFECTO DEL INHIBIDOR DE LA NITRIFICACIÓN 3,4-DIMETILPIRAZOL FOSFATO (DMPP) EN LA LIXIVIACIÓN DE NITRATOS, RENDIMIENTO Y CALIDAD DE GRANO DE TRIGO (*Triticum durum* L.) EN EL VALLE DE MEXICALI

T E S I S

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROBIOTECNOLOGÍA EN ZONAS ÁRIDAS

PRESENTA

ING. JUAN DANIEL CASTILLO MURILLO

DIRECTORA

DRA. SILVIA MÓNICA AVILÉS MARÍN

La presente tesis titulada: **EFFECTO DEL INHIBIDOR DE LA NITRIFICACIÓN 3,4-DIMETILPIRAZOL FOSFATO (DMPP) EN LA LIXIVIACIÓN DE NITRATOS, RENDIMIENTO Y CALIDAD DE GRANO DE TRIGO (*Triticum durum* L.) EN EL VALLE DE MEXICALI**, realizada por el C. **Juan Daniel Castillo Murillo**, dirigida por la **Dra. Silvia Mónica Avilés Marín**, ha sido evaluada y aprobada por el Comité Particular abajo indicado, como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROBIOTECNOLOGÍA EN ZONAS ÁRIDAS

COMITÉ PARTICULAR:

DIRECTORA DE TESIS:



Dra. Silvia Mónica Avilés Marín

SECRETARIO:



Dr. Roberto Soto Ortiz

ASESOR:



Dr. Juan Gabriel Brigido Morales

ASESOR:



Dr. Carlos Enrique Ail Catzim

ASESOR:



Dr. Samuel Sandoval Solís

“POR LA REALIZACIÓN PLENA DEL SER”

Ejido Nuevo León, Mexicali, Baja California, México. Diciembre de 2025

AGRADECIMIENTOS

La culminación de esta tesis representa no solo un logro académico, sino también un recorrido lleno de aprendizajes, desafíos y momentos significativos. Por ello, quiero dedicar este espacio a agradecer profundamente a quienes me acompañaron en este camino.

A mi directora de tesis, **Dra. Silvia Mónica Avilés Marín** por su guía experta, paciencia y compromiso. Su confianza en mi trabajo y sus valiosas orientaciones fueron fundamentales para que este proyecto tomara forma y llegara a buen puerto.

A todos mis profesores, quienes con dedicación y pasión compartieron sus conocimientos a lo largo de mi formación. Cada clase, cada conversación y cada consejo han contribuido a moldear mi pensamiento crítico y mi vocación profesional. Gracias por sembrar en mí la curiosidad y el deseo de aprender.

Al comité de evaluación, Dr. Juan Gabriel Brigido Morales, Dr. Carlos Ail Catzim, Dr. Roberto Soto Ortiz y Dr. Samuel Sandoval Solís, por su tiempo, disposición y valiosas observaciones que enriquecieron esta tesis. Su mirada crítica y sus aportes fueron esenciales para mejorar la calidad del trabajo presentado.

A los laboratoristas Oracio Rivera Caudillo y Alejandro López Lugo por su apoyo en la estancia en los laboratorios de Agua y Suelo, Nutrición animal, respectivamente, que hicieron posible el análisis de las muestras del presente trabajo.

Al **ICA-UABC**, por brindarme un entorno académico estimulante, recursos valiosos y oportunidades de crecimiento. Aquí encontré no solo formación profesional, sino también amistades, experiencias y aprendizajes que llevaré conmigo siempre.

DEDICATORIA

A mi familia, por ser mi pilar incondicional. Su amor, apoyo y comprensión me sostuvieron en los momentos de duda y me impulsaron a seguir adelante. Gracias por creer en mí incluso cuando yo no lo hacía, por celebrar mis logros y por estar presentes en cada etapa de este proceso.

Y a mi fiel compañero, mi mascota **Ruffo**, por estar a mi lado en largas noches de estudio, por ofrecerme consuelo en momentos de estrés y por recordarme, con su ternura, la importancia de las pequeñas alegrías cotidianas.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, de una u otra forma, aportaron a este proyecto. Cada palabra de aliento y cada gesto de apoyo fueron esenciales para llegar hasta aquí.

A TODOS USTEDES, GRACIAS POR FORMAR PARTE DE ESTE VIAJE. ESTA TESIS ES TAMBIÉN SUYA.

ÍNDICE

	Página
ÍNDICE DE CUADROS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Justificación	3
1.2 Objetivos	4
1.3 Hipótesis	4
II. REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1 Fertilización nitrogenada y su impacto en el medio ambiente	3
2.2 Ciclo del Nitrógeno	6
2.2.1 Procesos de adición de Nitrógeno	7
2.2.1.1 Adición antropogénica	7
2.2.1.2 Fijación biológica	8
2.2.1.3 Mineralización	9
2.2.2 Procesos de pérdidas de Nitrógeno	10
2.2.2.1 Desnitrificación	10
2.2.2.2 Inmovilización	11
2.2.2.3 Volatilización	11
2.2.2.4 Lixiviación	11
2.3 Alternativas para mitigar las pérdidas de nitrógeno	12
2.3.1 Fertilizantes de liberación controlada	12
2.3.2 Uso de inhibidores de nitrificación	12
2.3.2.1 Biológicos	13
2.3.2.2 Sintéticos	15
2.4 Cultivo de trigo (<i>Triticum durum</i> L.)	16
2.4.1 Producción y Calidad de Trigo	16

	Página
2.5 Uso de Inhibidores de nitrificación en la producción de trigo	20
III. ARTÍCULO. USO DEL INHIBIDOR DE LA NITRIFICACIÓN DMPP EN TRIGO (<i>Triticum durum</i> L.): IMPACTO EN EL RENDIMIENTO Y CALIDAD DE GRANO	21
3.1 Resumen	21
3.2 Abstract	22
3.3 Introducción	23
3.4 Materiales y métodos	25
3.5 Resultados y discusión	27
3.6 Conclusiones	35
3.7 Bibliografía	36
IV. ARTÍCULO. EFECTO DE 3,4-DIMETILPIRAZOL FOSFATO EN LA LIXIVIACIÓN DE NITRATOS DEL SUELO CULTIVADO CON TRIGO (<i>Triticum durum</i> L.) EN EL VALLE DE MEXICALI	41
4.1 Resumen	41
4.2 Abstract	42
4.3 Introducción	43
4.4 Materiales y métodos	44
4.5 Resultados y discusión	49
4.6 Conclusiones	52
4.7 Bibliografía	53
V.CONCLUSION GENERAL	55
VI. LITERATURA CITADA	56

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Inhibidores biológicos de nitrificación y su estructura química.	13
Cuadro 2. Etapas fenológicas del trigo según las escalas Zadoks y Feekes, incluyendo la duración estimada en días para trigo invernal y trigo primaveral	16
Cuadro 3. Tratamientos de fertilización nitrogenada y el inhibidor DMPP aplicados en el cultivo de <i>Triticum durum</i> L. var. Atil	26
Cuadro 4. Efecto del inhibidor DMPP sobre los parámetros de calidad en panza blanca (%), peso hectolítrico y proteína (%) (kg hL^{-1}) del grano de trigo	31
Cuadro 5. Correlaciones de variables del grano de trigo (<i>Triticum durum</i>)	35
Cuadro 6. Características físicas y químicas del suelo a tres profundidades previo al establecimiento del experimento	46

ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1.	Principales procesos involucrados en el ciclo global del nitrógeno (N).	7
Figura 2.	Etapas fenológicas del trigo en escala Feekes	17
Figura 3.	Ubicación geográfica del sitio donde se estableció el experimento	25
Figura 4.	Efecto del inhibidor DMPP sobre el rendimiento de grano y eficiencia en el uso de nitrógeno en <i>Triticum durum</i>	28
Figura 5.	Efecto del inhibidor DMPP sobre el rendimiento de grano en <i>Triticum durum</i>	30
Figura 6.	Ubicación geográfica del sitio donde se estableció el experimento	45
Figura 7.	Instalación de piezómetros en cada unidad experimental	48
Figura 8.	Piezómetro instalado a 60 cm de profundidad	48
Figura 9.	Tendencia acumulada de lixiviación de nitratos durante el ciclo de cultivo de trigo (2023-2024)	50

RESUMEN

El nitrógeno es un nutriente esencial para el desarrollo de las plantas y la productividad agrícola, especialmente en regiones áridas como el Valle de Mexicali. No obstante, el uso excesivo de fertilizantes nitrogenados en la agricultura convencional, ha generado impactos negativos en el suelo, el ambiente y la salud humana, principalmente por la lixiviación de nitratos y la baja eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN). Por lo anterior, se evaluó el uso del inhibidor de la nitrificación 3,4-dimetilpirazol fosfato (DMPP) en dos estudios complementarios. El primero analizó su efecto sobre el rendimiento y la calidad del grano de trigo duro (*Triticum durum* L.), mientras que el segundo se centró en su impacto sobre la lixiviación de nitratos en suelos alcalinos del Valle de Mexicali. Se aplicaron dosis de 200, 300 y 400 kg N ha⁻¹ con DMPP, comparadas con un testigo de urea convencional (400 kg N ha⁻¹), bajo un diseño experimental de bloques completos al azar. Los resultados muestran que no hubo diferencias significativas de rendimiento entre tratamientos ($p > 0.05$), pero la dosis de 200 kg N ha⁻¹ + DMPP alcanzó la mayor eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN = 40 kg kg⁻¹), superando significativamente al testigo ($p < 0.05$). En cuanto a calidad del grano, el testigo presentó mejores valores de proteína, peso hectolítrico y menor incidencia de panza blanca, mientras que los tratamientos con DMPP redujeron estos parámetros ($p < 0.05$). Además, el uso de DMPP mostró una reducción en la lixiviación de nitratos, en suelos de textura franco-arenosa. Lo que representa un beneficio ambiental importante en la gestión de nutrientes. En conjunto, los resultados demuestran que el DMPP permite optimizar el uso del nitrógeno, reducir su impacto ambiental y mantener el rendimiento del cultivo, aunque con algunas limitaciones en la calidad del grano. Estos resultados contribuyen en el desarrollo de prácticas agrícolas más sostenibles en zonas áridas como el Valle de Mexicali.

Palabras clave: Fertilización nitrogenada, inhibidores de nitrificación, producción de trigo, calidad ambiental.

ABSTRACT

Nitrogen is an essential nutrient for plant development and agricultural productivity, particularly in arid regions such as the Mexicali Valley. However, the intensive use of conventional nitrogen fertilizers like urea has led to negative impacts on soil, the environment, and human health, mainly due to nitrate leaching and low nitrogen use efficiency (NUE). To address this issue, the nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) was evaluated in two complementary studies. The first focused on its effect on grain yield and quality in durum wheat (*Triticum durum* L.), while the second assessed its impact on nitrate leaching in alkaline soils of the Mexicali Valley (pH 8.4, sandy loam texture). Nitrogen doses of 200, 300, and 400 kg N ha⁻¹ with DMPP were applied and compared to a conventional urea control (400 kg N ha⁻¹), using a randomized complete block design. Results showed no significant differences in yield among treatments ($p > 0.05$), but the 200 kg N ha⁻¹ + DMPP treatment achieved the highest NUE (40 kg kg⁻¹), significantly outperforming the control ($p < 0.05$). Regarding grain quality, the control treatment showed better values for protein content, test weight, and lower incidence of white belly, while DMPP treatments reduced these quality parameters ($p < 0.05$). Additionally, the use of DMPP significantly reduced nitrate leaching, representing an important environmental benefit in nutrient management. Overall, these studies demonstrate that DMPP can optimize nitrogen use, reduce environmental impact, and maintain crop yield, although with some limitations in grain quality. These findings support the development toward a more sustainable agricultural practice in arid regions such as the Mexicali Valley.

Keywords: Nitrogen fertilization, nitrification inhibitors, wheat production, environmental quality.

I. INTRODUCCIÓN

El nitrógeno es uno de los nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas y uno de los elementos más importantes en la productividad de los cultivos, especialmente en ecosistemas áridos y semiáridos. Sin embargo, frecuentemente se aplican fertilizantes nitrogenados sin considerar las distintas formas químicas que el nitrógeno adopta en el suelo ni su dinámica en los ciclos biogeoquímicos; dando lugar a su uso excesivo, que puede tener consecuencias negativas (Niu *et al.*, 2020; Kumar *et al.*, 2024; Moghaddam *et al.*, 2023). Las prácticas agrícolas tradicionales, como el uso excesivo de urea contribuyen a la degradación del suelo y la contaminación del agua por lixiviación de nitratos, lo que genera efectos nocivos para la salud, el medio ambiente y la economía (Saynes-Santillán *et al.*, 2021; Bozal-Leorri *et al.*, 2023). Para mitigar estos problemas, se han desarrollado alternativas como los fertilizantes de liberación controlada y los estabilizadores de fertilizantes, entre los que se incluyen los inhibidores de nitrificación. Entre los más utilizados destacan la diciclinamida, la nitrapirina y, más recientemente, el 3,4-dimetil-pirazol fosfato (DMPP), que ha demostrado reducir la volatilización y lixiviación del nitrógeno, siendo un posible inhibidor de nitrificación en cultivos agrícolas específicos (Corrochano-Monsalve *et al.*, 2024; Parra Cañas, 2020). Los fertilizantes nitrogenados de liberación controlada, como la urea-Environmentally Smart Nitrogen, y los inhibidores de nitrificación, como el DMPP, son herramientas útiles para disminuir las pérdidas de nitrógeno, permitiendo una agricultura más eficiente y con menor impacto ambiental (FAO, 2002). En México, el trigo constituye la tercera fuente más importante de nutrientes de bajo costo en la dieta alimenticia, después del maíz y el frijol, con una producción de aproximadamente 3.5 millones de toneladas. El estado de Baja California ocupa el cuarto lugar en producción de trigo, con alrededor de 250,000 toneladas, concentradas principalmente en el Valle de Mexicali, donde las prácticas agrícolas tradicionales se basan en el uso excesivo de urea como fertilizante. Sin embargo, el incremento constante en el costo de los fertilizantes nitrogenados y los problemas en su distribución requieren alternativas para su uso eficiente en granos básicos (CIMMYT, 2021). Dado que la práctica

agrícola convencional a menudo omite considerar las condiciones edafoclimáticas y el estado nutrimental del suelo en la producción de cultivos; entre las alternativas para mejorar el uso eficiente de los fertilizantes nitrogenados se encuentran los inhibidores de nitrificación, que permiten un mayor tiempo de residencia del nitrógeno en formas asimilables en la solución del suelo, manteniéndolo disponible para el cultivo (Bozal-Leorri *et al.*, 2023).

1.1 Justificación

La región del valle de Mexicali, Baja California ocupa el cuarto lugar a nivel nacional en la producción de trigo, con alrededor de 250,000 toneladas anuales; donde las prácticas agrícolas tradicionales incluyen el uso excesivo de urea como fertilizante. Sin embargo, existe una baja eficiencia de los fertilizantes químicos que da lugar a pérdidas de nitrógeno por procesos de lixiviación y volatilización de entre el 30% y 50%. Ante este panorama, los fertilizantes nitrogenados de liberación controlada o inhibidores de la nitrificación representan herramientas útiles para la disminución de las pérdidas de nitrógeno; sin embargo, son pocos los estudios realizados en condiciones de climas áridos utilizando inhibidores de nitrificación sobre cultivos de trigo, donde factores como las altas temperaturas, baja humedad del suelo y presencia de salinidad, pueden restringir su persistencia y efectividad.

Por lo tanto, evaluar el efecto del DMPP en el cultivo de trigo en el valle de Mexicali responde a una necesidad técnica y económica, pero también al conocimiento científico para sistemas agrícolas en ambientes áridos.

1.2 Objetivos

Objetivo General

Evaluar el efecto del 3,4-dimetilpirazol fosfato (DMPP) sobre la lixiviación de nitratos, calidad de grano y rendimiento del cultivo de trigo (*Triticum durum* L.) en el valle de Mexicali

Objetivos específicos

1. Determinar el impacto del inhibidor 3,4-dimetilpirazol fosfato en la lixiviación de nitratos en el suelo del valle de Mexicali.
2. Evaluar el efecto del inhibidor 3,4-dimetilpirazol fosfato en el rendimiento del cultivo de trigo (*Triticum durum* L.).
3. Determinar la influencia del inhibidor en la calidad del grano de trigo, considerando parámetros como el contenido de proteínas, el peso hectolítrico y el porcentaje de panza blanca.

