



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

**RELACIÓN DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA CON LA
PRODUCCIÓN DE CEREALES Y LAS EMISIONES DE ÓXIDO NITROSO
EN UN VERTISOL DEL ESTADO DE GUANAJUATO**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

PRESENTA

ANA DE JESÚS CERVANTES REYES

Asesor: Dr. Aurelio Báez Pérez

Co-asesor: M. en C. Ana María Martínez García

Cuatitlán Izcalli, Estado de México. 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
SECRETARÍA GENERAL
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN**

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
ASUNTO: VOTO APROBATORIO

**M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE**

**ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA
Jefa del Departamento de Titulación
de la FES Cuautitlán.**

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el trabajo de: **Tesis**

Relación de la fertilización nitrogenada con la producción de cereales y las emisiones de óxido nitroso en un vertisol del estado de Guanajuato.

Que presenta la pasante: **Ana de Jesús Cervantes Reyes**
Con número de cuenta: **085271670** para obtener el Título de: **Ingeniera Agrícola**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 16 de noviembre de 2021.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	Dr. Alejandro Espinosa Calderón	
VOCAL	Dr. Joob Anastacio Zaragoza Esparza	_____
SECRETARIO	M.C. Ana María Martínez García	_____
1er. SUPLENTE	Dr. Gustavo Mercado Mancera	_____
2do. SUPLENTE	M.C. Oscar Arellano Díaz	_____

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
SECRETARÍA GENERAL
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, autoriza a la alumna:
Ana de Jesús Cervantes Reyes
Con número de cuenta: 085271670 a presentar el trabajo de: **Tesis.**

Relación de la fertilización nitrogenada con la producción de cereales y las emisiones de óxido nítrico en un vertisol del estado de Guanajuato.

Bajo la asesoría de: **Dr. Aurelio Báez Pérez**
Para obtener el título de: **Ingeniera Agrícola**

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
PRESIDENTE	Dr. Alejandro Espinosa Calderón	_____	_____
VOCAL	Dr. Joob Anastacio Zaragoza Esparza	<i>Joob Zaragoza</i>	18-10-2021
SECRETARIO	M.C. Ana María Martínez García	_____	_____
1er. SUPLENTE	Dr. Gustavo Mercado Mancera	_____	_____
2do. SUPLENTE	M.C. Oscar Arellano Díaz	_____	_____

Atentamente notificamos su participación en la revisión y evaluación del trabajo para que en un plazo no mayor a 15 días hábiles emita su VOTO APROBATORIO. Si existieran correcciones u observaciones en el trabajo, contaría con 15 días hábiles más a partir del momento en que el pasante entrega el trabajo corregido, para emitir su VOTO APROBATORIO o RECHAZO, todo esto de acuerdo con el Reglamento para Titulación de la FES Cuautitlán.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 16 de agosto de 2021.

I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA
JEFA DEL DEPARTAMENTO

NOTA: Los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional.
En caso de que algún miembro del jurado no pueda asistir al examen profesional deberá dar aviso por anticipado al departamento.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
SECRETARÍA GENERAL
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN**

ASUNTO: **VOTO APROBATORIO**

**M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE**

**ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA
Jefa del Departamento de Titulación
de la FES Cuautitlán.**

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el trabajo de: **Tesis**

Relación de la fertilización nitrogenada con la producción de cereales y las emisiones de óxido nítrico en un vertisol del estado de Guanajuato.

Que presenta la pasante: **Ana de Jesús Cervantes Reyes**
Con número de cuenta: **085271670** para obtener el Título de: **Ingeniera Agrícola**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 16 de noviembre de 2021.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	Dr. Alejandro Espinosa Calderón	
VOCAL	Dr. Joob Anastacio Zaragoza Esparza	
SECRETARIO	M.C. Ana María Martínez García	
1er. SUPLENTE	Dr. Gustavo Mercado Mancera	
2do. SUPLENTE	M.C. Oscar Arellano Díaz	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
SECRETARÍA GENERAL
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN**

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
ASUNTO: VOTO APROBATORIO

**M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE**

**ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA
Jefa del Departamento de Titulación
de la FES Cuautitlán.**

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el trabajo de: **Tesis**

Relación de la fertilización nitrogenada con la producción de cereales y las emisiones de óxido nítrico en un vertisol del estado de Guanajuato.

Que presenta la pasante: **Ana de Jesús Cervantes Reyes**
Con número de cuenta: **085271670** para obtener el Título de: **Ingeniera Agrícola**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 16 de noviembre de 2021.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	Dr. Alejandro Espinosa Calderón	_____
VOCAL	Dr. Joob Anastacio Zaragoza Esparza	_____
SECRETARIO	M.C. Ana María Martínez García	_____
1er. SUPLENTE	Dr. Gustavo Mercado Mancera	_____
2do. SUPLENTE	M.C. Oscar Arellano Díaz	_____

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
SECRETARÍA GENERAL
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN**

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
ASUNTO: VOTO APROBATORIO



**M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE**

**ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA
Jefa del Departamento de Titulación
de la FES Cuautitlán.**

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el trabajo de: **Tesis**

Relación de la fertilización nitrogenada con la producción de cereales y las emisiones de óxido nítrico en un vertisol del estado de Guanajuato.

Que presenta la pasante: **Ana de Jesús Cervantes Reyes**
Con número de cuenta: **085271670** para obtener el Título de: **Ingeniera Agrícola**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 16 de noviembre de 2021.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	Dr. Alejandro Espinosa Calderón	_____
VOCAL	Dr. Joob Anastacio Zaragoza Esparza	_____
SECRETARIO	M.C. Ana María Martínez García	_____
1er. SUPLENTE	Dr. Gustavo Mercado Mancera	_____
2do. SUPLENTE	M.C. Oscar Arellano Díaz	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional.

Agradecimientos

Al Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA), bajo el programa Enhancement Capacityfor Low Development Strategies, por el financiamiento otorgado para el presente estudio.

Al CONACYT, por el financiamiento otorgado para el presente trabajo, mediante el proyecto: “Cuantificación y mitigación de gases de efecto invernadero en sistemas agrícolas de granos básico mediante el uso eficiente de fertilizantes orgánicos e inorgánicos”.

Al INIFAP-Campo Experimental Bajío y al Colegio de Postgraduados por las facilidades otorgadas para el desarrollo del presente trabajo.

A la UNAM, por mi formación académica.

Al Dr. Jorge D. Etchevers Barra, Dra. Vinisa Saynes, Dra. Adriana Otero y Dr. Daniel Lapidus, por su gestión para el financiamiento del presente trabajo.

Al Dr. Aurelio Báez Pérez, por su excelente dirección para el desarrollo de la presente investigación, por compartir su conocimiento, por su apoyo incondicional, por motivarme siempre y por nunca dejar de creer en mí.

A la M. en C. Ana María Martínez. Por su apoyo permanente y acertada asesoría

A los miembros del jurado: Al. M. en C. Oscar Arellano Díaz, Al Dr. Gustavo Mercado Mancera, Al Dr. Joob Anastasio Zaragoza Esperanza, Al Dr. Alejandro Espinosa Calderón, por sus valiosas aportaciones que enriquecieron el presente trabajo.

A Nayeli Medina Rojas, Alejandro Prado García, Gerardo García Meza, y Cecilia Tinoco Paramo, por su invaluable colaboración en el trabajo de campo para la elaboración del presente estudio.

A Roberto Carlos Gomora Becerril y Diana Rocío González Padilla, del Colegio de Postgraduados, por su invaluable apoyo en el trabajo de laboratorio.

A Dios por darme las herramientas necesarias y la oportunidad de llegar hasta este punto.

DEDICATORIA

A mis hijos, Anahí, Noé y Gerson, a quienes amo desde lo más profundo de mi corazón, que son lo más valioso de mi vida, han sido la motivación principal para seguir adelante con este proyecto y esperando ser un ejemplo para ellos.

A la memoria de mis padres Dr. Honorio Cervantes y Ana Reyes Isidro, por haberme forjado como la persona que soy, que están apoyándome desde el cielo y que sé que estarían muy felices con este logro.

A mis hermanos y hermanas Hugo, Araceli, Xóchitl y Honorio, porque me han apoyado incondicionalmente toda la vida.

A Moisés Flores por su apoyo incondicional.

RESUMEN

En la actualidad, el uso irracional de los fertilizantes en la agricultura moderna ha traído como consecuencia graves problemas de contaminación ambiental, aunada a la problemática de la degradación de los suelos, ocasiona que los agricultores demanden cada vez mayor cantidad de estos insumos agrícolas. Lo anterior repercute directamente en el incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero, la contaminación de cuerpos de agua y la rentabilidad para la producción de granos básicos. El Bajío es una región agrícola por excelencia, y las prácticas de agricultura intensiva que se llevan a cabo para la producción de cereales y hortalizas acrecientan la problemática expuesta. Con base en lo anterior, es necesario implementar prácticas agronómicas para mejorar la fertilidad de los suelos y hacer un uso más racional de los fertilizantes químicos. Se estableció un experimento para evaluar el efecto de cuatro dosis crecientes de fertilización nitrogenada en la emisión de óxido nitroso (N_2O), la eficiencia en su aprovechamiento en maíz y trigo y su relación con el potencial de producción agrícola. Para el primer cultivo las evaluaciones se efectuaron durante el ciclo primavera-verano de 2014, mientras que para el cultivo de trigo éstas se efectuaron durante el ciclo otoño-invierno 2014-2015. Los tratamientos de fertilización para maíz fueron de 0, 100, 200 y 400 unidades de $N\ ha^{-1}$ y para trigo 0, 100, 200 y 300 $kg\ de\ N\ ha^{-1}$. El diseño experimental fue en bloques al azar con tres repeticiones. Se colocaron cámaras de PVC en el fondo y en el lomo de los surcos, una por unidad experimental, para monitorear a lo largo de los ciclos de cultivo las emisiones de N_2O . Se obtuvieron muestras de gases a partir de las cámaras herméticamente cerradas. Se introdujo, a través de un septo especial colocado en la tapa superior de cada cámara, una jeringa de 20 cm^3 para obtener las muestras de gases, las cuales se trasvasaron a viales color ámbar. Las concentraciones de N_2O se determinaron mediante cromatografía de gases. Durante cada evaluación se recolectaron muestras de suelo de 0 a 15 cm de profundidad, tanto en el fondo como en la parte superior del surco, para evaluar la concentración de $N-NO_3$ y $N-NH_4$. Se evaluaron los componentes de rendimiento al final de cada ciclo de cultivo. Los rendimientos promedio de maíz superaron las $16\ t\ ha^{-1}$; sin embargo, no hubo diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos ni se encontró relación alguna con las dosis crecientes de fertilización nitrogenada. La producción de trigo, en el segundo ciclo de

evaluaciones, mostró respuesta a las dosis crecientes de fertilización sólo hasta el tratamiento tres, donde se obtuvieron 8.2 t ha⁻¹ de grano, con 200 kg de N ha⁻¹; sin embargo, con la dosis más alta de fertilizante (300 kg ha⁻¹) el rendimiento se abatió 16% respecto a la producción más alta. La disponibilidad de nitrógeno inorgánico en el suelo (N-NO₃ + N-NH₄), a lo largo del ciclo de cultivo de maíz tuvo una estrecha relación entre el contenido de este elemento y las dosis crecientes de fertilización: En el lomo del surco, donde se aplicó directamente el fertilizante, ésta fue de R²=0.98 y se ajustó a un modelo exponencial, y en el fondo del surco el ajuste fue de R²=0.96 con una tendencia lineal. Con la dosis de fertilización más alta hubo hasta 160 ppm de N-inorgánico en el primero y 60 ppm en el segundo. Durante el ciclo de cultivo de trigo, esta relación tuvo el mismo comportamiento, con un ajuste de R²=0.82 y R²=0.96, respectivamente. Las emisiones de N₂O también presentaron la misma tendencia en el lomo y fondo del surco, R²=0.89 y R²=0.98, respectivamente. Con la dosis de fertilización más alta los niveles de emisiones de N₂O alcanzaron hasta 6000 g ha⁻¹ por ciclo de cultivo en el lomo de surco y hasta 2000 g ha⁻¹ en el fondo del mismo. Estos resultados evidenciaron altas pérdidas de nitrógeno a medida que aumentaron las dosis de fertilización nitrogenada.

ABSTRACT

At present, the irrational use of fertilizers in modern agriculture has resulted in severe problems of environmental pollution, coupled with the problem of soil degradation, causing farmers to demand more and more agricultural inputs. This has a direct impact on the increase in greenhouse gas emissions, the pollution of bodies of water and the profitability for the production of basic grains. Bajío is an agricultural region par excellence and the intensive farming practices that are carried out for the production of cereals and vegetables increase the problem previously exposed. That is why it is necessary to implement agronomic practices to improve the fertility of soils and make a more rational use of chemical fertilizers. An experiment was carried out to evaluate the effect of four increasing doses of nitrogen fertilization on the emission of nitrous oxide (N_2O), the efficiency in its utilization in maize and wheat and its relation with the potential of agricultural production. For the first crop the evaluations were carried out during the spring-summer cycle of 2014, while for the cultivation of wheat these were carried out during the autumn-winter 2014-2015 cycle. Fertilization treatments for maize were 0, 100, 200 and 400 units of N ha^{-1} and for wheat 0, 100, 200 and 300 kg of N ha^{-1} . The experimental design was in random blocks with three replicates. PVC chambers were placed in the bottom and back of the furrows, one per experimental unit, to monitor N_2O emissions throughout the growing cycles. Gas samples were obtained from the hermetically sealed chambers. A 20 cm^3 syringe was introduced through a special septum placed in the upper lid of each chamber to obtain the gas samples, which were transferred to amber vials. N_2O concentrations were determined by gas chromatography. During each evaluation, soil samples were collected from 0 to 15 cm deep, both at the bottom and at the top of the groove, to evaluate the concentration of N-NO_3 and N-NH_4 . Performance components were evaluated at the end of each culture cycle. Average maize yields exceeded 16 t ha^{-1} ; However, there were no significant differences ($p < 0.05$) between treatments nor was there any relationship with increasing doses of nitrogen fertilization. Wheat production in the second cycle of evaluations showed a response to increasing fertilization doses only up to treatment three, where 8.2 t ha^{-1} of grain were obtained, with $200 \text{ kg of N ha}^{-1}$; However, with the highest fertilizer dose (300 kg ha^{-1}) yield was 16% lower than the highest yield. The availability of inorganic nitrogen in the soil ($\text{N-NO}_3 + \text{N-$

NH₄) throughout the maize crop cycle had a close relationship between the content of this element and the increasing doses of fertilization: The fertilizer was applied directly, it was $R^2 = 0.98$ and adjusted to an exponential model, and at the bottom of the groove the adjustment was $R^2=0.96$ with a linear trend. At the highest fertilization dose there were up to 160 ppm of N-inorganic in the first and 60 ppm in the second. During the wheat crop cycle, this ratio had the same behavior, with an adjustment of $R^2=0.82$ and $R^2=0.96$, respectively. The N₂O emissions also showed the same behavior in the back and bottom of the groove, $R^2=0.89$ and $R^2= 0.98$ respectively. At the highest fertilization dose, the N₂O emission levels reached up to 6000 ha⁻¹ per crop cycle in the furrow spine and up to 2000 g ha⁻¹ at the bottom of the furrow. These results evidenced high losses of nitrogen as the nitrogen fertilization doses increased.

