

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

**EFFECTO DEL USO DE UN FERTILIZANTE DE ENTREGA LENTA VERSUS
FERTILIZANTES NITROGENADOS TRADICIONALES EN LA DINÁMICA DEL
NITRÓGENO EN UN SUELO DE TEXTURA GRUESA CULTIVADO CON MAÍZ
GRANO EN LISÍMETROS**

CAMILA SCOTT FERNÁNDEZ

SANTIAGO - CHILE

2016

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

**EFFECTO DEL USO DE UN FERTILIZANTE DE ENTREGA LENTA VERSUS
FERTILIZANTES NITROGENADOS TRADICIONALES EN LA DINÁMICA DEL
NITRÓGENO EN UN SUELO DE TEXTURA GRUESA CULTIVADO CON MAÍZ
GRANO EN LISÍMETROS**

**EFFECT OF USING A “SLOW RELEASE” FERTILIZER COMPARED TO
“TRADITIONAL NITROGEN FERTILIZER” ON THE NITROGEN DYNAMIC IN
A COARSE-TEXTURE SOIL CULTIVATED WITH MAIZE IN LYSIMETERS**

CAMILA SCOTT FERNÁNDEZ

Santiago, Chile

2016

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

**EFFECTO DEL USO DE UN FERTILIZANTE DE ENTREGA LENTA VERSUS
FERTILIZANTES NITROGENADOS TRADICIONALES EN LA DINÁMICA DEL
NITRÓGENO EN UN SUELO DE TEXTURA GRUESA CULTIVADO CON MAÍZ
GRANO EN LISÍMETROS**

Memoria para optar al título profesional de:
Ingeniera Agrónomo.

CAMILA SCOTT FERNÁNDEZ

PROFESORES GUÍAS	CALIFICACIÓN
Sr. Osvaldo Salazar Guerrero Ingeniero Agrónomo, M.Sc. Ph.D.	7,0
Sra. Yasna Tapia Fernández Ingeniera en Alimentos, Dra.	6,5
PROFESOR EVALUADOR	
Sr. Ricardo Cabeza Pérez Ingeniero Agrónomo, Ph.D.	6,5
Sr. Ítalo Chiffelle Gómez Bioquímico, Dr.	7,0

Santiago, Chile

2016

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, en especial a mi mamá por tanto amor, sacrificio y entrega, por creer en mí más que cualquiera. A mi papá, por su apoyo incondicional y siempre instarme a lograr más. A mi hermano, por hacerme volver a la infancia cada vez que nos reunimos y por estar siempre conmigo dándome apoyo incondicional. A mi tía Rocío, por su amor, cuidados y enseñanzas. A ellos por hacer de mí la persona que soy.

A mis amigos y amigas, por darme la fuerza y el ánimo para seguir adelante siempre. Por estar conmigo en los momentos difíciles, darme tantas alegrías y buenos momentos.

Carolina, gracias por tu incondicionalidad, por estar siempre dispuesta a escucharme y ayudarme. Gracias por tanto cariño, paciencia y por todo el apoyo que me has dado en mis proyectos y ocurrencias. Por acompañarme en este camino a llegar a ser profesional. Estoy muy agradecida de ti y de tu familia. Gracias por todas las vivencias y las que vendrán.

Hugo, por estar siempre, eres una gran persona y muy incondicional. Gracias por estar en las buenas y en las muy malas. Por tu inmenso cariño y paciencia. Siempre me voy a preguntar cómo me soportas tanto y cómo pudiste revisar tantas veces el Abstract. Espero sigamos creciendo como profesionales y persona, together.

Gianina, por estar siempre pendiente de mí, que este bien y segura. A pesar de la distancia te has encargado de estar presente dándome fuerza, apoyo y consejos. Gracias por darme tantas anécdotas para contarles a mis nietos

A mis profesores guías y evaluadores, por siempre tener la puerta abierta para resolver mis dudas cada vez que lo necesité. Al equipo del Laboratorio de Química de Suelos y Aguas, por acogerme durante mis mediciones y entregarme nuevos conocimientos. Agradezco profunda y sinceramente al profesor Ricardo Pertuzé, por toda la ayuda brindada.

A todas esas personas que se sienten parte de esto, muchísimas gracias.