1.3 Hipótesis

La aplicación del inhibidor 3,4-dimetilpirazol fosfato reduce la lixiviación de nitrógeno en el suelo, mantiene o incrementa el rendimiento del cultivo de trigo (*Triticum durum* L.), el porcentaje de proteínas, el peso hectolítrico y disminuye el porcentaje de panza blanca del grano de trigo en el valle de Mexicali.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Fertilización nitrogenada y su impacto en el medio ambiente

El aumento de la población mundial y la producción de cereales alimentarios han impulsado el uso intensivo de fertilizantes sintéticos de nitrógeno, con un incremento previsto del 50 % para 2050 en comparación con 2012 (FAO, 2018), lo que conlleva mayores pérdidas de nitrógeno. Anualmente, se aplican alrededor de 110 millones de toneladas de nitrógeno (principalmente en forma de fertilizantes a base de amonio) en suelos agrícolas a nivel mundial (FAO, 2022). Durante el ciclo biogeoquímico del nitrógeno, el amonio (NH_4^+) se transforma en nitrato (NO_3^-) mediante la nitrificación, un proceso que libera protones y acidifica el suelo. Uno de los principales problemas asociados al uso de estas fuentes antropogénicas de nitrógeno es la emisión de óxido nitroso (N_2O), un gas de efecto invernadero que representa el 84 % de las emisiones (Zheng *et al.*, 2021). En los sistemas de producción de granos, la fertilización contribuye aproximadamente al 60 % del incremento en rendimiento donde el 95 % se debe a la aplicación de fertilizantes nitrogenados (Oita *et al.*, 2016). Sin embargo, las aplicaciones excesivas de nitrógeno generan sobrefertilización (Bibi *et al.*, 2006) y provocan una degradación ambiental sin precedentes. Entre los principales efectos negativos se encuentran la lixiviación de nitratos hacia los acuíferos, la acidificación del suelo, la volatilización del amoniaco (NH_3) y la emisión de N_2O . Estos procesos afectan directamente la calidad del agua y del aire, además de contribuir al cambio climático. El óxido nitroso, en particular, posee un potencial de calentamiento global 300 veces superior al del dióxido de carbono (CO_2). En el sector agrícola las emisiones de N_2O derivadas del uso ineficiente de fertilizantes representan el 50.4% de las emisiones totales expresadas en unidades equivalentes de CO_2 (González-Estrada y Camacho-Amador, 2017). Adicionalmente, la sobrefertilización puede desencadenar procesos de eutrofización en cuerpos de agua superficiales, favoreciendo la proliferación excesiva de cianobacterias, afectando la composición, calidad, además de pérdida de biodiversidad acuática, con consecuencias graves

para los ecosistemas y los servicios ambientales que estos proveen (Pedrozo-Acuña y Ramírez-Salinas, 2020).

2.2 Ciclo del nitrógeno

El nitrógeno es el cuarto elemento más abundante en la biomasa celular y constituye el componente principal de la atmósfera terrestre, donde se encuentra principalmente en forma de nitrógeno molecular (N_2), que es un gas inerte. La conversión entre este nitrógeno atmosférico y las formas reactivas utilizadas por los organismos vivos ocurre mediante reacciones redox catalizadas por microorganismos como bacterias y arqueas, hongos y, en menor medida, plantas simbióticas (Coskun *et al.*, 2017), siendo las bacterias y arqueas los principales impulsores de las transformaciones del nitrógeno en los ecosistemas terrestres (Zhao *et al.*, 2021). Además, la actividad humana ha modificado este ciclo mediante el proceso de Haber-Bosch, que combina el nitrógeno atmosférico con hidrógeno para formar amoníaco (NH_3), que se aplica directamente a los cultivos como fertilizante o sirve como precursor para la producción de otros fertilizantes nitrogenados (Smil, 2004). El ciclo del nitrógeno es uno de los ciclos biogeoquímicos más complejos, ya que involucra siete de los nueve estados de oxidación posibles del nitrógeno que van de -3 hasta +5. Los procesos del ciclo del nitrógeno en el suelo incluyen principalmente la mineralización (amonificación, nitratación, nitrificación), lixiviación, desnitrificación, inmovilización y fijación de nitrógeno (Stein y Klotz, 2016) (figura 1). Sin embargo, la aplicación intensiva de fertilizantes nitrogenados afecta la biodiversidad, estructura y función de las comunidades microbianas del suelo (Ai *et al.*, 2018), alterando así el ciclo del nitrógeno.

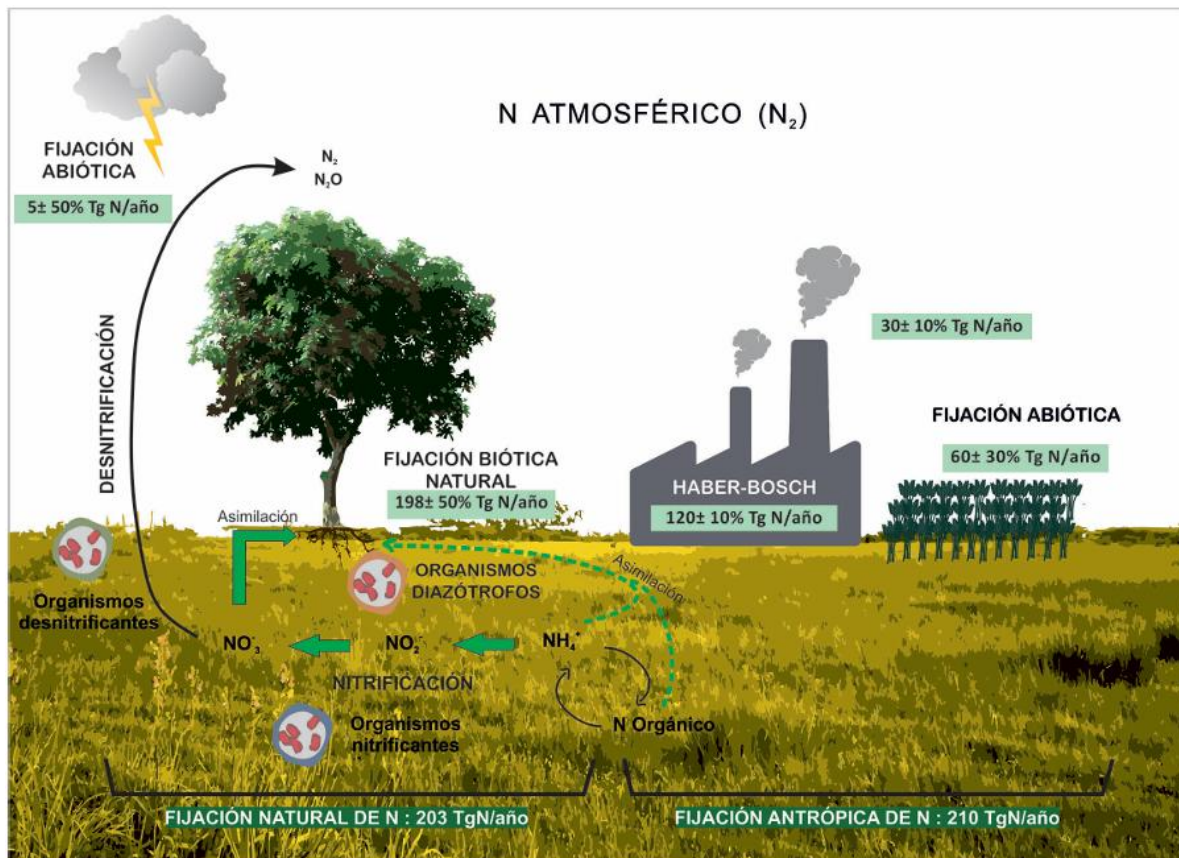


Figura 1. Principales procesos involucrados en el ciclo global del nitrógeno (N).
Extraído de Fowler *et al.* 2013.

2.2.1 Procesos de Adición de Nitrógeno

2.2.1.1 Adición Antropogénica

La adición antropogénica de nitrógeno al medio ambiente se produce principalmente a través de la aplicación de fertilizantes sintéticos y el uso de combustibles fósiles. Estas actividades han incrementado significativamente la cantidad de nitrógeno reactivo en el medio ambiente (Stein y Klotz, 2016). La producción de fertilizantes nitrogenados mediante el proceso de Haber-Bosch ha sido fundamental para la agricultura moderna, pero también ha contribuido a la contaminación ambiental (Smil, 2004).

Investigaciones recientes han demostrado que los ecosistemas se han sobre fertilizado con nitrógeno generado por actividades humanas, lo que puede tener repercusiones negativas en la flora y fauna (Falkowski, 2023). Además, la quema de combustibles fósiles, junto con la intensificación de la actividad industrial y agrícola han elevado aún más la concentración de nitrógeno en el medio ambiente, exacerbando problemas como la contaminación de cursos de agua dulce y zonas litorales (Pedrozo-Acuña y Ramírez-Salinas, 2020).

Por otra parte, la deposición atmosférica de nitrógeno, combinada con los efectos del cambio climático puede reducir la ventaja competitiva de las plantas fijadoras de nitrógeno, disminuyendo su abundancia y diversidad en las comunidades vegetales (Falkowski, 2023). Esta pérdida es preocupante y la fertilización excesiva con nitrógeno sintético ha sido vinculada directamente a este declive, lo que podría tener implicaciones a largo plazo para la sostenibilidad de los ecosistemas agrícolas.

2.2.1.2 Fijación Biológica

La fijación biológica de nitrógeno es un proceso natural llevado a cabo por ciertas bacterias y arqueas que convierten el nitrógeno atmosférico (N_2) en amoníaco (NH_3), una forma que las plantas pueden utilizar. Este proceso es fundamental para mantener la fertilidad del suelo y sostener la productividad agrícola (Stein y Klotz, 2016). Entre los organismos más eficientes en este proceso se encuentran las bacterias del género *Rhizobium*, que establecen una relación simbiótica con las leguminosas; estas bacterias colonizan las raíces de las plantas y forman nódulos especializados donde ocurre la conversión de N_2 atmosférico en formas nitrogenadas aprovechables (López-Alcocer *et al.*, 2021). La eficiencia de esta simbiosis varía según la cepa bacteriana, la especie vegetal y las condiciones edafoclimáticas del entorno (Rizzo Rivas, 2009).

Además de enriquecer el suelo con nitrógeno disponible, la fijación biológica contribuye directamente a la sostenibilidad de los sistemas agrícolas, al reducir la dependencia de fertilizantes sintéticos, disminuye también el impacto ambiental

asociado a su producción y uso, incluyendo la emisión de gases de efecto invernadero como el óxido nitroso (Falkowski *et al.*, 2023). Estudios recientes destacan que integrar cultivos de leguminosas en rotaciones agrícolas no solo mejora la fertilidad del suelo, sino que también fortalece la resiliencia de los agroecosistemas (Guzmán Duchén y Montero Torres, 2021).

La diversidad y funcionalidad de las poblaciones de bacterias fijadoras de nitrógeno en el suelo, como el género *Rhizobium*, pueden verse influenciadas por factores como el tipo de suelo, el manejo agrícola, la rotación de cultivos y el uso de agroquímicos. Por ello, preservar y potenciar estas comunidades microbianas es clave para una agricultura más sostenible.

La investigación en este campo sigue avanzando, con estudios orientados a identificar y seleccionar cepas bacterianas de mayor eficiencia, adaptadas a condiciones específicas, así como a desarrollar inoculantes microbianos que puedan aplicarse en diversos sistemas de cultivo (Rizzo Rivas, 2009).

2.2.1.3 Mineralización

La mineralización es el proceso biológico mediante el cual el nitrógeno contenido en la materia orgánica se transforma en formas inorgánicas, como el amonio (NH_4^+). Este proceso es esencial para mantener la fertilidad del suelo y garantizar el suministro continuo de nitrógeno en los sistemas agrícolas.

La tasa de mineralización de nitrógeno depende de múltiples factores, entre ellos el pH del suelo, la temperatura, la humedad, la actividad microbiana y la relación carbono/nitrógeno (C/N) de la materia orgánica presente; y por ende, de las prácticas de manejo. Por ejemplo, la aplicación de enmiendas orgánicas puede aumentar la tasa de mineralización al proporcionar una fuente adicional de materia orgánica para los microorganismos del suelo (Torres-Lozada *et al.*, 2021). Sin embargo, si la relación C/N de la enmienda es muy alta, puede ocurrir una inmovilización temporal del nitrógeno, ya que los microorganismos consumen NH_4^+ y NO_3^- para satisfacer sus propias necesidades metabólicas (Wang y Song, 2024).

Comprender la dinámica de la mineralización y los factores que la regulan es esencial para optimizar la disponibilidad de nitrógeno en el suelo, sincronizar su liberación con las demandas del cultivo y reducir la dependencia de fertilizantes sintéticos. La amonificación es la descomposición de materia orgánica en amoníaco (NH_3) y amonio (NH_4^+) por microorganismos, un paso crucial en el ciclo del nitrógeno (Stein y Klotz, 2016). Este proceso es influenciado por la calidad de la materia orgánica y las condiciones ambientales del suelo. La nitrificación es un proceso biológico aerobio mediante el cual el amonio (NH_4^+) se oxida secuencialmente, primero a nitrito (NO_2^-) y luego a nitrato (NO_3^-) por bacterias nitrificantes. Este proceso es fundamental para la disponibilidad de nitrógeno en formas que las plantas pueden absorber y se divide en dos etapas bien definidas: la nitrificación y la nitratación (Zhao *et al.*, 2021). La nitrificación es la primera etapa de la nitrificación, donde el amonio (NH_4^+) se convierte en nitrito (NO_2^-) por la acción de bacterias como Nitrosomonas (Stein y Klotz, 2016). Este proceso es crucial para la transformación del nitrógeno en el suelo y puede ser afectado por factores como el pH y la disponibilidad de oxígeno (Bachtsevani *et al.*, 2021). La nitratación es la segunda etapa de la nitrificación, donde el nitrito (NO_2^-) se convierte en nitrato (NO_3^-) por la acción de bacterias como Nitrobacter (Stein y Klotz, 2016). Este proceso es esencial para la formación de nitrato, una forma de nitrógeno fácilmente absorbida por las plantas.

2.2.2 Procesos de Pérdidas de Nitrógeno

2.2.2.1 Desnitrificación

La desnitrificación es el proceso mediante el cual los nitratos (NO_3^-) se reducen a gases nitrogenados (N_2 , N_2O) y se liberan a la atmósfera. Este proceso es llevado a cabo por bacterias desnitrificantes en condiciones anaerobias (Stein y Klotz, 2016). La desnitrificación representa una fuente significativa de emisiones de gases, por lo que, es un proceso clave en la mitigación de la contaminación por nitratos en el suelo y el agua.

2.2.2.2 Inmovilización

La inmovilización es el proceso mediante el cual el nitrógeno inorgánico se convierte en formas orgánicas no disponibles para las plantas, a través de la actividad microbiana en el suelo (Ai *et al.*, 2018). Este proceso es importante para el almacenamiento de nitrógeno en el suelo y puede ser influenciado por la relación carbono/nitrógeno de la materia orgánica.

2.2.2.3 Volatilización

La volatilización es la pérdida de nitrógeno en forma de amoníaco (NH_3) hacia la atmósfera desde el suelo, especialmente en condiciones de pH alto y temperaturas elevadas; este proceso reduce la eficiencia de los fertilizantes nitrogenados (Davidson, 2009). La volatilización puede ser mitigada mediante la incorporación de fertilizantes en el suelo y el uso de inhibidores de la ureasa (Parra, 2020).

2.2.2.4 Lixiviación

La lixiviación es el proceso mediante el cual los nitratos (NO_3^-) se disuelven en el agua y se filtran a través del suelo, llegando a las aguas subterráneas; este proceso puede contaminar fuentes de agua potable y reducir la disponibilidad de nitrógeno para las plantas (Stein y Klotz, 2016). La magnitud de la lixiviación es influenciada por factores como la textura del suelo, el régimen de precipitación o riego y la aplicación de fertilizantes (Cameron *et al.*, 2013).

2.2 Alternativas para mitigar las pérdidas de nitrógeno

2.3.1 Fertilizantes de liberación controlada

Los recubrimientos de fertilizantes son una estrategia eficaz para reducir las pérdidas de nitrógeno; estos recubrimientos, generalmente están hechos con materiales de baja permeabilidad, por lo que, regulan la liberación de nitrógeno, mejorando su disponibilidad para las plantas y reduciendo la lixiviación y volatilización (Mahmud *et al.*, 2021). Los fertilizantes de liberación controlada pueden incluir recubrimientos de polímeros, azufre o combinaciones de ambos, que permiten una liberación gradual del nitrógeno en el suelo (Shaviv, 2001); además, estos recubrimientos pueden ser diseñados para responder a condiciones específicas del suelo, como la humedad y la temperatura, optimizando la eficiencia del uso del nitrógeno (Parra, 2020).

1.3.2 Uso de inhibidores de nitrificación

Los inhibidores de la nitrificación son compuestos que retrasan o bloquean la conversión microbiana del amonio (NH_4^+) en nitrato (NO_3^-), de esta manera el nitrógeno es más estable en el suelo, lo que mejora su disponibilidad (Fan *et al.*, 2022); el proceso se logra mediante la inhibición específica del primer paso de la nitrificación: la oxidación del NH_4^+ a hidroxilamina (NH_2OH) (Akiyama *et al.*, 2010).

Al reducir la formación de nitritos (NO_2^-) y nitratos (NO_3^-), los inhibidores disminuyen directamente la lixiviación de NO_3^- hacia los acuíferos y las emisiones de óxido nitroso (N_2O) y óxido nítrico (NO) desde los sistemas agrícolas (Qiao *et al.*, 2015; Loick *et al.*, 2016 y Mahmud *et al.*, 2021).

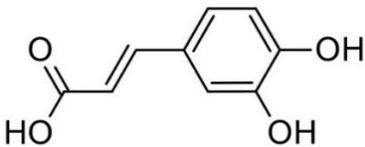
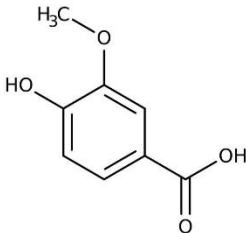
Sin embargo, la eficacia de los inhibidores de la nitrificación requiere de la evaluación de las interacciones entre el tipo de inhibidor, las propiedades del suelo y las fluctuaciones regionales de la temperatura (Guardia *et al.*, 2017). Por ejemplo, en suelos con pH alcalino, los inhibidores pueden persistir durante más tiempo y por lo tanto el efecto es más prolongado, debido a la población de bacterias nitrificantes, que respecto a suelos de pH ácido (Cui *et al.*, 2021). Por el contrario, tienen una baja efectividad en suelos de textura arenosa, posiblemente asociada con la rápida degradación por microorganismos heterótrofos del suelo (Subbarao *et al.*, 2006).

Atendiendo a su origen, los inhibidores de nitrificación pueden clasificarse en dos grandes grupos: biológicos y sintéticos.