ÍNDICE

Agradecimientos.....	i
DEDICATORIA.....	iii
RESUMEN.....	iv
ABSTRACT.....	vi
INDICE.....	viii
ÍNDICE DE CUADROS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	4
2.1. Objetivo general.....	4
2.2. Objetivos particulares.....	4
2.3. Hipótesis.....	4
III. MARCO TEÓRICO.....	5
3.1. Producción de cereales en México y uso de fertilizantes.....	5
3.2. Producción de cereales en el Bajío.....	6
3.2.1. Producción de maíz en Guanajuato.....	6
3.2.2. Producción de trigo en Guanajuato.....	7
3.3. Emisiones de gases de efecto invernadero y cambio climático.....	8
3.4. El Ciclo del nitrógeno.....	8
3.5. Uso excesivo de fertilizantes en la agricultura.....	10
IV. MATERIALES Y MÉTODOS.....	12
4.1. Sitio de estudio.....	12
4.2. Características del suelo.....	12
4.3. Manejo agronómico precedente de la parcela.....	13
4.4. Los experimentos.....	13
4.5. Manejo agronómico.....	14
4.5.1. Maíz.....	14
4.5.2. Trigo.....	15
4.6. Temperatura y precipitación.....	15

4.6.1. Año 2014	15
4.6.2. Año 2015	16
4.7. Componentes de rendimiento	17
4.7.1 Evaluación de parámetros agronómicos en maíz	17
4.7.2. Evaluación de parámetros agronómicos en trigo.....	18
4.8. Disponibilidad de N y potencial de rendimiento.....	19
4.9. Monitoreo de nitrógeno inorgánico en el suelo	20
4.10. Emisiones de óxido nitroso	21
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	22
5.1. Variables agronómicas para maíz.....	22
5.1.1. Población.....	22
5.1.2. Número de mazorcas	22
5.1.3. Altura de planta	23
5.1.4. Diámetro de mazorca	24
5.1.5. Longitud de mazorca	24
5.1.6. Número de granos por mazorca	24
5.1.7. Peso de 100 granos	24
5.1.8. Rendimiento de grano	25
5.1.9. Biomasa aérea	26
5.2. Variables agronómicas para trigo.....	27
5.2.1. Población.....	27
5.2.2. Número de tallos y espigas	27
5.2.3. Altura de planta	28
5.2.4. Rendimiento de grano	29
5.2.5. Peso de mil granos, número de granos por espiga y número de granos m ⁻²	30
5.2.6. Biomasa aérea	31
5.3. Disponibilidad de N y potencial de rendimiento.....	31
5.3.1. Ciclo primavera-verano para cultivo de maíz.....	31
5.3.2. Ciclo otoño-invierno para cultivo de trigo.....	34
5.4. Monitoreo de nitrógeno en el suelo	34
5.4.1. Ciclo primavera-verano para cultivo de maíz.....	34
5.4.2. Ciclo otoño-invierno para cultivo de trigo.....	36
5.5. Emisiones de óxido nitroso	37

5.5.1. Ciclo primavera-verano para cultivo de maíz.....	37
VI. CONCLUSIONES.....	39
VII. BIBLIOGRAFÍA	40
VIII. ANEXOS	44

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Características físico-químicas de suelo. Campo Experimental Bajío. Celaya, Guanajuato.	13
Cuadro 2. Tratamientos con cuatro dosis crecientes de fertilización nitrogenada para maíz y trigo.	13
Cuadro 3. Resultados promedio de componentes de rendimiento para maíz. Campo Experimental Bajío. Celaya, Guanajuato. Ciclo primavera-verano de 2014.	22
Cuadro 4. Resultados de componentes de rendimiento en trigo. Ciclo otoño-invierno 2014-2015.	27
Cuadro 5. Disponibilidad y aprovechamiento de N para la producción de maíz en ciclo primavera-verano 2014.	33
Cuadro 6. Disponibilidad y aprovechamiento de N para la producción de trigo en ciclo otoño-invierno 2014-2015.	34

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización del área experimental. INIFAP- Campo Experimental Bajío	12
Figura 2. Distribución de unidades experimentales en la parcela. Campo Experimental Bajío.....	14
Figura 3. Registro diario de las temperaturas máximas y mínimas, y la precipitación pluvial en Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato. Ciclo primavera-verano de 2014.....	15
Figura 4. Climograma mensual. Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato durante 2014.....	16
Figura 5. Registro diario de las temperaturas máximas y mínimas, y la precipitación pluvial en Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato. otoño-invierno de 2015.....	17
Figura 6. Climograma mensual. Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato. Ciclo otoño-invierno de 2015.	17
Figura 7. Unidades experimentales equipadas con cámaras para medir las emisiones de N ₂ O. Maíz en ciclo primavera-verano 2014 y trigo en otoño-invierno 2014-2015.....	21
Figura 8. Contenido de nitrógeno y fósforo a lo largo del ciclo de cultivo.	23
Figura 9. Rendimiento de maíz. Campo Experimental Bajío. Ciclo primavera-verano 2014.....	26
Figura 10. Relación entre número de plantas y número de tallos por planta (p<0.05). .	28
Figura 11. Relación altura de planta con dosis de nitrógeno y biomasa aérea. (p<0.05).	29
Figura 12. Rendimiento de trigo. Campo Experimental Bajío. Ciclo otoño-invierno 2014.	30
Figura 13. Relación entre biomasa aérea y rendimiento de grano.	31
Figura 14. Relación entre concentración promedio de N-inorgánico en el suelo (N-NO ₃ +NH ₄) en el bordo y fondo de los surcos en función de las dosis crecientes de fertilización nitrogenada. Cultivo de maíz. (p<0.05).....	35

Figura 15. Disponibilidad promedio de N inorgánico en bordo y fondo del surco. Ciclo primavera-verano 2014. Cultivo maíz.	36
Figura 16. Relación entre concentración promedio de N-inorgánico en el suelo (N-NO ₃ +NH ₄) en el bordo y fondo de los surcos en función de las dosis crecientes de fertilización nitrogenada. Cultivo de trigo. (p<0.05).....	36
Figura 17. Disponibilidad promedio de N inorgánico en bordo y fondo del surco. Ciclo otoño-invierno 2014-2015. Cultivo trigo.	37
Figura 18. Emisiones promedio de N ₂ O en bordo y fondo del surco en función de las dosis crecientes de fertilización. (p<0.05).....	38

I. INTRODUCCIÓN

En la agricultura moderna el uso de los fertilizantes químicos es esencial para mantener la producción de granos básicos, que demandan una población cada vez más creciente. Sin embargo, el uso irracional de estos insumos agrícolas ha traído como consecuencia graves problemas de contaminación ambiental. Se estima que en el mundo se consumen más de 83 millones de toneladas métricas de nitrógeno para la producción agrícola, de las cuales 60% se utiliza para la producción de los tres principales cereales que se consumen en el mundo: maíz, arroz y trigo (Ladja *et al.*, 2005). Se prevé que para el 2050 el crecimiento poblacional demandará entre 50 y 70% mayor producción de cereales para satisfacer necesidades de alimentación. Lo anterior implica mayor uso de fertilizantes químicos. En México, de acuerdo con datos del Banco Mundial (2016), se consumen en promedio alrededor de 80 kg por hectárea de fertilizantes químicos, lo que equivale a poco menos de la mitad de lo que consumen en Estados Unidos. Los problemas de contaminación ambiental por el uso de los fertilizantes químicos están relacionados con la baja eficiencia de aprovechamiento por los cultivos, principalmente por el desconocimiento de los requerimientos nutrimentales y por las prácticas inadecuadas de aplicación (Peña *et al.*, 1997).

Entre los fertilizantes que se requieren en mayor volumen para la agricultura están los nitrogenados. El Nitrógeno (N) es un elemento esencial para la nutrición de las plantas y uno de los más importantes para la producción de cereales (Below, 2002); sin embargo, es un nutrimento que frecuentemente se encuentra deficiente en los suelos agrícolas (Salisbury & Ross, 1994). Su disponibilidad para las plantas es esencial para su desarrollo, porque forma parte de la estructura de las proteínas e interviene en la formación de las paredes celulares y en casi todos los procesos fisiológicos de las plantas. La manifestación de deficiencias de nitrógeno en los cultivos implica estrés nutrimental, que deriva en el abatimiento de la producción. Por ello la importancia del abastecimiento adecuado de este elemento durante el desarrollo vegetativo de las plantas. Un factor importante a considerar en el uso racional de los fertilizantes químicos, es un adecuado diagnóstico de disponibilidad de este elemento en el suelo, que permita calcular con la mayor exactitud posible la cantidad aproximada de fertilizante que requiere

el cultivo para el nivel de producción que le permita las condiciones de clima, suelo y manejo agronómico determinadas. Es decir, suministrar sólo lo que los cultivos requieren, con base en el nivel de producción real que puede obtenerse de una especie determinada bajo las condiciones edafoclimáticas específicas donde se va a establecer, procurando implementar prácticas de manejo agronómico adecuadas que permitan una alta eficiencia en el aprovechamiento del fertilizante por los cultivos.

Es ampliamente aceptado que el nitrógeno del suelo es absorbido por las plantas en forma de $N-NO_3$ y $N-NH_4$, es decir, en forma inorgánica; sin embargo, estas formas de nitrógeno se pierden fácilmente por lixiviación o desnitrificación. La primera da lugar a la contaminación de mantos acuíferos, y la segunda a emisiones de gases de efecto invernadero, en especial óxido nitroso, que contribuyen de manera importante con el cambio climático global. La aplicación localizada del fertilizante al pie de las plantas y la aplicación fraccionada a medida que el desarrollo vegetativo demande el nitrógeno, son estrategias de manejo agronómico que contribuyen a aumentar la eficiencia en el aprovechamiento de los fertilizantes químicos en la agricultura.

Es importante considerar el encarecimiento excesivo que han tenido los fertilizantes y otros insumos agrícolas en los últimos años, lo cual incide directamente en los costos de producción y en la rentabilidad en la producción de granos básicos, la cual ha venido a la baja. Para lograr una mayor eficiencia en el aprovechamiento del N que se suministra de manera externa a los cultivos, es necesario efectuar una serie de prácticas de manejo agronómico adecuadas que permitan minimizar las pérdidas y aumentar la eficiencia en su aprovechamiento por los cultivos, para limitar los problemas de contaminación ambiental que imperan actualmente (Peña *et al.*, 1997).

El Bajío es una zona productora de cereales por excelencia, el potencial de rendimiento de maíz en esta región, bajo condiciones de riego, está por encima de 15 t ha^{-1} , mientras que en condiciones de temporal puede superar las 5 t ha^{-1} , cuando hay una regular distribución de las lluvias. Mientras tanto, la producción de trigo de invierno puede alcanzar hasta 9 t ha^{-1} . Los agricultores generalmente esperan obtener estos niveles de

producción y recurren frecuentemente al uso excesivo de fertilizantes nitrogenados. Lo anterior, además de encarecer los costos de producción y generar graves problemas de contaminación ambiental, provocan un serio problema de deterioro de los suelos por salinización, compactación y disminución de las reservas orgánicas (Báez *et al.*, 2012). El propósito de este estudio fue evaluar el uso los fertilizantes nitrogenados para la producción de cereales y su relación con su disponibilidad en el suelo y la emisión de óxido nitroso.

II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1. Objetivo general

- Evaluar el efecto de la aplicación de nitrógeno en las emisiones de óxido nitroso y la eficiencia de aprovechamiento y producción de maíz y trigo.

2.2. Objetivos particulares

- Evaluar la producción de maíz y trigo en función de las dosis crecientes de fertilización nitrogenada.
- Evaluar la disponibilidad de nitrógeno en el suelo y su relación con las emisiones de óxido nitroso al ambiente.
- Evaluar la eficiencia de aprovechamiento del fertilizante nitrogenado en función de las dosis crecientes de fertilización nitrogenada y el potencial de rendimiento de los cereales.

2.3. Hipótesis

- Con las dosis de fertilización más altas aumenta el potencial de rendimiento de los cereales.
- Con las dosis de fertilización más altas hay mayor disponibilidad de N, pero también mayores emisiones de óxido nitroso.
- La eficiencia de aprovechamiento del fertilizante por los cultivos disminuye a medida que aumentan las dosis de fertilización nitrogenada.

III. MARCO TEÓRICO

3.1. Producción de cereales en México y uso de fertilizantes

La producción de cereales en México demanda alto consumo de fertilizantes químicos. Se estima que en el país se consumen anualmente entre 4 y 5.5 millones de toneladas de estos insumos, de los cuales más de 60% se importan (Gaucín-Piedra y Torres-Garrido, 2013; Grageda-Cabrera *et al.*, 2011). De acuerdo con estadísticas del SIAP (2016) la producción de cereales en México: maíz, trigo, cebada, arroz y sorgo, alcanzó globalmente cerca de 36.5 millones de toneladas durante 2014, lo cual corresponden a 64, 10, 2.3, 0.7 y 23% de cada cultivo, respectivamente. Se estima que alrededor de 80% de la superficie agrícola del país se fertiliza con diversas dosis de fertilización química, dependiendo del potencial de producción y de la capacidad económica del productor (Grageda-Cabrera *et al.*, 2011); sin embargo, con frecuencia se aplican dosis excesivas de fertilizantes, con lo cual se incurre en el uso irracional de estos insumos agrícolas, en especial de los fertilizantes nitrogenados. Peña-Cabriales *et al.* (2001) y Mora-Ravelo *et al.* (2007) mencionan que la eficiencia en el aprovechamiento de este tipo de abonos por los cultivos oscila entre 10 y 60%. El nitrógeno que no pueden aprovechar los cultivos puede ser inmovilizado en parte por los microorganismos del suelo, lixivía o desnitrifica. En este último interviene el proceso metabólico de varios tipos de bacterias, que usan el nitrato como aceptor terminal de electrones, en condiciones anaerobias principalmente. El proceso de reducción de nitratos hasta nitrógeno en forma de gas ocurre en etapas sucesivas, catalizadas por sistemas enzimáticos diferentes, apareciendo como productos intermedios nitritos, óxido nítrico y óxido nitroso. Este último es considerado como uno de los gases de efecto invernadero que contribuye con la problemática del cambio climático global. De acuerdo con investigaciones el N₂O puede permanecer en la atmósfera durante más de 114 años y tiene un potencial de calentamiento 298 veces mayor que el CO₂ (Singor *et al.*, 2013). De ahí la importancia del manejo racional de los fertilizantes químicos.

3.2. Producción de cereales en el Bajío

La región Bajío constituye una de las principales entidades productoras de granos y hortalizas en el país, de acuerdo con Peña-Cabriales *et al.* (2001) 80% de la superficie agrícola está destinada a la producción de cereales y hortalizas. Los sistemas de producción en las áreas donde hay disponibilidad de riego son intensivos. En estas condiciones, para la producción de cereales, se cultivan dos ciclos por año: maíz o sorgo durante primavera-verano y trigo o cebada durante otoño invierno. De acuerdo con Peña-Cabriales *et al.* (2001) el cultivo de trigo de invierno en el Bajío se fertiliza con dosis de al menos 350 kg de N ha⁻¹ (equivalente a 760 kg de urea ha⁻¹), y el rendimiento promedio, de acuerdo con estadísticas del SIAP (2016), es de 6 t ha⁻¹; sin embargo, el potencial de rendimiento de trigo en la región está por encima de 9 t ha⁻¹. Por otra parte, el de maíz se fertiliza con dosis superiores a 500 kg de N ha⁻¹ (equivalente a 1.1 t ha⁻¹ de urea) y el rendimiento promedio estatal, para condiciones de riego, es de 8.8 t ha⁻¹ (SIAP, 2016), con un potencial de rendimiento por encima de 15 t ha⁻¹. Si bien los rendimientos de estos granos básicos han aumentado en las últimas décadas, por el empleo de semillas mejoradas y uso de fertilizantes químicos, la rentabilidad ha venido a la baja y paralelamente ha aumentado el deterioro de los suelos y los niveles de contaminación ambiental.

De acuerdo con Peña-Cabriales *et al.* (2001) sólo se aprovecha por los cultivos 60% del fertilizante que se aplica para su producción, se estima que del fertilizante nitrogenado que se aplica para la producción de cereales en la región Bajío, alrededor de 100 kg h⁻¹, no se aprovechan por las plantas (Grageda-Cabrera *et al.*, 2000). Lo anterior equivale a 1.15x10⁵ t de N año⁻¹ que se pierden y pasan a formar parte de la contaminación de mantos freáticos y emisiones de N₂O.

3.2.1. Producción de maíz en Guanajuato

El estado de Guanajuato ha ocupado entre el cuarto y quinto lugar en producción de maíz a nivel nacional (SIAP, 2016). Se siembran anualmente entre 380, 000 y 420, 000 hectáreas, de las cuales poco menos de un tercio cuentan con riego. En estas condiciones, Guanajuato ocupa entre el primero y segundo lugar en la producción de este

cereal en el país. El rendimiento promedio estatal varía entre 3.3 y 4.9 t ha⁻¹, mientras que para condiciones de riego éste varía entre 7.9 y 8.8 t ha⁻¹. El potencial de rendimiento de maíz, en las mejores zonas productora del estado, es mayor que 16 t ha⁻¹. Predomina el uso de semillas mejoradas distribuidas por empresas como: Monsanto, Berentsen y Dupont, entre otras, y el empleo excesivo de fertilizantes para la producción de este cereal en Guanajuato. De acuerdo con Peña-Cabriales *et al.* (2001). Las prácticas de agricultura intensiva que se emplean en el estado no contemplan, en muchos casos, la incorporación de abonos orgánicos, rotación de cultivos con leguminosas o al menos la incorporación de parte de los residuos de cosecha para el mantenimiento de las reservas orgánicas de los suelos agrícolas. Debido a lo anterior hay un evidente grado de deterioro de los suelos, lo cual se traduce en una mayor demanda de insumos para la producción agrícola, entre éstos el uso de los fertilizantes nitrogenados.

3.2.2. Producción de trigo en Guanajuato

El cultivo de trigo en el estado de Guanajuato ocupa un lugar preponderante en el país. Durante los últimos 15 años (2000 a 2014) se han sembrado anualmente en el estado, durante el otoño-invierno, entre 50, 000 y 141, 000 hectáreas, lo cual depende principalmente de la disponibilidad de agua en las presas. La producción anual cosechada, durante este tiempo, se ha estimado entre 250, 000 y 800, 000 toneladas de grano. El estado de Guanajuato ha aportado entre el 7.5 y 23.3% a la producción total anual nacional. Su rendimiento promedio anual en condiciones de riego es de 6.4 t ha⁻¹. A nivel estatal, la variedad de trigo Cortázar S94 ocupa el segundo lugar en superficie cultivada con 22%, sólo después de la variedad Bárcenas S2002, la cual ocupa el 29% (SIAP, 2016). Se siembran entre 90 y 95% de trigos harineros, y el resto de trigos cristalinos (Solís *et al.*, 2009). El trigo es un cultivo que se siembra en la región Bajío durante el ciclo otoño-invierno, con un rendimiento potencial por encima de las 9 t ha⁻¹. La mayor disponibilidad de variedades de trigo en el mercado corresponde a tipos de gluten suave, que fueron generadas por el INIFAP en el Campo Experimental Bajío (Báez-Pérez *et al.*, 2012).

3.3. Emisiones de gases de efecto invernadero y cambio climático

Los ecosistemas terrestres y marinos desempeñan un papel importante en la regulación del clima del planeta. Los gases de efecto invernadero que emiten los ecosistemas terrestres, como parte de los diversos ciclos biogeoquímicos son: el vapor de agua, CO₂, N₂O y CH₄. La intensidad en las emisiones de estos compuestos depende de las condiciones climáticas, geológicas y de las perturbaciones ocasionadas por las actividades humanas. Biomas como turberas, humedales, bosques de coníferas y los océanos desempeñan un papel crucial en la absorción y acumulación de carbono y contribuyen de este modo a protegernos de los efectos del cambio climático. En la actualidad, los ecosistemas terrestres y marinos absorben aproximadamente la mitad de las emisiones de CO₂ que genera la humanidad. Los ecosistemas terrestres almacenan alrededor de 2 100 Gt de carbono en los organismos vivos, la hojarasca y la materia orgánica del suelo, casi tres veces más que la cantidad presente en la atmósfera. Las emisiones de N₂O en el planeta cobra importancia como gas de efecto invernadero porque puede permanecer en la atmósfera durante más de 114 años y su potencial de calentamiento es 298 veces mayor que el CO₂ (Signor y Pellegrino, 2013). Se estima que las emisiones globales de este gas alcanzan aproximadamente 17.7 Tg de N año⁻¹, de las cuales 6.7 Tg (37.8 %) son emitidos como parte de las actividades humanas. Los suelos agrícolas emiten 2.8 Tg de N año⁻¹, es decir, el 15.3% de la cantidad total de emisiones, o 41.8 % de las emisiones antrópicas (Denman, 2007)

3.4. El Ciclo del nitrógeno

La productividad y dinámica de los ecosistemas terrestres, está limitada por la disponibilidad de nutrientes. En el caso de los agroecosistemas, para la producción de cultivos, la principal limitante en los suelos para aumentar la productividad de los cultivos es la disponibilidad de N, ya que determina el crecimiento vegetal. En la actualidad se ha recurrido al uso de fertilizantes químicos para contrarrestar la deficiencia de N y otros macro y micro elementos (Vitousek *et al.*, 1997; Fields, 2004).