“La Felicidad es solo verdadera cuando es compartida”

ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN.....	3
HIPÓTESIS	6
OBJETIVOS.....	6
Objetivo general	6
Objetivos específicos.....	6
MATERIALES Y MÉTODOS.....	7
Lugar de estudio	7
Materiales	8
Metodología.....	9
Aporte hídrico.....	10
Lixiviación de N.....	10
Producción de materia seca	11
Absorción de N.....	11
Fertilización	12
Uso de clorofilómetro y tabla Munsell.....	12
Diseño experimental y análisis estadístico.....	14
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	15
Percolación	15
Cargas de nitratos lixiviados	16

Producción de materia seca del cultivo de maíz grano.....	19
Absorción de nitrógeno por el cultivo de maíz.....	20
Uso de clorofilómetro y tabla Munsell.....	23
Correlación de absorción de N en grano y con herramientas de medición de contenido de clorofila.....	25
CONCLUSIONES.....	27
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28
APÉNDICE	31
Apéndice I. Concentraciones de N-NO ₃ durante la temporada de riego.....	31
Apéndice II. Estado fenológico de los tratamientos en las dos fechas de medición.	32

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la aplicación de un fertilizante de entrega lenta (FEL) de nitrógeno versus un fertilizante nitrogenado tradicional (urea) en la dinámica del nitrógeno (N) en un suelo de textura gruesa y cultivado con maíz grano en lisímetros. Se evaluaron las pérdidas por lixiviación de N, producción de materia seca (MS) del cultivo y también se correlacionó la salida de N del sistema por la cosecha del maíz grano utilizando técnicas tradicionales y mediciones de índice de contenido de clorofila (ICC) y Valor Munsell (VM). El estudio se realizó en un invernadero de la Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile en la temporada 2013-2014. Se establecieron cuatro tratamientos: T0 sin presencia de cultivo y sin fertilizar; T1 con presencia de cultivo y sin fertilizar; T2 con presencia de cultivo fertilizado con urea; y T3 con presencia de cultivo fertilizado con FEL. La dosis de fertilización para T2 y T3 fue de 250 kg N ha⁻¹. Para determinar la lixiviación se colectó el agua que percoló de los lisímetros para su posterior análisis en laboratorio, mientras que a la cosecha se realizó un análisis del tejido vegetal determinando la concentración de N absorbida por los diferentes órganos. Los resultados mostraron diferencias significativas ($p < 0,05$) en las pérdidas por lixiviación solo entre T1 y T3. En producción de MS y absorción de N por parte del cultivo de maíz se obtuvieron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre T1 con T2 y T3. La mayor absorción de N del cultivo fue por parte de los tallos y hojas, siendo la salida más importante de N del cultivo. Aunque se determinó un coeficiente de correlación alto (r) entre el rendimiento y la absorción con las variables de ICC y VM en los estados V4 y V7, los valores de r no fueron significativos ($p > 0,05$). En el caso de la correlación entre absorción con la variable de ICC, los valores de r obtenidos correspondieron a: V4, $r=0,84$; V7, $r=0,10$. En tanto, para la correlación entre absorción con la variable de VM los valores de r correspondieron a: V4, $r=0,94$ y en V7, $r=0,74$.

Palabras claves: Índice de contenido de clorofila (ICC), lixiviación de N, absorción de N.

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the effect of applying a slow release nitrogen fertilizer (FEL) versus a traditional nitrogen fertilizer (urea) in the nitrogen (N) dynamics in coarse-textured soil maize growing in lysimeters. It was measured the N leaching rates, production of dry matter (MS) and crop N uptake, whereas it was also correlated the crop N uptake using traditional techniques and measurements of chlorophyll content index (CCI) and Munsell Value (MV). The study was carried out in a glasshouse of the Faculty of Agricultural Sciences at the University of Chile, during the season 2013-14. Four treatments were set: T0 with bare soil and without N; T1 with maize and without N; T2 with maize and urea; and T3 with maize and FEL. The N fertilization rate for T2 and T3 was 250 kg N ha⁻¹. For measuring the N lixiviation it was collected the water leached from lysimeters for later laboratory analysis, and at the maize harvesting, it was measured MS and vegetal tissue to measure the N concentration in different maize components. The results showed that there was significant differences ($p < 0.05$) in leaching losses only between T1 and T3. In DM production and N uptake there was significant differences ($p < 0.05$) between T1 with T2 and T3. The highest N absorption was found in stem+leaf, being the most important N output of the crop. Although it was found a high correlation coefficient (r) between yield and N uptake with CCI and MV at the state V4 and V7, the r values were not significant ($p > 0.05$). In the correlation between N uptake and CCI, the r values were: V4, $r = 0,84$; V7, $r = 0,10$. Moreover in the correlation between N uptake with the variable MV the r values were: V4, $r = 0,94$ and V7, $r = 0,74$.