1.3.2.1 Biológicos

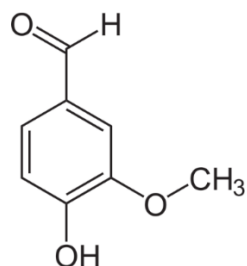
De acuerdo a Issifu y colaboradores (2024) los inhibidores biológicos de la nitrificación (BNI, por sus siglas en inglés) son compuestos orgánicos producidos naturalmente por ciertas plantas, que inhiben la actividad de los microorganismos nitrificantes en el suelo (Cuadro 1).

Cuadro 1. Inhibidores biológicos de nitrificación y su estructura química. Imágenes tomadas de la web. (www.fishersci.com)

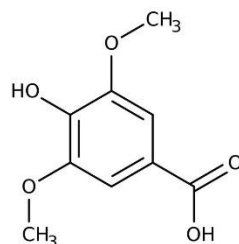
Nombre del compuesto	Descripción	Estructura química
Ácido cafeico (CA)	Este compuesto ha demostrado ser uno de los inhibidores más potentes, reduciendo significativamente la nitrificación y las emisiones de N ₂ O	
Ácido vanílico (VA)	El ácido vanílico también ha mostrado eficacia en la inhibición de la nitrificación, especialmente cuando se combina con otros compuestos como el ácido cafeico.	

Continuación Cuadro 1

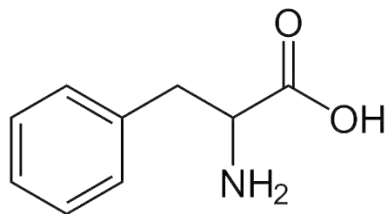
Vanilina (VAN) La vanilina es otro compuesto que puede inhibir la actividad de las bacterias nitrificantes, contribuyendo a la reducción de las pérdidas de nitrógeno



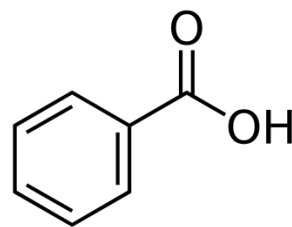
Ácido siríngico (SA) Aunque menos eficaz que otros compuestos, el ácido siríngico también puede contribuir a la inhibición de la nitrificación



Fenilalanina (PHE) La fenilalanina ha mostrado efectos inhibitorios en combinación con otros compuestos, aunque su eficacia individual es limitada



Ácido benzoico (BA) Este compuesto ha sido identificado recientemente como un inhibidor biológico prometedor, mostrando alta eficacia en la reducción de la nitrificación



Entre algunas de las plantas conocidas por su capacidad de liberar inhibidores biológicos de nitrificación se tiene al sorgo y el pasto del género *Braquiaria* (Subbarao *et al.*, 2013). Este género de pasto, en particular, ha demostrado reducir las emisiones de N₂O en sistemas de pastoreo, lo que la convierte en una opción prometedora para la mitigación de gases de efecto invernadero (Byrnes *et al.*, 2017).

2.3.2.2 Sintéticos

Los inhibidores sintéticos de la nitrificación (SNI) son compuestos químicos diseñados para inhibir la actividad de las bacterias nitrificantes, retrasando o reduciendo la conversión de amonio (NH_4^+) a nitrato (NO_3^-). Algunos de los inhibidores sintéticos más utilizados incluyen:

Nitrapirina: Este compuesto inhibe la actividad de la enzima amonio monooxigenasa (AMO), reduciendo la nitrificación y por lo tanto las emisiones de N_2O (Ruser y Schulz, 2015). La nitrapirina ha demostrado ser eficaz en una variedad de condiciones de suelo y clima, lo que la convierte en una opción versátil para la gestión del nitrógeno.

Diciandiamida (DCD): Es un inhibidor eficaz que reduce la formación de nitrato y las emisiones de gases de efecto invernadero en suelos agrícolas (Tufail *et al.*, 2023); es especialmente útil en suelos arenosos, donde la lixiviación de nitratos es un problema común.

3,4-Dimetilpirazol fosfato (DMPP): Este inhibidor reduce la abundancia de bacterias oxidantes de amonio (AOB), retrasando la oxidación del NH_4^+ y disminuyendo las emisiones de N_2O (Coskun *et al.*, 2017). El DMPP ha demostrado ser eficaz en una amplia gama de suelos (Bachtsevani *et al.*, 2021) y condiciones climáticas, lo que lo convierte en una herramienta valiosa para la gestión del nitrógeno.

Ácido 2-(N-3,4-dimetilpirazol) succínico (DAMPSA): Este compuesto es eficaz en la inhibición de la nitrificación y la reducción de las pérdidas de nitrógeno en suelos agrícolas, lo que con lleva la reducción significativa de emisiones de N_2O en sistemas agrícolas intensivos (Subbarao *et al.*, 2006 y Guardia *et al.*, 2017). El inhibidor DAMPSA es estructuralmente similar al DMPP pero tiene un grupo succínico unido al anillo de pirazol, lo que le confiere una alta estabilidad.

2.4 Cultivo de trigo (*Triticum durum* L.)

2.4.1 Producción y Calidad de Trigo (*Triticum spp.*)

El cultivo del trigo es una práctica agrícola fundamental en muchas partes del mundo, debido a que es una fuente importante de carbohidratos y proteínas para la dieta humana. Tiene su origen en la región asiática y las primeras formas conocidas por los humanos se remontan a hace más de doce mil años, donde recolectaron y cultivaron especies silvestres como *Triticum monococcum* y *Triticum dicoccum*.

En la actualidad existe una amplia diversidad de variedades adaptadas a climas y ciclos de cultivo, y una clasificación general incluye: trigos de invierno y trigos de primavera, así como trigos precoces y tardíos.

El desarrollo del trigo puede describirse usando escalas que se han definido a través de los años. Tres sistemas son los más usados: Zadoks, Feekes (Cuadro 2) (Figura 2) y Haun. Estos constituyen una referencia útil que se ajustan de acuerdo a cada región edafoclimática, cultivar y manejo agronómico, por ejemplo, los trigos primaverales en la región del noroeste del país, en función de la fecha de siembra, suele incrementar la duración del ciclo del cultivo hasta 150 días de desarrollo hasta la cosecha.

Cuadro 2. Etapas fenológicas del trigo de acuerdo a las escalas Zadoks y Feekes, incluyendo la duración estimada en días a nivel global para trigo invernal y trigo primavera. (Zadoks *et al.*, 1974; Miller T.D, 1992)

Zadoks	Etapas Zadoks	Feekes	Etapas Feekes	Días Trigo Invernal	Días Trigo Primavera
00–09	Germinación	1	Emergencia de la plántula	7	5
10–19	Desarrollo de hojas	2	Desarrollo de hojas	14	10
20–29	Macollamiento	3	Macollamiento	21	14
30–39	Encañado	4–5	Inicio del encañado y presencia de nudos	14	10

Zadoks	Etapa Zadoks	Feekes	Etapa Feekes	Días Trigo Invernal	Días Trigo Primavera
40–49	Embuchamiento	6	Hoja bandera visible	10	7
50–59	Espigado	7–8	Inicio y espigado completo	7	5
60–69	Floración	9	Floración	5	3
70–79	Llenado del grano	10–11	Formación y llenado del grano	21	14
80–89	Maduración	12–13	Madurez fisiológica y de cosecha	14	10
90–99	Senescencia	–	Senescencia	10	7

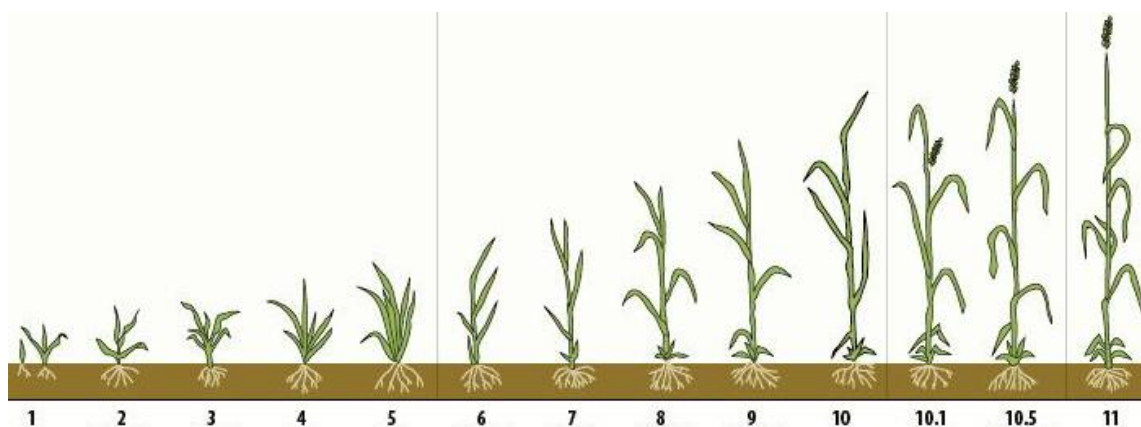


Figura 2. Etapas fenológicas del trigo en escala de Feekes (Adaptado de Miller T.D, 1992)

Desde el punto de vista morfológico, el trigo presenta un sistema radicular fasciculado, que, aunque puede alcanzar más de un metro de profundidad, la mayor parte de la actividad exploratoria se concentra en los primeros 25 cm de suelo. El tallo (conocido como caña) es hueco y tiene 6 nudos; su altura y resistencia mecánica son determinantes para evitar el encamado. Las hojas son cintiformes, con nervaduras paralelas y ápice agudo. La inflorescencia es de tipo espiga, está compuesta por un eje central (raquis) con espiguillas en cada nudo; cada espiguilla tiene hasta nueve flores, aunque la mayoría aborta.

En cuanto al manejo agronómico, el cultivo comprende prácticas agrícolas como preparación del terreno, siembra, fertilización, riego, control de malezas, plagas y enfermedades y finalmente la cosecha. El rendimiento varía según las condiciones edafoclimáticas, la variedad y las prácticas de manejo. Por su parte, la calidad se evalúa principalmente (más no exclusivamente) por características como el contenido de proteínas y gluten. Entre las principales amenazas fitosanitarias se tienen plagas como pulgones y enfermedades como la roya que pueden reducir el rendimiento y la calidad. Tras la cosecha, se deben tomar medidas adecuadas para la conservación y almacenamiento a fin de preservar la calidad del grano.

La producción de trigo es fundamental para la seguridad alimentaria, de acuerdo con la FAO (2022), en el año 2022, la producción mundial alcanzó 808 millones de toneladas, donde figuran 3 países como grandes productores: China con una producción de aproximadamente 137 millones de toneladas, seguida por India con 107 millones de toneladas y Rusia con 104 millones de toneladas, en conjunto representan casi la mitad de la producción registrada.

En México, la producción de trigo desempeña un papel estratégico en la seguridad alimentaria, la producción nacional de trigo fue de aproximadamente 3.5 millones de toneladas, con un rendimiento promedio de 6 toneladas por hectárea (SIAP, 2023). Esta producción se concentró principalmente en los estados del noreste y centro del país, siendo Sonora el principal productor nacional, con una participación superior al 50% de la producción nacional. Otros de los estados con relevancia en la producción de trigo son Baja California y Guanajuato.

En Baja California, la producción de trigo se concentra principalmente en el Valle de Mexicali, donde se produjeron alrededor de 131,000 toneladas durante el ciclo agrícola 2023-2024, con un rendimiento promedio de 6.5 toneladas por hectárea (SIAP, 2024). La producción en esta región es crucial para la economía local y contribuye significativamente a la producción total del estado.

Las variedades de trigo cultivadas, se destinan principalmente a la elaboración de pastas para sopas, harinas para uso industrial y al alimento del ganado, lo que contribuye a satisfacer las necesidades de la industria molinera y el sector pecuario.

El trigo puede absorber nitrógeno tanto en forma de nitrato (NO_3^-) como de amonio (NH_4^+). Sin embargo, el uso exclusivo de amonio puede ser tóxico para muchas plantas, incluyendo el trigo, si no se encuentra en proporciones adecuadas con el nitrato. El amonio es una fuente de nitrógeno más energéticamente eficiente, pero su acumulación puede causar acidificación del rizoplasma, inhibición del crecimiento radicular y estrés oxidativo. Estudios recientes indican que una proporción balanceada de $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ mejora la eficiencia del uso del nitrógeno (NUE) y reduce los efectos tóxicos del amonio (Ye *et al.*, 2022). Además, el nitrato actúa como una señal molecular que regula la expresión de genes relacionados con el crecimiento y la respuesta al estrés.

La calidad del trigo es un concepto multidimensional que depende del uso final del grano (panificación, pastas, galletas, etc.), y se evalúa mediante parámetros físicos, químicos, reológicos y genéticos. Los parámetros físicos incluyen el peso hectolítrico, el peso de mil granos y la dureza del grano, los cuales reflejan la sanidad y densidad del grano (Olán *et al.*, 2022). El contenido de proteína y la composición del gluten (gliadinas y gluteninas) son determinantes en la calidad panadera y de pastas. La calidad reológica se evalúa mediante pruebas como el índice de Zeleny, el Falling Number, alveograma y mixograma, que permiten conocer la calidad del gluten y fuerza panadera, actividad enzimática (amilasa), tenacidad y elasticidad de la masa, aptitud y tiempo de amasado, respectivamente (Grupo Borau, 2023). Estudios recientes han identificado marcadores genéticos en las gluteninas que permiten seleccionar líneas con mejor comportamiento reológico y nutricional (Guzmán *et al.*, 2022). La calidad del trigo depende de la interacción genotipo-ambiente, manejo agronómico, fecha de siembra, fertilización y condiciones climáticas (Olán *et al.*, 2012).

2.5 Uso de Inhibidores de nitrificación en cultivo de trigo

El uso de inhibidores como el 3,4-dimetilpirazol fosfato (DMPP), ha ganado relevancia en cultivo de trigo como estrategia para mejorar la eficiencia del uso del nitrógeno (NUE) y reducir pérdidas ambientales; sin embargo, su efectividad depende en gran medida de las condiciones edafoclimáticas y del manejo agronómico local.

Un ejemplo de esta variabilidad fue reportado por Rose *et al.* (2023) quienes evaluaron el uso de DMPP-urea (Entec®) en condiciones subtropicales; donde a pesar de que el inhibidor logro retrasar la nitrificación durante el primer mes tras la aplicación, no se observaron mejoras significativas en la eficiencia agronómica del nitrógeno ni en el rendimiento del trigo.

Sin embargo, otros estudios han demostrado que el DMPP si puede generar beneficios fisiológicos y productivos significativos en trigo, particularmente cuando se aplica en condiciones adecuadas; pues al mantener el nitrógeno en forma de amonio (NH_4^+) por más tiempo, se mejora su disponibilidad en la rizósfera, lo que favorece la absorción más eficiente por las raíces (Tufail *et al.*, 2023). Esta mayor disponibilidad de nitrógeno asimilable se traduce en una mejora de la eficiencia del uso del nitrógeno (NUE), lo que impacta positivamente en procesos metabólicos clave como la síntesis de clorofila y producción de proteínas estructurales y enzimáticas clave para el crecimiento del trigo. En consecuencia, se observa un desarrollo foliar más vigoroso y una prolongación de la fase vegetativa, lo que puede incrementar el número de macollos y hojas, dependiendo del manejo agronómico (Zhu *et al.*, 2019).

Además, el DMPP no solo actúa sobre el nutriente, sino también sobre el entorno biológico del suelo, ya que reduce la actividad de bacterias nitrificantes como *Nitrosomonas* y *Nitrobacter*, favoreciendo comunidades microbianas que interactúan positivamente con la rizosfera del trigo (Bachtsevani *et al.*, 2021). Estos cambios pueden influir en la disponibilidad de otros nutrientes y en la resistencia a enfermedades, afectando indirectamente la fisiología del cultivo.

3. ARTÍCULO

USO DEL INHIBIDOR DE LA NITRIFICACIÓN DMPP EN TRIGO (*Triticum durum* L.): IMPACTO EN EL RENDIMIENTO Y CALIDAD DEL GRANO

Castillo-Murillo, Juan Daniel ¹, Avilés-Marín, Silvia Mónica ¹, Brigido-Morales, Juan Gabriel, Soto-Ortiz, Roberto ¹, Ail-Catzim, Carlos Enrique ¹, Sandoval-Solís, Samuel ²

¹Universidad Autónoma de Baja California. Instituto de Ciencias Agrícolas. Carretera a Delta S/N Ejido Nuevo León. Mexicali, Baja California, 21705, México.

²University of California, Davis. 135 Veihmeyer Hall, Davis, CA, 95616, USA

*Autora de correspondencia: monica_aviles@uabc.edu.mx

3.1 Resumen

Antecedentes: Las altas pérdidas de nitrógeno (32-65%) en agricultura reducen la eficiencia fertilizante y generan impactos ambientales. Inhibidores como el 3,4-dimetilpirazol fosfato (DMPP) optimizan la disponibilidad de nitrógeno, pero su efecto sobre la calidad industrial del trigo duro (*Triticum durum* L.) en regiones áridas es poco documentado. **Objetivo:** Evaluar el efecto del DMPP en rendimiento, eficiencia de uso de nitrógeno (EUN) y calidad del grano de trigo duro en el Valle de Mexicali, México. **Metodología:** Ensayo en suelo franco-arenoso alcalino (pH 8.4) bajo diseño bloques completos al azar (3 repeticiones). Tratamientos: testigo (urea convencional, 400 kg N ha⁻¹ sin DMPP) vs. dosis de DMPP (200, 300, 400 kg N ha⁻¹). Se evaluaron rendimiento, EUN, proteína (%) del grano, peso hectolítrico (kg hL⁻¹) y panza blanca (%). Los datos se analizaron con ANOVA y prueba de Tukey (p<0.05). **Resultados:** No hubo diferencias significativas en rendimiento (p>0.05). La dosis de 200 kg N ha⁻¹ + DMPP alcanzó la máxima EUN (40 kg kg⁻¹), superando significativamente al testigo (p<0.05). En calidad, el testigo mostró valores óptimos: proteína (11.81%), peso hectolítrico (83.00 kg hL⁻¹) y panza blanca (1.20%). Todos

los tratamientos con DMPP redujeron significativamente la calidad: menor proteína (9.64-9.85%), menor peso hectolítrico (80.50-81.33 kg hL⁻¹) y mayor porcentaje de panza blanca (35.0-58.1%) (p<0.05). **Implicaciones:** El DMPP permite reducir dosis de nitrógeno manteniendo rendimiento y mejorando EUN, pero compromete severamente la calidad comercial del grano en condiciones áridas, requiriendo ajustes en dosis y manejo de riego. **Conclusiones:** El uso de DMPP en trigo duro es viable para eficiencia nitrogenada, pero su impacto negativo en calidad requiere estrategias de manejo integrado que prioricen estándares comerciales.

