

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE CIENCIAS AGRÍCOLAS**



**USO EFICIENTE DE FERTILIZANTES ORGÁNICOS E
INORGÁNICOS EN LA PRODUCCIÓN DE TRIGO: EN BÚSQUEDA
DE LA SUSTENTABILIDAD AMBIENTAL**

T E S I S

**COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

INGENIERO AGRÓNOMO

PRESENTA

JULIAN AVILA AVELAR

**DIRECTOR
DR. JESÚS SANTILLANO CÁZARES**

MEXICALI BAJA CALIFORNIA

AGOSTO DE 2019

**USO EFICIENTE DE FERTILIZANTES ORGÁNICOS E INORGÁNICOS EN LA
PRODUCCIÓN DE TRIGO: EN BÚSQUEDA DE LA SUSTENTABILIDAD
AMBIENTAL**

TESIS

Sometida a la consideración del programa de Ingeniero Agrónomo

Del

Instituto de Ciencias Agrícolas

Por

Julian Avila Avelar

MEXICALI BAJA CALIFORNIA

AGOSTO DE 2019

ESTA TESIS FUE REALIZADA BAJO LA DIRECCIÓN DEL COMITÉ TUTORIAL,
APROBADA Y ACEPTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÓNOMO

COMITÉ TUTORIAL:

DIRECTOR _____

DR. JESÚS SANTILLANO CÁZARES

CODIRECTOR _____

DR. FIDEL NÚÑEZ RAMÍREZ

ASESOR _____

M. C. VÍCTOR ALBERTO CÁRDENAS SALAZAR

ASESOR _____

DR. CARLOS ENRIQUE AIL CATZIM

ASESOR _____

DRA. CRISTINA RUÍZ ALVARADO

AGRADECIMIENTOS:

- Dr. Jesús Santillano Cazares por su apoyo en la dirección en este trabajo, tener la disponibilidad de su tiempo y además de la de dedicación, paciencia, ayudarme en todo el proceso de este trabajo que fue llevado a cabo, también por ser el Maestro del cual he aprendido mucho ya que se prestó a compartir su conocimiento y tiempo.
- Dr. Carlos Enrique Ail Catzim por ser mi tutor, haberme apoyado durante toda mi formación profesional y también por ser un excelente maestro el cual me apoyo durante la carrera.
- Dr. Fidel Núñez Ramírez por permitirme utilizar sus instalaciones, todo su apoyo brindado en la elaboración de esta investigación y por transmitirme su conocimiento.
- Al M.C. Víctor Alberto Cárdenas Salazar y Dra. Cristina Ruiz Alvarado por participar como asesores en esta tesis el cual es un papel muy importante para mí ya que son una parte esencial y también les agradezco por los conocimientos otorgados al ser mis maestros.

- Al Instituto de Ciencias Agrícolas y todos los que lo conforman, intendentes, maestros y secretarias por brindar una muy buena universidad de la cual ayudan a seguir adelante a muchas generaciones.
- A la familia Aguilar Gutiérrez por todo el apoyo brindado en mi formación ya que son una segunda familia que me ha ayudado a salir adelante y ha estado pendiente de mí en todo momento.
- A mis tías, tíos y familia por brindarme su cariño, confianza y apoyo incondicional

DEDICATORIA:

Dedico esta tesis a mis padres por todo el apoyo que me han dado desde pequeño, también por darme las herramientas necesarias para concluir mi carrera universitaria, por llenarme siempre de cariño y enseñarme todos los valores que tengo conmigo los cuales serán indispensables en mi vida profesional; también quiero agradecerles por creer siempre en mí y cuidarme aunque estén lejos, gracias por toda la confianza que me han dado y su amor incondicional. También a mis hermanas Janeth y Anavel por creer en mí, siempre estar ahí cuando las necesité y además por su cariño brindado siempre, son mi familia y los amo, muchísimas gracias por todo sin ustedes no lo habría logrado.

ÍNDICE

Contenido

RESUMEN	VII
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	2
2.1 Objetivo general	2
2.1.1 Objetivo específico	2
III. PLANTEAMIENTO DE HIPÓTESIS	3
IV. REVISIÓN DE LITERATURA	4
4.1 La dualidad del nitrógeno en la producción agrícola	4
4.2. Alternativas propuestas para incrementar la EUN	5
4.2.1. Dosis de fertilizantes nitrogenados	5
4.2.2. Fuentes de fertilizantes	6
4.2.3. Momento de aplicación	8
4.2.4. Método de aplicación (colocación del fertilizante)	9
V. MATERIALES Y MÉTODOS	11
5.1. Ubicación del estudio y condiciones ambientales	11
5.2. Manejo agronómico del experimento	11
5.3. Tratamientos probados y variables de respuesta	12
5.4. Diseño experimental y análisis estadísticos	12
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	14
VII. CONCLUSIONES	17
VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	18