La dinámica del N en la biosfera comprende principalmente la fijación de N (N₂). La mineralización, la nitrificación, la desnitrificación y la oxidación anaeróbica del amonio

Annamox (Hu *et al.*, 2011), procesos mediados por microorganismos en el suelo principalmente. El N entra a la biosfera por fijación química y biológica del N₂ y se remueve de la misma por el efecto de la desnitrificación (Klotz y Stain, 2008).

Los procesos de fijación los llevan a cabo gran cantidad de bacterias que poseen enzimas (llamadas nitrogenasas) que rompen el triple enlace del N₂ y producen amonio (Hayatsu *et al.*, 2008).

La incorporación de N es esencial en los sistemas agrícolas para la fertilidad de suelo y una buena productividad vegetal (Tang *et al.*, 2012). Los procesos de mineralización del N son terminales para la disponibilidad del elemento en los ecosistemas terrestres éstos se originan principalmente por la lixiviación y degradación de la materia orgánica (N Nourbakhsh y Alinejadian, 2009).

La asimilación microbiana (inmovilización) es un proceso que controla la disponibilidad de N en las plantas, que junto con la relación C/N en las plantas y el suelo, son variables fundamentales que afectan la tasa de mineralización (Firestone, 1982).

La nitrificación consiste en la oxidación secuencial del amonio a nitrito, y hasta hace poco tiempo este proceso se atribuía a las bacterias quimiolitotróficas oxidantes del amonio (BOA). Las BOA se clasifican en tres géneros: *Nitrosomonas*, *Nitrospira* y *Nitrosococcus*. Este último es el encargado de codificar la subunidad A de la enzima amonio monooxigenasa (AMO), la cual cataliza el primer paso de la oxidación del amonio y es una herramienta molecular capaz de distinguir poblaciones muy cercanas (Freitag *et al.*, 2005).

Los cambios de las condiciones de pH y la fertilización nitrogenada del suelo afectan la estructura de las comunidades de BOA, así como de aquellas oxidantes de amonio, ya que estas dependen de NH₄⁺ y NO₂⁻ como fuentes de energía (Leininger *et al.*, 2006; Hansel *et al.*, 2008; Nicol *et al.*, 2008).

A la oxidación del amonio a nitrito le sigue la oxidación de nitrito a nitrato, este proceso es mediado por las bacterias oxidantes de nitrito (BON). Las BON se clasifican en cuatro géneros *Nitrobacter*, *Nitrospina*, *Nitrococcus* y *Nitrospira*. Las prácticas de fertilización influyen en la diversidad de los grupos funcionales de BON (Freitag *et al.*, 2005). La oxidación biológica del amonio en condiciones anaeróbicas se lleva a cabo por las bacterias denominadas ANAM-MOX (Hayatsu *et al.*, 2008; Francis *et al.*, 2007).

La desnitrificación es el proceso más importante en el ciclo del N, ya que éste devuelve el N fijado a la atmósfera por medio del proceso de la respiración microbiana, a través de la reducción desasimilatoria de NO_3^- y NO_2^- a N_2O y N_2 , respectivamente; también involucra la reducción asimiladora de nitrito para convertirlo en amonio y ser incorporado al metabolismo celular (Simon, 2002).

Las plantas poseen la capacidad de incorporar nitratos en su biomasa, lo que reduce su pérdida por lixiviación y desnitrificación (Gorfer *et al.*, 2011).

3.5. Uso excesivo de fertilizantes en la agricultura

El uso de los fertilizantes en la agricultura es esencial para maximizar los rendimientos (producción obtenida por unidad de superficie) y los ingresos para los productores, por lo que son insumos indispensables para la seguridad alimentaria. Aproximadamente la mitad de la población mundial debe su seguridad alimentaria gracias a la producción y uso de fertilizantes (Erisman *et al.*, 2008) que han hecho posible la producción masiva de alimentos, particularmente de granos básicos.

Actualmente habitamos el planeta alrededor de 7000 millones de personas y la población continúa creciendo. Sin el uso de fertilizantes sería imposible cubrir la creciente demanda global de alimentos (Erisman *et al.*, 2008). La FAO estima que para el año 2050 la población se incrementará en un tercio. Para combatir el hambre y la pobreza es necesario hacer uso eficiente de los escasos recursos naturales y la adaptación al cambio climático (FAO, 2002). Desde el punto de vista de la productividad agrícola los beneficios de aplicar fertilizantes son evidentes; sin embargo, la tasa a la cual están siendo

suministrados a los suelos está generando consecuencias ambientales devastadoras, particularmente en el caso de los fertilizantes nitrogenados (Galloway *et al.*, 2003). En los últimos 60 años la producción antropogénica de nitrógeno para su uso en fertilizantes ha duplicado las tasas de fijación (mecanismos de ingreso del N a los ecosistemas por vías naturales) (Sutton *et al.*, 2011). Actualmente 100 Tg N año⁻¹ están siendo añadidos a los suelos en forma de nitrógeno globalmente (Erisman *et al.*, 2008). Este incremento en el uso de fertilizantes en los cultivos ha modificado el ciclo global del nitrógeno debido a que grandes cantidades de este elemento en su forma reactiva, también llamado nitrógeno reactivo (Nr, formas de nitrógeno capaces de combinarse con otras formas químicas en el ambiente) están siendo añadidas a los ecosistemas agrícolas (Groffman y Rossi-Marshall, 2013). La adición de grandes cantidades de fertilizantes no garantiza un incremento ilimitado en la producción, ya que las plantas únicamente absorben el nitrógeno que requieren. Se estima que únicamente la mitad del fertilizante aplicado a los cultivos es incorporado en la biomasa de las plantas, mientras que la otra mitad se pierde en forma gaseosa a la atmósfera, o se lixivia (transporte de partículas por el agua) desde el suelo hacia cuerpos de agua (Galloway *et al.*, 2003).

El uso excesivo de fertilizantes en la agricultura incrementa el potencial de pérdida del Nr, que es ampliamente dispersado por procesos de transporte hidrológico en forma de amoníaco (NH₃), amonio (NH₄) y nitrato (NO₃), y atmosférico en forma de óxidos de N (NO_x), óxido nitroso (N₂O) (Galloway *et al.*, 2003). Actualmente el Nr se está acumulando en el ambiente porque las tasas de creación de Nr son mayores que las tasas de remoción de N.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Sitio de estudio

El experimento se estableció en el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) (Figura 1), en las instalaciones del Campo Experimental Bajío ubicado en Celaya, Guanajuato en el km. 6.5 de la carretera Celaya-San Miguel de Allende s/n. C.P. 38110, el cual se localiza a los 20°34'47'' LN, 100°49'13''LO; se encuentra a una altitud de 1765 m, el clima de la región corresponde a un BS1hw (W) eq (semiseco semicálido). La temperatura media anual oscila en 18.4 °C y la precipitación media anual en 601 mm.

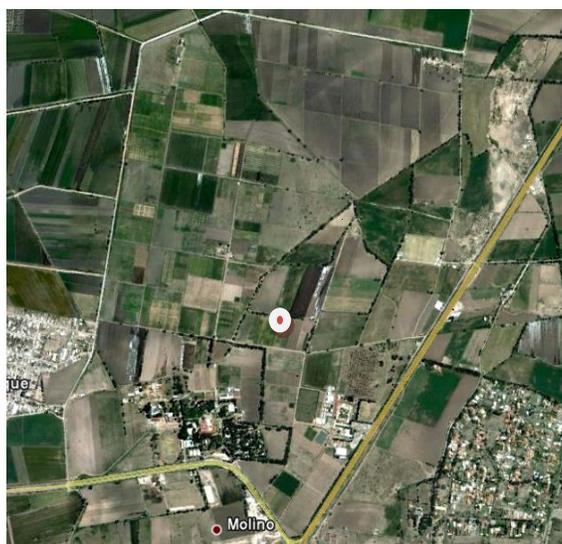


Figura 1. Localización del área experimental. INIFAP- Campo Experimental Bajío

4.2. Características del suelo

El suelo en el que se establecieron los experimentos, maíz en primavera-verano y trigo en otoño-invierno, correspondió a un *Vertisol pélico*, de color oscuro y profundo (>1 m). El resultado del análisis físico-químico, para los primeros 30 cm de profundidad, evidenció un contenido de arcilla de cerca de 60%, pH ligeramente alcalino, mediano contenido de materia orgánica y alto contenido de P extractable-Olsen, K, Ca y Mg (Cuadro 1). Sin embargo, se observó que los contenidos de Fe y Zn fueron bajos. Estas deficiencias son frecuentes en este tipo de suelos en la región Bajío, y frecuentemente se manifiestan en el cultivo de maíz como un amarillamiento intervenal en las hojas más desarrolladas.

Cuadro 1. Características físico-químicas de suelo. Campo Experimental Bajío. Celaya, Guanajuato.

pH	MO	NI	P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Zn	Mn	Cu	Arena	Limo	Arcilla
	%	----- ppm -----										----- % -----		
7.2	1.97	14.8	23.3	859	5441	1027	294	6.11	1.66	6.47	0.79	26	18	56

4.3. Manejo agronómico precedente de la parcela

La parcela donde se estableció el experimento, durante tres años previos al establecimiento de este trabajo, fue cultivada con maíz y chile poblano en rotación. Se incorporaron durante ese tiempo alrededor de 40 t ha⁻¹ de maíz en verde y más de 20 toneladas de residuos cosecha de chile. Previo al establecimiento de esos cultivos estuvo el terreno en descanso varios ciclos de cultivo. La mayor incidencia de malezas fue de zacate Johnson (*Sorghum halepense* L.), el cual fue controlado oportunamente.

4.4. Los experimentos

Se establecieron dos experimentos: uno con maíz durante el ciclo primavera-verano de 2014 y otro con trigo durante el ciclo otoño-invierno 2014-2015. En ambos ensayos se evaluaron cuatro dosis crecientes de fertilización nitrogenada (Cuadro 2). Las dosis máximas de nitrógeno se definieron de acuerdo a las cantidades de fertilizante que utilizan los agricultores para cada cultivo. Se evaluaron cuatro tratamientos con tres repeticiones, el diseño experimental fue en bloques al azar. El criterio de bloqueo fue la pendiente. Las unidades experimentales constaron de 8 surcos de 1 m de ancho, por 15 m de longitud. La distribución de las unidades experimentales en el campo se presenta en la Figura 2.

Cuadro 2. Tratamientos con cuatro dosis crecientes de fertilización nitrogenada para maíz y trigo.

Tratamiento	Maíz (primavera de 2014)			Trigo (invierno 2014-2015)		
	N	P ₂ O ₅	K	N	P ₂ O ₅	K
	Unidades ha ⁻¹			Unidades ha ⁻¹		
1	0	80	50	0	60	00
2	100	80	50	100	60	00
3	200	80	50	200	60	00
4	400	80	50	300	60	00

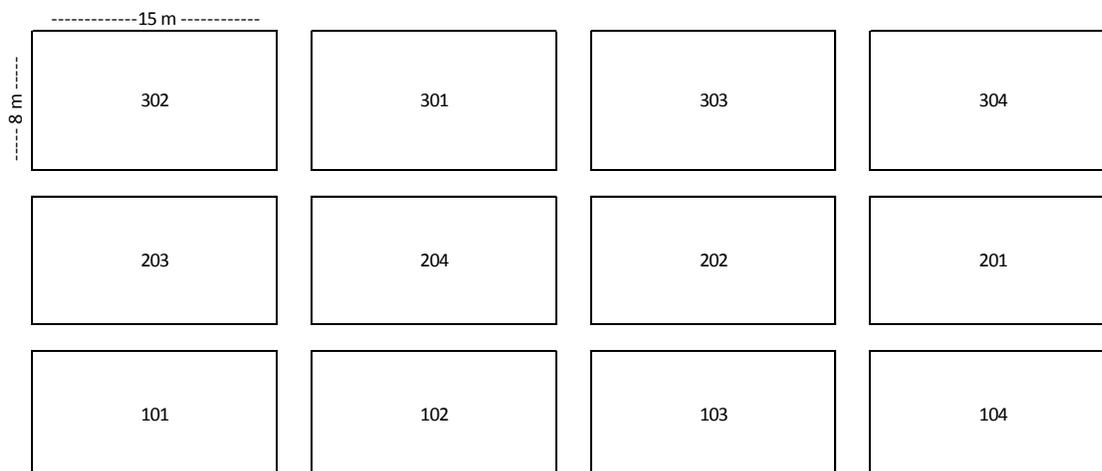


Figura 2. Distribución de unidades experimentales en la parcela. Campo Experimental Bajío.

4.5. Manejo agronómico

4.5.1. Maíz

Se estableció durante el ciclo de cultivo primavera-verano de 2014 sobre surcos de surco de 1 m de ancho y una distancia entre plantas de 15 cm. La fecha de siembra fue el 26 de mayo de 2014 sobre terreno húmedo, después de intensos aguaceros. La variedad de maíz empleada fue “Cimarrón” de Asgrow, la cual es de ciclo largo. Se aplicó como fuente de nitrógeno, urea; de fósforo, superfosfato de calcio triple; y de potasio, cloruro de potasio. El nitrógeno se aplicó en dos fracciones: la mitad a la siembra (con base a lo señalado en el Cuadro 2) y la otra mitad a los 40 días después de la siembra (15 de junio), durante la escarda.

El experimento contó con riego por goteo, el cual se usó de manera ocasional, ya que la distribución de las lluvias a lo largo del ciclo de cultivo satisfizo las necesidades hídricas de las plantas. Se aplicó el 20 de julio para el control del gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*) el producto Palgus, cuyo ingrediente activo es *Spinetoram*. Se aplicó también Furadan granulado directamente al cogollo con un salero de 3 a 4 gránulos por planta cuando éstas medían menos de medio metro de altura. El control de malezas se hizo el 15 de junio de manera manual y mediante una aplicación del herbicida post-emergente Maister, cuyo ingrediente activo son las sulfonilureas, para control de zacates. La superficie de la unidad experimental: 120 m².

4.5.2. Trigo

El experimento de trigo se estableció durante el ciclo de cultivo otoño-invierno 2014-2015. Se conservó la misma distribución de las unidades experimentales y el ancho de surco de 1 m. El cultivo se sembró a 3 hileras por surco sobre terreno seco. Se utilizó la variedad de trigo Alondra F2014 de gluten fuerte, la cual necesita 130 días para llegar a la madurez fisiológica (Solís *et al.*, 2016). Se sembraron 150 kg ha⁻¹ el 22 de diciembre de 2014. Se aplicaron cuatro riegos mediante tubería de compuertas: 0, 40, 70 y 100 días después de la siembra.

4.6. Temperatura y precipitación

Se registró a lo largo de los ciclos de cultivo las temperaturas máximas, mínimas y la precipitación mediante una estación automatizada que se localiza cerca de la parcela experimental.

4.6.1. Año 2014

Las temperaturas máximas y mínimas y las precipitaciones imperantes a lo largo del año se presentan en la Figura 3. El inicio de la temporada de lluvias se registró a finales de mayo, y el volumen anual de lluvia sumó 467 mm, con una distribución irregular. Es notable la presencia de dos periodos de sequía intraestival (Figura 4) en los meses de julio y septiembre; sin embargo, la disponibilidad de riego proporcionó humedad suficiente en el suelo para el desarrollo del cultivo.

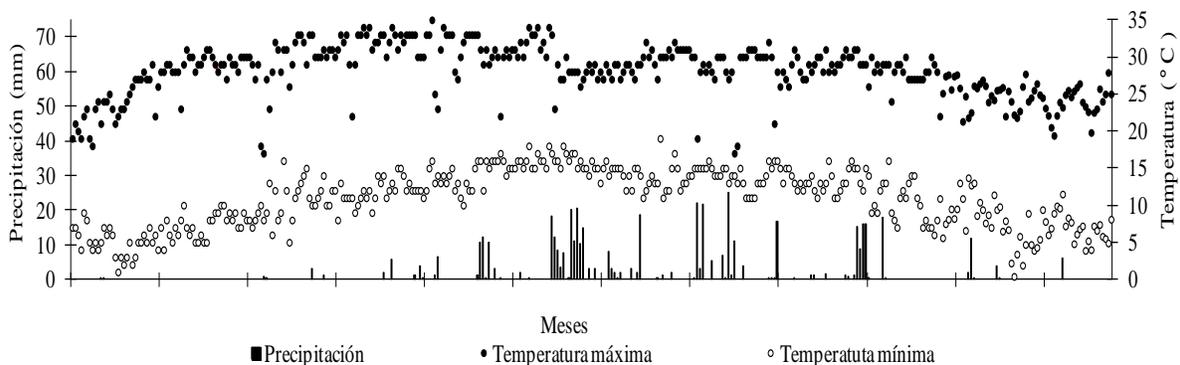


Figura 3. Registro diario de las temperaturas máximas y mínimas, y la precipitación pluvial en Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato. Ciclo primavera-verano de 2014.