Palabras clave: nitrógeno, urea, 3-4-Dimethylpyrazole Fosfato, zonas áridas

3.2 Abstract

High nitrogen (N) losses in agriculture, ranging from 32% to 65%, reduce fertilizer efficiency and contribute to environmental degradation. Nitrification inhibitors such as 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) have shown potential to optimize N availability; however, their impact on the industrial quality of durum wheat (*Triticum durum* L.) under arid conditions remains underexplored. This study aimed to evaluate the effect of DMPP on yield, nitrogen use efficiency (NUE), and grain quality of durum wheat in the Mexicali Valley, Mexico. A randomized complete block design with three replications was implemented on alkaline sandy loam soil (pH 8.4). Treatments included a control (conventional urea, 400 kg N ha⁻¹ without DMPP) and three DMPP doses (200, 300, 400 kg N ha⁻¹). Yield, NUE, grain protein content (%), test weight (kg hL⁻¹), and percentage of white belly were assessed. ANOVA and Tukey's test (p<0.05) were used for statistical analysis. No significant differences in yield were observed (p>0.05). The 200 kg N ha⁻¹ + DMPP treatment achieved the highest NUE (40 kg kg⁻¹), significantly outperforming the control (p<0.05). In terms of grain quality, the control showed optimal values: protein (11.81%), test weight (83.00 kg hL⁻¹), and white belly (1.20%). All DMPP treatments significantly reduced grain quality, with lower protein (9.64–9.85%), lower test weight (80.50–81.33 kg hL⁻¹), and higher white belly incidence (35.0–58.1%) (p<0.05). These findings

suggest that while DMPP enhances nitrogen efficiency and allows for reduced N application rates without compromising yield, it adversely affects commercial grain quality under arid conditions. Integrated management strategies, including adjusted N doses and irrigation practices, are necessary to balance efficiency and quality standards.

Keywords: nitrogen, urea, 3-4-Dimethylpyrazole Phosphate, arid zones

3.3 Introducción

El nitrógeno, esencial para la producción agrícola, presenta un alto riesgo de pérdidas por volatilización (Dawar *et al.*, 2021; Tong *et al.*, 2022), desnitrificación (Cui *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2013) y lixiviación (Huang *et al.*, 2017; Cui *et al.*, 2021); y de acuerdo con Wang *et al.*, (2024) estas tasas de pérdida anuales oscilan entre 32%, 2% y 65% respectivamente. Estas pérdidas reducen la eficiencia de uso del nitrógeno y generan impactos negativos en la salud humana, el medio ambiente y la economía (Duncan *et al.*, 2017; Dawar *et al.*, 2021; Patel *et al.*, 2022). En este contexto, es crucial investigar estrategias sostenibles de manejo que optimicen la eficiencia en el uso del nitrógeno, promuevan la producción agrícola y minimicen riesgos ambientales. Entre las alternativas destacan los fertilizantes de liberación controlada y los inhibidores enzimáticos, como la triamida tiofosfórica N-(n-butilo) (NBPT) para la ureasa, y la nitrapirina, diciandiamida (DCD), dimetilpirazol fosfato succínico (DMPSA) y 3,4-dimetilpirazol fosfato (DMPP) para la nitrificación (Liu *et al.*, 2013; Byrne *et al.*, 2020; Duff *et al.*, 2022; Guan *et al.*, 2024). El DMPP, un inhibidor de la nitrificación, retrasa la conversión de amonio (NH_4^+) a nitrato (NO_3^-), prolongando la disponibilidad de nitrógeno en el suelo y reduciendo pérdidas por lixiviación o volatilización (Arregui y Quemada, 2008; Cui *et al.*, 2021; Friedl *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2024); esto favorece una absorción continua de nitrógeno en etapas críticas del cultivo, mejorando el rendimiento agrícola (Norton y Ouyang, 2019; Wang *et al.*, 2021; Shalmani *et al.*, 2022). Duncan *et al.* (2017), Dawar *et al.* (2021) y Shalmani *et al.* (2022) demostraron que el DMPP puede incrementar el

rendimiento del trigo entre 10 % y 37 % respecto a fertilizantes nitrogenados convencionales, especialmente en ambientes semiáridos y bajo condiciones de sequía. La disponibilidad sostenida de nitrógeno en el suelo favorece el contenido proteico del grano, principal indicador de calidad del trigo, que determina sus propiedades tecnológicas y clasificación en mercados internacionales. Mientras el trigo panificable requiere alto contenido proteico, el trigo blando, con niveles más bajos, se usa en galletas y cadenas especializadas (De Santis *et al.*, 2020; An *et al.*, 2024). Aunque el DMPP podría incrementar la acumulación de proteínas al optimizar la absorción de nitrógeno en fases críticas (Liu *et al.*, 2013; Cui *et al.*, 2021), estudios muestran que no siempre aumenta el contenido proteico, pese a mejorar la eficiencia del nitrógeno (Arregui y Quemada, 2008; Huérfano *et al.*, 2015; Duncan *et al.*, 2017). En México, el Valle de Mexicali, Baja California, es el cuarto productor nacional de trigo, con 260,000 toneladas en 39,000 hectáreas y un rendimiento promedio de 6.68 t ha⁻¹ en el ciclo 2023 (SIAP, 2024). En esta región, la fertilización nitrogenada convencional se basa en una dosis de 35 kg de nitrógeno por tonelada esperada, aportando 200-300 kg N ha⁻¹ para rendimientos promedio, y hasta 300-400 kg N ha⁻¹ en parcelas con mayores expectativas de rendimiento. El uso intensivo de fertilizantes nitrogenados justifica explorar tecnologías como los inhibidores de la nitrificación para mejorar la eficiencia del nitrógeno, reducir pérdidas ambientales y promover la sostenibilidad agrícola. Sin embargo, la evidencia sobre el 3,4-dimetilpirazol fosfato (DMPP) en trigo duro (*Triticum durum* L.) es limitada, especialmente en su impacto sobre el rendimiento y la calidad del grano, incluyendo el contenido proteico, clave para su valor comercial. Este trabajo evaluó el efecto del 3,4-dimetilpirazol fosfato (DMPP) en el rendimiento y la calidad del grano de trigo duro (*Triticum durum* L.) en el Valle de Mexicali, Baja California, México.

3.4 Materiales y métodos

Este estudio se realizó durante el ciclo agrícola 2023–2024 en una parcela de producción comercial de 12,000 m² (120 m × 100 m) en el Ejido Tehuantepec, Valle de Mexicali, Baja California, México (32° 53' 28.52" N y 115° 04' 26.27" O) (figura 3). El clima es árido, semicálido [BWh(x')], con precipitaciones invernales escasas. La normal climatológica (1981-2020) de la estación climatológica más cercana indica 54 mm de precipitación anual, temperaturas máximas de 41 °C en verano (aunque existen registros diarios de hasta 51 °C) y 23 °C en invierno (SMN, 2025). El suelo es franco-arenoso, con densidad aparente de 1.47 g cm⁻³, pH de 8.4 y conductividad eléctrica de 2.5 dS m⁻¹.



Figura 3. Ubicación geográfica del sitio donde se estableció el experimento

Se utilizó trigo duro (*Triticum durum* L. cv. Atil), sembrado al voleo con una densidad de 200 kg ha⁻¹. El experimento se estableció en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. Se evaluó el fertilizante NovaTec® Solub 45 (46 % nitrógeno ureico, 0.36 % 3,4-dimetilpirazol fosfato [DMPP] como inhibidor de

nitrificación) en tres dosis, junto con un testigo de urea convencional (46 % nitrógeno) sin inhibidor de nitrificación.

Cuadro 3. Tratamientos de fertilización nitrogenada y el inhibidor DMPP aplicados en el cultivo de *Triticum durum* L. var. Atil

Tratamiento	Nitrógeno (kg ha ⁻¹)	DMPP (kg ha ⁻¹)
Testigo	400	0.0
N200	200	0.72
N300	300	1.08
N400	400	1.44

Nota: El tratamiento testigo utilizó urea convencional (46% de nitrógeno) sin DMPP. Las dosis de DMPP corresponden al 0.36% del fertilizante NovaTec® Solub 45.

Los tratamientos se aplicaron en tres momentos: presembrado, primer riego de auxilio (51 días después de la siembra, DDS) y segundo riego de auxilio (80 DDS), distribuyendo la dosis total equitativamente entre cada aplicación. El cultivo se manejó según las prácticas agronómicas convencionales de la región.

Variables de estudio

Rendimiento de grano

El rendimiento se estimó cosechando un área de 1 m² por tratamiento en cada repetición, seleccionada al azar, y los datos se extrapolaron para expresar el rendimiento en kg ha⁻¹.

Eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN)

La EUN se determinó mediante la productividad parcial del fertilizante nitrogenado (PPFN), utilizando la fórmula descrita por Cui *et al.* (2010):

$$\text{PPFN} = \text{Rendimiento de grano (kg ha}^{-1}\text{)} / \text{Dosis de nitrógeno (kg ha}^{-1}\text{)}$$

Calidad del grano

Los análisis de calidad del grano se realizaron en el laboratorio de Grupo La Moderna, S.A. de C.V., evaluando las siguientes variables:

- **Contenido de proteína en grano (%):** Se midió mediante espectrofotometría de reflectancia en el infrarrojo cercano (Inframatic 9500 NIR), calibrado previamente con valores obtenidos por el método Kjeldahl (método 46-11A, AACC, 2000).
- **Peso hectolítrico (kg hL⁻¹):** Se determinó con una balanza Winchester Bushel Meter Ohaus®, conforme al método 55-10 de la AACC (2005).
- **Panza blanca (%):** En una muestra de 100 g, los granos se clasificaron según el tipo de endospermo (vítreo o harinoso). Los granos con endospermo almidonoso se consideraron como “panza blanca”, y el porcentaje se calculó con la fórmula:

$$\text{Panza blanca (\%)} = (\text{Número de granos con panza blanca} / \text{Número total de granos}) \times 100$$

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) bajo el modelo de bloques completos al azar. Las diferencias significativas entre tratamientos se determinaron mediante la prueba de Tukey ($p < 0.05$). Se realizó un análisis de correlación de Pearson para determinar la asociación entre las variables rendimiento, proteína, panza blanca (PB), peso hectolítrico (PHEC) y eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN). Los análisis se llevaron a cabo utilizando el software IBM SPSS Statistics 23.

3.5 Resultados y discusión

Eficiencia en el uso del Nitrógeno (EUN)

La figura 4 muestra el efecto del inhibidor de nitrificación (DMPP) sobre el rendimiento del grano y la eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN) en trigo duro (*Triticum durum* L. cv. Atil). La aplicación de 200 kg ha⁻¹ de nitrógeno en

combinación con DMPP resultó en la mayor EUN, con un valor aproximado de 40 kg kg⁻¹, significativamente superior ($p < 0.05$, prueba de Tukey) al tratamiento testigo (urea convencional, 400 kg ha⁻¹ sin DMPP) y a los tratamientos con 300 y 400 kg ha⁻¹ de nitrógeno más DMPP (N300 y N400), que mostraron valores de EUN inferiores al 30 kg kg⁻¹.

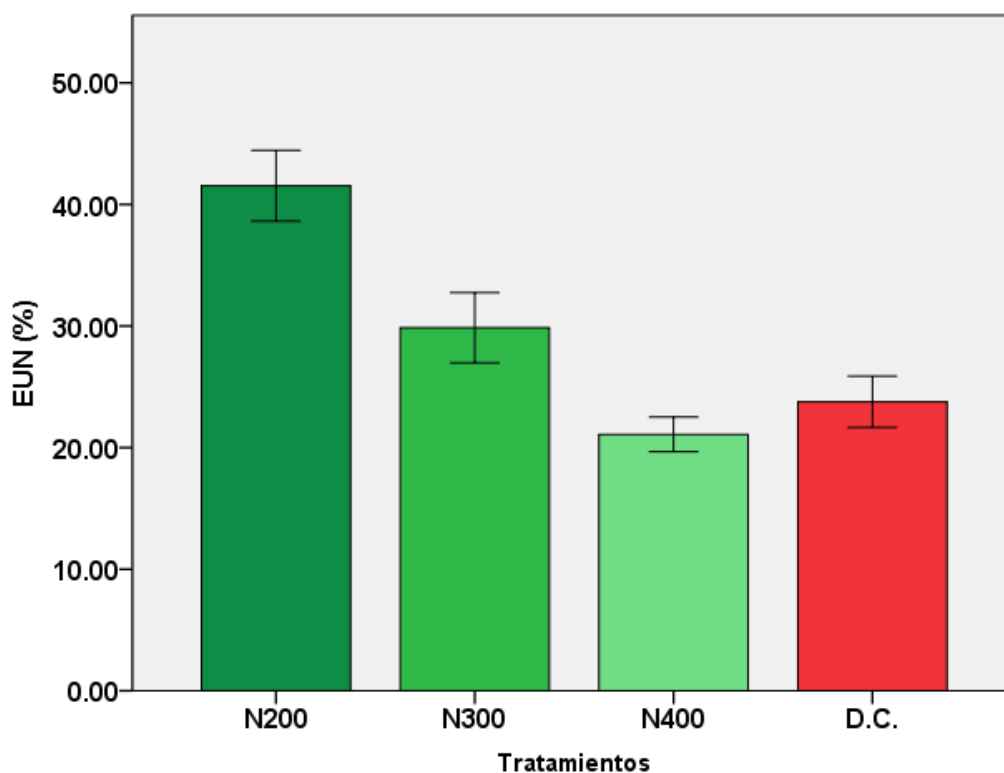


Figura 4. Efecto del inhibidor DMPP sobre la eficiencia en el uso de nitrógeno en trigo (*Triticum durum* L.). Barras de error no traslapadas de forma vertical indican diferencias significativas ($p < 0.05$)

Los resultados obtenidos muestran una mayor eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN) con la dosis de 200 kg N ha⁻¹ combinada con DMPP en comparación con una dosis más alta (400 kg N ha⁻¹) sin DMPP, un resultado esperado y respaldado por investigaciones previas. Shalmani *et al.* (2022) reportaron un incremento del 19% en la EUN en trigo bajo condiciones de fertilización con DMPP y sin estrés

hídrico, mientras que Zhang *et al.* (2025) indicaron que el DMPP puede aumentar la EUN en un rango de 4% a 93%, dependiendo de las condiciones experimentales. Por otro lado, la mayor EUN observada con la dosis de 200 kg N ha⁻¹, en comparación con dosis más altas (300 y 400 kg N ha⁻¹), sugiere la existencia de un punto óptimo de aplicación de nitrógeno, más allá del cual el uso de un inhibidor como el DMPP no mejora significativamente la EUN. Este hallazgo es coherente con Huérfano *et al.* (2015), quienes identificaron 180 kg N ha⁻¹ como la dosis óptima para maximizar el rendimiento, un valor cercano al utilizado en este estudio. Asimismo, Wang *et al.* (2024) encontraron que una aplicación de 225 kg N ha⁻¹ optimizó la EUN en un sistema trigo-maíz, mientras que dosis excesivas (300 kg N ha⁻¹) incrementaron el riesgo de pérdidas ambientales sin beneficios adicionales en la eficiencia.

Rendimiento

En cuanto al rendimiento del cultivo, no se observaron diferencias significativas entre las distintas dosis de nitrógeno con adición de DMPP y la dosis comercial (Testigo) ver Figura 5. Este resultado coincide con investigaciones previas que, si bien han reportado mejoras en la EUN, señalan que el efecto sobre el rendimiento no siempre es significativo. En un metaanálisis, Yang *et al.* (2016) concluyeron que el DMPP no incrementó de manera significativa el rendimiento, registrando en promedio solo un 1.2% de aumento, principalmente en suelos alcalinos.