Keywords: Chlorophyll content index (CCI), lixiviation of N, nitrogen uptake.

INTRODUCCIÓN

El nitrógeno (N) es el elemento químico más abundante en la atmósfera (casi el 80% del volumen de aire), y también es uno de los componentes esenciales de muchas biomoléculas, por ejemplo proteínas y aminoácidos. El N ocupa el cuarto lugar como elemento químico más común en los tejidos de las plantas (Camargo y Alonso, 2006). En el suelo, las fuentes orgánicas de N son transformadas a amonio (NH_4^+) y posteriormente a nitrato (NO_3^-), mediante los procesos de mineralización y nitrificación, respectivamente, formas en las cuales pueden ser absorbidas por las plantas (Havlin et al., 2013). Sin embargo, en la mayor parte de los casos, el suministro de N desde el suelo no es suficiente para sostener la demanda de N de los cultivos, y es necesario aportar N al suelo a través de la incorporación de fertilizantes. Algunas investigaciones señalan que cerca del 40% de la producción mundial de alimentos sería el resultado directo del uso de fertilizantes y éstos en algunos cultivos alcanzan el 60% de los costos de producción (Espinoza, 2009). Dentro de los fertilizantes más utilizados están los que aportan N y fósforo (P), los que al ser aplicados en dosis excesivas al suelo pueden generar problemas de contaminación en los suelos y cuerpos de agua cercanos. Durante el siglo pasado, el desarrollo de nuevas prácticas agrícolas con miras a satisfacer la demanda mundial creciente de alimentos ha alterado drásticamente el ciclo del N (Canfield et al., 2010). En este sentido, las aplicaciones excesivas de fertilizantes nitrogenados a cultivos agrícolas han sido reconocidas como un problema global durante los últimos 40 años (Robertson y Vitousek, 2009).

Por otra parte en Chile, el maíz (*Zea mays* L.) es el tercer cultivo más importante en superficie, después de los cereales de grano pequeño. Según Odepa (2015), la superficie alcanzada durante la temporada 2014-2015 llegó a las 125.200 ha. La producción de maíz en Chile se encuentra principalmente en la zona central, en condiciones de clima Mediterráneo donde las precipitaciones se concentran en otoño-invierno y se cultiva bajo riego durante primavera-verano (Nájera et al., 2015). Se ha observado que en la producción de maíz grano en la zona central de Chile se aplican dosis altas de fertilizantes nitrogenados, en un rango de 350 a 560 kg N ha⁻¹ (Salazar et al., 2014). Además, es importante considerar que en promedio, 200 kg N ha⁻¹ no son absorbidos por el cultivo de maíz y son susceptibles a pérdidas por lixiviación si el agua percola a través del perfil del suelo (Nájera et al., 2015). Este proceso de pérdida es particularmente importante en suelos de texturas gruesas, donde la capacidad de retención de agua es baja, generando un riesgo alto de contaminación de cursos de agua cercanos (Salazar et al., 2014).

Debido a las altas dosis de N aplicado, este puede ser lixiviado durante la estación de crecimiento del cultivo (primavera-verano) debido a riegos excesivos. Por otro lado, una cantidad significativa de N residual todavía puede estar presente en el suelo en otoño-invierno, período en el cual se concentran las precipitaciones, lo cual representa un alto

riesgo de lixiviación de los NO_3^- durante el barbecho (Salazar et al., 2014). Además, luego de la aplicación de fertilizantes nitrogenados se pueden producir pérdidas de N mediante los procesos de volatilización y desnitrificación, siendo la magnitud de las mismas reguladas por factores ambientales. De este modo, las pérdidas de N reducen la eficiencia de recuperación o de absorción (ER) del N aplicado, lo cual afecta directamente a la eficiencia de uso del N (EUN) y por consiguiente al rendimiento (Barbieri et al., 2010). La eficiencia del uso del N se entiende por la cantidad de N que es aprovechado por el cultivo en relación al N total aplicado.