RESUMEN

Los sistemas de producción que toman en cuenta el bienestar de la sociedad, la economía de los agricultores y que sean ambientalmente amigables, son considerados como sustentables. El objetivo del presente trabajo fue evaluar la eficiencia de uso del nitrógeno (EUN) de tratamientos de fertilización aplicados a un cultivo de trigo (*Triticum aestivum* L.). Se evaluaron cinco tratamientos tomando en cuenta diferencias en fuentes, criterio utilizado para determinar la dosis de fertilizante a aplicar, dosis, y momentos de aplicación. Las variables de respuesta fueron rendimientos y EUN. Para los rendimientos se observó diferencia significativa ($P = 0.036$) entre tratamientos. La EUN fue también afectada significativamente ($P = 0.001$). Si el trigo no se encuentra en una condición nutricional precaria en extremo al inicio de la etapa de encañe, la tecnología de uso del sensor GreenSeeker™ puede ser útil para incrementar la EUN. La aplicación de dosis altas de fertilizantes sintéticos en etapas tempranas de desarrollo, como en amacollamiento, produjeron bajas EUN. Se concluye que las prácticas de manejo en la aplicación de fertilizantes nitrogenados en la producción de trigo, pueden producir diferencias sustanciales en rendimientos y en los niveles de EUN. Bajas EUN representan costos ambientales considerables, causados por pérdidas de nitrógeno a mantos freáticos (como iones de NO_3^-) o en forma de gases de efecto invernadero en la atmósfera, como el óxido nitroso (N_2O).

I. INTRODUCCIÓN

Uno de los insumos más limitantes en la producción de cultivos es el nitrógeno (N) (Hawkesford *et al.* 2012). Irónicamente, los fertilizantes a base de N que no son utilizados para la producción, tienen el potencial de causar una serie de problemas ambientales tales como la eutrofización en cuerpos de agua, lluvia ácida, la saturación de N en ambientes naturales, y calentamiento global (Meunier, 2013). Las pérdidas de N a partir de sistemas de producción agrícola impactan inevitablemente el ambiente y es un signo de un manejo deficiente de los fertilizantes, lo cual, a su vez, significa afectaciones a la rentabilidad para los productores (Ercoli *et al.* 2017). Los sistemas de producción que toman en cuenta el bienestar de la sociedad, la economía de los agricultores y que sean ambientalmente amigables pueden lograrse mediante el uso eficiente de los insumos. En este contexto, se ha puesto énfasis en la eficiencia en el uso del N (EUN) en sistemas de producción de trigo (*Triticum aestivum* L.) (Guttieri *et al.* 2017). De acuerdo con Malhi *et al.* (2001), un programa efectivo de manejo del N debe tomar en cuenta cuatro variables: fuente, dosis, momentos de aplicación y colocación del fertilizante (incorporado o sobre la superficie).

II. OBJETIVO

2.1 Objetivo general

El objetivo general del presente trabajo fue identificar estrategias de fertilización nitrogenada en trigo, que permitan alcanzar los más altos rendimientos posibles, con la mayor eficiencia. Es decir, identificar estrategias sustentables de fertilización en la producción de trigo.

2.1.1 Objetivo específico

El objetivo específico del presente trabajo fue evaluar la EUN alcanzada con tratamientos contrastantes en fuentes, criterios para definir las dosis de fertilizante a aplicar, dosis de fertilizante aplicadas, y momentos de aplicación.

III. PLANTEAMIENTO DE HIPÓTESIS

Se espera que el uso de fuentes de fertilizante de lenta liberación, tecnologías innovadoras para la determinación de dosis racionadas y aplicaciones divididas, produzcan los mayores rendimientos de trigo y las más altas eficiencias de uso del nitrógeno.

IV. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1 La dualidad del nitrógeno en la producción agrícola

Uno de los insumos más limitantes en la producción de cultivos y calidad es el nitrógeno (N) (Blumenthal *et al.* 2008; Hawesford *et al.* 2012). Irónicamente, los fertilizantes a base de N que no se utilizan para la producción de cultivos tienen el potencial de causar una serie de daños ambientales, tales como eutrofización en cuerpos de agua fresca, lluvia ácida, la saturación de N en ecosistemas naturales y calentamiento global (Meunier, 2013). Las pérdidas de N a partir de sistemas de producción agrícola inevitablemente impactan negativamente al ambiente y son signos de un manejo inadecuado del N, lo cual, a su vez, es generalmente indicativo de pérdida de utilidades para los productores (Boyer *et al.* 2011; Al-Feel y Al-Basheer, 2012; Ercoli *et al.* 2017; Rathore *et al.* 2017). Los sistemas de producción sostenibles, es decir, los sistemas de producción que toman en cuenta el bienestar de la gente, la economía de los productores, y son ambientalmente amigables, pueden lograrse mediante el uso eficiente de los insumos. En este sentido, un fuerte énfasis se ha puesto en la eficiencia del uso del nitrógeno (EUN) en sistemas de producción de trigo (Yadav *et al.* 2017; Rathore *et al.* 2017; Yang *et al.* 2017; Guttieri *et al.* 2017). El concepto de EUN, sin embargo, no es nuevo y se define como el rendimiento de grano por unidad de N disponible en el suelo (Moll *et al.* 1982). La EUN es una medida indirecta de la sostenibilidad del sistema de producción (Hirel *et al.* 2011; Pourazari *et al.* 2015; Meng *et al.* 2016; Yadav *et al.* 2017).