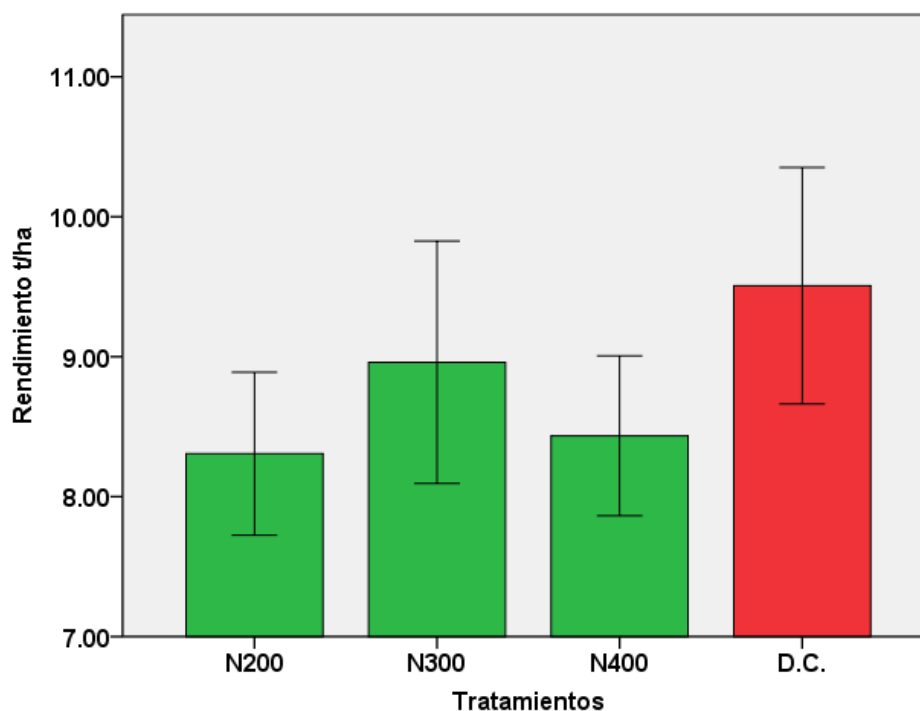


Figura 5. Efecto del inhibidor DMPP sobre el rendimiento de grano de trigo (*Triticum durum*). Barras de error no traslapadas de forma vertical indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

De forma similar, Duncan *et al.* (2017) evaluaron seis experimentos con ENTEC urea (urea con 1% de DMPP) y encontraron que solo en uno de ellos el rendimiento fue significativamente mayor, y de forma marginal. Ni *et al.* (2023) también reportaron que la adición de inhibidores elevó el rendimiento del grano apenas un 2%, con alta variabilidad interanual. No obstante, otros estudios, como los de Villar y Guillaumes (2010) y Shalmani *et al.* (2022), informaron aumentos del 10% al 13% en el rendimiento del trigo con la aplicación de DMPP. Estos hallazgos sugieren que el impacto del DMPP sobre el rendimiento de los cultivos es variable y está influenciado por la interacción entre factores edafoclimáticos y prácticas de manejo.

Calidad del grano

La fertilización nitrogenada es un factor crítico para optimizar el rendimiento y la calidad del grano en trigo, pero sus efectos dependen de la dosis, el momento de aplicación y las condiciones edafoclimáticas. Estudios previos han demostrado que una oferta adecuada de nitrógeno (N) puede incrementar simultáneamente el rendimiento y la calidad del grano hasta un punto máximo, tras el cual el contenido de proteína (GPC) puede seguir aumentando si el N no es limitante (Krüger *et al.*, 2020). De Santis *et al.* (2020) confirman que altas dosis de N favorecen un GPC elevado, a menudo asociado con mayores rendimientos, aunque frecuentemente a expensas de una relación negativa entre ambas variables. Además, dosis de hasta 240 kg N ha⁻¹, combinadas con un riego adecuado, pueden reducir la incidencia de panza blanca a valores inferiores al 10%, mejorando la calidad del endospermo (Solís y Díaz de León, 2001). En este contexto, los inhibidores de nitrificación, como el 3,4-dimetilpirazol fosfato (DMPP), podrían optimizar la disponibilidad de N al reducir pérdidas por lixiviación y emisiones de N₂O, potencialmente mejorando la calidad del grano (Duncan *et al.*, 2017; Ni *et al.*, 2023). Sin embargo, la literatura reporta resultados inconsistentes, con efectos nulos o limitados en rendimiento y calidad en algunos casos (Huerfano *et al.*, 2015; Antošovský *et al.*, 2025).

Cuadro 4. Efecto del inhibidor DMPP sobre los parámetros de calidad en panza blanca (%), peso hectolítrico y proteína (%) (kg hL⁻¹) del grano de trigo

Tratamiento	Panza blanca (%)	Peso hectolítrico kg hL ⁻¹	Proteína (%)
Dosis convencional	1.20 a	83.00 a	11.81 a
200 kg ha ⁻¹	35.0 b	80.50 b	9.64 b
300 kg ha ⁻¹	58.1 c	81.33 b	9.77 ab
400 kg ha ⁻¹	47.3 c	81.33 b	9.85 ab

Medias con letras diferentes indican diferencias significativas (Tukey p<0.05)

En el contexto específico del Valle de Mexicali, los resultados (Cuadro 4) muestran que el testigo superó a los tratamientos con DMPP en los parámetros de calidad del grano, lo que sugiere que la urea convencional favoreció una mayor acumulación de nitrógeno en el grano en este contexto.

Peso hectolítrico

El peso hectolítrico del grano varió entre 80.50 y 83.00 kg hL⁻¹, con diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$). El tratamiento testigo con urea convencional (400 kg ha⁻¹) alcanzó el valor más alto (83.00 kg hL⁻¹), mientras que la dosis de 200 kg ha⁻¹ con DMPP (N200) registró el menor valor (80.50 kg hL⁻¹). Los tratamientos N300 y N400 (300 y 400 kg ha⁻¹ con DMPP) presentaron valores intermedios (81.33 kg hL⁻¹), sin diferencias significativas entre ellos. Estos resultados sugieren que el DMPP, especialmente en dosis bajas, reduce la densidad del grano, probablemente por una menor acumulación de materia seca debido a la nitrificación retardada en un suelo alcalino bajo condiciones áridas (Lan *et al.*, 2022). Dado que el almidón constituye el 60-75% del peso seco del grano, su acumulación, limitada por el estrés térmico en la zona de estudio, pudo reducir el peso hectolítrico en los tratamientos con DMPP, amplificado por el riego limitado (presiembrado, 51 y 80 DDS) (Han *et al.*, 2025; Kim y Kim, 2021; Li *et al.*, 2016)

El testigo combinó alto peso hectolítrico (83.00 kg hL⁻¹) y contenido de proteína en el grano (11.81%), indicando que la urea convencional optimizó ambos parámetros, a diferencia de los tratamientos con DMPP y aunque no se observaron diferencias significativas en rendimiento, el "efecto de dilución" en tratamientos con mayor rendimiento pudo contribuir a la menor densidad con DMPP (Gauer *et al.*, 1992; Antošovský *et al.*, 2024)

Panza blanca

El porcentaje de panza blanca en el grano de trigo mostró diferencias significativas ($p < 0.05$), donde el tratamiento testigo con urea convencional (400 kg ha^{-1}) registró el menor valor (1.20%), mientras que los tratamientos con DMPP (NovaTec® Solub 45) presentaron valores más altos: 35.0%, 58.1%, y 47.3% para N200, N300, y N400 (200, 300, y 400 kg ha^{-1} , respectivamente).

La panza blanca, caracterizada por gránulos de almidón sueltos y espacios no ocupados por proteína en el endospermo, reduce la calidad del grano (Solís y Díaz de León, 2001); su mayor incidencia con DMPP se atribuye a la baja disponibilidad de nitrógeno, que favorece la acumulación de almidón sobre proteína, exacerbada por la inhibición de la nitrificación en un suelo alcalino, donde el DMPP es más persistente (Zhang y Wang, 2024).

Aunque la literatura reporta una correlación negativa entre panza blanca y contenido de proteína en grano (GPC), con una reducción de 16.4-18.5% en panza blanca por cada unidad porcentual de aumento en GPC (Robinson *et al.*, 1979), en este estudio el GPC no disminuyó drásticamente (9.64–11.81%), lo que sugiere que el estrés térmico y el manejo del riego influyeron más en la panza blanca que la proteína.

Contenido de proteína en grano (%).

El contenido de proteína en grano (GPC) de trigo mostró diferencias significativas ($p < 0.05$), donde el testigo con urea convencional (400 kg ha^{-1}) alcanzó el mayor GPC (11.81%), superando a los tratamientos con DMPP (NovaTec® Solub 45), que registraron valores más bajos: 9.64%, 9.77% y 9.85% para las dosis de 200, 300 y 400 kg ha^{-1} , respectivamente. El menor GPC obtenido en los tratamientos con DMPP, puede atribuirse a la baja disponibilidad de nitrógeno por la inhibición de la nitrificación en un suelo alcalino, donde el DMPP puede persistir hasta tres meses (Pérez-Castaño, 2019). Además, altas concentraciones de DMPP pueden alterar las comunidades microbianas del suelo, reduciendo bacterias nitrificantes y la absorción de micronutrientes como zinc y hierro, clave para la calidad proteica (Duncan *et al.*, 2017; Bachtsevani *et al.*, 2021).

La fertilización nitrogenada influye significativamente en el GPC, requiriendo dosis de al menos 140 kg N ha^{-1} en suelos de fertilidad media para alcanzar rendimientos

superiores a 3500 kg ha⁻¹ y estándares de calidad (Krüger *et al.*, 2021). Sin embargo, como se indicó anteriormente, en condiciones áridas el estrés térmico y el riego limitado favorecen la acumulación de almidón sobre nitrógeno (Solís y Díaz de León, 2001).

Correlación de variables

En el cuadro 5 se muestra el análisis de correlación de variables de rendimiento y calidad del grano del trigo, se obtuvo lo siguiente:

- **Rendimiento está fuertemente ligado a PHEC**, lo que indica que la energía disponible es un factor crítico.
- **Proteína y PB están inversamente relacionadas**, lo que sugiere que son indicadores opuestos en la composición del grano.
- **EUN no correlaciona significativamente con rendimiento**, pero sí con PHEC (negativa), lo que podría implicar que mayor eficiencia en nitrógeno no siempre se traduce en más energía.
- **Rendimiento vs PHEC:**
Correlación **muy alta y positiva** ($r = 0.825$, $p = 0.001$).
→ A mayor rendimiento, mayor PHEC.
- **Rendimiento vs Proteína:**
Correlación **moderada positiva** ($r = 0.552$, $p = 0.063$, no significativa al 0.05).
→ Tendencia a que mayor rendimiento se asocie con más proteína, pero no es estadísticamente significativa.
- **Proteína vs PB (Proteína Bruta):**
Correlación **muy alta y negativa** ($r = -0.967$, $p < 0.001$).
→ Cuando aumenta proteína, disminuye PB.

Cuadro 5. Correlaciones de variables del grano de trigo (*Triticum durum*)

		Rendimiento t ha	Proteína (%)	PB (%)	PHEC	EUN (%)
Rendimiento	Correlación de Pearson	1	0.552	-0.562	0.825**	-0.363
	Sig. (bilateral)		0.063	0.057	0.001	0.246
	N	12	12	12	12	12
Proteína	Correlación de Pearson	0.552	1	-0.967**	0.684*	-0.234
	Sig. (bilateral)	.063		.000	.014	.465
	N	12	12	12	12	12
PB	Correlación de Pearson	-0.562	-0.967**	1	-0.682*	0.139
	Sig. (bilateral)	0.057	.000		0.015	0.667
	N	12	12	12	12	12
PHEC	Correlación de Pearson	0.825**	0.684*	-.682*	1	-0.601*
	Sig. (bilateral)	0.001	0.014	0.015		0.039
	N	12	12	12	12	12
EUN	Correlación de Pearson	-0.363	-0.234	0.139	-0.601*	1
	Sig. (bilateral)	0.246	0.465	0.667	0.039	
	N	12	12	12	12	12

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

* . La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

- **Proteína vs PHEC:**

Correlación **alta positiva** ($r = 0.684$, $p = 0.014$).

→ Más proteína se asocia con más PHEC.

- **PB vs PHEC:**

Correlación **alta negativa** ($r = -0.682$, $p = 0.015$).

→ A mayor PB, menor PHEC.

- **EUN (Eficiencia de uso de nitrógeno):**

- Correlación negativa con PHEC ($r = -0.601$, $p = 0.039$, significativa).

- Correlación débil con rendimiento (-0.363 , $p = 0.246$, no significativa).

3.6 Conclusión

El uso del inhibidor de nitrificación 3,4-dimetilpirazol fosfato (DMPP) en trigo duro (*Triticum durum* L. cv. Atil) en el Valle de Mexicali (ciclo 2023–2024) permitió reducir la dosis de nitrógeno a 200 kg ha⁻¹ sin afectar el rendimiento y mejorando la eficiencia en suelos franco-arenosos alcalinos (pH 8.4). No obstante, el DMPP disminuyó la calidad comercial del grano, reduciendo el peso hectolítrico (80.50–81.33 kg hL⁻¹), el contenido de proteína (9.64–9.85%) y aumentando la incidencia de panza blanca (35.0–58.1%) en comparación con la urea convencional. El análisis de correlación evidenció que el rendimiento se relaciona fuertemente con PHEC ($r = 0.825$, $p < 0.01$), indicando que la energía disponible en el grano es clave para la productividad. La proteína mostró correlación positiva con PHEC ($r = 0.684$, $p < 0.05$) y negativa con PB ($r = -0.967$, $p < 0.01$), reflejando ajustes en la composición proteica. La eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN) no correlacionó con rendimiento, pero sí negativamente con PHEC ($r = -0.601$, $p < 0.05$), lo que sugiere que mayor eficiencia no implica mayor energía en el grano. Estos hallazgos subrayan la necesidad de optimizar dosis y momentos de aplicación de fertilizantes con DMPP, así como ajustar calendarios de riego, para equilibrar rendimiento, calidad y sostenibilidad.

3.7 Bibliografía

- An, H., Han, J., He, Q., Zhu, Y., Wu, P., Wang, Y., Gao, Z., Du, T. and Xue, J., 2024. Influence of nitrogen application rate on wheat grain protein content and composition in China: A meta-analysis. *Agronomy*, 14(6), p.1164. Available at: <https://doi.org/10.3390/agronomy14061164>
- Antošovský, J., Škarpa, P. and Ryant, P., 2024. The effect of nitrogen-sulphur fertilizer with nitrification inhibitor on winter wheat (*Triticum aestivum* L.) nutrition. *Heliyon*, 10(12), p.e33035. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33035>
- Antošovský, J., Škarpa, P. and Ryant, P. 2025. The effect of nitrification inhibitor on the yield and quality of *Triticum aestivum* L. and *Brassica napus* L. – A long-term experiment. *Field Crops Research*, 328, p.109906. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2025.109906>
- Arregui, L.M. and Quemada, M., 2008. Strategies to improve nitrogen use efficiency in winter cereal crops under rainfed conditions. *Agronomy Journal*, 100(2), pp.277–284. Available at: <https://doi.org/10.2134/agronj2007.0187>

- Bachtsevani, E., Papazlatani, C.V., Rousidou, C., Lampronikou, E., Menkissoglu-Spirodi, U., Nicol, G.W., Karpouzas, D.G. and Papadopoulou, E.S., 2021. Effects of the nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) on the activity and diversity of the soil microbial community under contrasting soil pH. *Biology and Fertility of Soils*, 57(8), pp.1117–1135. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00374-021-01602-z>
- Byrne, M.P., Tobin, J.T., Forrestal, P.J., Danaher, M., Nkwonta, C.G., Richards, K., Cummins, E., Hogan, S.A. and O'Callaghan, T.F., 2020. Urease and nitrification inhibitors—As mitigation tools for greenhouse gas emissions in sustainable dairy systems: A review. *Sustainability*, 12(15), p.6018. Available at: <https://doi.org/10.3390/su12156018>
- Cui, L., Li, D., Wu, Z., Xue, Y., Xiao, F., Zhang, L., Song, Y., Li, Y., Zheng, Y., Zhang, J. and Cui, Y., 2021. Effects of nitrification inhibitors on soil nitrification and ammonia volatilization in three soils with different pH. *Agronomy*, 11(8), p.1674. Available at: <https://doi.org/10.3390/agronomy11081674>
- Cui, Z., Chen, X. and Zhang, F., 2010. Current nitrogen management status and measures to improve the intensive wheat–maize system in China. *AMBIO*, 39(5–6), pp.376–384. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13280-010-0076-6>
- Dawar, K., Khan, H., Zaman, M., Muller, C., Alam, S.S., Fahad, S., Alwahibi, M.S., Alkahtani, J., Saeed, B., Saud, S., Hammad, H.M. and Nasim, W., 2021. The effect of biochar and nitrogen inhibitor on ammonia and nitrous oxide emissions and wheat productivity. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40(6), pp.2465–2475. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10283-1>
- De Santis, M.A., Giuliani, M.M., Flagella, Z., Reyneri, A. and Blandino, M., 2020. Impact of nitrogen fertilisation strategies on the protein content, gluten composition and rheological properties of wheat for biscuit production. *Field Crops Research*, 254, p.107829. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107829>
- Duff, A.M., Forrestal, P., Ikoyi, I. and Brennan, F., 2022. Assessing the long-term impact of urease and nitrification inhibitor use on microbial community composition, diversity and function in grassland soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 170, p.108709. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108709>
- Duncan, E.G., O'Sullivan, C.A., Roper, M.M., Peoples, M.B., Treble, K. and Whisson, K., 2017. Crop and microbial responses to the nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) in Mediterranean wheat-cropping systems. *Soil Research*, 55(6), p.553. Available at: <https://doi.org/10.1071/sr16327>

- Friedl, J., Scheer, C., Rowlings, D.W., Deltedesco, E., Gorfer, M., De Rosa, D., Grace, P.R., Müller, C. and Keiblinger, K.M., 2020. Effect of the nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) on N-turnover, the N₂O reductase-gene nosZ and N₂O:N₂ partitioning from agricultural soils. *Scientific Reports*, 10(1). Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59249-z>
- Gauer, L.E., Grant, C.A., Bailey, L.D. and Gehl, D.T., 1992. Effects of nitrogen fertilization on grain protein content, nitrogen uptake, and nitrogen use efficiency of six spring wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars, in relation to estimated moisture supply. *Canadian Journal of Plant Science*, 72(1), pp.235–241. Available at: <https://doi.org/10.4141/cjps92-026>
- Guan, T., Lei, J., Fan, Q. and Liu, R., 2024. Soil factors key to 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) efficacy: EC and SOC dominate over biotic influences. *Microorganisms*, 12(9), p.1787. Available at: <https://doi.org/10.3390/microorganisms12091787>
- Han, P., Wang, Y. and Sun, H., 2025. Impact of temperature stresses on wheat quality: A focus on starch and protein composition. *Foods*, 14(13), p.2178. Available at: <https://doi.org/10.3390/foods14132178>
- Huang, T., Ju, X. and Yang, H., 2017. Nitrate leaching in a winter wheat-summer maize rotation on a calcareous soil as affected by nitrogen and straw management. *Scientific Reports*, 7(1). Available at: <https://doi.org/10.1038/srep42247>
- Huérffano, X., Fuertes-Mendizábal, T., Duñabeitia, M.K., González-Murua, C., Estavillo, J.M. and Menéndez, S., 2015. Splitting the application of 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP): Influence on greenhouse gases emissions and wheat yield and quality under humid Mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy*, 64, pp.47–57. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.11.008>
- Kim, K. and Kim, J. 2021. Understanding wheat starch metabolism in properties, environmental stress condition, and molecular approaches for value-added utilization. *Plants*, 10(11), p.2282. Available at: <https://doi.org/10.3390/plants10112282>
- Krüger, H.R., Zilio, J.P., Frolla, F.D. and Tranier Pérez, E.A., 2021. Clima, rendimiento y contenido proteico del grano de trigo en la región semiárida argentina. *Ciencia del Suelo*, 39(1), pp.168–182. Available at: <https://ojs.suelos.org.ar/index.php/cds/article/view/655>
- Lan, T., Li, M., He, X., Deng, O., Zhou, W., Luo, L. and Gao, X., 2022. Efectos del inhibidor sintético de la nitrificación (3,4-dimetilpirazol fosfato; DMPP) e inhibidor biológico de la nitrificación (propionato de metilo 3-(4-hidroxifenil); MHPP) sobre la tasa bruta de nitrificación de N y oxidantes de amoníaco en dos suelos contrastantes. *Biología y Fertilidad de los Suelos*, 58(3), pp.333–344.