Además, las pérdidas de N desde el suelo están asociadas a otros procesos de contaminación ambiental, incluso a una escala global, destacándose: i) el aumento de las concentraciones globales de óxido nitroso (N_2O), gas de efecto invernadero; ii) acidificación de los suelos y de cuerpos de agua; iii) procesos de eutrofización de aguas continentales e hipoxia permanente en zonas costeras, donde es uno de los contaminantes principales; y iv) una pérdida acelerada de la diversidad biológica en ecosistemas terrestres y acuáticos (Vitousek et al., 1997). Asociado a éste último proceso, uno de los ejemplos más dramáticos de hipoxia es la zona del Golfo de México, generado por las descargas de campos agrícolas a través del sistema del río Mississippi de los Estados Unidos (Robertson y Vitousek, 2009). Aunque existen aportes de N desde zonas urbanas e industriales, la agricultura, debido a su rápida expansión, es la que posee una mayor incidencia sobre la dinámica de los sistemas marinos costeros. A nivel mundial, se han identificado 400 áreas con hipoxia y su frecuencia se ha duplicado aproximadamente cada década desde 1960 (Robertson y Vitousek, 2009). Por otra parte, estas alteraciones de origen antrópico en el ciclo del N han generado efectos nocivos en la salud de las personas (Vitousek et al., 1997). En relación a este último punto, se ha demostrado que beber agua con concentraciones altas de NO_3^- ($> 10 \text{ mg N-NO}_3 \text{ L}^{-1}$) tiene efectos adversos para las personas, generando riesgo de cánceres específicos, alteraciones reproductivas y otros efectos crónicos en la salud humana (Ward et al., 2005; Galloway et al., 2008).

Entre las buenas prácticas de manejo del N en los sistemas de cultivos anuales se destacan: i) ajustar la rotación de cultivos; ii) proporcionar a los agricultores apoyo a las decisiones con herramientas que les permitan predecir el rendimiento y por lo tanto la demanda de N y así evitar la fertilización excesiva; iii) hacer un uso más eficiente del agua de riego, y; iv) hacer una mejor gestión en la colocación y la formulación de fertilizantes nitrogenados en los sistemas de cultivos (Robertson y Vitousek, 2009). En la mayoría de la agricultura intensiva, los ensayos en campo muestran consistentemente que menos de la mitad del N aplicado es finalmente absorbido por los cultivos. Así, el N residual se transforma en un contaminante potencial del ambiente. Existen diversas estrategias para disminuir las salidas de N desde el suelo hacia el ambiente, como el uso de compuestos que pueden retrasar la desnitrificación y fertilizantes de entrega lenta (FEL). Los FEL corresponden a formulaciones recubiertas con una sustancia o membrana que retrasa la solubilidad y a compuestos que inhiben la nitrificación o la actividad de la ureasa (Robertson y Vitousek, 2009; Havlin et al., 2013).

La principal y más clara ventaja de los FEL sobre los fertilizantes solubles de entrega rápida, es su capacidad de suministrar nutrientes a una tasa más lenta, siguiendo la curva de demanda de las plantas, generalmente mediante una aplicación al inicio. Además, debido a su liberación lenta a la solución del suelo, las posibilidades de daños a las plantas asociadas a niveles de toxicidad se reducen y la eficiencia en el uso de los fertilizantes mejora considerablemente. Otra ventaja, asociada principalmente a los FEL nitrogenados, es la clara disminución en los niveles de pérdidas de N por lixiviación. Comúnmente se piensa que los FEL son costosos en comparación a los fertilizantes solubles en agua, sin embargo, las constantes aplicaciones requeridas cuando se usan estos últimos pueden resultar más costosas en relación a los FEL si se consideran aspectos productivos, económicos y ambientales (Rose et al., 2004).