4.2. Alternativas propuestas para incrementar la EUN

Raun y Gordon (1999) propusieron varias alternativas para incrementar la EUN en sistemas de producción. De acuerdo con Malhi *et al.* (2001), un programa efectivo de manejo debe tomar en cuenta cuatro variables; dosis, fuente, momento de aplicación y método de aplicación (incorporado o en la superficie) de los fertilizantes. En coincidencia con Malhi *et al.* (2001), Ortiz-Monasterio (2002) propuso estrategias para incrementar la EUN en la producción de trigo. Entre las opciones propuestas era el uso de variedades eficientes, la aplicación de dosis racionales, el momento adecuado de aplicación, el uso de fuentes eficientes de fertilizantes, y métodos adecuados de aplicación (localización de los fertilizantes). Yadav *et al.* (2017) propuso un manejo específico dependiendo del sitio, manejo integrado del N, es decir, tomar en cuenta fuentes de N que se encuentran en el suelo, como residuos de cultivos, estiércol, fijación biológica, además de la adición de fertilizantes sintéticos, el uso de más fuentes de fertilizantes eficientes, métodos mejorados de aplicación; la adopción de agricultura de conservación (AC); el uso de variedades genéticamente mejoradas para ser eficientes; variedades y el uso de técnicas de agricultura de precisión.

4.2.1. Dosis de fertilizantes nitrogenados

Aunque las dosis de aplicación de fertilizantes a base de N se ha identificado como una variable clave para influir en los rendimientos y calidad de la producción agrícola, y la EUN, estos objetivos, particularmente el de los rendimientos y la EUN, en general ya han sido exitosamente resueltos a través del uso de algoritmos locales, asistidos por sensores ópticos, como el GreenSeeker®

(Trimble Navigation, Sunny Valley, CA.). El principio en el que se sustentan las recomendaciones de dosis de N en base a esta tecnología recae en la predicción de los rendimientos de trigo a medio ciclo del cultivo (Z30, de acuerdo con la descripción fenológica propuesta por Zadoks (Zadoks *et al.* 1974). De esta manera, las recomendaciones de dosis de fertilizantes se realizan en función del potencial de rendimiento que se estima tener en un campo y ciclo específico y no en los rendimientos que los productores esperan lograr (Raun *et al.* 2002; Mullen *et al.* 2003).

4.2.2. Fuentes de fertilizantes

Entre las opciones de manejo de los fertilizantes en base a N, una que ha recibido mucha atención en tiempos recientes es el uso de fuentes eficientes de fertilizantes. Existe una variedad de productos para recubrir los gránulos de urea convencional que han sido añadidos para protegerlos, con el propósito de intentar que dure por más tiempo disponible en el suelo (a través de retardar la hidrólisis de la urea), para que la planta pueda absorberlo, antes de que se pierda al ambiente (Behin y Sadeghi, 2016; Naz y Sulaiman, 2016; Rose *et al.* 2016). Un producto pionero entre los fertilizantes de lenta liberación que aún sigue en el interés de la comunidad científica es la urea Agrotain®, N-(n butyl) triamida trifosfórica (urea – NBPT) (Slamka *et al.* 2014; Ding *et al.* 2015; Giannoulis *et al.* 2016; Zanin *et al.* 2016). Los reportes de literatura acerca de la efectividad de la urea – NBPT para incrementar los rendimientos de trigo y la EUN son inconsistentes. Mohammed *et al.* (2016) indicó inconsistencia en reportes de literatura acerca de incrementar la eficiencia de este tipo de fertilizantes, en

comparación con los fertilizantes convencionales. Esta inconsistencia sería explicada por variaciones espaciales y temporales en el suelo y por factores climáticos, al igual que por variación en el momento y método de aplicación de los fertilizantes. Curitiba-Espíndula *et al.* (2013) reportaron que usar urea - NBPT resultó en una mejor utilización de N por el trigo. Más tarde, Curitiba-Espíndula *et al.* (2014) encontraron resultados mixtos, reportando que el uso de urea – NBPT mejoró el rendimiento de grano solo cuando la urea convencional era aplicada en la superficie en la etapa de amacollamiento, pero no cuando la urea convencional era incorporada en surcos al momento de la siembra. Prando *et al.* (2013) reportó que no encontró diferencia entre la urea –NBPT y la urea convencional en rendimientos de trigo en Brasil. En China, no se encontró ventaja en los rendimientos de trigo por usar urea – NBPT, comparado con urea convencional (Ding *et al.* 2015). La efectividad de la urea – NBPT para reducir la velocidad de hidrólisis en campos de trigo en Australia dependió de la temperatura; siendo efectiva solamente bajo temperaturas frescas (5°C y 10°C), pero inefectiva a una temperatura de 25° C (Suter *et al.* 2011). Utilizando una base de datos bastante robusta (47 experimentos a lo largo de seis años), la urea – NBPT y el nitrato de amonio resultaron más eficientes que la urea convencional en reducir las emisiones de gases de efecto invernadero e incrementar el rendimiento en Inglaterra (Sylvester-Bradley *et al.* 2014). En Victoria, Australia, Turner *et al.* (2010) reportó que las pérdidas acumuladas de N en forma de NH₃ de tratamientos de urea convencional y urea – NBPT aplicados a trigo invernal fueron 9.5 y 1.0%, respectivamente; concluyendo que la urea – NBPT en sustitución de

urea convencional podían reducir sustancialmente las emisiones de NH_3 . En Montana, EUA, en trigo cultivado bajo agricultura de conservación (AC), Engel *et al.* (2017) reportó que la adición de NBPT a urea (1g kh^{-1}) redujo las pérdidas de NH_3 en 65%, comparado con urea sin NBPT. En un estudio similar al anterior (Engel *et al.* 2017), Romero *et al.* (2017) reportó que la urea – NBPT mejoró la recuperación de fertilizante en tres ciclos de prueba, comparado con urea convencional, pero los rendimientos de trigo no fueron afectados por las dos fuentes de fertilizante; mientras que la proteína en el grano se incrementó de 6 a 8 g kg^{-1} , con el uso de urea convencional y urea – NBPT, respectivamente.