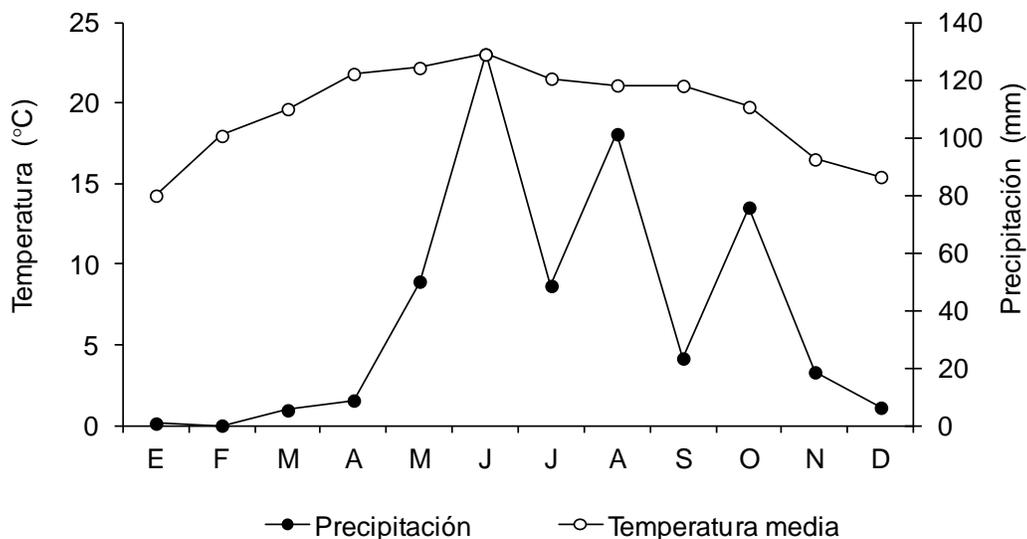


Figura 4. Climograma mensual. Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato durante 2014.

4.6.2. Año 2015

Las condiciones meteorológicas que imperan a lo largo del ciclo de cultivo influyen directamente sobre el desarrollo de las plantas, por lo tanto, determinan el potencial de rendimiento. La fecha de siembra del ensayo fue tardía, el 24 de agosto. La precipitación total durante 2015 fue de 938.6 mm, un año excepcionalmente lluvioso (Figura 5), ya que el promedio anual de la zona es de alrededor de 600 mm, y se han registrado años de menos de 300 mm de lluvia. Durante el desarrollo del cultivo, después del 24 de agosto, hubo una precipitación de 243.5 mm. Se suministró un riego a la siembra y a la semana cayeron dos fuertes aguaceros: uno de 60 mm y al tercer día otro de 50 mm. El exceso de humedad favorece la proliferación de enfermedades, principalmente fungosas.

Las temperaturas máximas a lo largo del ciclo de cultivo fueron frecuentemente de alrededor de 30 °C. Las temperaturas mínimas no fueron menores de 4 °C a finales de noviembre (Figura 5). No se presentaron heladas, por lo cual el cultivo pudo llegar a madurez fisiológica. Las temperaturas medias mensuales a lo largo del ciclo de cultivo fluctuaron entre 18 y 20 °C, con excepción de noviembre, que fue de 15 °C y fue en el mes que se presentaron las temperaturas mínimas extremas (Figura 6).

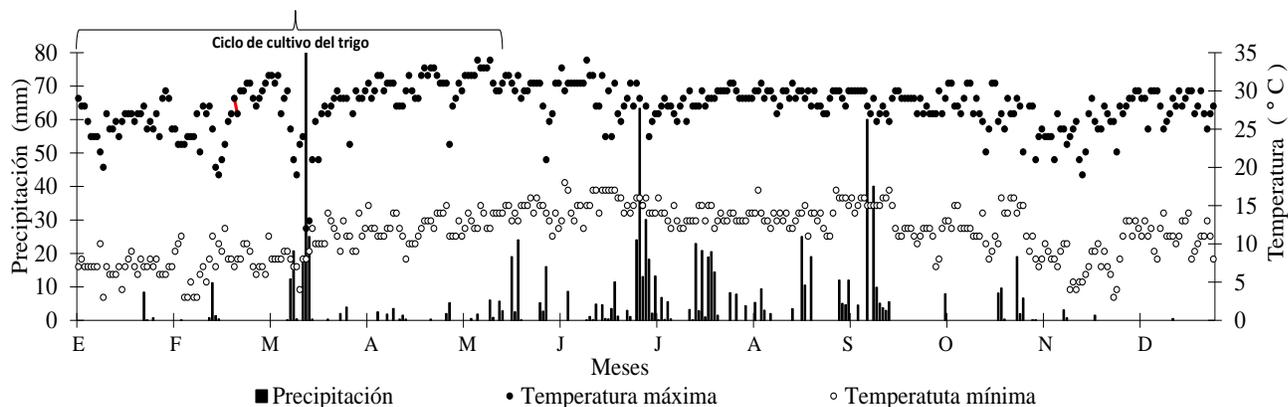


Figura 5. Registro diario de las temperaturas máximas y mínimas, y la precipitación pluvial en Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato. otoño-invierno de 2015.

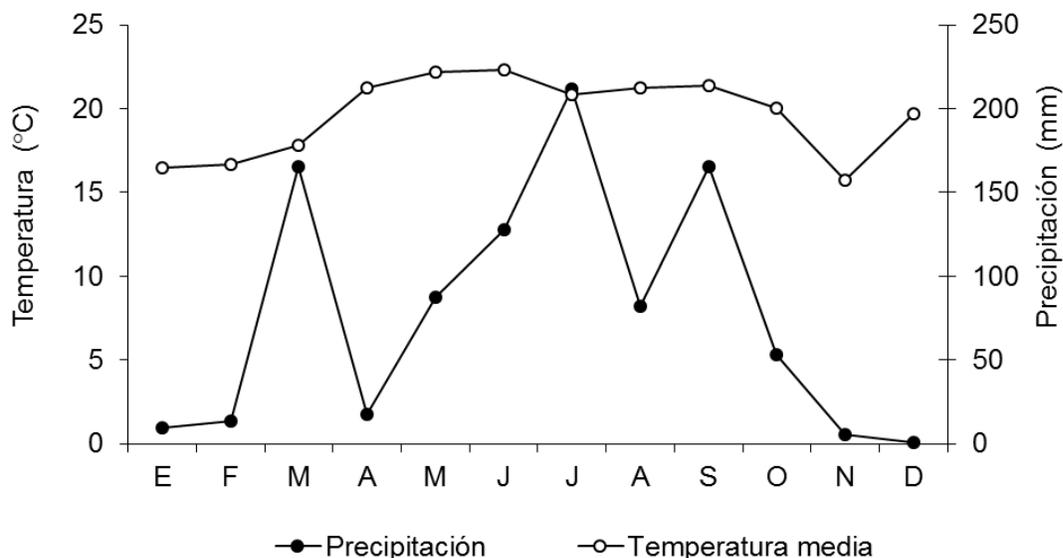


Figura 6. Climograma mensual. Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato. Ciclo otoño-invierno de 2015.

4.7. Componentes de rendimiento

4.7.1 Evaluación de parámetros agronómicos en maíz

La población de plantas y el número de mazorcas m^{-2} se contabilizaron a partir de tres submuestras que se evaluaron por unidad experimental, con dimensiones de dos surcos de ancho por 5 m de longitud ($10 m^2$). La altura de planta se estimó a partir de las mismas áreas de muestreo en 10 plantas seleccionadas al zar, en la que se midió su longitud

desde la base del suelo a la base de la espiga. Se valoraron los parámetros de mazorca: longitud, diámetro, número de hileras mazorca⁻¹, número de granos hilera⁻¹ y número de granos mazorca⁻¹. Para lo anterior se seleccionaron 20 mazorcas al azar dentro de cada área de muestra. Para el peso de 100 granos se homogenizó el grano que se obtuvo de cada área de muestra y se contabilizaron 100 granos de maíz, después se pesaron en una balanza analítica. El rendimiento de grano se ajustó a 14% de humedad. Para la determinación de la paja, biomasa e índice de cosecha se seleccionaron 3 plantas contiguas a las áreas de muestra. Se separó el grano, se trituro la paja, incluyendo el olote y se colocó en una bolsa de papel. El material vegetal se secó en una estufa a 75 °C durante 72 horas. El grano se pesó y se ajustó al 14% de humedad. Posteriormente se calculó el índice de cosecha dividiendo el rendimiento económico (grano) entre el rendimiento biológico (grano + paja). Para el cálculo de la biomasa aérea, en cada área de muestreo, se despejó la ecuación mencionada.

4.7.2. Evaluación de parámetros agronómicos en trigo

La población de plantas y el número tallos y espigas m⁻² se contabilizaron a partir de tres submuestras recolectadas en cada unidad experimental, con dimensiones de un surco de ancho por 1 m de longitud, consideradas como la parcela útil. Las plantas se arrancaron de raíz y se contabilizó el número de plantas m⁻² a partir de la identificación de la raíz que aglomeraban varios tallos, lo cual fue perfectamente visible. Se estimó el índice de amacollamiento (número de tallo planta⁻¹) al dividir el número de tallos entre el número de plantas en cada área de muestreo. La altura de planta se estimó a partir de las mismas áreas de muestreo 10 tallos seleccionadas al azar en la que se midió su longitud desde la base del suelo a la base de la espiga. El rendimiento de grano se ajustó al 12% de humedad. Para el peso de 200 granos se homogenizó el grano que se obtuvo de cada área de muestra se contabilizaron 200 granos de trigo y se pesaron en una balanza analítica. El resultado se multiplicó por cinco. Para estimar el número de granos espiga⁻¹ se calculó a partir del peso de 200 granos el número de granos por área de muestra y se dividió entre el número de espigas.

Para la determinación de la cantidad de paja, biomasa aérea e índice de cosecha se seleccionaron 3 plantas contiguas a las áreas de muestra. Se separó el grano, se trituro la paja y se colocó el material vegetal en una bolsa de papel, y después se secó en una estufa a 75 °C durante 72 horas. El grano se pesó y se ajustó a 12% de humedad. Posteriormente se calculó el índice de cosecha dividiendo el rendimiento económico (grano) entre el rendimiento biológico (grano + paja). Para el cálculo de la biomasa, en cada área de muestra, se despejó la ecuación mencionada y se estimó este parámetro.

4.8. Disponibilidad de N y potencial de rendimiento

Para esta evaluación se consideró el método de fertilización racional desarrollado por Rodríguez-Safuentes (1993), a partir del cual se postula la siguiente ecuación:

$$Dosis\ de\ fertilizante = \frac{Demanda - Suministro}{Eficiencia\ de\ recuperación}$$

Donde:

Demanda: Cantidad de nutriente que requiere el cultivo para producir una tonelada de producto, que en este caso es maíz.

Suministro: se refiere a la reserva del nutriente que contiene el suelo, a cierta profundidad. Parámetro que se calcula a partir del análisis químico en una muestra representativa del suelo.

Eficiencia de aprovechamiento: Se refiere a la capacidad del cultivo para aprovechar el fertilizante químico que se le suministra de manera externa. Influye el tipo de suelo, por la capacidad para retener nutrimentos según el contenido de arcilla o coloides orgánicos; la capacidad de exploración de la raíz, que tienen que ver con su forma morfológica; las prácticas de manejo agronómico, por la forma en que se coloca el fertilizante al cultivo; el fraccionamiento, la oportunidad de aplicación.

Para completar el cálculo de las reservas de nitrógeno disponible en el suelo, se consideró también el nitrógeno mineralizable de la materia orgánica contenida en éste a partir de relación C/N, los aportes por efecto de la rotación de cultivos y las incorporaciones precedentes de abonos orgánicos. Lo anterior de acuerdo parámetros determinados para las condiciones del Bajío por Castellanos *et al.* (2005).

Para usar eficientemente los fertilizantes para la producción de cereales se debe considerar, en primer lugar, tener certidumbre del potencial de rendimiento que se puede obtener a partir de las condiciones edafoclimáticas que prevalecen en el sitio y de las prácticas de manejo agronómico. En el Bajío se pueden producir, en condiciones de riego, más de 15 t ha⁻¹ de maíz en primavera-verano, y más de 9 t ha⁻¹ de trigo en otoño invierno. Para calcular el requerimiento de nitrógeno, por el cultivo, se parte del conocimiento de que el maíz requiere 22.5 kg ha⁻¹, adentro de las plantas, de este elemento por cada tonelada de maíz que producen, mientras que para trigo se requieren 26 kg ha⁻¹ de N por cada tonelada de grano que se produce (Castellanos *et al.*, 2005).

4.9. Monitoreo de nitrógeno inorgánico en el suelo

Para evaluar el contenido de nitrógeno en el suelo en los primeros 15 cm de profundidad, a lo largo del ciclo de cultivo, se ubicaron sitios específicos al interior de las unidades experimentales. Se consideraron los surcos centrales y 2 metros hacia dentro, tal como se muestra en la Figura 7. Se hicieron muestreos de suelos, dos a tres veces por semana, a lo largo del ciclo de cultivo tanto para maíz, como para trigo. Se utilizó una barrena de acero inoxidable con un diámetro de 2 cm. Se recolectaron dos muestras de suelo en los primeros 15 cm de profundidad: una en el fondo del surco y otra en la cresta del mismo. Posteriormente en el laboratorio Nacional de Fertilidad de Suelos y Nutrición Vegetal del Campo Experimental Bajío se determinó la humedad de las muestras mediante el método gravimétrico, que consiste en pesar una porción de las muestras de suelo recolectadas en el campo (alrededor de 30 g) y meterlas en una estufa a 110 °C durante 24 horas. Se resta el peso seco del peso húmedo, se divide entre el peso seco y se multiplica por 100 para obtener el porcentaje de humedad. Para la evaluación de N-NO₃ y N-NH₄



Figura 7. Unidades experimentales equipadas con cámaras para medir las emisiones de N_2O . Maíz en ciclo primavera-verano 2014 y trigo en otoño-invierno 2014-2015.

Posteriormente, en el laboratorio, se pesaron 9 g de suelo húmedo en matraces Erlenmeyer de 50 mL y se adicionaron 30 mL de KCl 1 molar. Se agitaron durante un minuto de manera manual. Se dejaron reposar 2 horas y se agitaron nuevamente otro minuto. Después la solución reposada se pasó a través de papel filtro # 40, para la obtención de los extractos, los cuales se analizaron para la determinación de $N-NO_3$ y $N-NH_4$ mediante el método de Kjeldahl (Mulvaney, 1996). Se consideró la humedad del suelo, la cual se determinó mediante el método gravimétrico, es decir, se secaron submuestras de suelo a $110\text{ }^{\circ}C$ durante 24 horas.

4.10. Emisiones de óxido nitroso

Se colocaron cámaras herméticas para evaluar la emisión de gases en cada unidad experimental: una al fondo del surco y otra en la cresta del surco. Las dimensiones de dicha cámara fueron de 6 pulgadas de diámetro por 30 cm de altura construidas con PVC. Se colectaron gases de tres a dos veces por semana mediante el siguiente procedimiento: Se utilizaron jeringas 20 cm^3 para extraer gases de la cámara, a través de un septo. Dichos volúmenes extraídos se colocaron en viales herméticos, los cuales fueron previamente purgados con una carga de gas extraído de la misma cámara. La medición de la concentración de óxido nitroso se determinó por cromatografía de gases. Se registraron al mismo tiempo la temperatura del aire, del suelo y la humedad del suelo.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Variables agronómicas para maíz

5.1.1. Población

El número de plantas m⁻² fluctuó entre 69,000 y 74,000 plantas hectárea⁻¹ y fue semejante ($p < 0.05$) en todos los tratamientos. Esta población fue relativamente baja si se considera que en el Bajío se cultiva el maíz con poblaciones superiores a 100,000 plantas ha⁻¹, las cuales frecuentemente son recomendadas por las empresas de semilla. El Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) recomienda, para condiciones de riego en el estado de Guanajuato, 85,000 plantas ha⁻¹ (Pons-Hernández *et. al.*, 2013). La población de plantas en el este ensayo con maíz se estableció sobre surcos de 1 m de ancho, en lugar de 0.8 m de ancho, que es lo que recomienda el INIFAP (Pons-Hernández *et. al.*, 2013). Por ello la población de plantas fue menor a la recomendación que se hace en INIFAP; sin embargo, dicha condición favoreció mayor incidencia de luz, mayor tasa fotosintética y mayor aprovechamiento de las reservas del suelo, lo que derivó en una mayor producción de materia seca y por lo tanto un mayor potencial de producción, como se explicará más adelante.

Cuadro 3. Resultados promedio de componentes de rendimiento para maíz. Campo Experimental Bajío. Celaya, Guanajuato. Ciclo primavera-verano de 2014.

Trat.	Dosis N kg ha ⁻¹	Número		Altura m	Ø cm	Longitud Mazorca cm	Número		cien granos g	Peso grano g	Peso Paja t ha ⁻¹	Biomasa Aérea t ha ⁻¹	IC	
		Plantas m ²	M				H/M	granos						
								Hilera ⁻¹						M ⁻¹
1	0	7.4a*	7.3a	2.81a	5.20a	15.1a	15.8a	32.7a	517.0a	48.9a	16.5a	18.1a	34.6a	0.48a
2	100	6.9a	7.1 ^a	2.81a	5.27a	14.9a	15.8a	32.3a	512.3a	51.2a	15.9a	17.4a	33.3a	0.48a
3	200	7.3a	7.2 ^a	2.83a	5.28a	14.6a	15.9a	31.4a	498.8a	50.9a	17.1a	17.8a	34.9a	0.49a
4	400	7.2a	7.1 ^a	2.86a	5.27a	14.6a	15.8a	31.9a	504.1a	51.4a	16.6a	18.3a	34.9a	0.48a

*: letras iguales son estadísticamente semejantes ($p < 0.05$), **G**: grano, **H**: hileras, **N**: nitrógeno, **M**: mazorcas, **Ø**: diámetro, **IC**: índice de cosecha.