Aunque en Chile existen algunas experiencias en el uso de FEL nitrogenados en frutales y en algunas hortalizas, su uso en cultivos extensivos, en los cuales se aplican dosis altas de fertilizantes N, estos no han sido evaluados. Por lo tanto, es necesario realizar pruebas a pequeña escala con estos productos, bajo condiciones controladas para evaluar su efecto en algunos procesos del ciclo del N. En particular, en el cultivo del maíz grano el proceso de lixiviación ha sido señalado como una de las pérdidas más importantes de N desde los suelos, relacionado principalmente a las estrategias de fertilización y riego que se aplican en este cultivo (Salazar et al., 2013).

Los estudios en lisímetros permiten evaluar la dinámica de algunos procesos del ciclo del N y la medición de concentraciones de nitrato (Zotarelli et al., 2007). En estos estudios, el uso de lisímetros se basa en la recolección de un volumen de agua que se pierde por percolación desde la columna de suelo, para la posterior medición de la concentración de formas nitrogenadas.

Según lo anteriormente expuesto, es esencial fomentar el desarrollo de tecnologías para la aplicación de FEL nitrogenados, tanto para pequeños como para grandes agricultores, y realizar estudios que generen datos que respalden las ventajas de su utilización y de esta manera contribuir al desarrollo agrícola y protección ambiental en Chile.

HIPÓTESIS

Los fertilizantes de entrega lenta (FEL) nitrogenados promueven una mayor eficiencia en el uso de N que los fertilizantes tradicionales porque los primeros generan menores pérdidas de N por lixiviación y producen rendimientos más altos en el cultivo del maíz grano.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar el efecto de la aplicación de un FEL nitrogenado versus fertilizantes nitrogenados tradicionales (urea) en la dinámica del nitrógeno (N) en un suelo de textura gruesa cultivado con maíz grano en lisímetros.

Objetivos específicos

- Evaluar el efecto de la aplicación de un FEL nitrogenado versus fertilizantes nitrogenados tradicionales en las tasas de lixiviación de N.
- Evaluar el efecto de la aplicación de un FEL versus fertilizantes nitrogenados tradicionales en la producción de materia seca del cultivo de maíz grano.
- Correlacionar la salida de N del sistema por la cosecha del maíz grano (absorción) utilizando técnicas tradicionales y mediciones con un clorofilómetro.

MATERIALES Y MÉTODOS

Lugar de estudio

El estudio se realizó en el Invernadero de Investigación de la Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. Los análisis de agua y tejido vegetal se realizaron en el Laboratorio de Química de Suelos y Aguas de dicha Facultad.

El suelo utilizado se extrajo de un predio ubicado en la localidad de San Luis, Comuna de Pichidegua en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. El manejo del campo corresponde a un monocultivo de maíz grano entre los meses de Septiembre y Marzo, donde luego hay un periodo de barbecho de aproximadamente seis meses. Se determinó que el suelo de la zona corresponde a terrazas aluviales no diferenciadas y clasificado como Typic Haploxerepts (Inceptisol), con clase textural dominante entre areno francosa a arenosa en todo el perfil (CIREN – Chile, 1996). En la zona también se realizó una descripción morfológica y una caracterización de propiedades químicas y físicas del suelo por horizontes (Rojas, 2014), que se resume en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Propiedades físicas y químicas de suelos en San Luis.

Profundidad cm	Propiedades ¹								
	Db	Clase textural ²	HA	MOS	N _T	pH (H ₂ O)	pH (KCl)	CE	CIC
	Mg m ⁻³	-	----- % -----	%	-----	-	-	dS m ⁻¹	cmol ₍₊₎ kg ⁻¹
0-15	1,35	F	11,91	1,47	0,039	6,93	6,20	1,59	9,65
15-39	1,36	Fa	9,11	1,24	0,015	6,90	5,78	1,04	10,64
39-73	1,32	Fa	6,27	1,18	0,015	6,90	5,76	0,89	10,15
73-103	1,31	F	28,18	1,35	0,024	6,80	6,80	1,32	10,94
103-132	1,46	A	0,19	0,44	0,002	7,27	4,68	0,80	10,49
132-155+	1,31	aF	5,10	0,71	0,023	7,29	5,75	0,59	10,94