4.2.3. Momento de aplicación (aplicación en un solo momento vs. aplicaciones divididas)

El momento de aplicación de fertilizantes a base de N se puede ser abordada en la literatura ya sea como la comparación entre el número de veces que los fertilizantes son aplicados en diferentes etapas de desarrollo de un cultivo a lo largo de un ciclo (una sola aplicación contra dos, o dos contra tres, etc.), o las estaciones del año en las que el fertilizante es aplicado (otoño contra primavera, etc.). Los primeros estudios (número de aplicaciones en un ciclo) son más comunes para sistemas de producción bajo riego y los segundos (por las estaciones en que se aplican los fertilizantes) son más comunes en estudios bajo temporal. Independientemente del sistema de producción, desde el punto de vista agrícola, la importancia del tiempo de aplicación del fertilizante N radica en proveer este nutriente esencial en etapas fenológicas claves, cuando las tasas de acumulación máxima de N ocurren cuando los rendimientos y la calidad puedan

ser maximizados (Fischer, 1993; Ortiz-Monasterio, 2002; Efreteui *et al.* 2016; Mohammed *et al.* 2016). Muchos estudios han reportado que la máxima acumulación de N en trigo ocurre a partir de fines de la etapa de amocalliento y hasta la etapa de espigamiento, de las etapas Z25 a Z50 (Brown *et al.* 2005; Orloff *et al.* 2012; Meng *et al.* 2013). Además, la etapa a la cual los rendimientos de trigo se ha encontrado tener la mayor relación es la etapa de elongación del tallo, o encañe, en la etapa Z30 (Fischer *et al.* 1993; Raun *et al.* 2002; Moges *et al.* 2004; Ortiz-Monasterio y Raun, 2007; Efreteui *et al.* 2016); mientras que aplicaciones tardías de N (en espigamiento) mejoran principalmente la concentración de N en grano (Brown *et al.* 2005; Grahmann *et al.* 2013). En el noroeste de la India, Coventry *et al.* (2011) probó cuatro tratamientos consistentes en aplicaciones divididas (mas métodos de riego) y reportó que en tres de cuatro la división de aplicaciones de fertilizantes en dosis iguales en tres etapas fenológicas (1/3 a la siembra, 1/3 a comienzos de amacollamiento, y 1/3 en la etapa de primer nudo visible) siempre registró los rendimientos más altos, proteína en grano, y recuperación (eficiencia) de fertilizantes, que cuando la aplicación se hizo en dos aplicaciones; 1/3 a la siembra + 2/3 a 65 días después de la siembra o sin fertilizante a la siembra + 1/2 a 22 días después de la siembra + 1/2 a 65 días después de la siembra.

4.2.4. Método de aplicación (colocación del fertilizante)

La relevancia de la colocación del fertilizante (incorporado contra superficial) reside en que los fertilizantes todavía se aplican comúnmente al voleo (en la superficie del suelo) pero este método no garantiza que una parte sustancial del

fertilizante aplicado esté disponible para la planta en el lugar correcto para una absorción radicular óptima, causando de esta manera problemas de contaminación (Zhu y Chen, 2002; Nkebiwe *et al.* 2016). Nkebiwe *et al.* (2016) realizó una revisión de literatura extensa acerca de la colocación de los fertilizantes y su efecto en el rendimiento de los cultivos, calidad y eficiencia.

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Ubicación del estudio y condiciones ambientales

El experimento fue conducido en el campo experimental del ICA-UABC, localizado en el ejido Nuevo León, Mexicali B. C., México (Lat. 32° 24' 26.38" N, Long. 115° 11' 55.43" O, elevación 14 msnm). La temperatura media anual es de 22.3 °C, pero puede variar desde 50 °C durante el verano, y tan baja como -7 °C durante el invierno. La precipitación anual promedio es de sólo 58 mm (Santillano-Cázares *et al.* 2018).

5.2. Manejo agronómico del experimento

La siembra se realizó el 10 de diciembre de 2017, la variedad de trigo utilizada fue CIRNO, con una densidad de siembra de 100 kg ha⁻¹, utilizando una sembradora de labranza mínima, sobre residuos de cosecha del ciclo anterior de producción de trigo. Al momento de la siembra se aplicaron 11 y 52 kg ha⁻¹ de N y fósforo, respectivamente; el fertilizante comercial utilizado fue fosfato monoamónico. Se aplicó un riego de germinación y cuatro adicionales de auxilio, aproximadamente coincidiendo con las etapas fenológicas de amacollamiento, inicio de encañe, espigamiento, y llenado de grano. Se realizó una aplicación para control de malezas, a base de productos comerciales localmente recomendados específicamente para trigo (una mezcla de agua con Axial®, Sigma forte®, Buffex® y Amber®).