- Li, C.Y., Zhang, R.Q., Fu, K.Y., Li, C. and Li, C., 2016. Effects of high temperature on starch morphology and the expression of genes related to starch biosynthesis and degradation. *Journal of Cereal Science*, 73, pp.25–32. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.11.005>
- Li, Z., Xu, P., Bo, X., Wu, J., Han, Z., Guo, S., Li, K., Shen, M., Wang, J. and Zou, J., 2024. Soil pH-dependent efficacy of DMPP in mitigating nitrous oxide under different land uses. *Geoderma*, 449, p.117018. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.117018>
- Liu, C., Wang, K. and Zheng, X. 2013. Effects of nitrification inhibitors (DCD and DMPP) on nitrous oxide emission, crop yield and nitrogen uptake in a wheat–maize cropping system. *Biogeosciences*, 10(4), pp.2427–2437. Available at: <https://doi.org/10.5194/bg-10-2427-2013>
- Ni, K., Vietinghoff, M. and Pacholski, A., 2023. Targeting yield and reducing nitrous oxide emission by use of single and double inhibitor treated urea during winter wheat season in Northern Germany. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 347, p.108391. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108391>
- Norton, J. and Ouyang, Y., 2019. Controls and adaptive management of nitrification in agricultural soils. *Frontiers in Microbiology*, 10. Available at: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01931>
- Patel, N., Srivastav, A.L., Patel, A., Singh, A., Singh, S.K., Chaudhary, V.K., Singh, P.K. and Bhunia, B., 2022. Nitrate contamination in water resources, human health risks and its remediation through adsorption: A focused review. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(46), pp.69137–69152. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22377-2>
- Pérez-Castaño, E.A., 2019. Respuesta de los inhibidores de la nitrificación en el suelo agrícola: movilidad y permanencia. E.T.S. de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas (UPM). Available at: <https://oa.upm.es/57081/>
- Robinson, D., Smith, A. and Lee, K., 1979. Relationship between protein content and white belly in wheat grains. *Journal of Cereal Science*, 10(2), pp.123–130.
- Shalmani, M.A.M., Lakzian, A., Khorassani, R., Zaman, M., Feiziasl, V., Borzouei, A., Rudsari, M.K. and Khiabani, B.N., 2022. Nitrification inhibitor application at stem elongation stage increases soil nitrogen availability and wheat nitrogen use efficiency under drought stress. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 69(11), pp.2020–2037. Available at: <https://doi.org/10.1080/03650340.2022.2132387>
- SIAP, 2024. Estadísticas agrícolas. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera.
- SMN, 2025. Normales climatológicas del estado de Baja California. Servicio Meteorológico Nacional, Comisión Nacional del Agua. Available at:

https://smn.conagua.gob.mx/tools/RESOURCES/Normales_Climatologicas/Normales9120/bc/nor9120_02141.txt

- Solís Moya, E. and Díaz de León Tobías, J.G., 2001. Efecto de los factores controlables de la producción sobre el rendimiento y la panza blanca del grano en trigo duro. *Terra Latinoamericana*, 19(4), pp.375–383. Available at: <https://www.redalyc.org/pdf/573/57319410.pdf>
- Tong, B., Hou, Y., Wang, S. and Ma, W., 2022. Partial substitution of urea fertilizers by manure increases crop yield and nitrogen use efficiency of a wheat–maize double cropping system. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 127(1), pp.11–21. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10705-022-10219-z>
- Villar, J.M. and Guillaumes, E., 2010. Use of nitrification inhibitor DMPP [3,4-dimethylpyrazole phosphate] to improve nitrogen recovery in irrigated wheat on a calcareous soil. *Spanish Journal of Agricultural Research*. Available at: <https://doi.org/10.5424/sjar/2010084-1241>
- Wang, H., Ma, S., Shao, G. and Dittert, K., 2021. Use of urease and nitrification inhibitors to decrease yield-scaled N₂O emissions from winter wheat and oilseed rape fields: A two-year field experiment. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 319, p.107552. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107552>
- Wang, J., Qian, R., Li, J., Wei, F., Ma, Z., Gao, S., Sun, X., Zhang, P., Cai, T., Zhao, X., Chen, X. and Ren, X., 2024. Nitrogen reduction enhances crop productivity, decreases soil nitrogen loss and optimizes its balance in wheat-maize cropping area of the Loess Plateau, China. *European Journal of Agronomy*, 161, p.127352. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127352>
- Yang, M., Fang, Y., Sun, D. and Shi, Y., 2016. Efficiency of two nitrification inhibitors (dicyandiamide and 3,4-dimethylpyrazole phosphate) on soil nitrogen transformations and plant productivity: A meta-analysis. *Scientific Reports*, 6(1). Available at: <https://doi.org/10.1038/srep22075>
- Zhang, J., Liu, Y., Wang, P., Zhao, Y., Zhu, Y. and Xiao, X., 2025. The effect of protein–starch interaction on the structure and properties of starch, and its application in flour products. *Foods*, 14(5), p.778. Available at: <https://doi.org/10.3390/foods14050778>
- Zhang, Y. and Wang, H., 2024. Persistence and efficacy of DMPP in different soil pH conditions. *Agricultural and Environmental Microbiology*, 75(1), pp.89–102.

4. ARTICULO

EFFECTO DEL 3,4-DIMETILPIRAZOL FOSFATO EN LA LIXIVIACIÓN DE NITRATOS EN UN SUELO CULTIVADO CON TRIGO (*Triticum durum* L.) EN EL VALLE DE MEXICALI

Castillo-Murillo, Juan Daniel ¹, Avilés-Marín, Silvia Mónica ¹, Brigido-Morales, Juan Gabriel, Soto-Ortiz, Roberto ¹, Sandoval-Solís, Samuel ²

¹Universidad Autónoma de Baja California. Instituto de Ciencias Agrícolas.

Carretera a Delta S/N Ejido Nuevo León. Mexicali, Baja California, 21705, México.

²University of California, Davis. 135 Veihmeyer Hall, Davis, CA, 95616, USA

*Autora de correspondencia: monica_aviles@uabc.edu.mx

4.1 Resumen

El nitrógeno es uno de los nutrientes esenciales para la productividad de los cultivos, sin embargo; su uso excesivo puede tener consecuencias negativas para el medio ambiente. Entre las alternativas para contribuir en el uso eficiente de los fertilizantes nitrogenados se tienen el uso de los inhibidores de la nitrificación que permitan mayor tiempo de residencia y disponibilidad del nitrógeno en la solución del suelo, y con disminución de la lixiviación de nitratos. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto del inhibidor 3,4-dimetilpirazol fosfato (DMPP) sobre la lixiviación de nitratos en cultivo de trigo (*Triticum durum* L.) en el valle de Mexicali. Se evaluaron tres niveles de fertilización nitrogenada de 200 kg ha⁻¹, 300 kg ha⁻¹ y 400 kg ha⁻¹ con DMPP, y un testigo convencional con 400 kg ha⁻¹, se utilizó urea + inhibidor DMPP (NovaTec® Solub 45) y urea convencional en testigo, respectivamente, en un diseño en bloques completamente al azar con 3 repeticiones. Se colectaron muestras de agua subterránea a 60 cm de profundidad, después de cada riego, se trasladaron en una hielera para su análisis, la concentración de nitratos se determinó por espectrofotometría. El tratamiento de 400 kg ha⁻¹ con DMPP a los 51 días después de la siembra (DDS) presentó una disminución del 78% en la

lixiviación de nitratos, respecto al tratamiento convencional. El uso de la dosis 400 kg ha⁻¹ con DMPP disminuye la lixiviación de nitratos a respecto a la fertilización convencional, representando una alternativa para el uso eficiente de los fertilizantes nitrogenados.

Palabras clave: nitrógeno, urea, zonas áridas

4.2 Abstract

Nitrogen is one of the essential nutrients for crop productivity, however; Its excessive use can have negative consequences for the environment. Among the alternatives to improve to the efficient use of nitrogen fertilizers are the use of nitrification inhibitors that allow longer residence time and availability of nitrogen in the soil solution, leading to a decrease in nitrate leaching. The objective of this study was to evaluate the effect of the 3,4-dimethylpyrazole phosphate inhibitor (DMPP) on nitrate leaching in wheat (*Triticum durum* L.) in the valley of Mexicali. Three fertilization levels of 200 Kg ha⁻¹, 300 Kg ha⁻¹ and 400 Kg ha⁻¹ with DMPP were evaluated, and a conventional control with 300 Kg ha⁻¹, urea + DMPP inhibitor and conventional urea were used in control. Groundwater samples, 60 cm deep, were collected after each irrigation, with a completely randomized block design with 3 replications. The concentration of nitrates, by spectrophotometry. The 400 Kg ha⁻¹ treatment with PPDM at 51 DDS showed a 78% decrease in nitrate leaching, compared to conventional treatment. The use of the inhibitor 3,4 dimethyl pyrazole-phosphate at a dose of 400 Kg ha⁻¹ with DMPP reduces nitrate leaching compared to conventional fertilization, representing an alternative for the efficient use of nitrogen fertilizers.

Keywords: nitrogen, urea, arid zones

4.3 Introducción

Las pérdidas de nitrógeno (N) en suelos agrícolas constituyen un desafío crítico tanto para la eficiencia del uso de fertilizantes como para la sostenibilidad ambiental. Entre los principales mecanismos de pérdida, la lixiviación de nitratos (NO_3^-) destaca por su importancia económica y ambiental, especialmente en regiones con riego intensivo. Este proceso implica el desplazamiento del nitrógeno (en forma de nitrato), hacia capas profundas del perfil del suelo, quedando fuera del alcance del sistema radicular del cultivo, generando la consecuente contaminación de las aguas subterráneas. La magnitud de la lixiviación está determinada por la interacción de múltiples factores, no obstante, resulta particularmente severo en suelos arenosos, debido a su alta permeabilidad y baja capacidad de retención de agua y nutrientes. Factores como la textura del suelo, la intensidad de las precipitaciones o el sistema de riego, además de las prácticas de manejo agrícola influyen significativamente en la magnitud de estas pérdidas. En cultivos en general, particularmente el cereales como el trigo (*Triticum durum* L.), se estima que entre el 30% y el 50% del N aplicado puede perderse por lixiviación, dependiendo de las condiciones edafoclimáticas y del manejo del riego (Grahmann y Vence, 2000); cuando el riego resulta excesivo, puede incrementar estas pérdidas hasta en un 60%. Otros factores como la labranza intensiva, la pendiente del terreno y la escasa incorporación de materia orgánica también acentúan esta problemática, ya que la materia orgánica mejora la estructura del suelo y su capacidad de retención de nutrientes, reduciendo así la pérdida de nitrógeno (Torres *et al.*, 2021). Asimismo, la conductividad hidráulica del suelo (velocidad con la que el agua se mueve a través del perfil), es un factor clave en la dinámica de la lixiviación, pues los suelos con alta conductividad, como los arenosos, presentan mayor riesgo a las pérdidas de N del suelo (Fan *et al.*, 2022). Frente a esta problemática, se han desarrollado estrategias para mejorar la eficiencia del uso del nitrógeno, entre las que destacan los inhibidores de la nitrificación. Estos compuestos actúan mediante dos mecanismos principales: (1) eliminan el cofactor de cobre de las arqueas oxidantes de amonio (AMO) al actuar como agentes quelantes (Ruser y Schulz, 2015), y (2) bloquean el transporte de electrones en los citocromos mediante la unión con AMO, impidiendo la conversión de NH_4^+ a NO_3^- (Florio *et al.*, 2016). Uno de los inhibidores más estudiados es el

3,4-dimetilpirazol fosfato (DMPP), el cual ha demostrado reducir significativamente las pérdidas de nitrógeno por lixiviación y volatilización (Bachtsevani *et al.*, 2021). Estudios recientes también han mostrado que el uso de cultivos de cobertura, como *Lolium multiflorum*, en combinación con inhibidores de nitrificación, puede disminuir la lixiviación de nitrógeno en sistemas de rotación de cultivos (Salazar *et al.*, 2021). En cultivos como el maíz (*Zea mays*), se ha comprobado que la aplicación fraccionada de nitrógeno, junto con el uso de DMPP, mejora la eficiencia del fertilizante y reduce la concentración de nitratos en el suelo (González-Moro *et al.*, 2023). En trigo bajo irrigación, el uso de DMPP ha resultado en una mayor recuperación aparente de nitrógeno y beneficios económicos para los productores (Villar y Guillaumes, 2001). Sin embargo, aún son escasos los estudios realizados en condiciones de campo abierto en zonas áridas, especialmente en cultivos de cereales como el trigo. Por ello, el objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto del inhibidor de nitrificación DMPP sobre la lixiviación de nitratos en el cultivo de trigo (*Triticum durum* L.) en el Valle de Mexicali, una región caracterizada por una amplia superficie de suelos de textura arenosa y clima árido.

4.4 Materiales y métodos

4.4.1 Sitio experimental

El estudio se realizó durante el ciclo otoño-invierno 2024, en una parcela agrícola de producción comercial, de un productor cooperante, en una superficie de 12000 m² (120 m x 100 m), ubicada en el Ejido Tehuantepec, en el Valle de Mexicali, Baja California, México (32° 53' 28.52" N y 115° 04' 26.27" O), a una altitud de 8 m.s.n.m.m (figura 8). El clima de la zona estudio es árido, con bajas precipitaciones invernales (media de 37 mm anuales), temperaturas altas en verano (alrededor de 42.8 °C) y temperaturas altas en invierno (26.7 °C) (CONAGUA, 2020).

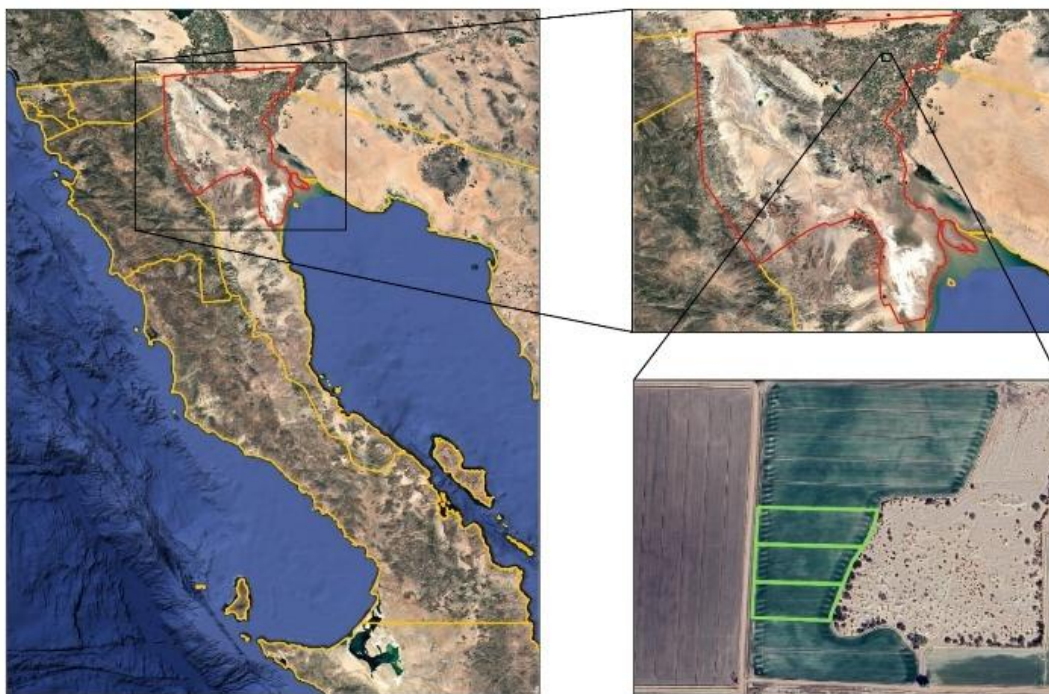


Figura 6. Sitio experimental en el Valle de Mexicali, Baja California, México

4.4.2 Características iniciales del suelo

El análisis de las propiedades del suelo muestran una textura franco-arenosa, en la capa superficial (0 a 30 cm), una densidad de 1.47 g cm^{-3} , pH de 8.28 (medianamente alcalino), CE de 2.81 dS m^{-1} (moderadamente salino), con bajo contenido de nitrógeno y fósforo (Cuadro 6).