¹Db: densidad aparente; HA humedad aprovechable, MOS: materia orgánica; N_T: nitrógeno total; CE: conductividad eléctrica; CIC: capacidad de intercambio catiónica

²F: franca; Fa: franco arenosa; aF: areno francosa; a: arenosa

Materiales

En el estudio se utilizaron lisímetros fabricados con tubos de PVC, de 50 cm de largo y 20 cm de diámetro, de un volumen aproximado de 15,7 L. Los tubos se montaron sobre una estructura metálica para su soporte, donde en la base de los lisímetros se adosaron embudos de plástico, rellenos con arena de cuarzo y una malla metálica fina, permitiendo el paso del líquido percolado a través de los lisímetros. Los percolados fueron colectados en bidones de plásticos, como se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Lisímetros y cultivo de maíz en condiciones de invernadero.

El maíz usado en los tratamientos correspondió a semillas de maíz de grano, variedad comercial 33Y74 (Pioneer). El riego del cultivo se realizó con agua destilada, para evitar el aporte adicional de N por esta vía.

Para monitorear el nivel de N en hojas se utilizó i) Clorofilómetro, marca Opti-Science modelo CCM-200, para la medición del índice de contenido de clorofila (ICC) y ii) una tabla de colores Munsell para tejido vegetal para medir el color de la hoja.

La fertilización se realizó con Urea y Metil-Urea (polímero compuesto por urea baja en biureto + formaldehído) contenida en un producto comercial de nombre Nitrafert® correspondiente a un fertilizante nitrogenado líquido de entrega lenta (FEL).

Adicionalmente se utilizaron botellas plásticas de 100 mL para la toma de muestras y transporte del líquido lixiviado, también jeringas para la extracción de las muestras contenidas en las botellas plásticas y su posterior análisis en laboratorio.

Metodología

El cultivo de maíz fue sembrado directamente el día 26 de septiembre del año 2013, recibió su último riego el día 30 de enero del 2014, para ser cosechado en abril del mismo año, con una humedad del 15%.

Según los datos obtenidos en la Dirección Meteorológica de Chile, en su página de internet, el promedio de las temperaturas máximas registradas en Santiago en los meses de diciembre de 2013 y enero de 2014 fueron de 29,6 °C y 30,8 °C, respectivamente. Se estima, que dentro de la sala de invernadero las temperaturas alcanzadas fueron superiores en al menos 10°C a las temperaturas registradas por la Dirección Meteorológica de Chile.

Se establecieron cuatro tratamientos, donde se consideró la aplicación de fertilizantes a un cultivo de maíz. Cada tratamiento en cuatro repeticiones se dispuso en tubos de PVC de 50 cm de largo y 20 cm de diámetro como muestra la Figura 2. En estos tubos se incorporó suelo disturbado a distintas profundidades (0-15 cm, 15-30 cm, 30-50 cm) extraído con barreno del predio de San Luis. Los suelos fueron depositados en los lisímetros en el orden que corresponde a cada horizonte en el perfil de suelo original.

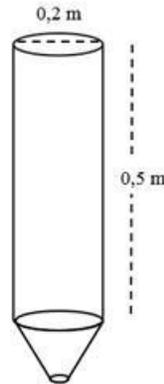


Figura 2. Forma y dimensión de lisímetros utilizados en el ensayo de invernadero.

Aporte hídrico

El ensayo se llevó a cabo desde el período de siembra que se realizó el día 26 de septiembre de 2013 hasta la cosecha el día 14 de abril de 2014. Durante el desarrollo del estudio se realizaron riegos de mantención (lunes a viernes) de 1 Litro desde la siembra hasta el mes de diciembre. Durante el mes de enero se aumentó el volumen de agua a 2 Litros de riego de mantención. Para poder obtener percolado, se hicieron riegos importantes una vez a la semana desde el mes de diciembre, incluyendo riegos en las fechas: 05-Dic-13, 12-Dic-13 de 3 Litros de agua por columna y, 17-Dic-13 con 4 Litros por columna. En estas fechas la evapotranspiración fue mayor que el aporte de riego y no se obtuvo líquido percolado en la mayoría de los tratamientos, presentándose una alta dispersión en los volúmenes obtenidos. Así, durante el mes de enero, se aumentó el volumen de riego aplicado a 5 Litros por columna en cinco fechas: 2-Ene-14, 6-Ene-14, 13-Ene-14, 20-Ene-14, 27-Ene-14, lo que permitió la obtención de percolado en todos los tratamientos. Es importante destacar que, todos los tratamientos y repeticiones recibieron las mismas cantidades de riego durante todo el ensayo.