5.3. Tratamientos probados y variables de respuesta

Se evaluaron cinco tratamientos y fueron seleccionados tomando en cuenta diferencias en fuentes, criterio utilizado para determinar la dosis de fertilizante a aplicar, dosis de fertilizante aplicadas, y momentos de aplicación (Cuadro 1). Las fuentes de fertilizantes a base de N consistieron en urea convencional, urea de liberación lenta (Urea Forte®) y estiércol seco de bovino. Un criterio utilizado para determinar la dosis óptima de fertilizante se apoya en el uso de algoritmos desarrollados localmente y con el apoyo de un sensor comercial (GreenSeeker™). Las variables a medir fueron rendimientos de trigo y EUN. La EUN se calculó como el grano producido por unidad de N aplicado, ya que la fracción mineral de N del suelo no fue medido; lo anterior de acuerdo con procedimiento utilizado por Ortiz-Monasterio *et al.* (1997).

5.4. Diseño experimental y análisis estadísticos

El diseño de tratamientos fue de bloques completos al azar con ocho repeticiones para los tratamientos 1, 4 y 5 y cuatro para los tratamientos 2 y 3 (Cuadro 1). Los datos se analizaron utilizando el PROC MIXED del programa estadístico SAS (versión 9.0). La separación estadística de las medias se realizó utilizando la opción *lsmeans*, declarando diferencias significativas con una probabilidad de error igual o menor a 5%.

Cuadro 1. Tratamientos utilizados para comparar fuentes, criterios para la fertilización, dosis, y momentos de aplicación de fertilizantes a trigo, sobre la producción y eficiencia del uso del nitrógeno (EUN) en el ciclo de siembras 2017-2018 en el ICA-UABC, en el valle de Mexicali, B. C., México.

Tratamiento número	Fuente	Criterio para la fertilización†	Dosis de N (kg ha⁻¹)	Momento de aplicación
1	Urea convencional	Tradicional + Sensor	270	50% en amacollamiento y 50% al inicio de encañe
2	Urea convencional	Sensor	96	100% inicio del encañe
3	Urea convencional	Sensor X 2	192	100% al inicio de encañe
4	Urea liberación lenta (Forte®)	Tradicional + Sensor	270	50% en amacollamiento y 50% al inicio de encañe
5	Estiércol	Arbitrario	120‡	50% en amacollamiento y 50% al inicio de encañe

†Sensor = Fertilización en base a tecnología de uso de un sensor comercial (GreenSeeker®); Tradicional + sensor = Práctica tradicional + uso de la tecnología GreenSeeker®; Sensor X 2 = Dosis recomendada por el sensor multiplicada por 2; y Arbitraria = Dosis determinada de manera arbitraria.

‡Equivalente a 40 t ha⁻¹, asumiendo una concentración de N orgánico de 1% al momento de la aplicación y una mineralización de 24% durante el ciclo de crecimiento.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 2 se presentan los resultados de rendimientos y EUN. Se observó diferencia significativa ($P = 0.036$) para los rendimientos y también para la EUN ($P = 0.001$). Aunque en general se observa una relación inversa entre los rendimientos y la EUN, no siempre fue así, ya que el tratamiento 3 registró los más altos rendimientos y su EUN fue similar a la de los tratamientos con las mayores eficiencias. El tratamiento 2, en el cual el criterio para determinar su dosis de fertilización N fue usando el sensor GreenSeeker™, registró el menor rendimiento de todos los tratamientos. Esto fue un tanto sorpresivo, ya que esta tecnología había demostrado ser efectiva para definir la fertilización óptima para trigos en el valle de Mexicali (Santillano *et al.* 2013). Posibles causas de este resultado es que las parcelas de este tratamiento habían sido el tratamiento “testigo” desde una temporada de producción pasada; es decir, no había recibido fertilizantes, sino hasta el inicio de encañe de la temporada que se reporta. El trigo en este tratamiento (planeado originalmente para ser testigo, sin fertilizante) tenía una condición evidentemente precaria, por lo que se decidió cambiarlo a tratamiento fertilizado de acuerdo con la recomendación del sensor. Es posible que la tecnología del sensor GreenSeeker™ sea efectiva solamente en situaciones donde los trigos no se encuentran severamente desnutridos. En soporte de esta posibilidad, el tratamiento 4 fue de los más rendidores, utilizándose el sensor para su fertilización, pero ya había recibido 174 kg N ha^{-1} en la etapa de amacollamiento. El tratamiento que utilizó estiércol como fuente de N, también fue

de los menos rendidores y es que su dosis de 120 kg ha^{-1} , es teórica (Figueroa-Viramontes *et al.* 2010), ya que se desconoce en realidad cuanto N fue mineralizado en las etapas más críticas para el crecimiento del trigo.