Cuadro 6. Características físicas y químicas del suelo a tres profundidades previo al establecimiento del experimento

Propiedades físicas	Profundidad		
	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm
Densidad aparente (g cm ⁻³)	1.47		
Textura	Franco arenosa	Franco	Franco arcillo arenoso
Arcilla (%)	24.20	24.00	25.20
Limo (%)	39.60	31.60	27.60
Arena (%)	36.20	44.40	47.20
Saturación (%)	36.10	33.80	35.60
Capacidad de campo (%)	35.04	35.64	38.26
Punto de marchitez permanente (%)	20.93	21.38	23.31
Humedad aprovechable (%)	14.11	14.26	14.95
Propiedades químicas			
pH	8.28	8.45	8.49
Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)	2.81	1.85	2.41
Nitrógeno (ppm)	5.45	5.52	3.40
Fósforo (ppm)	2.28	1.86	0.63

4.4.3 Diseño experimental y tratamientos

Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones, cada unidad experimental tuvo una superficie de 100 m⁻², los tratamientos evaluados fueron los siguientes:

- T200 + DMPP: Aplicación de 200 kg N ha⁻¹ en forma de urea con inhibidor DMPP al 0.36%
- T300 + DMPP: Aplicación de 300 kg N ha⁻¹ en forma de urea con inhibidor DMPP al 0.36%
- T400 + DMPP: Aplicación de 400 kg N ha⁻¹ en forma de urea con inhibidor DMPP al 0.36%

- Testigo: Aplicación convencional de 400 kg N ha⁻¹ en forma de urea sin inhibidor

4.4.4 Establecimiento del cultivo y manejo agronómico

La siembra de trigo cristalino (*Triticum durum* L.) var. Átil se realizó el día 4 de diciembre de 2023 con una densidad de siembra de 200 kg ha⁻¹. El manejo agronómico se realizó de acuerdo con las prácticas convencionales de la región.

4.4.5 Diseño e instalación de piezómetros

Para monitorear el movimiento de solutos en el perfil del suelo se instalaron piezómetros, los cuales se construyeron con tubos de ABS de 1 m de longitud y 38.1 mm de diámetro. Su diseño consistió en una base de 5 cm sin perforar, seguida de un tramo de 10 cm con perforaciones para permitir la entrada de agua, la cual se recubrió con una malla geotextil para evitar el ingreso de partículas de suelo y 85 cm de espacio sin perforar en la parte superior. La instalación se realizó mediante la perforación de un orificio de 10 cm de diámetro con una barrena manual, hasta una profundidad de 60 cm, donde fue colocando el piezómetro (figura 7). En la parte superior se colocó un tapón de PCV para evitar el ingreso de agua superficial (figura 8).



Figura 7. Instalación de piezómetros en cada unidad experimental **Figura 8.** Piezómetro instalado a 60 cm de profundidad.

4.4.6 Colecta y análisis de muestra de agua

Las muestras de agua intersticial (lixiviado) se colectaron de los piezómetros tres días después de cada evento de riego, con el fin de captar el máximo nivel de lixiviación de solutos. Para ello se utilizó una jeringa de 60 mL acoplada a una manguera de 6.3 mm de diámetro y 75 cm de largo que se introdujo hasta el fondo del piezómetro. Para cada muestra se midió el pH (potenciómetro Hanna HQ40D®), conductividad eléctrica (conductímetro Hanna HQ40D) y concentración de nitratos (NO_3^-) por espectrofotometría (Espectrofotómetro DR 5000).

Análisis de acumulación de nitratos

A partir de los datos de concentración de nitratos (NO_3^-) se obtuvo la tendencia acumulada de lixiviación de nitratos durante el ciclo de cultivo de trigo (2023-2024), para ello se ajustaron curvas de tendencia mediante regresión lineal, seleccionando la ecuación con mejor ajuste para cada tratamiento, los valores de la pendiente se consideran como la tasa de lixiviación de nitratos en el suelo.

4.5 Resultados y discusión

La dinámica de lixiviación de nitratos durante el ciclo del cultivo de trigo mostró una clara influencia de la interacción entre la dosis de nitrógeno y el inhibidor de nitrificación DMPP. Contrario a lo que podría esperarse bajo un modelo lineal de dosis utilizadas en los tratamientos, durante los primeros 60 días después de la siembra (DDS), el tratamiento con la dosis más alta de fertilizante junto con DMPP ($\text{N400} + \text{DMPP}$) registró la menor concentración de nitratos en el lixiviado (4.44 mg L^{-1}), significativamente menor que el testigo con la misma dosis sin inhibidor (5.64 mg L^{-1}), y que los tratamientos $\text{N200} + \text{DMPP}$ (6.90 mg L^{-1}) y $\text{N300} + \text{DMPP}$ (7.30 mg L^{-1}). Este hallazgo sugiere que, a dosis elevadas el DMPP es particularmente efectivo en la etapa inicial para retrasar la nitrificación, manteniendo

una mayor proporción del N aplicado. Los resultados son consistentes con estudios previos que han demostrado la eficacia de los inhibidores de la nitrificación en la reducción de la lixiviación de nitratos en el cultivo de trigo (Sánchez-Martin et al., 2024; Tedeschi et al., 2021).

La aparente menor eficacia inicial del DMPP en las dosis N200 y N300 podría explicarse por un desbalance entre la cantidad del inhibidor, la dosis de N y la dinámica de riego, es probable que, en estas dosis más bajas el pico de disponibilidad de N protegido por el DMPP fuera de menor magnitud y duración, siendo más rápidamente sobrepasado por los volúmenes de agua de los primeros riegos, que movilizaron el nitrato presente y el que se generó tras el periodo de máxima efectividad del inhibidor. Esto coincide con lo reportado por Torabian et al., (2023) quienes observaron que la eficacia del DMPP para reducir la lixiviación es más consistente cuando se aplica con dosis de N que aseguren una suficiente concentración del principio activo en el suelo, pues observaron que la eficacia del DMPP disminuye cuando se aplican dosis superiores a 300 kg N ha⁻¹, especialmente en suelos arenosos bajo riego frecuente.

A partir de los 80 DDS y hasta el final del ciclo de cultivo, se observó una convergencia en las concentraciones de nitratos en el lixiviado entre todos los tratamientos, incluido N400 + DMPP (figura 9). La pendiente de la curva de lixiviación acumulada para este tratamiento mostró un aumento notable en esta etapa, indicando que la efectividad del DMPP disminuyó con el tiempo, permitiendo que el nitrógeno residual se nitrificara y lixiviera. Este fenómeno es crítico, ya que señala que el DMPP retrasa, pero no necesariamente previene, la lixiviación en dosis altas si el nitrógeno no es absorbido por el cultivo dentro del periodo de acción del inhibidor.

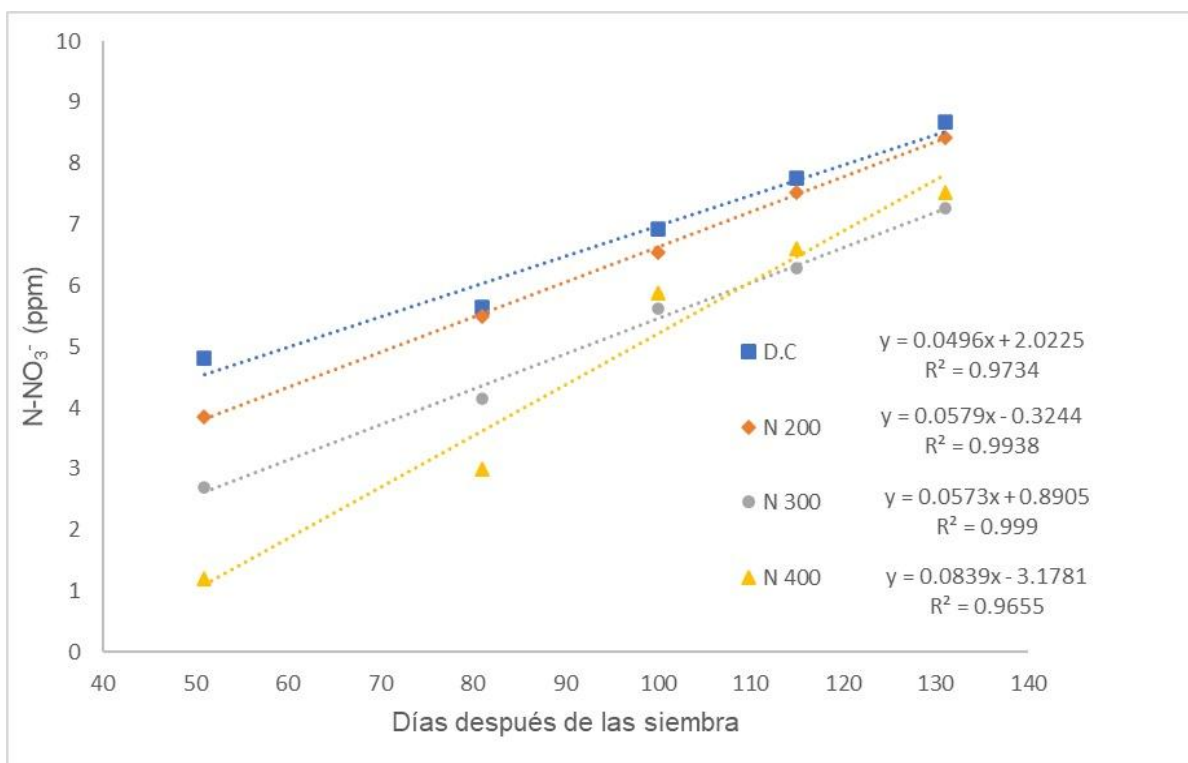


Figura 9. Tendencia acumulada de la evolución de la lixiviación de nitratos por efecto del inhibidor DMPP durante el desarrollo del cultivo de trigo durante el ciclo de cultivo de trigo (2023-2024)

Este resultado es consistentemente reportado en la literatura. Buenrostro-Rodríguez (2024) confirma que la acumulación y posterior lixiviación de nitratos se intensifican en etapas fenológicas tardías, cuando la demanda de N por el cultivo disminuye y el nitrógeno residual queda expuesto al lavado por el riego.

El incremento en la lixiviación de nitratos hacia el final del ciclo de cultivo, representa una pérdida significativa de nitrógeno, lo que reduce la eficacia de aprovechamiento del fertilizante aplicado y aumenta el riesgo de contaminación de aguas subterráneas (Paramio, 2023; Reussi Calvo et al., 2006). La sincronía entre la disponibilidad de nitrógeno y la demanda del cultivo se revela como el factor determinante para la eficiencia del uso del N. El manejo convencional (testigo), donde el N se aplica sin inhibidores y está inmediatamente disponible, resulta en

una mayor probabilidad de pérdida temprana si el riego no gestiona adecuadamente (Solís Moya y Díaz de León, 2001), sobre todo en zonas áridas como el Valle de Mexicali que dependen completamente de la irrigación para la producción agrícola. El DMPP por su parte, modula esta disponibilidad, pero su ventana de acción no es infinita, como lo demuestra el repunte de la lixiviación en N400 + DMPP.

Un hallazgo prometedor de este estudio es que el tratamiento N300 + DMPP presentó una tendencia acumulada de lixiviación intermedia, pero con una eficiencia inicial mejor que el testigo y una reducción en la cantidad total de N aplicado. Esto sugiere que esta dosis potencialmente fraccionada, podría representar un equilibrio entre la productividad del cultivo, la eficiencia económica y la mitigación ambiental, la literatura respalda esta aproximación (Gonzalez-Moro *et al.*, 2023), así por ejemplo para trigo se podría aplicar una dosis base al momento de la siembra y un fraccionamiento posterior, sincronizando con periodos de máxima demanda.

Si bien, los niveles de lixiviación registrados en este estudio se encuentran dentro de los rangos permisibles para evitar aportes significativos al agua subterránea en la región, que presenta un manto freático superficial. Es necesario tomar en cuenta que la lixiviación de nitratos observada en el suelo refleja la dinámica del nitrógeno en el sistema y su relación con las prácticas de manejo; por lo que una mayor eficiencia del uso del agua junto con un calendario de fertilización preciso y el uso de inhibidores constituyen una estrategia robusta para conciliar la productividad agrícola con la sostenibilidad ambiental.

4.6 Conclusión

Este estudio permitió caracterizar el efecto del inhibidor DMPP sobre la lixiviación de nitratos en trigo, identificando dos etapas claras de efectividad. Contrario a la expectativa lineal, la dosis más alta de nitrógeno (400 kg N ha^{-1}) con DMPP resultó en la menor lixiviación inicial, demostrando su eficacia para mitigar pérdidas tempranas. No obstante, este beneficio se vio contrarrestado por un incremento en la lixiviación durante etapas tardías, revelando la limitación temporal del inhibidor y el riesgo de acumulación de nitratos residuales. El hallazgo más relevante para un manejo sostenible es el desempeño de la dosis de 300 kg N ha^{-1} con DMPP, la cual

representa un balance entre la productividad agrícola y la mitigación del impacto ambiental, al reducir la lixiviación de nitratos de manera sostenida. En el contexto de zonas áridas como el Valle de Mexicali, donde la irrigación es indispensable y las condiciones climáticas pueden intensificar la pérdida de nitrógeno, el uso de tecnologías como el DMPP y prácticas complementarias como un aumento en la eficiencia del riego, representan estrategias clave para mejorar la sostenibilidad agrícola. Por lo tanto, se recomienda considerar el uso de inhibidores de la nitrificación como parte de un manejo integrado del nitrógeno en sistemas agrícolas intensivos, donde se priorice la sincronización nutricional.

4.7 Bibliografía

- Bachtsevani, E., Papazlatani, C. V., Rousidou, C., Lampronikou, E., Menkissoglu-Spiroudi, U., Nicol, G. W., Karpouzas, D. G., y Papadopoulou, E. S. (2021). Effects of the nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) on the activity and diversity of the soil microbial community under contrasting soil pH. *Biology and Fertility of Soils*, 57(8), 1117–1135. <https://doi.org/10.1007/s00374-021-01602-z>
- Buenrostro-Rodríguez, J., (2024). Optimización de la fertilización nitrogenada en trigo bajo riego: efectos sobre rendimiento y calidad. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 15(3), 421–435. <https://revistafitotecniamexicana.org/documentos/46-3/5a.pdf>.
- Fan, D., He, W., Shi, Y., Smith, W. N., y Grant, B. B. (2022). Global evaluation of inhibitor impacts on ammonia and nitrous oxide emissions from agricultural soils: A meta-analysis. *Global Change Biology*, 28(18), 5121–5141. <https://doi.org/10.1111/gcb.16294>
- Fan, X., Zhang, F., y Cui, P. (2022). Nitrification inhibitors and their effects on nitrogen cycling in agricultural soils. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22(1), 123-134. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00567-8>
- González-Moro, M. B., Vega-Mas, I., y Marino, D. (2023). Will crops with biological nitrification inhibition capacity be favored under future atmospheric CO₂? *Frontiers in Plant Science*, 14, 1245427. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1245427>
- Graham, P. H., y Vance, C. P. (2000). Nitrogen fixation in perspective: an overview of research and extension needs. *Field Crops Research*, 65(2-3), 93-106. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(99\)00080-5](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(99)00080-5)
- Paramio, J. (2023). *Reducción de la lixiviación de nitratos y manejo mejorado de nitrógeno con sondas de succión en cultivos hortícolas*. Fundación Cajamar. Recuperado de <https://publicacionescajamar.es/wp-content/uploads/2023/03/reduccion-de-la-lixivacion-de-nitratos.pdf>
- Reussi Calvo, N. (2006). *Pérdida de nitrógeno como nitrato por lixiviación en sistemas de cultivo continuo y rotación cultivo-pastura*. Revista INIA, 55, 35–39. Recuperado de <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/12281/1/Revista-INIA-55-diciembre.p.35-39-Grahmann-et-al.pdf>
- Ruser, R., y Schulz, R. (2015). The effect of nitrification inhibitors on the nitrous oxide (N₂O) release from agricultural soils—A review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 178(2), 171–188. <https://doi.org/10.1002/jpln.201400251>
- Salazar, J., Pérez, L., y Gómez, R. (2021). Uso de cultivos de cobertura en combinación con inhibidores de la nitrificación para reducir la lixiviación de nitrógeno. *Revista de Ciencias del Suelo*, 39(1), 45–58.
- Sánchez-Martín, L., Quílez, D., y Vallejo, A. (2024). Efficacy of nitrification inhibitors in reducing nitrate leaching in wheat under Mediterranean conditions. *Agronomy for*

- Sustainable Development, 44(2), 145–158. <https://doi.org/10.1007/s13593-024-00987-3>
- Servicio Meteorológico Nacional. (s.f.). *Inicio*. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Recuperado el 21 de noviembre de 2023, de <https://smn.conagua.gob.mx/es/>
- Tedeschi, L. O., Miguez, F., and Salvagiotti, F. (2021). Nitrification inhibitors and nitrogen management in wheat systems: A review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(4), 987–1002. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00456-9>
- Torabian, S., Farhangi-Abriz, S., Qin, R., Noulas, C., y Wang, G. (2023). Rendimiento de fertilización con nitrógeno e inhibidores de nitrificación en los campos de trigo irrigados. *Agronomía*, 13(2), 366. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020366>
- Torres-Lozada, L. K., Escobar-Medina, D., Soto-Paz, J., Daza-Torres, M. C., y Torres-Lozada, P. (2021). Evaluación de la mineralización del nitrógeno en un suelo ácido bajo fertilización inorgánica y orgánica. *Ingeniería*.
- Villar, J. M., y Guillaumes, E. (2010). Use of nitrification inhibitor DMPP to improve nitrogen recovery in irrigated wheat on a calcareous soil. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8(4), 1218–1230. <https://doi.org/10.5424/sjar/2010084-1241>

5. CONCLUSION GENERAL

Los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación demuestran que el uso del inhibidor de la nitrificación 3,4-dimetilpirazol fosfato (DMPP) en el cultivo de trigo duro (*Triticum durum* L.) en el Valle de Mexicali tiene un impacto positivo tanto en el rendimiento agronómico como en la sostenibilidad ambiental. Por un lado, la aplicación de DMPP mantuvo el rendimiento del cultivo y aumentó la eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN), pero no así en la calidad del grano, no obstante, esto representa un avance importante en la optimización de la fertilización nitrogenada, con sus limitaciones hacia la calidad de grano. Por otro lado, se observó una reducción en la lixiviación de nitratos, lo que contribuye a reducir la afectación en la calidad del agua, por el manto freático superficial de la región, además de reducir efectos negativos fuera de sitio como eutrofización cuando la descarga llega a los cuerpos de agua, lo que permite la conservación de los recursos hídricos y a la mitigación de la contaminación ambiental. En conjunto, estos resultados muestran que el uso de DMPP constituye una herramienta con potencial para mejorar la productividad del trigo y reducir el impacto ambiental de la fertilización nitrogenada en sistemas agrícolas del Valle de Mexicali. Además, abren la puerta a futuras investigaciones orientadas a evaluar su aplicación en otros cultivos y condiciones edafoclimáticas, así como a explorar su integración en estrategias de manejo sostenible de nutrientes.