Lixiviación de N

Después de 24 horas de aplicado el riego, se determinó el volumen de agua percolada en los bidones dispuestos bajo el embudo, dividiendo la masa en kilogramos de agua colectada en

los bidones por la densidad del agua (asumiendo la densidad del agua igual a 1 kg L^{-1}) y se colectó una muestra para su posterior análisis de laboratorio. Las muestras fueron analizadas utilizando un set de reactivos de la empresa Hach mediante métodos colorimétricos. La concentración de nitrato ($\text{mg N-NO}_3 \text{ L}^{-1}$) en el percolado fue determinado por medio del método del ácido cromotrópico (Hach, 2005). La lectura de las concentraciones de nitrato en las aguas percoladas se realizó mediante un espectrofotómetro marca Hach modelo DR-5000. Con estos datos se determinó la carga de N-NO_3 lixiviada (NL) por cada columna utilizando la Ecuación 1:

$$\text{NL (g lisímetro}^{-1}\text{)} = \text{concentración de N-NO}_3 \text{ (mg L}^{-1}\text{)} \times \text{volumen (L) percolado lisímetro}^{-1} \times 10^{-3} \text{ (Ec. 1)}$$

Luego, esta carga de NL por columna se llevó al equivalente de NL por hectárea, considerando el área del lisímetro de $0,0314 \text{ m}^2$.

Producción de materia seca

Posterior a la cosecha, las plantas de maíz fueron separadas en raíz, tallo+hojas, mazorca y grano para obtener su materia seca (MS). De esta manera se pudo estimar la producción de materia seca (MS) por hectárea según tratamiento y bloque, considerando un número común de establecimiento de plantas por hectárea ($95.000 \text{ plantas ha}^{-1}$).

Absorción de N

Al final del estudio, se realizó un análisis de N total en la parte aérea y radical de la planta, donde las muestras de tejido fueron sometidas a 70°C hasta alcanzar una masa constante, para su posterior molienda y análisis de N total según los métodos propuestos por Sadzawka et al. (2007).

Fertilización

Las fuentes nitrogenadas corresponden a urea como fertilizante nitrogenado y Metil-Urea (polímero compuesto por urea baja en biureto + formaldehído) como fertilizantes de entrega lenta (FEL), cuyos grados de fertilizantes son 46-0-0 y 28-0-0 respectivamente, en una dosis de N equivalente a 250 kg ha⁻¹. Ambos fertilizantes fueron aplicados a la siembra (septiembre), en el caso de la urea existió una incorporación al suelo superficial. Considerando la aplicación y fuente de N se establecieron cuatro tratamientos se detallan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Descripción de los tratamientos.

Tratamiento	Cultivo	Fertilizante	Dosis de N (kg ha ⁻¹)	Dosis de producto
T0	Ninguno	Ninguno	0	-
T1	Maíz	Ninguno	0	-
T2	Maíz	Urea	250	544 kg ha ⁻¹
T3	Maíz	Metil-Urea (FEL)	250	735 L ha ⁻¹

Uso de clorofilómetro y tabla Munsell

Durante el desarrollo del cultivo, se midió en dos ocasiones el ICC en las hojas de maíz con clorofilómetro (marca Opti-Science modelo CCM-200), en las siguientes fechas: 06 y 13 de diciembre de 2013. De acuerdo a Castillo y Ligarreto (2010), el contenido de clorofila en las hojas está estrechamente relacionado con la concentración de N y por lo tanto, refleja el estado nutricional de este elemento. Además, se relacionó el ICC con las determinaciones del color de las hojas realizadas con una tabla Munsell® para tejido vegetal.

Para los tratamientos con maíz, se les asignó valores referenciales de acuerdo a la posición del color en tabla Munsell, para cada color de la tabla fue asignado con un número “valor Munsell” (VM), como se muestra en la Figura 3. Los VM varían de 0,5 a 5 en las diferentes láminas, donde 1 se corresponde con los colores de croma alto y alto valor y 5 con el croma bajo y bajo valor (Realini, 2016).