Las EUN observadas en este experimento variaron desde 21 hasta 49 kg de grano por kg de N aplicado, con una media de 36 kg kg N^{-1} . Las EUN más altas, de 49 y 44 kg kg N^{-1} se registraron para los tratamientos 2 y 5. Estos niveles de EUN son considerados como altos, si se toma en cuenta una referencia de INIFAP valle de Mexicali, la cual estimó que en la región se requieren 35 kg de N para producir una tonelada de grano (INIFAP, 2010); esto representa una EUN de casi 30 kg kg N^{-1} . Por el contrario, EUN registradas para los tratamientos 1 y 4 tuvieron bajas eficiencias, al compararlo con la referencia de INIFAP (2010). Ortiz-Monasterio, *et al.* 1997), reportaron EUN de 61, 35, y 18 kg kg N , para dosis de 75, 150, y 300 kg N ha^{-1} promedio entre 10 variedades de trigo, respectivamente. En este estudio el promedio de la fertilización fue de 190 kg, con una EUN promedio de 36; lo cual es similar a la EUN obtenida con 150 kg N ha^{-1} , en el trabajo reportado por Ortiz-Monasterio *et al.* (1997).

Cuadro 2. Rendimientos y eficiencia de uso del nitrógeno (EUN) de tratamientos utilizados para comparar fuentes, criterios para la fertilización, dosis de fertilizante aplicado, y momentos de aplicación de fertilizantes a trigo, en el ciclo de siembras 2017-2018 en el ICA-UABC, en el valle de Mexicali, B. C., México.

Tratamiento número	Rendimiento (kg ha ⁻¹)¶¶	NUE (kg kg N ⁻¹)¶¶
1	5725 ab	21 b
2	4750 b	49 a
3	7350 a	38 ab
4	6975 a	26 b
5	5350 b	44 a
<i>Media</i>	<i>6030</i>	<i>36</i>
<i>Error estandar</i>	<i>743</i>	<i>5.5</i>
<i>Significancia</i>	<i>*</i>	<i>**</i>

¶¶ = Diferencia significativa ($P < 0.05$), ** = Diferencia significativa ($P > 0.01$).

VII. CONCLUSIONES

Bajo condiciones nutricionales aceptables del trigo al inicio de encañe, el uso de tecnologías de precisión como el sensor GreenSeeker™ pueden ser útiles para incrementar la EUN. Aplicaciones altas de fertilizantes sintéticos en etapas tempranas, como en amacollamiento, producen una baja EUN debido, posiblemente, a que la demanda de mayores concentraciones de N en el suelo por el trigo, comienzan hasta el inicio de encañe. Con base en los resultados de este trabajo, se concluye que las decisiones de manejo de la fertilización en la producción de cultivos tienen efectos sustanciales en la producción y en la EUN. El reto está en lograr los mayores rendimientos, sin reducir de manera importante la EUN, ya que bajas EUN representan costos ambientales causados por pérdidas como iones de N a mantos freáticos o como gases de efecto invernadero (N₂O) en la atmósfera.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Feel, M. A., and AL-Basheer, A. A. R. 2012. Economic efficiency of wheat production in Gezira scheme, Sudan. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 11(1), 1-5.
- Arshad, M.A. y Coen, G.M. 1992. Characterization of soil quality: Physical and chemical criteria. *American J. of Alternative Agriculture* 7: 25-31.
- Behin, J., and Sadeghi, N. 2016. Utilization of waste lignin to prepare controlled-slow release urea. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 5(4), 289-299.
- Blumenthal, J. M., Baltensperger, D. D., Cassman, K. G., Mason, S. C., and Pavlista, A. D. 2008. Importance and effect of nitrogen on crop quality and health. In *Nitrogen in the Environment* (pp. 51-70). Academic Press.
- Boyer, C. N., Brorsen, B. W., Solie, J. B., and Raun, W. R. 2011. Profitability of variable rate nitrogen application in wheat production. *Precision Agriculture*, 12(4), 473-487.
- Brown, B., Westcott, M., Christensen, N., Pan, B., and Stark, J. 2005. Nitrogen management for hard wheat protein enhancement. PNW 578. Pacific Northwest Extension Publications.
- Coventry, D. R., Yadav, A., Poswal, R. S., Sharma, R. K., Gupta, R. K., Chhokar, R. S., and Kleemann, S. G. L. 2011. Irrigation and nitrogen scheduling as a requirement for optimising wheat yield and quality in Haryana, India. *Field Crops Research*, 123 (2), 80-88.

- Curitiba Espindula, M., Soares Rocha, V., Alves de Souza, M., Campanharo, M., and de Sousa Paula, G. 2013. Rates of urea with or without urease inhibitor for topdressing wheat. *Chilean journal of agricultural research*, 73(2), 160-167.
- Ding, W. X., Chen, Z. M., Yu, H. Y., Luo, J. F., Yoo, G. Y., Xiang, J., and Yuan, J. J. 2015. Nitrous oxide emission and nitrogen use efficiency in response to nitrophosphate, N-(n-butyl) thiophosphoric triamide and dicyandiamide of a wheat cultivated soil under sub-humid monsoon conditions. *Biogeosciences*, 12(3), 803-815.
- Efretuei, A., Gooding, M., White, E., Spink, J., and Hackett, R. 2016. Effect of nitrogen fertilizer application timing on nitrogen use efficiency and grain yield of winter wheat in Ireland. *Irish journal of agricultural and food research*, 55(1), 63-73.
- Engel, R., Jones, C., Romero, C., and Wallander, R. 2017. Late-fall, winter and spring broadcast applications of urea to no-till winter wheat I. Ammonia loss and mitigation by NBPT. *Soil Science Society of America Journal*, 81(2), 322-330.
- Ercoli, L., Masoni, A., Mariotti, M., Pampana, S., Pellegrino, E., and Arduini, I. 2017. Effect of preceding crop on the agronomic and economic performance of durum wheat in the transition from conventional to reduced tillage. *European Journal of Agronomy*, 82, 125-133.
- Espindula, M. C., Rocha, V. S., Souza, M. A. D., Campanharo, M., and Pimentel, A. J. B. 2014. Urease inhibitor (NBPT) and efficiency of single or split application of urea in wheat crop. *Revista Ceres*, 61(2), 276-279.