6. Literatura citada

- Ai, C., Zhang, S., Zhang, X., Guo, D., Zhou, W., and Huang, S. (2018). Distinct responses of soil bacterial and fungal communities to changes in fertilization regime and crop rotation. *Geoderma*, 319, 156-166. <https://libcon.rec.uabc.mx:2281/10.1016/j.geoderma.2018.01.010>
- Akiyama, H., Yan, X., and Yagi, K. (2010). Evaluation of effectiveness of enhanced-efficiency fertilizers as mitigation options for N₂O and NO emissions from agricultural soils: meta-analysis. *Global Change Biology*, 16(6), 1837-1846. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02031.x>
- Bachtsevani, E., Papazlatani, C. V., Rousidou, C., Lampronikou, E., Menkissoglu-Spiroudi, U., Nicol, G. W. and Papadopoulou, E. S. (2021). Efectos del inhibidor de la nitrificación 3,4-dimetilpirazol fosfato (DMPP) sobre la actividad y diversidad de la comunidad microbiana del suelo bajo pH contrastante del suelo. *Biología y fertilidad de los suelos*, 57, 1117-1135. <https://libcon.rec.uabc.mx:2281/10.1007/s00374-021-01602-z>
- Bibi, S., Saifullah, Naeem, A. and Dahlawi, S. (2016). Environmental impacts of nitrogen use in agriculture, nitrate leaching and mitigation strategies. In *Soil science: Agricultural and environmental perspectives* (pp. 131-157). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-34451-5_6
- Bozal-Leorri, A., González-Moro, M. B., Aparicio-Tejo, P. M. y González-Murua, C. (2023). Los inhibidores biológicos de la nitrificación y su importancia en la agricultura. Universidad Pública de Navarra.
- Byrnes, R. C., Núñez, J., Arenas, L., Rao, I., Trujillo, C., Alvarez, C. and Six, J. (2017). Biological nitrification inhibition by *Brachiaria* grasses mitigates soil nitrous oxide emissions from bovine urine patches. *Soil Biology and Biochemistry*, 107, 156-163. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.12.029>
- Calister. (s.f.). Escala Zadoks. Recuperado de <https://www.calister.com.uy/media/zadoks.pdf>. Consultado: 27 de agosto de 2025.
- Cameron, K. C., Di, H. J., and Moir, J. L. (2013). Nitrogen losses from the soil/plant system: a review. *Annals of Applied Biology*, 162(2), 145-173. <https://doi.org/10.1111/aab.12014>
- Celaya-Michel, H. y Castellanos-Villegas, A. E. (2011). Mineralización de nitrógeno en el suelo de zonas áridas y semiáridas. *Terra Latinoamericana*, 29(3), 343-356. Recuperado en 07 de marzo de 2025, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792011000300343&lng=es&esytng=es.
- CIMMYT. (2021). Uso eficiente de nitrógeno en la agricultura. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo.

- Corrochano-Monsalve, M., Carrasco, I. y Maresma, Á. (2024). Inhibidores para optimizar el uso del nitrógeno en la agricultura. *Revista Agricultura*.
- Coskun, D., Britto, D. T., Shi, W. and Kronzucker, H. J. (2017). How plant root exudates shape the nitrogen cycle. *Trends in Plant Science*, 22(8), 661-673. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2017.05.004>
- Cui, L., Li, D., Wu, Z., Xue, Y., Xiao, F., Zhang, L. and Cui, Y. (2021). Effects of nitrification inhibitors on soil nitrification and ammonia volatilization in three soils with different pH. *Agronomy*, 11(8), 1674. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081674>
- Davidson, E. A. (2009). The contribution of manure and fertilizer nitrogen to atmospheric nitrous oxide since 1860. *Nature Geoscience*, 2(9), 659-662. <https://doi.org/10.1038/ngeo608>
- Falkowski, P. (2023). El nitrógeno antropogénico, una amenaza para la flora y fauna. *Science*.
- Fan, D., He, W., Smith, W. N., Drury, C. F., Jiang, R., Grant, B. B. and Zou, G. (2022). Global evaluation of inhibitor impacts on ammonia and nitrous oxide emissions from agricultural soils: A meta-analysis. *Global Change Biology*, 28(17), 5121-5141. <https://doi.org/10.1111/gcb.16294>
- FAO. (2002). Los fertilizantes y su uso. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- FAO. (2018). The future of food and agriculture – Alternative pathways to 2050. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/l8429EN/i8429en.pdf>
- FAO. (2022). Perspectivas de cosecha y situación alimentaria. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/c35b2343-99cc-4136-be18-258132fd9f40/content>. Consultado: 1 de junio, 2024.
- FAO. (2022). World fertilizer trends and outlook to 2022. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/ca6746en/ca6746en.pdf>
- Fowler, D., Coyle, M., Skiba, U., Sutton, M. A., Cape, J. N., Reis, S., ... y Voss, M. (2013). The global nitrogen cycle in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 368(1621), 20130164.
- González-Estrada, E., y Camacho Amador, M. (2017). Emisiones de gases de efecto invernadero en la agricultura. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(8), 1733-1745. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i8.698>.
- Guardia, G., Cangani, M. T., Andreu, G., Sanz-Cobena, A., García-Marco, S., Álvarez, J. M. and Vallejo, A. (2017). Effect of inhibitors and fertigation strategies on GHG emissions, NO fluxes and yield in irrigated maize. *Field crops research*, 204, 135-145. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.01.009>
- Guzmán, C., Crossa, J., Mondal, S., Govindan, V., Huerta, J., Crespo-Herrera, L., and Ibba, M. I. (2022). Effects of glutenins (Glu-1 and Glu-3) allelic variation on dough properties

- and bread-making quality of CIMMYT bread wheat breeding lines. *Field Crops Research*, 284, 108585.
- Guzmán Duchén, D., y Montero Torres, J. (2021). Interacción de bacterias y plantas en la fijación del nitrógeno. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*. <https://doi.org/10.53287/uyxf4027gf99e>
- Grupo Borau. (2023). Parámetros de calidad del trigo panadero. <https://www.grupoborau.es>
- Issifu, S., Acharya, P., Kaur-Bhambra, J., Gubry-Rangin, C. and Rasche, F.(2024). Biological nitrification inhibitors with antagonistic and synergistic effects on growth of ammonia oxidisers and soil nitrification. *Microbial Ecology*, 87, 143. <https://doi.org/10.1007/s00248-024-02456-2>
- Kumar, V., Rithesh, L., Raghuvanshi, N., Kumar, A. and Parmar, K.(2024). Advancing nitrogen use efficiency in cereal crops: A comprehensive exploration of genetic manipulation, nitrogen dynamics, and plant nitrogen assimilation. *South African Journal of Botany*, 169, 486-498. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2024.04.040>.
- Loick, N., Dixon, E. R., Abalos, D., Vallejo, A., Matthews, G. P., McGeough, K. L. y Cárdenas, L. M. (2016). La desnitrificación como fuente de emisiones de óxido nítrico de los núcleos de suelo incubados de un suelo de pastizal del Reino Unido. *Biología y Bioquímica del Suelo*, 95, 1-7.
- López-Alcocer, J. de J., Lépiz-Ildefonso, R., González-Eguiarte, D. R., Rodríguez-Macías, R. y López-Alcocer, E. (2021). Eficiencia en fijación biológica de nitrógeno de cepas de *Rhizobium* spp. recolectadas en frijol cultivado y silvestre. *Terra Latinoamericana*. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.654>
- Mahmud, K., Panday, D., Mergoum, A., and Missaoui, A. (2021). Nitrogen losses and potential mitigation strategies for a sustainable agroecosystem. *Sustainability*, 13(4), 2400. <https://doi.org/10.3390/su13042400>
- Miller, T. D. (1992). Growth stages of wheat: Identification and understanding for improved crop management. Better Crops with Plant Food, Potash and Phosphate Institute.
- Moghaddam, H., Oveisi, M., Mehr, M. K., Bazrafshan, J., Naeimi, M. H., Kaleibar, B. P. y Müller-Schärer, H. (2023). Siembra temprana combinada con fertilización nitrogenada para adaptarse a los efectos del cambio climático en el rendimiento del trigo de invierno en ambientes áridos: resultados de un estudio de campo y modelado. *Revista Europea de Agronomía*, 146, 126825. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126825>.
- Niu, J., Gui, H., Iqbal, A., Zhang, H., Dong, Q., Pang, N. and Song, M. (2020). N-use efficiency and yield of cotton (*G. hirsutum* L.) are improved through the combination of N-fertilizer reduction and N-efficient cultivar. *Agronomy*, 11(1), 55. <https://doi.org/10.3390/agronomy11010055>
- Obando Mera, C., y Hernández del Valle, M. F. (2024). Desarrollo de la estrategia de reducción de huella de carbono de Nitrofert SAS. <https://hdl.handle.net/10784/34317>
- Oita, A., Malik, A., Kanemoto, K., Geschke, A., Nishijima, S. y Lenzen, M. (2016). Contaminación sustancial por nitrógeno incrustada en el comercio

- internacional. Geociencia de la naturaleza, 9(2), 111-115.
<https://doi.org/10.1038/ngeo2635>
- Olán, Micaela de la O, Espitia Rangel, Eduardo, López Sánchez, Higinio, Villaseñor Mir, Héctor E, Peña Bautista, Roberto J, y Herrera Hernández, Juan. (2012). Calidad física de grano de trigos harineros (*Triticum aestivum* L.) mexicanos de temporal. Revista mexicana de ciencias agrícolas, 3(2), 271-283. Recuperado en 18 de septiembre de 2025, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342012000200005&lng=es&tlng=es.
- Parra Cañas, J. P. (2020). Fertilizantes de liberación lenta, controlada y estabilizados. Universidad de Antioquia.
- Pedrozo Acuña, A., y Ramírez Salinas, N. (2020). La eutrofización de cuerpos de agua: un síntoma antropogénico que requiere atención. Perspectivas IMTA, 1(08).
<https://doi.org/10.24850/b-imta-perspectivas-2020-08>
- Qiao, C., Liu, L., Hu, S., Compton, J. E., Greaver, T. L., y Li, Q. (2015). How inhibiting nitrification affects nitrogen cycle and reduces environmental impacts of anthropogenic nitrogen input. Global change biology, 21(3), 1249-1257.
<https://doi.org/10.1111/gcb.12802>
- Rizzo Rivas, D. G. (2009). La fijación biológica del nitrógeno por simbiosis como herramienta para incrementar la productividad de los sistemas de producción animal. Universidad de Nariño. <http://sired.udenar.edu.co/id/eprint/11052>
- Rodríguez, M. B. (2005). Impacto ambiental del uso de fertilizantes nitrogenados en agricultura. Universidad de Buenos Aires.
- Rose, T. J., Kearney, L. J., Zeng, Y., Van Zwieten, L. y Rose, M. T. (2023). La urea DMPP restringe la nitrificación en el primer mes sin mejorar la eficiencia del uso agronómico de N. Ciclo de nutrientes en agroecosistemas, 126(1), 115-125.
<https://libcon.rec.uabc.mx:2281/10.1007/s10705-023-10279-9>
- Ruser, R. and Schulz, R. (2015). The effect of nitrification inhibitors on the nitrous oxide (N₂O) release from agricultural soils—a review. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 178(2), 171-188. <https://doi.org/10.1002/jpln.201400251>
- Salim, N. y Raza, A. (2020). Nutrient use efficiency (NUE) for sustainable wheat production: a review. Journal of Plant Nutrition, 43(2), 297-315.
- Saynes-Santillán, V., Fernández-Luqueño, F., y Ortiz-Monasterio Rosas, J. I. (2021). Uso eficiente de nitrógeno en la agricultura. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo.
- Shaviv, A. (2001). Advances in controlled-release fertilizers. Advances in Agronomy, 71, 1-49. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(01\)71011-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(01)71011-5)
- Skiba, U., and Smith, K. A. (2000). The control of nitrous oxide emissions from agricultural and natural soils. Chemosphere - Global Change Science, 2(3-4), 379-386.
[https://doi.org/10.1016/S1465-9972\(00\)00015-7](https://doi.org/10.1016/S1465-9972(00)00015-7)
- Smil, V. (2004). Enriquecer la tierra: Fritz Haber, Carl Bosch y la transformación de la producción mundial de alimentos. Prensa del MIT.

- Stein, L. Y., and Klotz, M. G. (2016). The nitrogen cycle. *Current Biology*, 26(3), 94-98. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2015.12.021>
- StudyLib. (s.f.). Escala de Zadoks para el desarrollo del trigo: Una guía. Recuperado de <https://studylib.es/doc/4757066/escala-zadoks>. Consultado: 27 de agosto de 2025.
- Subbarao, G. V., Rondon, M., and Ito, O. (2006). Biological nitrification inhibition (BNI)—is it a widespread phenomenon?. *Plant and Soil*, 294(1-2), 5-18. <https://doi.org/10.1007/s11104-006-9159-3>
- Subbarao, G. V., Rondon, M. and Ito, O. (2013). Biological nitrification inhibition (BNI) in natural and agricultural ecosystems. *Advances in Agronomy*, 119
- Tufail, M. A., Irfan, M., Umar, W., Wakeel, A. y Schmitz, R. A. (2023). Mediación de emisiones gaseosas y mejora de la productividad de la planta mediante inhibidores de la nitrificación de DCD y DMPP: metanálisis de las últimas tres décadas. *Investigación en Ciencias Ambientales y Contaminación*, 30(23), 64719-64735. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26318-5>
- Wang, X., y Song, L. (2024). Avances en el estudio de la inmovilización de NO₃ por microbios en suelos agrícolas. *Nitrógeno*, 5(4), 927-940. <https://doi.org/10.3390/nitrogen5040060>
- Yamori, W., Hikosaka, K. y Way, D. A. (2014). Respuesta a la temperatura de la fotosíntesis en plantas C3, C4 y CAM: aclimatación a la temperatura y adaptación a la temperatura. *Investigación de la fotosíntesis*, 119(1), 101-117. <https://libcon.rec.uabc.mx:2281/10.1007/s11120-013-9874-6>
- Yara Argentina. (s.f.). Crecimiento y desarrollo del trigo. Recuperado de <https://www.yara.com.ar/nutricion-vegetal/trigo/crecimiento-y-desarrollo-del-trigo/>. Consultado: 27 de agosto de 2025
- Ye, J. Y., Tian, W. H. y Jin, C. W. (2022). Nitrógeno en plantas: De la nutrición a la modulación de la adaptación al estrés abiótico. *Biología del estrés*, 2(1), 4.
- Zadoks, J. C., Chang, T. T., y Konzak, C. F. (1974). A decimal code for the growth stages of cereals. *Annals of Applied Biology*, 79(1), 109–117.
- Zhao, H., Lin, J., Wang, X., Shi, J., Dahlgren, R. A., y Xu, J. (2021). Dynamics of soil microbial N-cycling strategies in response to cadmium stress. *Environmental Science y Technology*, 55(20), 14305-14315. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04409>
- Zheng, J., Fan, J., Zhang, F., Guo, J., Yan, S., Zhuang, Q. y Guo, L. (2021). Efectos interactivos de la práctica de acolchado y la tasa de nitrógeno sobre el rendimiento del grano, la productividad del agua, la eficiencia en el uso de fertilizantes y las emisiones de gases de efecto invernadero del maíz de verano de secano en el noroeste de China. *Gestión del Agua Agrícola*, 248, 106778. <https://libcon.rec.uabc.mx:2281/10.1016/j.agwat.2021.106778>
- Zhu, G., Ju, X., Zhang, J., Müller, C., Rees, R. M., Thorman, R. E. y Sylvester-Bradley, R. (2019). Efectos del inhibidor de la nitrificación DMPP (fosfato de 3, 4-dimetilpirazol)

sobre las tasas brutas de transformación de N y las emisiones de N₂O. Biología y fertilidad de los suelos, 55(6), 603-615. <https://doi.org/10.1007/s00374-019-01375-6>