5.1.2. Número de mazorcas

Este parámetro fluctuó entre 71,000 y 73,000 mazorcas por hectárea lo cual indica que no hubo diferencia significativa ($p < 0.05$) (Cuadro 3). En el tratamiento dos, con menor población (6.9 plantas ha⁻¹), la emisión de mazorca fue de 1.16 mazorcas planta⁻¹ en

promedio. Lo anterior favorece una mayor homogeneidad en la producción de mazorcas, parámetro que se relaciona directamente con el rendimiento de grano.

5.1.3. Altura de planta

El crecimiento de las plantas de maíz fue semejante ($P < 0.05$) en todos los tratamientos. Las plantas alcanzaron una altura promedio mayor a 2.8 m (Cuadro 3). El tratamiento cuatro, con la mayor dosis de fertilizante (400 Kg ha^{-1}) tuvo una altura ligeramente mayor con respecto a los demás tratamientos; sin embargo, esa diferencia no fue estadísticamente significativa. La altura de planta promedio reportada para la variedad cimarrón de Asgrow, para las condiciones edafoclimáticas del estado de Guanajuato, es entre 2.3 y 2.6 m (Pons-Hernández *et. al.*, 2013). En el presente estudio las plantas alcanzaron una altura entre 7 y 18% mayor a lo que se menciona en esta referencia. Estos resultados en el crecimiento de las plantas revelaron un adecuado suministro de nitrógeno y fósforo del suelo. El nivel de suficiencia del primero, en la etapa de floración, fue de 3.5%, mientras que el segundo fue de alrededor de 0.25% (Figura 8). De acuerdo con los niveles de suficiencia propuestos por el Laboratorios A-L de México, S.A. de C.V. (AL) el cultivo tuvo un adecuado contenido de N y P en la etapa de floración en todos los tratamientos. Lo anterior se explica por el manejo precedente que tuvo la parcela donde se estableció este ensayo, la cual fue sometida a prácticas de incorporación de abonos verdes y labranza reducida.

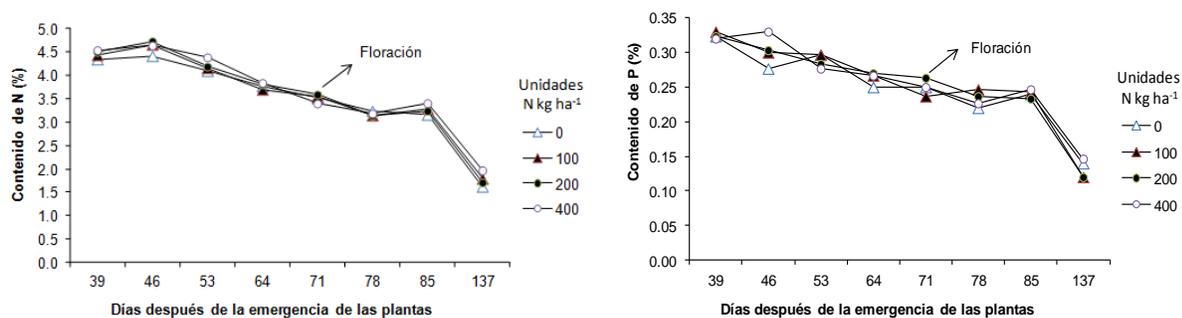


Figura 8. Contenido de nitrógeno y fósforo a lo largo del ciclo de cultivo.

5.1.4. Diámetro de mazorca

Este parámetro fue semejante ($p < 0.05$) en todos los tratamientos (Cuadro 3). El coeficiente de variación fue de alrededor de 3%, lo que muestra el grado de una uniformidad que hubo en esta variable. Se esperaba mazorcas más pequeñas en el tratamiento uno, sin aplicación de fertilizante; sin embargo, la reserva del suelo proporcionó una nutrición adecuada del cultivo, como se observó en la Figura (8).

5.1.5. Longitud de mazorca

Esta variable, que se relaciona directamente con el rendimiento de grano, fluctuó entre 14.6 y 15.1 cm; sin embargo, todos los tratamientos fueron estadísticamente semejantes ($p < 0.05$) (Cuadro 3). Estos resultados fueron consistentes y mostraron un comportamiento similar a lo que fue explicado anteriormente con el diámetro de mazorca.

5.1.6. Número de granos por mazorca

El número de granos por mazorca, que depende del número de hileras por mazorca y el número de granos por hilera, fue estadísticamente semejante ($p < 0.05$) en todos los tratamientos (Cuadro 3). Los valores fluctuaron alrededor de 500 granos por mazorca. Estos resultados muestran la homogeneidad que hubo en cuanto al tamaño de las mazorcas en todos los tratamientos.

5.1.7. Peso de 100 granos

Este parámetro está relacionado con el llenado y la densidad de los granos, es decir, que dependió directamente de la nutrición que tuvo el cultivo durante su desarrollo y de las condiciones climáticas, por lo tanto, puede influir directamente en el rendimiento de grano. Granos más pesados indican una mejor nutrición que granos más ligeros. Los resultados no mostraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos; sin embargo, se observó en el tratamiento uno, sin aplicación de fertilizantes (Cuadro 3), que los granos fueron entre 4 y 5% más ligeros con respecto a los tratamientos con aplicación de fertilizantes químico (100, 200 y 400 kg ha⁻¹). Pero esta tendencia no se reflejó en el rendimiento de grano, como se explicará a continuación.

5.1.8. Rendimiento de grano

La producción promedio de maíz, en los diferentes tratamientos, fluctuó entre 15.9 y 17.1 t ha⁻¹. No hubo diferencias significativas entre tratamientos por efecto de las dosis crecientes de fertilización ($p < 0.05$) (Figura 8). La mayor producción se obtuvo con el tratamiento 3 (Figura 9), donde se aplicaron 200 unidades de N ha⁻¹, con más de 17 t ha⁻¹ de grano, apenas 600 kg más con respecto a lo que se obtuvo con el tratamiento sin aplicación de fertilizante. Cabe mencionar que, una producción por encima de 16 t ha⁻¹ sin la aplicación de fertilizante (0 kg ha⁻¹) químico implicó un alto reservorio de N en el suelo potencialmente aprovechable por las plantas, el cual provino de la incorporación de abonos verdes que se hicieron en ensayos anteriores al presente estudio, el cual se estimó en 130 kg ha⁻¹ (se explicará con detalle en el punto 5.3.1). Lemcoff y Loomis (1986) mencionan que el rendimiento de maíz depende de la calidad, cantidad y tamaño de los granos, en especial cuando está influenciado por dosis adecuadas de nitrógeno. De la misma forma, Urbina (1993) señaló que el rendimiento está influenciado directamente por su potencial genético, nutrición y factores ambientales como son agua, luz y temperatura. Aunque la población de plantas en el presente ensayo fue relativamente baja, debido al ancho de los surcos de 1 m, comparado con la población de plantas recomendadas para la zona Bajío; se obtuvo un rendimiento extremadamente alto (entre 16 y 17 t ha⁻¹). De manera general, estos rendimientos fueron elevados, considerando que en el estado de Guanajuato la producción promedio de maíz en condiciones de riego es de 8.5 t ha⁻¹ (SIAP, 2016); sin embargo, estudios reportan rendimientos cercanos a 15 t ha⁻¹ (Martínez-Menes, 2009). La producción de maíz en el presente estudio sobrepasó el rendimiento máximo extremo que se ha obtenido en el estado.

Este potencial de producción en maíz se explica por varias razones: una adecuada fecha de siembra, condiciones edafoclimáticas favorables, adecuado suministro de nutrientes y mayor tasa fotosintética. Esto último se observó claramente en la altura de planta, la cual alcanzó una estatura por encima de lo reportado por Pons-Hernández *et. al.* (2013) para esta variedad, como se explicó anteriormente. El mayor ancho de surco favoreció una mayor luminosidad, y por lo tanto una menor competencia entre plantas por luz y nutrientes.

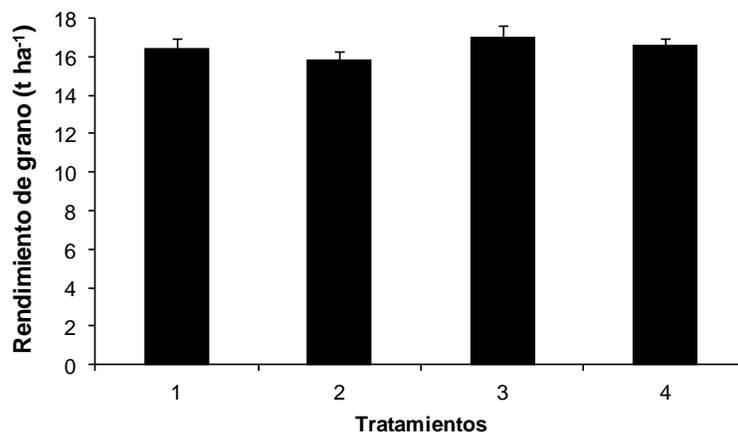


Figura 9. Rendimiento de maíz. Campo Experimental Bajío. Ciclo primavera-verano 2014.

Estos resultados evidencian que el nitrógeno que se aplicó en los demás tratamientos no fue aprovechado por el cultivo y se perdió muy probablemente por procesos de lixiviación y desnitrificación, ocasionando con ello contaminación en el ambiente.

5.1.9. Biomasa aérea

Los resultados de biomasa aérea corresponden al material vegetativo de las plantas que se encuentra por encima del suelo (paja + grano). Todos los tratamientos fueron estadísticamente semejantes ($p < 0.05$), lo que indica que no hubo respuesta en este parámetro por efecto de las dosis crecientes del fertilizante nitrogenado. Estos resultados explican la similitud que hubo en el rendimiento de maíz, el cual fue semejante en todos los tratamientos, como ya se explicó anteriormente. Este comportamiento en el patrón de acumulación de materia seca, implica necesariamente un adecuado suministro de este nutrimento al cultivo por una reserva suficiente y disponible contenida en el suelo. Lo anterior se explica por la incorporación de abonos verdes, procedentes de maíz, y las prácticas de rotación de cultivo que se efectuaron con chile durante dos años previos al establecimiento del presente ensayo.

5.2. Variables agronómicas para trigo

5.2.1. Población

La población de plantas fluctuó entre 101.6 y 111.7 plantas m⁻² (Cuadro 4). De acuerdo con el análisis estadístico el coeficiente de variación global fue de 15.8%. No hubo diferencias significativas entre tratamientos ($p \leq 0.05$). La siembra en surcos para la producción de trigo es una práctica agronómica cada vez más generalizada, debido a las ventajas que presentan en cuanto al control de malezas y aplicación de insumos agrícolas.

Cuadro 4. Resultados de componentes de rendimiento en trigo. Ciclo otoño-invierno 2014-2015

T	N	Número					Altura Planta m	Peso grano t ha ⁻¹	Mil granos g	miles granos m ⁻²	Biomasa t ha ⁻¹	IC
		plantas m ⁻²	tallos Planta ⁻¹	tallos m ⁻²	espigas m ⁻²	granos espiga ⁻¹						
1	0	111.7a*	328.6b	3.0b	325.3b	33.5c	0.79b	5.4c	49.0a	10.9c	14.5b	0.40ba
2	100	114.6a	349.2b	3.1b	345.6ba	41.7ba	0.85ba	6.8b	47.1a	14.4b	18.7.6ba	0.36b
3	200	101.6a	366.9b	3.7ba	360.7ba	47.4a	0.89a	8.2a	47.3a	17.1a	20.6a	0.47a
4	300	101.6a	418.7a	4.2b	411.1a	36.2c	0.94a	6.9b	46.4a	14.9b	20.0a	0.38ba

*: letras iguales son estadísticamente semejantes ($p < 0.05$). **IC**: índice de cosecha, **N**: nitrógeno.

5.2.2. Número de tallos y espigas

La emisión de tallos por planta fue mayor en el tratamiento 4, con mayor dosis de fertilización, el cual fue entre 12 y 22% mayor respecto a los demás tratamientos (Cuadro 4). Este resultado fue consistente con la emisión de tallos planta⁻¹ y el número de espigas, donde se observó el mismo comportamiento. Por otra parte, hubo una estrecha correlación entre el número de plantas y número de tallos planta⁻¹ (amacollamiento) ($R^2=0.84$) (Figura 10), la cual tuvo un comportamiento inverso, que indicó que a mayor número de plantas menor número de tallos. Esto coincide con lo reportado por Báez *et al.* (2012), quien observó esta misma tendencia en trigo y cebada. Estos resultados reflejaron que a mayor competencia entre plantas disminuyó la emisión de tallos por planta, lo cual puede deberse a la competencia que hubo por la luz y los nutrientes. Estos parámetros son importantes porque influyen directamente en el rendimiento de grano, como se explicará más adelante.

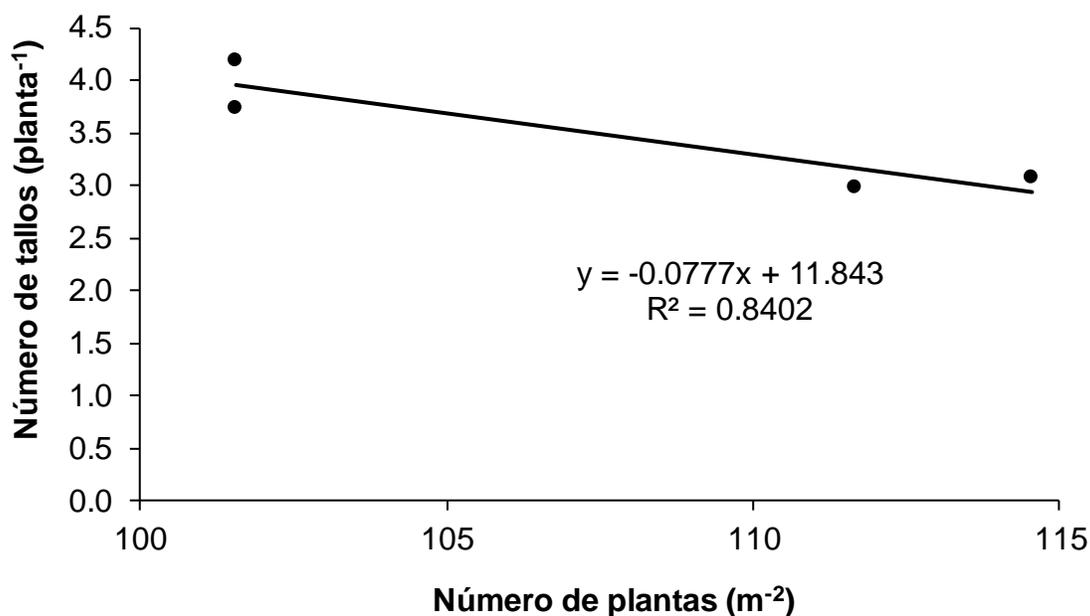


Figura 10. Relación entre número de plantas y número de tallos por planta ($p < 0.05$).

5.2.3. Altura de planta

La altura de planta mostró diferencias significativas por efecto de las dosis crecientes de fertilización nitrogenada. Las plantas del tratamiento sin fertilización (1) tuvieron un crecimiento entre 7 y 16% menor respecto con a los tratamientos con aplicación de 100, 200 y 300 kg de N ha⁻¹ (2, 3 y 4). No hubo diferencias significativas ($p < 0.05$), en este parámetro, entre estos últimos tratamientos. Sin embargo, se observó una estrecha relación entre la altura de planta y las dosis de fertilización ($R^2 = 0.99$). Este resultado evidenció la respuesta de la planta a la disponibilidad del N. La altura de planta también se relacionó medianamente con la producción de biomasa aérea ($R^2 = 0.55$) (Figura 11). Puede determinarse, al efectuar la raíz cuadrada, que el grado de asociación entre estas variables fue de $r = 0.74$. Mayor producción de paja no necesariamente implicó mayor rendimiento de grano, como se explicará más adelante. El mayor crecimiento de las plantas que se obtuvo en el tratamiento 4 (Cuadro 4), con 300 unidades de N ha⁻¹. Al finalizar el crecimiento del cultivo, en este tratamiento, se observó un ligero acame de las plantas. Al respecto Torres-García y Lazcano Ferrat (1997) mencionaron que cuando se aplican altas cantidades de nitrógeno en trigo y cebada hay riesgo de incrementar el

acame de las plantas, por lo que recomiendan formular adecuadamente el balance en la nutrición del cultivo, principalmente entre nitrógeno, fósforo y potasio.

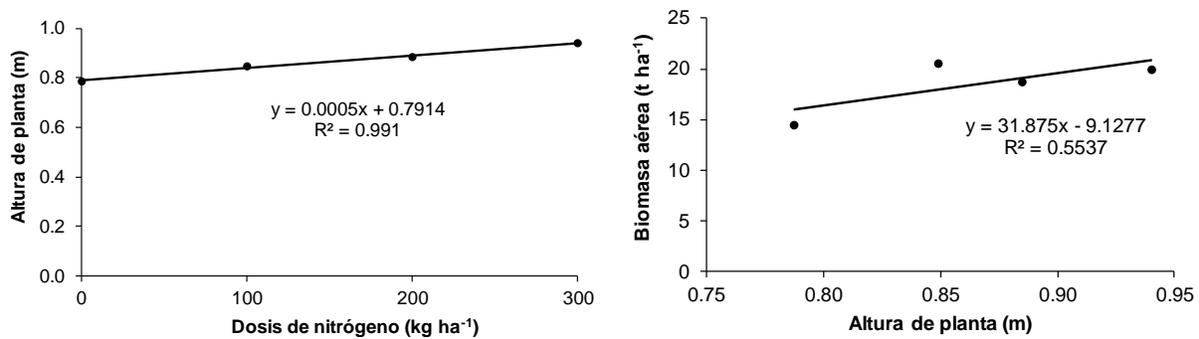


Figura 11. Relación altura de planta con dosis de nitrógeno y biomasa aérea. ($p < 0.05$).