- Fischer, R.A.; Howe, G.N.; Ibrahim, Z. Irrigated Spring Wheat and Timing and Amount of Nitrogen Fertilizer. I. Grain Yield and Protein Content. *Field Crops Res.* 1993, 33, 37–56. [CrossRef]
- Giannoulis, K. D., Bartzialis, D., Skoufogiannia, E., and Danalatos, N. G. 2016. The Use of Urease Inhibitor Fertilizers (Agrotain) and Their Effect on Cereal Crops and Cotton Yield. *Agrofor*, 1(2).
- Grahmann, K.; Verhulst, N.; Buerkert, A.; Ortiz-Monasterio, I.; Govaerts, B. Nitrogen Use Efficiency and Optimization of Nitrogen Fertilization in Conservation Agriculture. *CAB Rev.* 2013, 8, 1–19. [CrossRef]
- Gregory, P. J., Ingram, J. S., Andersson, R., Betts, R. A., Brovkin, V., Chase, T. N., ... and Howden, S. M. 2002. Environmental consequences of alternative practices for intensifying crop production. *Agriculture, ecosystems and environment*, 88(3), 279-290.
- Guttieri, M.J.; Frels, K.; Regassa, T.; Waters, B.M.; Baenziger, P.S. Variation for Nitrogen Use Efficiency Traits in Current and Historical Great Plains Hard Winter Wheat. 2017. *Euphytica*, 213. [CrossRef]
- Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Møller, I. S., and White, P. 2012. Functions of macronutrients. In *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (pp. 135-189). Academic Press.
- Hirel, B., Tétu, T., Lea, P. J., and Dubois, F. 2011. Improving nitrogen use efficiency in crops for sustainable agriculture. *Sustainability*, 3(9), 1452-1485.
- Malhi, S.S.; Grant, C.A.; Johnston, A.M.; Gill, K.S. Nitrogen Fertilization Management for No-till Cereal Production in the Canadian Great Plains: A Review. *Soil Tillage Res.* 2001, 60, 101–122. [CrossRef]

- Martin, N., and Adad, I. 2006. Generalidades más importantes de las ciencias del suelo. *Disciplina Ciencias del Suelo*, 1, 2006.
- Meng Q, Yue S, Chen X, Cui Z, Ye Y, *et al.* 2013. Understanding Dry Matter and Nitrogen Accumulation with Time-Course for High-Yielding Wheat Production in China. *PLoS ONE* 8 (7): e68783. doi:10.1371/journal.pone.0068783"
- Meng, Q.; Yue, S.; Hou, P.; Cui, Z.; Chen, X. Improving Yield and Nitrogen Use Efficiency Simultaneously for Maize and Wheat in China: A Review. *Pedosphere* 2016, 26, 137–147. [CrossRef]
- Meunier C. 2013. *Reactive Nitrogen In The Environment : Flows, Effects, And Management Options* [e-book]. New York: Nova Science Publishers, Inc.
- Mohammed, Y. A., Chen, C., and Jensen, T. 2016. Urease and nitrification inhibitors impact on winter wheat fertilizer timing, yield, and protein content. *Agronomy Journal*, 108(2), 905-912.
- Moll, R.H.; Kamprath, E.J.; Jackson, W.A. Analysis and Interpretation of Factors Which Contribute to Efficiency of Nitrogen Utilization¹. *Agron. J.* 1982, 74, 562–564. [CrossRef]
- Mullen, R. W., Freeman, K. W., Raun, W. R., Johnson, G. V., Stone, M. L., and Solie, J. B. 2003. Identifying an in-season response index and the potential to increase wheat yield with nitrogen. *Agronomy Journal*, 95(2), 347-351.
- Naz, M. Y., and Sulaiman, S. A. 2016. Slow release coating remedy for nitrogen loss from conventional urea: a review. *Journal of Controlled Release*, 225, 109-120.