5.2.4. Rendimiento de grano

La producción de trigo presentó diferencias significativas por efecto de las dosis crecientes de fertilización de 0 a 200 kg ha⁻¹ de N ($p < 0.05$) (Figura 8). Sin embargo, la producción más alta no se obtuvo en el tratamiento donde se aplicó la dosis de fertilización más alta (300 kg ha⁻¹), donde hubo un rendimiento semejante ($p < 0.05$) al que se obtuvo con el nivel de fertilización de 100 kg de N ha⁻¹ (Figura 12). El máximo rendimiento se obtuvo con la aplicación de 200 kg ha⁻¹ de N, con 8.2 t ha⁻¹ de grano. Lo anterior sugiere que con la mayor dosis de fertilizante hubo un exceso de nitrógeno, que pudo ocasionar problemas de toxicidad en las plantas.

El potencial de producción de trigo de invierno en el Bajío está por encima de 9 t ha⁻¹, cuando se siembra en la primera quincena de diciembre. Este ensayo se sembró el 22 de diciembre, un poco tardío, que impidió alcanzar una mayor producción. Por otra parte, temperaturas máximas por encima de 30 °C durante el periodo de floración, que regularmente ocurre en febrero, afectan la polinización (Figura 5), lo que puede reflejarse en una menor producción.

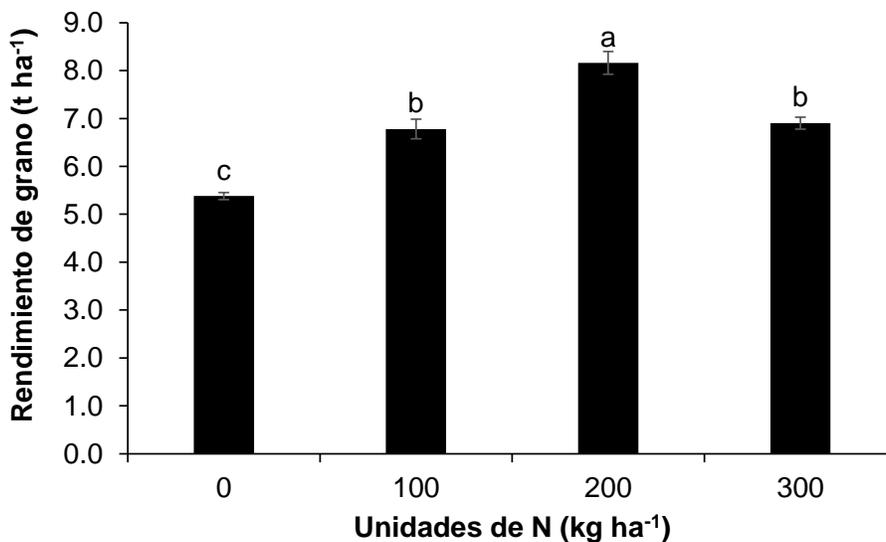


Figura 12. Rendimiento de trigo. Campo Experimental Bajío. Ciclo otoño-invierno 2014.

5.2.5. Peso de mil granos, número de granos por espiga y número de granos m⁻².

El peso de mil granos fluctuó, en promedio, entre 46.4 y 49.0 g. No hubo diferencias estadísticas ($p < 0.05$) en esta variable por efecto de la aplicación de las dosis crecientes de fertilización. Por otra parte, el número de granos espiga⁻¹ fue significativamente mayor ($p < 0.05$) en el tratamiento con 200 unidades de N ha⁻¹, que correspondió al tratamiento donde se obtuvo la mayor producción de trigo, con respecto a los demás tratamientos (Cuadro 4). Se observó que en el tratamiento cuatro, con la máxima dosis de fertilización, el número de granos espiga⁻¹ fue cerca de 24% menor respecto al tratamiento tres, donde se fertilizó con 300 kg ha⁻¹ de nitrógeno. Lo anterior se expresó con un abatimiento en la producción de trigo en el tratamiento con 400 kg de nitrógeno. Estos resultados indicaron que, la excesiva dosis de fertilizantes influye negativamente en estos componentes de rendimiento y abaten la producción de grano. Por lo anterior, además de tener un gasto excesivo por concepto del fertilizante y contaminar el ambiente, el potencial de rendimiento disminuye, con lo cual la rentabilidad va a la baja. Estos resultados ponen de manifiesto la importancia de predecir las dosis adecuadas de fertilización.

5.2.6. Biomasa aérea

La producción de biomasa mostró respuesta a las dosis crecientes de fertilización nitrogenada (Cuadro 4). Este comportamiento fue semejante a la tendencia que mostró el rendimiento de grano. Hubo una relación muy estrecha entre ambas variables ($R^2=0.85$). La producción de biomasa es un parámetro que depende en parte a la disponibilidad de nutrientes en el suelo. A pesar de ello la producción de biomasa entre los tratamientos con 200 y 300 unidades de nitrógeno fue semejante ($p<0.05$), lo cual indica que exceso de nitrógeno en los cultivos no necesariamente produce mayor cantidad de biomasa y sí menos cantidad de grano, como ya se explicó anteriormente.

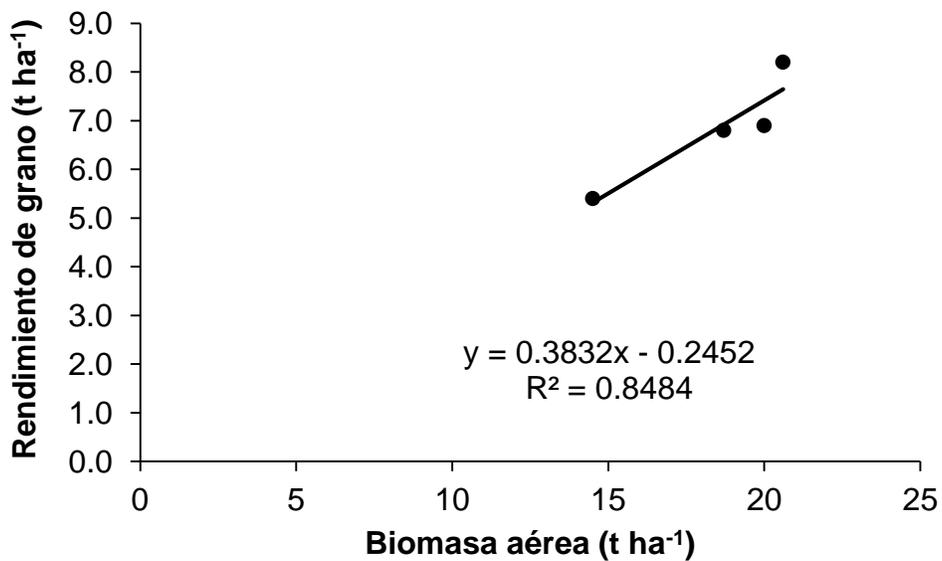


Figura 13. Relación entre biomasa aérea y rendimiento de grano.

5.3. Disponibilidad de N y potencial de rendimiento

5.3.1. Ciclo primavera-verano para cultivo de maíz

Con base en los resultados del análisis químico de suelos, el contenido de materia orgánica para los primeros 30 cm de profundidad fue de cerca de 2%, mientras que la reserva de N inorgánico fue de 14.8 ppm, es decir, 14.8 mg kg⁻¹. Lo anterior implicó, considerando que el suelo tuvo una densidad aparente de 1.15 g cm⁻³, que hubo una reserva de 51.1 kg ha⁻¹ de N inorgánico, sólo en los primeros 30 cm de profundidad. De acuerdo con el contenido de materia orgánica del suelo, y considerando que hubo una

relación C/N de 10/1, se estimó que se mineralizaron a lo largo del ciclo de cultivo, a partir de este reservorio, 38 kg de N ha⁻¹ disponibles para las plantas. Considerando que el cultivo precedente al maíz fue chile, se estimó que la mineralización de los residuos de cosecha de esta primera especie aportó alrededor de 25 kg de N al suelo. También deben considerarse los aportes provenientes de las enmiendas orgánicas, la cuales se hicieron dos años antes del establecimiento del cultivo de maíz, que consistió en la incorporación de alrededor de 20 t ha⁻¹ maíz en verde aunado a la biomasa de las arvenses que crecían al final del ciclo de cultivo, las cuales fueron abundantes. Lo anterior implicó un aporte aproximado de 4 t ha⁻¹ del abono seco, que proporcionaron alrededor de 130 kg ha⁻¹ de N al suelo, de acuerdo con estudios realizados por Castellanos-Ramos *et al.* (2005). Este supuesto parte de que, la materia vegetal de chile que se incorpora al suelo es lábil y contiene 3.25% de nitrógeno que puede quedar disponible para el cultivo de maíz en el ciclo de cultivo subsecuente. Todo lo anterior implicó que hubo una reserva de N en el suelo, en los primeros 30 cm de profundidad de 244.1 kg ha⁻¹ de N. Esta reserva se estimó para la parcela experimental, es decir, para todos los tratamientos, porque bajo estas condiciones se inició el experimento. Las dosis crecientes de fertilización incrementaron la disponibilidad de N inorgánico en los tratamientos correspondientes.

Considerando el máximo nivel de eficiencia de aprovechamiento del cultivo, que es el 80 %, esta reserva alcanzaría para producir 8.7 t ha⁻¹, producción que se esperaba en el tratamiento 1, sin aplicación de fertilizantes químicos; sin embargo, se obtuvo una producción de 16.5 t ha⁻¹, es decir, casi el doble. Se deduce que el aprovechamiento de la reserva de N del suelo por el cultivo es importante más allá de los 30 cm de profundidad. Por otra parte, es también evidente que el N que se aplicó como fertilizante químico en los otros tratamientos, no fue aprovechado en su mayoría por el cultivo, considerando que el máximo nivel de producción de grano fue de 17.1 t ha⁻¹, en el tratamiento 3, con aplicación de 200 unidades de N ha⁻¹, por lo cual había una disponibilidad de 444 kg de N ha⁻¹ (Cuadro 5), sin considerar que es muy probable que las raíces puedan absorber reservas de N más allá de los 30 cm de profundidad.

Cuadro 5. Disponibilidad y aprovechamiento de N para la producción de maíz en ciclo primavera-verano 2014.

Trat.	Dosis de N	Reserva N I ----- kg ha ⁻¹	Disponibilidad N -----	Aprov. cultivo %	Producción grano t ha ⁻¹	Demanda N	N no aprovechado kg ha ⁻¹
1	0	244	371	100	16.5	371	0
2	100	244	471	76	15.9	358	113
3	200	244	571	67	17.1	385	186
4	400	244	771	49	16.6	374	397

*Nitrógeno aprovechado por el cultivo más allá de los primeros 30 cm de profundidad. **se desconoce.

Estos resultados evidencian un uso irracional del fertilizante nitrogenado cuando no se consideran las reservas de N que dispone el suelo para un potencial de producción determinado, como el que se tuvo en el presente estudio. Es importante estimar las reservas del N del suelo más allá de 30 cm de profundidad, las cuales son factibles de ser aprovechadas de manera importante por el cultivo. Lo que no logró aprovechar el cultivo en parte pudo quedar inmovilizado por microorganismos del suelo y otra gran parte se perdió por diferentes vías: escurrimiento, lixiviación o desnitrificación. En esta última las emisiones de N₂O que aumentaron a medida que se incrementaron las dosis de fertilización nitrogenada así lo confirman, como se explicará más adelante.

Los suelos vertisoles son profundos, más de 1 m, y además tienen alta capacidad de retención de humedad e intercambio catiónico, lo cual favorece condiciones de fertilidad especiales para la producción de los cultivos. Estos resultados implican que el cultivo en el tratamiento sin aplicación de fertilizante químico obtuvo alrededor de 131 kg ha⁻¹ de N inorgánico más allá de los primeros 30 cm de profundidad, es decir, alrededor del 35% de su demanda interna. Esto es de suma importancia porque se puede asegurar la posibilidad de obtener altos rendimientos de maíz con una inversión económica menor respecto a la condición de aplicar elevadas dosis de fertilizante químico. Sin embargo, es necesario considerar para esto un suelo profundo no compactado, con enmiendas orgánicas y un mediano contenido de carbono orgánico. Ante la problemática del encarecimiento de los fertilizantes químicos, la contaminación ambiental y la necesidad de producir los cereales a bajo costo, para competir con los precios internacionales, los resultados del presente estudio son relevantes.

5.3.2. Ciclo otoño-invierno para cultivo de trigo

De acuerdo con Castellanos *et al.* (2005), el cultivo de trigo, para las condiciones del Bajío, se requieren 26 kg de N adentro de la planta para producir una tonelada de grano. Con base en lo anterior se requirieron 212.2 kg de N para la máxima producción que se obtuvo en el tratamiento donde se aplicaron 200 unidades de N kg ha⁻¹. Obviamente hubo una reserva importante de este elemento en el suelo, aún más allá de los primeros 30 cm de profundidad. De acuerdo con el método de fertilización empleada se estima que hubo una eficiencia de recuperación de fertilizantes de 60%, considerando que la fuente de fertilizante fue urea y que se hizo en sólo dos aplicaciones. Es factible inferir, a partir del tratamiento sin fertilización (1), que el cultivo fue capaz de extraer del suelo 140.4 kg de N ha⁻¹, lo cual es una cantidad importante, a partir de lo cual se obtuvo una producción de 5.4 t ha⁻¹. Con base en lo anterior se estima que en el tratamiento con la mayor fertilización hubo una disponibilidad de N de más de 440 kg de N ha⁻¹ (Cuadro 6). El abatimiento en el rendimiento implica un daño al cultivo que se traduce en un menor rendimiento. Las pérdidas de N necesariamente contaminan el ambiente y elevan los costos de producción. Niveles de aplicaciones de urea para la producción de trigo por encima 300 unidades de N ha⁻¹, son comunes en el Bajío y en otras regiones agrícolas del país.

Cuadro 6. Disponibilidad y aprovechamiento de N para la producción de trigo en ciclo otoño-invierno 2014-2015.

Trat	Fertilización	Rendimiento	Demanda	Reserva suelo	N no aprovechado
	kg N ha ⁻¹	t ha ⁻¹	kg N ha ⁻¹		Kg ha ⁻¹
1	0	5.4	140.4	140.4	0
2	100	6.8	176.8	240.4	63.6
3	200	8.2	213.2	340.4	127.2
4	300	6.9	179.4	440.4	261.0

5.4. Monitoreo de nitrógeno en el suelo

5.4.1. Ciclo primavera-verano para cultivo de maíz

Los resultados de las evaluaciones del monitoreo de disponibilidad nitrógeno inorgánico en el suelo (N-NO₃ + N-NH₄) mostraron que hubo una estrecha relación entre el contenido

de este elemento y las dosis crecientes de fertilización: mientras que, en el borde del surco, donde se aplicó directamente el fertilizante, ésta fue de $R^2=0.97$ y se ajustó a un modelo exponencial, para el fondo del surco el ajuste fue de $R^2=0.96$ y presentó una tendencia lineal (Figura 14).

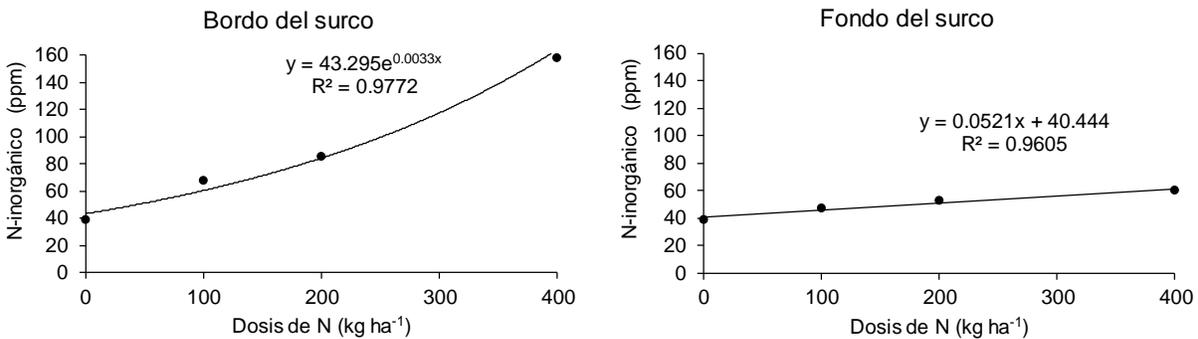


Figura 14. Relación entre concentración promedio de N-inorgánico en el suelo ($N-NO_3 + NH_4$) en el borde y fondo de los surcos en función de las dosis crecientes de fertilización nitrogenada. Cultivo de maíz. ($p < 0.05$).

Se observó que en tratamiento sin aplicación de fertilizante (1) la disponibilidad de nitrógeno fue semejante tanto en el borde como en el fondo del surco; sin embargo, al ir aumentando las dosis de nitrógeno esta diferencia aumentó desde 31 hasta 62%, con la dosis más alta de fertilizante. De manera general la disponibilidad de $N-NO_3$ fue entre 13 y 25% mayor respecto a la disponibilidad de $N-NH_4$ en los bordos del surco, mientras en el fondo del surco esta diferencia fluctuó entre 31 y 45% (Figura 15). Es importante señalar que la mayor disponibilidad de nitrógeno a mediana que aumentaron las dosis de fertilizante ureico, no presentó ninguna relación con el rendimiento de grano. Las altas reservas de nitrógeno que contenía el suelo suministró lo necesario para una producción de $16.5 t ha^{-1}$ de maíz, que fue lo que se obtuvo donde no se aplicó fertilizante. Lo anterior implicó una pérdida importante de nitrógeno inorgánico que no pudo ser aprovechada por el cultivo en los tratamientos con 100, 200 y 400 kg de $N ha^{-1}$.

Estos resultados confirman la aplicación excesiva de fertilizantes químicos que efectúan los agricultores en el Bajío, lo cual es una práctica frecuente. Ocurre principalmente por desconocimiento en cuanto a las reservas de nitrógeno disponibles en el suelo, la demanda requerida por el cultivo para un potencial de rendimiento determinado y por la ineficiencia en la aplicación de los fertilizantes, lo cual favorece aún más las pérdidas.

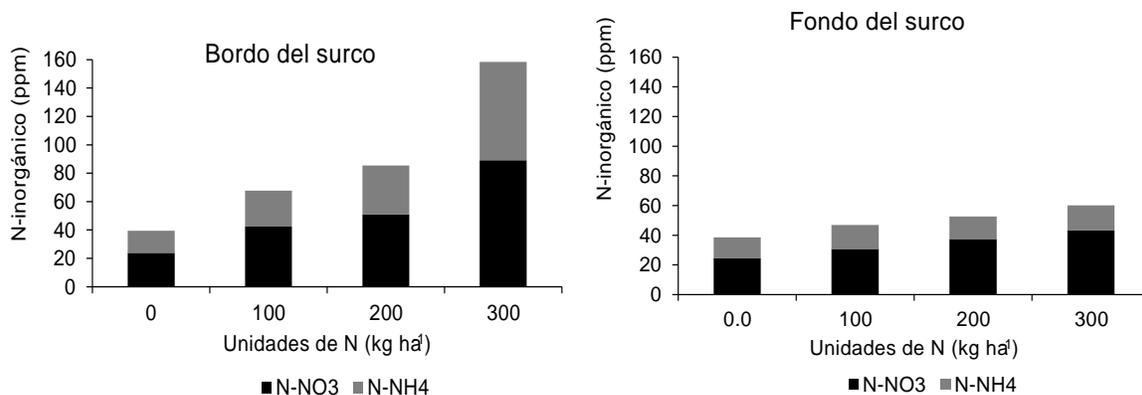


Figura 15. Disponibilidad promedio de N inorgánico en bordo y fondo del surco. Ciclo primavera-verano 2014. Cultivo maíz.

5.4.2. Ciclo otoño-invierno para cultivo de trigo

El comportamiento en la disponibilidad de nitrógeno inorgánico en el suelo, por efecto de las dosis crecientes de fertilización que se aplicaron durante el ciclo de cultivo otoño-invierno 2014-2015, mostró un comportamiento semejante al ciclo primavera-verano de 2014, donde se sembró maíz. La máxima fertilización, con 300 unidades de N ha⁻¹, implicó necesariamente un nivel de disponibilidad menor a lo que se observó en la evaluación que se hizo con el cultivo de maíz (Figura 16).

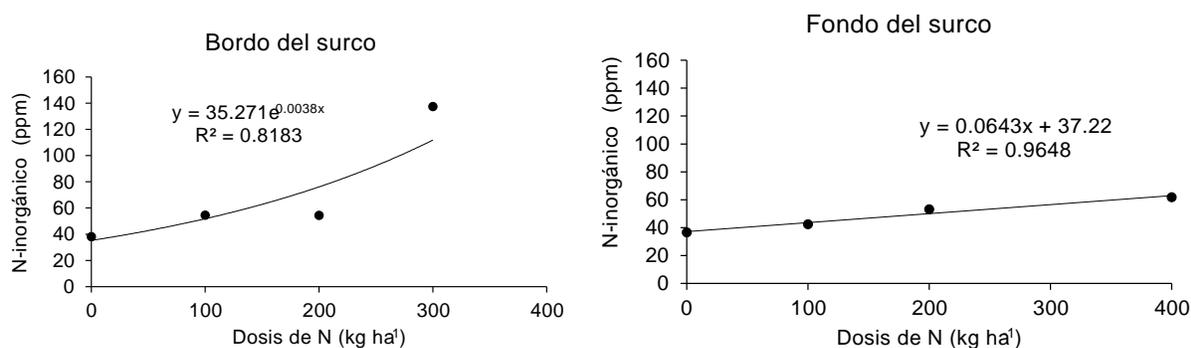


Figura 16. Relación entre concentración promedio de N-inorgánico en el suelo (N-NO₃ +NH₄) en el bordo y fondo de los surcos en función de las dosis crecientes de fertilización nitrogenada. Cultivo de trigo. (p<0.05).

A nivel de fracciones se observaron algunas respuestas diferentes, principalmente con la dosis más alta de fertilización, donde la disponibilidad de N-NH₄ fue 75% mayor respecto a la disponibilidad de N-NO₃ (Figura 17). Por otra parte, no se observaron diferencias entre disponibilidad de nitrógeno entre 100 y 200 kg ha⁻¹ tanto de N-NO₃ como de NH₄.

La alta disponibilidad de N con la mayor aplicación no se reflejó en el rendimiento de grano.

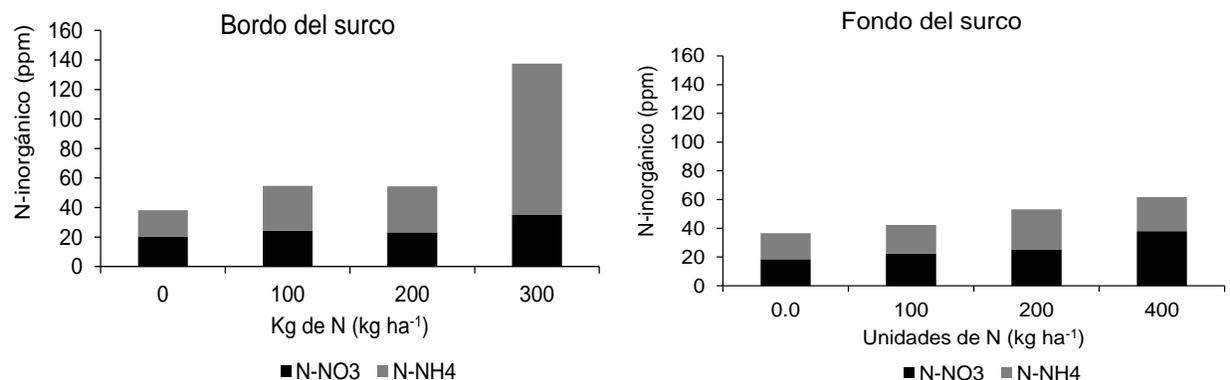


Figura 17. Disponibilidad promedio de N inorgánico en bordo y fondo del surco. Ciclo otoño-invierno 2014-2015. Cultivo trigo.

5.5. Emisiones de óxido nitroso

5.5.1. Ciclo primavera-verano para cultivo de maíz

Las emisiones de N₂O tuvieron un comportamiento diferente en el bordo del surco, donde se aplicó el fertilizante, y en el fondo del mismo. Éstas aumentaron, en el primero, de manera exponencial a medida que aumentaron las dosis crecientes de fertilizante nitrogenado ($R^2=0.88$), mientras que en el segundo el comportamiento de las emisiones fue lineal ($R^2=0.97$) (Figura 18). Las emisiones acumuladas en el bordo del surco, a lo largo del ciclo de cultivo, fluctuaron de 2100 g ha⁻¹ a cerca de 6000 g ha⁻¹, mientras que en el fondo del mismo estas fluctuaciones estuvieron en el rango de 1800 a 2000 g ha⁻¹. Estos resultados mostraron, al interior de las parcelas de cultivo, que las emisiones de N₂O fueron 2 a 3 veces mayores en bordo del surco, donde se aplicó directamente el fertilizante y hubo mayor disponibilidad de nitrógeno, comparado con las emisiones que hubo al fondo del éste, lo que muestra el potencial de contaminación ambiental que provoca el uso excesivo de fertilizantes nitrogenados o cuando si la eficiencia de aprovechamiento por los cultivos es baja. Esta tendencia en las emisiones de N₂O coincide con lo reportado con Millar *et al.* (2018).

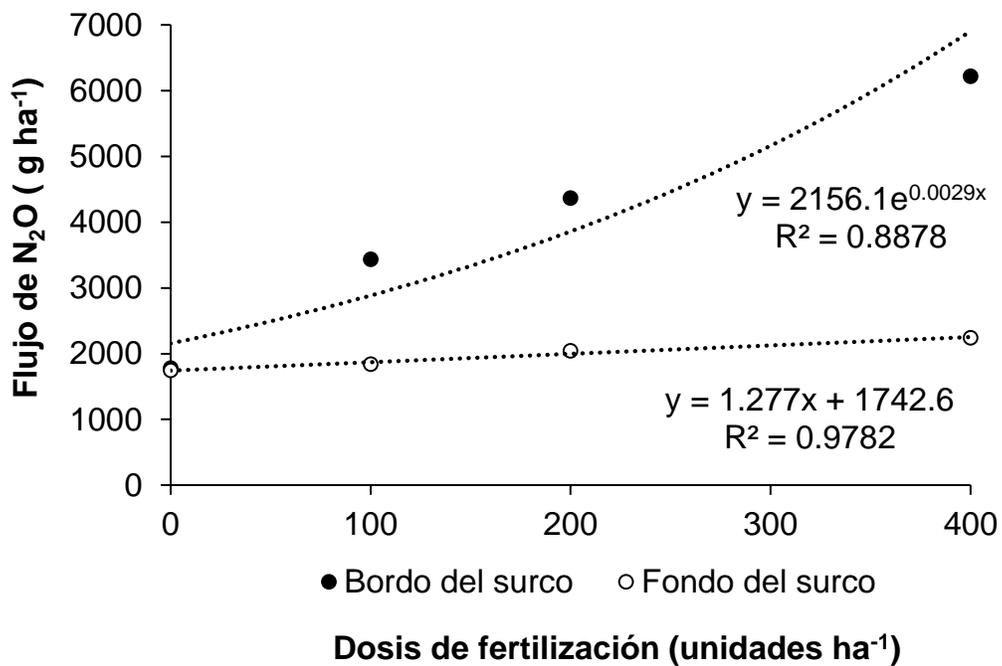


Figura 18. Emisiones promedio de N₂O en bordo y fondo del surco en función de las dosis crecientes de fertilización. (p<0.05).

VI. CONCLUSIONES

Con base en los objetivos e hipótesis que se plantearon en la presente investigación se tienen las siguientes conclusiones:

Las reservas de N inorgánico ($N\text{-NO}_3 + N\text{-NH}_4$) del suelo fueron suficientes para producir en promedio más de 16 t ha^{-1} de maíz, por lo cual no hubo respuesta a las dosis crecientes de fertilización. Las pérdidas de N aumentaron en función de éstas últimas.

La producción de trigo fue mayor a 8 t ha^{-1} con la aplicación de 200 kg de nitrógeno. Mayor nivel de fertilización implicó un abatimiento en el rendimiento de grano.

La disponibilidad de nitrógeno inorgánico en el suelo y las emisiones de N_2O aumentaron en función de las dosis crecientes de fertilización. Se estimaron grandes pérdidas de N con la dosis de fertilización más alta: 400 ha^{-1} unidades para maíz y 300 ha^{-1} unidades para trigo, las cuales equivalen a 870 y 650 kg de urea, respectivamente. Cantidades mayores de fertilizantes nitrogenados se emplean en el Bajío para la producción de cereales. Lo anterior evidencia el uso irracional de los fertilizantes químicos.

Se acepta la hipótesis de que la eficiencia de aprovechamiento del fertilizante por los cultivos disminuyó a medida que aumentaron las dosis de fertilización nitrogenada.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Báez-Pérez, A. J.M. Arreola-Tostado, B. Triomphe, A. Bautista-Cruz y P. de J. Licea-Morales. 2012. Implementación de la siembra directa para producción de cebada maltera en el estado de Guanajuato. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 3:1509-1519.
- Banco Mundial. (2016). <http://datos.bancomundial.org/indicador/AG.CON.FERT.ZS>. Fecha de consulta 16 de julio de 2016.
- Below, F. 2002. Fisiología, Nutrición y fertilización nitrogenada de maíz. *Informaciones agronómicas* No. 54. Pp. 7-12.
- Castellanos J. Z., Cueto W. J. A., Macías C. J., Salinas G. J. R., Tapia V. L. M., Cortes J. J. M., González A. I. J., Mata V.H., Mora G. M., Vázquez H. A., Valenzuela S. C., Enríquez R. E., 2005. La fertilización de los cultivos de maíz, sorgo y trigo en México. Folleto técnico Núm. 1.
- Denman, K. L. 2007. Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry. In: SOLOMON, S. *et al.* (Eds.). *Climate change 2007: the physical science basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. p. 499-588.
- Erisman, J. W., Sutton, M. A., Galloway, J., Klimont, Z. & Winiwarter, W. How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geosci.* 1: 636–639 (2008).
- FAO, 2009. Como alimentar al mundo en 2050. Foro de expertos de alto nivel. Roma, Italia. http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues_papers/Issues_papers_S P/La_agricultura_mundial.pdf. Fecha de consulta: 13/06/2017.
- Fields, S. 2004. Global Nitrogen: Cycling out of Control. *Environmental Health Perspectives* 112:556-563.
- Firestone, M. K. 1982. Biological denitrification. In F. J. Stevenson (ed.). *Nitrogen in agricultural soils*. Monography N° 22. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, USA. pp. 289-326.
- Francis C.A., Beman J.M., Kuypers M.M. 2007. New processes and players in the nitrogen cycle: the microbial ecology of anaerobic and archaeal ammonia oxidation. *The ISME Journal*. 1: 19–27.
- Freitag T.E., Chang L., Clegg C.D., Prosser J.I. 2005. Influence of inorganic nitrogen management regime on the diversity of nitrite-oxidizing bacteria in agricultural grassland soils. *Applied and Environmental Microbiology*. 71: 8323-8334.
- Galloway J.N., Aber J.D., Erisman J.W., Seitzinger S.P., Howarth R.H., Cowling E.B. and Cosby B.J. 2003. The nitrogen cascade. *BioScience* 53: 341–356.
- Gaucín-Piedra y Torres-Garrido. 2013. El mercado de los fertilizantes 2011-2012. *Claridades Agropecuarias* 239:45-47.
- Gorfer M., Blumhoff M., Klaubauf S., Urban A., Inselsbacher E., Bandian D., Mitter B., Sessitsch A., Wanek W., Strauss J. 2011. Community profiling and gene expression of fungal assimilatory nitrate reductases in agricultural soil. *The ISME Journal*. 5(11): 1771-1783. doi:10.1038/ismej.2011.53.

- Grageda-Cabrera, O.A., F. Esparza-García y J.J. Peña-Cabriales. 2000. Environmental impact of nitrogen fertilizers in the "Bajío" region of Guanajuato State, Mexico. pp. 45-54. In: G. Sánchez and E. Olguín (eds.). Environmental biotechnology and cleaner bioprocesses. Taylor & Francis. London, UK.
- Grageda-Cabrera, O.A., A. Díaz-Franco, J.J. Peña-Cabriales y J.A. Vera-Nuñez. 2011. Impacto de los biofertilizantes en la agricultura. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 3: 1261-1274.
- Groffman, P.M., and E.J. Rossi-Marshall, 2013. The Nitrogen Cycle, in: Weathers, K.C., 376 Strayer, D.L., Likens, G.E. (Eds.), *Fundamentals of Ecosystem Science*. San Diego, 377 CA: Elsevier, pp. 137-158.
- Hansel C.M., Fendorf S., Jardine P.M., Francis C.A. 2008. Changes in bacterial and archaeal community structure and functional diversity along a geochemically variable soil profile. *Applied and Environmental Microbiology*. 74(51): 1620–1633.
- Hayatsu M., Tago K., Saito M. 2008. Various players in the nitrogen cycle: Diversity and functions of the microorganisms involved in nitrification and denitrification. *Soil Science and Plant Nutrition*. 54: 33-45.
- Hu B., Shen L., Xu X., Zheng P. 2011. Anaerobic ammonium oxidation (anammox) in different natural ecosystems. *Biochemical Society transactions*. 39 (6): 181-6.
- Klotz M.G., Stain L.Y. 2008. Nitrifier genomics and evolution of the nitrogen cycle. *FEMS Microbiological Letters*. 278: 146-156.
- Ladha J. K., H. Pathak, T. J. Krupnik, J. Six, and C. van Kessel. 2005. Efficiency of Fertilizer Nitrogen in Cereal Production: Retrospects and Prospects. *Advances in agronomy* 87:85-156.
- Leininger S., Urich T., Schloter M., Schwark L., Qi J., Nicol G.W., Prosser J.I., Schuster S.C., Schleper C. 2006. Archaea predominate among ammonia-oxidizing prokaryotes in soils. *Nature* 442: 806-809.
- Lemcoff, J. and R. Loomis. 1986. Nitrogen influences on yield determination in maize. *Crop Sci*. 26:1017-1022.
- Martínez-Menes, M.R. 2009. Proyecto Especial de Producción de Maíz de Alto Rendimiento (PROEMAR 2009). Informe de evaluación y seguimiento. Colegio de Posgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México. pp. 80-82. <http://www.firco.gob.mx/POTTtransparencia/Documents/Estudios/9-EvaluaciondeResultados-PROEMAR2009.pdf>. Fecha de consulta 20/04/2017.
- Millar, N, A. Urreac, K. Kahmarka, I. Shcherbakd, G.P Robertsona, I. Ortiz-Monasterio. 2018. Nitrous oxide (N₂O) flux responds exponentially to nitrogen fertilizer in irrigated wheat in the Yaqui Valley, Mexico *Agriculture, Ecosystems and Environment* 261:125:32.
- Mora-Ravelo S.G., F. Gavi-Reyes, J.J. Peña Cabriales, J. Pérez-Moreno, L. Tijerina-Chávez y H. Vaquera Huerta. 2007. Desnitrificación de un fertilizante de lenta liberación y urea+fosfato monoamónico aplicados a trigo irrigado con agua residual o de pozo. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 23:25-33.