- Nkebiwe, P. M., Weinmann, M., Bar-Tal, A., and Müller, T. 2016. Fertilizer placement to improve crop nutrient acquisition and yield: a review and meta-analysis. *Field crops research*, 196, 389-401.
- Orloff, S., Wright, S., and Ottman, M. 2012. Nitrogen management impacts on wheat yield and protein. In *Proceedings, California Alfalfa and Grains Symposium, Sacramento, CA, December* (pp. 11-12).
- Ortiz-Monasterio, R., Sayre, K. D., Rajaram, S., and McMahon, M. 1997. Genetic progress in wheat yield and nitrogen use efficiency under four nitrogen rates. *Crop Science*, 37(3), 898-904.
- Ortiz-Monasterio, I., and Raun, W. 2007. Reduced nitrogen and improved farm income for irrigated spring wheat in the Yaqui Valley, Mexico, using sensor based nitrogen management. *Journal of Agricultural Science Cambridge*, 145(3), 215-222.
- Pourazari, F.; Vico, G.; Båth, B.; Weih, M. Nitrogen Use Efficiency and Energy Harvest in Wheat, Maize and Grassland Ley Used for Biofuel—Implications for Sustainability. *Procedia Environ. Sci.* 2015, 29, 22–23. [CrossRef]
- Prado, A. M., Zucareli, C., Fronza, V., Oliveira, F. Á. D., and Oliveira Júnior, A. 2013. Productive characteristics of wheat according to nitrogen sources and levels. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 43(1), 34-41.
- Rathore, V.S.; Nathawat, N.S.; Bhardwaj, S.; Sasidharan, R.P.; Yadav, B.M.; Kumar, M.; Santra, P.; Yadava, N.D.; Yadav, O.P. Yield, Water and Nitrogen Use Efficiencies of Sprinkler Irrigated Wheat Grown under Different Irrigation and Nitrogen Levels in an Arid Region. *Agric. Water Manag.* 2017, 187, 232–245. [CrossRef]

- Raun, W. R., Solie, J. B., Johnson, G. V., Stone, M. L., Mullen, R. W., Freeman, K. W., ... and Lukina, E. V. 2002. Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application. *Agronomy Journal*, 94(4), 815-820.
- Romero, C. M., Engel, R. E., Chen, C., Wallander, R., and Jones, C. A. 2017. Late-fall, winter, and spring broadcast applications of urea to no-till winter wheat II. Fertilizer N recovery, yield, and protein as affected by NBPT. *Soil Science Society of America Journal*, 81(2), 331-340.
- Rose, M. T., Perkins, E. L., Saha, B. K., Tang, E. C., Cavagnaro, T. R., Jackson, W. R., ... and Patti, A. F. 2016. A slow release nitrogen fertiliser produced by simultaneous granulation and superheated steam drying of urea with brown coal. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 3(1), 10.
- Santillano-Cázares, J., López-López, Á., Ortiz-Monasterio, I., and Raun, W. R. 2013. Uso de sensores opticos para la fertilizacion de trigo (*Triticum aestivum* L.). *Terra Latinoamericana*, 31(2), 95-103.
- Santillano-Cázares, J., Ruiz-Alvarado, C., García-López, A., Escobosa-García, I., Cárdenas-Salazar, V., Morales-Maza, A., and Núñez-Ramírez, F. 2018. Assessment of Intercropping and Plastic Mulch as Tools to Manage Heat Stress, Productivity and Quality of Jalapeño Pepper. *Agronomy*, 8(12), 307.
- Suter, H. C., Pengthamkeerati, P., Walker, C., and Chen, D. 2011. Influence of temperature and soil type on inhibition of urea hydrolysis by N-(n-butyl) thiophosphoric triamide in wheat and pasture soils in south-eastern Australia. *Soil Research*, 49(4), 315-319.

- Sylvester-Bradley, R., Kindred, D. R., Wynn, S. C., Thorman, R. E., and Smith, K. E. 2014. Efficiencies of nitrogen fertilizers for winter cereal production, with implications for greenhouse gas intensities of grain. *The Journal of Agricultural Science*, 152(1), 3-22.
- Turner, D. A., Edis, R. B., Chen, D., Freney, J. R., Denmead, O. T., and Christie, R. 2010. Determination and mitigation of ammonia loss from urea applied to winter wheat with N-(n-butyl) thiophosphoric triamide. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 137(3-4), 261-266.45
- Yadav, M.R.; Kumar, R.; Parihar, C.M.; Yadav, R.K.; Jat, S.L.; Ram, H.; Meena, R.K.; Singh, M.; Birbal; Verma, A.P.; *et al.* Strategies for Improving Nitrogen Use Efficiency: A Review. *Agric. Rev.* 2017, 38, 29–40
- Yang, X.; Lu, Y.; Ding, Y.; Yin, X.; Raza, S.; Tong, Y. Optimising Nitrogen Fertilisation: A Key to Improving Nitrogen-Use Efficiency and Minimising Nitrate Leaching Losses in an Intensive Wheat/Maize Rotation (2008–2014). *Field Crops Res.* 2017, 206, 1–10. [CrossRef]
- Zadoks, J. C., Chang, T. T., and Konzak, C. F. 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed research*, 14(6), 415-421.
- Zanin, L., Venuti, S., Tomasi, N., Zamboni, A., De Brito Francisco, R. M., Varanini, Z., and Pinton, R. 2016. Short-term treatment with the urease inhibitor N-(n-butyl) thiophosphoric triamide (NBPT) alters urea assimilation and modulates transcriptional profiles of genes involved in primary and secondary metabolism in maize seedlings. *Frontiers in plant science*, 7, 845.

Zivcak, M., Olsaovska, K., Slamka, P., Galambosova, J., Rataj, V., Shao, H. B., ...
and Zivcak, M. 2014. Measurements of chlorophyll fluorescence in different
leaf positions may detect nitrogen deficiency in wheat.