- Mulvaney, R. L. 1996. Nitrogen inorganic forms. En: *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods*. D.L. Sparks *et al.* (Eds.) ASA and SSSA, Madison WI. p 1123-1184.
- Nicol G.W., Leininger S., Schleper C., Prosser J.I. 2008. The influence of soil pH on the diversity, abundance and transcriptional activity of ammonia oxidizing archaea and bacteria. *Environmental microbiology*. 10:2966–2978.
- Nourbakhsh F., Alinejadian A. (2009). Arginine ammonification and L-glutaminase assays as rapid indices of corn nitrogen availability. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172:127–133.
- Peña-Cabriales, J.J. y O.A. Grageda-Cabrera. 1997. Dinámica del nitrógeno en el ecosistema agrícola. p. 371. In: J. Ruíz-Herrera, D. Guzmán de Peña y J.J. Peña-Cabriales (eds.). *Perspectivas de la microbiología en México*. Instituto Politécnico Nacional. México, D.F.
- Peña-Cabriales, J.J., O.A. Grageda-Cabrera y J.A. Vera-Núñez. 2001. Manejo de los fertilizantes nitrogenados en México: uso de las técnicas isotópicas (^{15}N). *Terra Latinoamericana* 20: 51-56.
- Pons-Hernández, J.L., A.D. Terrón-Ibarra, R. Paredes-Melesio y T. Medina-Cázares. 2013. Guía para la producción de maíz. In: *Guía para la producción de maíz, frijol, trigo y sorgo en Guanajuato*. Libro técnico no. 4. INIFAP, Celaya, Guanajuato. pp. 54-57.
- Rodríguez-Safuentes, J. 1993. *La fertilización de los cultivos. Un método racional*. Pontificia Universidad Católica de Chile, Facultad de Agronomía, Santiago, Chile.
- Salisbury, F. y Ross, C. 1994. *Fisiología Vegetal*. Grupo editorial Iberoamericana. México. 143 p.
- SIAP (2016) <http://www.gob.mx/siap/>. Fecha de consulta: 10 de diciembre de 2016.
- Signor D., C.E. Pellegrino-Cerri. 2013. Nitrous oxide emissions in agricultural soils: a review. *Pesquisa Agropecuária Tropical* 43: 322-338.
- Simon J. 2002. Enzymology and bioenergetics of respiratory nitrite ammonification. *FEMS Microbiology Reviews*. 26 (3): 285–309.
- Solís-Moya, E., Huerta-Espino J., Pérez-Herrera E., Villaseñor Mir H.E., Ramírez Ramírez A., de la Cruz-González M. de L., Ledesma-Ramírez L. y Suaste Franco M. del P. 2016. Alondra F2014 nueva variedad de trigo harinero de gluten fuerte para El Bajío. Folleto técnico en proceso de publicación. INIFAP Campo Experimental Bajío. Celaya, Guanajuato.
- Solís M., E.; Huerta E., J.; Villaseñor Mir, H. E.; Pérez H., P; Ramírez R., A.; Rodríguez G., F.; Espinosa T., E. y Santa R., R. H. 2009. Triunfo F2004: Nueva variedad de trigo harinero para zonas de temporal en Guanajuato. *Desplegable técnica No. 3 INIFAP, CIRCE, CEBAJ, Celaya Guanajuato, México*. p. 10-15.

- Sutton, M. A., Howard, C., Erisman, J. W., Billen, G., Bleeker, A., Grennfelt, P., van Grinsven, H., and Grizzetti, B. 2011 *The European Nitrogen Assessment*, Cambridge University Press, 612 pp.
- Tang H., Yu M., Wang Y., Han X., Wang X., Jin W., Chi F., Wei D. 2012. Effects of long-term fertilization on nif H gene diversity in agricultural black soil. *African Journal of Microbiology Research*.6(11): 2659-2666.
- Torres-García, H., I. Lazcano-Ferrat. 1997. Disminución del “acame” y aumento de rendimiento en cebada con una nutrición balanceada. Instituto de la Potasa y el Fósforo. *Informaciones agronómicas* 2:7-8.
- Urbina, R. 1993. Evaluación de híbridos de maíz de grano blanco y amarillo en ambientes de Centro América, Panamá, el Caribe y México. p. 27-38. En: *Síntesis de los Resultados Experimentales del PRM 1992*, Vol. 4, CIMMYT, Guatemala.
- Vitousek P.M., Aber J.D., Howarth R.W., Likens G.E., Matson P.A., Schindler D.W., Tilman D.G. 1997. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecological Applications*. 7:737-750.

VIII. ANEXOS

Anexo 1. Base de datos de componentes de rendimiento en maíz. Ciclo primavera-verano 2014. Campo Experimental Bajío.

Trat.	Bloq	Muestra	Número		Altura	Ø		Largo	Hileras	Número		Peso	Peso	Peso	Biomasa	IC
			Plantas	M		M	M			G H ⁻¹	G M ⁻¹	cien	grano	paja	Aerea	
			m2	m2	m	cm					g	t ha ⁻¹	t ha ⁻¹	t ha ⁻¹		
1	1	1	7.4	7.4	2.77	4.94	15.13	14.8	30.8	455	48.50	15.63	16.45	32.08	0.49	
1	1	2	7.1	6.8	2.74	5.17	15.46	16.2	31.5	510	51.00	15.29	16.37	31.65	0.48	
1	1	3	6.9	6.7	2.63	5.18	15.04	16.2	33.4	541	52.00	14.73	16.49	31.22	0.47	
1	2	1	8.2	8.3	2.92	5.18	15.01	15.5	32.1	497	47.00	17.40	22.80	40.20	0.43	
1	2	2	8.2	7.9	2.89	5.27	14.48	15.9	33.7	535	48.50	18.57	22.07	40.64	0.46	
1	2	3	7.2	7.3	2.99	5.51	14.84	16.0	33.0	527	52.00	18.27	17.42	35.69	0.51	
1	3	1	7.6	7.6	2.82	5.00	15.31	15.9	32.3	513	45.00	16.66	17.25	33.91	0.49	
1	3	2	7.1	7.0	2.77	5.25	15.34	16.1	31.5	506	46.00	16.24	20.09	36.34	0.45	
1	3	3	6.9	6.6	2.75	5.35	15.03	15.6	36.5	569	50.00	15.59	13.97	29.55	0.53	
Promedio			7.4	7.3	2.8	5.2	15.1	15.8	32.7	517.0	48.9	16.5	18.1	34.59	0.48	
Desviación estándar			0.5	0.6	0.1	0.2	0.3	0.4	1.7	31.8	2.6	1.3	2.9	3.9	0.0	
Error estándar			0.2	0.2	0.0	0.1	0.1	0.1	0.6	10.6	0.9	0.4	1.0	1.3	0.0	
Variación (%)			6.8	7.9	3.9	3.3	1.9	2.8	5.2	6.2	5.2	8.2	16.2	11.4	6.3	
2	1	1	7.0	7.6	2.69	5.01	15.30	15.5	30.6	474	48.50	16.60	15.53	32.12	0.52	
2	1	2	7.5	7.5	2.69	5.30	14.34	15.7	31.0	487	51.00	15.26	21.68	36.93	0.41	
2	1	3	6.5	6.2	2.74	5.11	14.35	15.9	31.0	492	51.00	14.92	15.02	29.94	0.50	
2	2	1	7.3	7.9	2.94	5.42	14.84	15.8	32.9	520	51.00	16.07	17.02	33.09	0.49	
2	2	2	7.8	6.1	2.98	5.26	14.20	15.4	30.9	476	50.00	18.30	21.06	39.36	0.46	
2	2	3	6.0	7.7	3.06	5.57	14.77	16.0	31.3	500	52.50	14.28	10.55	24.83	0.58	
2	3	1	6.2	6.2	2.79	5.32	15.57	16.5	33.3	549	55.50	15.06	18.04	33.10	0.45	
2	3	2	6.8	6.8	2.74	5.19	15.38	15.8	33.9	536	52.00	16.09	17.88	33.98	0.47	
2	3	3	7.4	7.6	2.72	5.24	15.00	16.0	36.1	578	49.00	16.50	19.51	36.01	0.46	
Promedio			6.9	7.1	2.8	5.3	14.9	15.8	32.3	512.3	51.2	15.9	17.4	33.26	0.48	
Desviación estándar			0.6	0.7	0.1	0.2	0.5	0.3	1.9	35.9	2.1	1.2	3.4	4.2	0.0	
Error estándar			0.2	0.2	0.0	0.1	0.2	0.1	0.6	12.0	0.7	0.4	1.1	1.4	0.0	
Variación (%)			8.9	10.4	4.9	3.1	3.3	2.0	5.8	7.0	4.1	7.5	19.6	12.7	9.4	

Anexo 1. Continuación...

Trat.	Bloq	Muestra	Número		Ø		Largo	Hileras	Número		Peso	Peso	Peso	Biomasa	
			Plantas	M	Altura	M			G H ⁻¹	G M ⁻¹	cien	grano	paja	Aerea	IC
			m2	m2	m	cm					g	t ha ⁻¹	t ha ⁻¹	t ha ⁻¹	
3	1	1	7.2	7.4	2.75	5.23	14.26	15.2	31.7	481	48.00	15.96	19.44	35.40	0.45
3	1	2	6.9	6.5	2.84	5.17	14.45	15.7	30.3	476	48.50	15.25	14.57	29.81	0.51
3	1	3	7.1	7.4	2.83	5.26	14.15	15.9	30.7	487	50.00	16.66	19.22	35.88	0.46
3	2	1	7.8	7.4	2.96	5.23	13.97	16.1	30.6	493	51.00	17.56	16.17	33.73	0.52
3	2	2	8.2	7.9	2.98	5.15	15.24	15.6	30.8	480	51.00	20.92	20.30	41.21	0.51
3	2	3	7.8	8.0	3.00	5.61	14.76	16.1	32.8	528	53.00	18.63	19.66	38.29	0.49
3	3	1	6.8	6.9	2.73	5.22	15.47	15.6	32.5	506	52.00	16.18	15.57	31.74	0.51
3	3	2	7.1	6.8	2.73	5.38	13.94	16.3	29.8	485	52.00	15.93	18.96	34.88	0.46
3	3	3	6.9	6.9	2.65	5.25	15.45	16.3	34.0	553	53.00	16.61	16.17	32.78	0.51
Promedio			7.3	7.2	2.8	5.3	14.6	15.9	31.4	498.8	50.9	17.1	17.8	34.86	0.49
Desviación estándar			0.5	0.5	0.1	0.1	0.6	0.4	1.4	25.8	1.8	1.7	2.1	3.4	0.0
Error estándar			0.2	0.2	0.0	0.0	0.2	0.1	0.5	8.6	0.6	0.6	0.7	1.1	0.0
Variación (%)			6.8	7.0	4.4	2.7	4.2	2.3	4.4	5.2	3.6	10.2	12.0	9.8	5.4
4	1	1	6.5	6.8	2.92	5.41	15.18	15.9	34.6	549	54.00	16.26	19.49	35.75	0.45
4	1	2	6.8	7.1	2.82	5.12	15.49	15.4	31.4	483	52.00	15.96	16.37	32.33	0.49
4	1	3	6.6	6.5	2.79	5.58	14.95	16.2	32.6	528	52.00	14.87	11.48	26.36	0.56
4	2	1	7.6	7.6	3.04	5.13	14.79	15.8	31.5	498	51.00	16.96	18.73	35.69	0.48
4	2	2	7.6	7.8	2.97	5.29	13.78	15.6	30.7	478	54.00	16.90	19.79	36.69	0.46
4	2	3	7.1	6.2	2.97	5.31	14.10	15.8	30.9	487	50.00	17.77	19.60	37.36	0.48
4	3	1	7.6	6.9	2.72	5.34	14.12	16.2	30.9	500	51.00	16.18	19.90	36.09	0.45
4	3	2	7.6	8.1	2.78	5.02	15.39	15.7	33.9	531	49.00	17.98	19.06	37.04	0.49
4	3	3	7.0	7.3	2.76	5.26	13.93	15.8	30.5	482	50.00	16.92	19.96	36.88	0.46
Promedio			7.2	7.1	2.9	5.3	14.6	15.8	31.9	504.1	51.4	16.6	18.3	34.91	0.48
Desviación estándar			0.5	0.6	0.1	0.2	0.7	0.3	1.5	25.8	1.7	1.0	2.8	3.5	0.0
Error estándar			0.2	0.2	0.0	0.1	0.2	0.1	0.5	8.6	0.6	0.3	0.9	1.2	0.0
Variación (%)			6.4	8.7	4.0	3.2	4.5	1.6	4.6	5.1	3.4	5.7	15.2	10.1	7.3

Anexo 2. Base de datos de componentes de rendimiento en trigo. Ciclo otoño-invierno 2014-2015. Campo Experimental Bajío.

Trat	Bloque	Repet.	plantas m ⁻²	Número			Altura Planta m	Peso grano t ha ⁻¹	Mil granos g	miles granos m-2	Biomasa t ha ⁻¹	IC
				tallos m ⁻²	tallos planta ⁻¹	espigas						
1	1	1	121	420	3.5	415	0.787	5.12	50.5	10.1	18.85	0.27
1	1	2	108	320	3.0	310	0.768	5.42	52.4	10.2	12.55	0.43
1	1	3	118	319	2.7	315	0.781	5.01	49.4	10.0	17.65	0.28
1	2	1	82	258	3.1	258	0.786	5.46	48.0	11.3	16.10	0.34
1	2	2	149	320	2.1	320	0.768	5.54	47.3	11.6	19.15	0.29
1	2	3	116	378	3.3	378	0.805	5.53	42.0	13.0	16.37	0.34
1	3	1	111	304	2.7	304	0.823	5.50	51.2	10.7	11.80	0.47
1	3	2	98	357	3.6	350	0.765	5.16	51.0	10.0	10.05	0.51
1	3	3	102	281	2.8	278	0.805	5.67	49.6	11.5	8.15	0.70
Promedio			111.7	328.6	3.0	325.3	0.79	5.4	49.0	10.9	14.5	0.4
Desviación			18.4	49.6	0.5	48.8	0.0	0.2	3.1	1.0	4.0	0.1
Error Estandar			6.1	16.5	0.2	16.3	0.0	0.1	1.0	0.3	1.3	0.0
Variación (%)			16.5	15.1	15.3	15.0	2.5	4.2	6.3	9.2	27.5	34.6
2	1	1	91	320	3.5	317	0.877	6.23	49.6	12.5	31.60	0.20
2	1	2	92	234	2.5	234	0.881	6.77	49.6	13.5	27.15	0.25
2	1	3	95	364	3.8	354	0.832	6.71	48.9	13.7	14.45	0.46
2	2	1	146	425	2.9	425	0.877	7.83	41.0	19.0	24.35	0.32
2	2	2	132	372	2.8	372	0.881	6.69	49.6	13.6	22.70	0.29
2	2	3	130	498	3.8	498	0.832	7.41	49.6	14.8	23.15	0.32
2	3	1	111	320	2.9	300	0.839	6.24	46.9	13.2	12.80	0.49
2	3	2	92	297	3.2	297	0.808	5.93	45.3	13.1	13.35	0.44
2	3	3	142	313	2.2	313	0.815	7.20	43.0	16.6	15.90	0.45
Promedio			114.6	349.2	3.1	345.6	0.85	6.8	47.1	14.4	20.6	0.4
Desviación			23.1	77.2	0.6	78.3	0.0	0.6	3.3	2.1	6.7	0.1
Error Estandar			7.7	25.7	0.2	26.1	0.0	0.2	1.1	0.7	2.2	0.0
Variación (%)			20.1	22.1	18.2	22.7	3.5	9.1	6.9	14.4	32.7	29.4

Anexo 2. Continuación...

Trat	Bloque	Repet.	plantas	Número			Altura Planta	Peso grano	Mil granos	miles granos	Biomasa	IC
				tallos	tallos	espigas						
			m ²	planta ⁻¹			m	t ha ⁻¹	g	m-2	t ha ⁻¹	
3	1	1	91	435	4.8	420	0.834	8.06	44.5	18.1	19.35	0.42
3	1	2	82	372	4.5	368	0.819	8.80	48.0	18.0	16.55	0.53
3	1	3	87	366	4.2	359	0.826	8.42	48.3	17.3	17.75	0.47
3	2	1	117	385	3.3	385	1.181	9.14	48.9	18.5	27.85	0.33
3	2	2	86	407	4.7	407	0.819	7.39	44.5	16.5	22.60	0.33
3	2	3	130	329	2.5	329	0.826	6.81	48.0	14.3	22.90	0.30
3	3	1	134	355	2.6	348	0.88	8.26	48.0	16.9	15.25	0.54
3	3	2	94	313	3.3	300	0.905	8.01	48.0	16.6	12.25	0.65
3	3	3	93	340	3.7	330	0.875	8.59	47.3	17.9	13.85	0.62
Promedio			101.6	366.9	3.7	360.7	0.89	8.2	47.3	17.1	18.7	0.5
Desviación estándar			19.9	38.4	0.9	38.9	0.1	0.7	1.6	1.3	5.0	0.1
Error estándar			6.6	12.8	0.3	13.0	0.0	0.2	0.5	0.4	1.7	0.0
Variación (%)			19.6	10.5	23.0	10.8	13.0	8.7	3.4	7.5	26.7	28.2
4	1	1	90	420	4.7	395	0.867	7.12	49.2	14.4	27.60	0.26
4	1	2	92	397	4.3	395	1.025	6.60	47.6	13.8	28.65	0.23
4	1	3	98	517	5.3	496	0.998	7.10	49.5	14.2	18.75	0.38
4	2	1	130	430	3.3	430	0.867	6.92	48.3	14.2	22.30	0.31
4	2	2	112	390	3.5	390	1.025	6.34	49.2	12.7	23.05	0.28
4	2	3	110	355	3.2	355	0.998	7.05	48.8	14.3	22.00	0.32
4	3	1	83	420	5.1	400	0.902	7.27	42.0	17.2	13.15	0.55
4	3	2	94	412	4.4	412	0.89	6.37	41.0	15.4	13.35	0.48
4	3	3	105	427	4.1	427	0.89	7.35	41.8	17.7	11.20	0.66
Promedio			101.6	418.7	4.2	411.1	0.94	6.9	46.4	14.9	20.0	0.4
Desviación estándar			14.3	43.7	0.7	38.8	0.1	0.4	3.6	1.6	6.3	0.1
Error estándar			4.8	14.6	0.2	12.9	0.0	0.1	1.2	0.5	2.1	0.0
Variación (%)			14.1	10.4	17.7	9.4	7.4	5.5	7.8	10.9	31.7	38.1