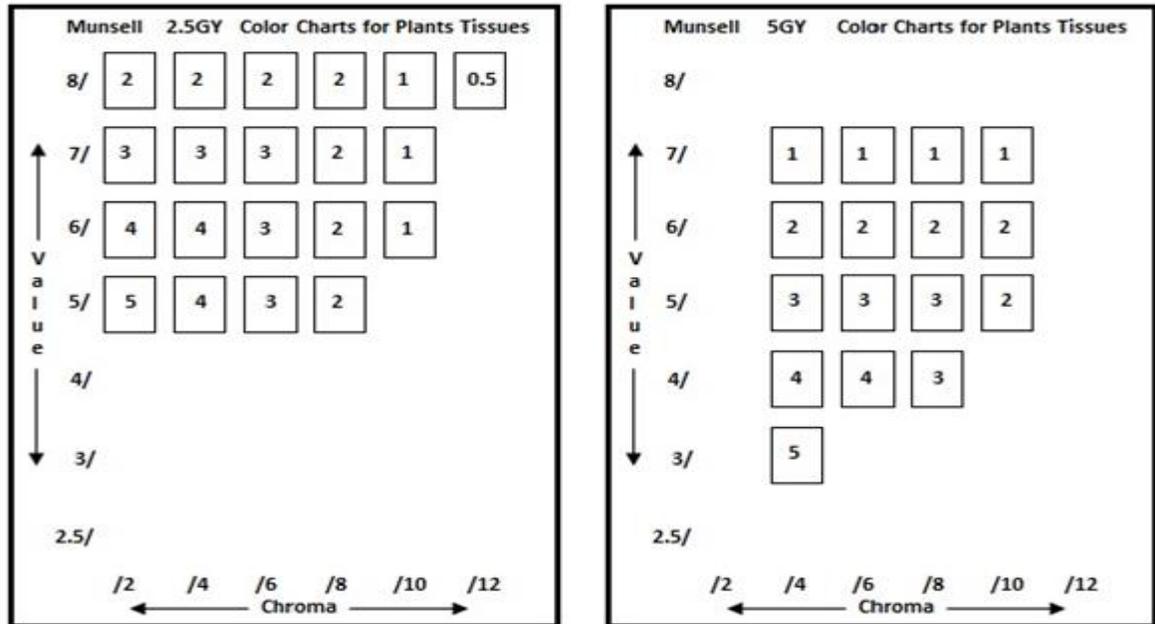


Figura 3. Asignación de “valores Munsell” a la carta de color de Munsell. 2.5GY lámina (izquierda) y la lámina 5GY (derecha) (Realini, 2016).

Las lecturas de color fueron tomadas de una hoja por planta, entre el borde y el nervio medio, realizando 3 repeticiones de la medición para luego obtener un promedio de estas mediciones. Las lecturas se tomaron en la última hoja expandida por cada fecha de medición.

Diseño experimental y análisis estadístico

El ensayo se realizó en un diseño en bloques completamente aleatorizados, donde se establecieron cuatro tratamientos, cada uno con cuatro repeticiones. La unidad experimental fue cada lisímetro. Los valores de lixiviación de N-NO₃, contenido de clorofila y producción de materia seca fueron comparados mediante un análisis de varianza (ANDEVA), previa verificación de supuestos de homocedasticidad de las varianzas y de distribución normal de los datos. Al encontrarse diferencias significativas, se realizó la prueba de rango múltiple de Tukey para separar las medias de los tratamientos, con un nivel de significancia del 5 %. Los datos fueron analizados en el programa estadístico InfoStat. Para relacionar el rendimiento y absorción con las variables de ICC y VM, se realizó un análisis correspondiente al coeficiente de correlación de Pearson (r) en los estados de desarrollo V4 y V7, utilizando el programa Microsoft Excel ®.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En todos los análisis estadísticos realizados, no se evidenciaron diferencias significativas entre bloques ($p>0,05$) en ninguna de las variables estudiadas, esto demuestra que la incidencia de luz en el invernadero no fue relevante en el orden de los bloques en el invernadero.

Percolación

En la Figura 4 se observa el volumen promedio percolado por cada tratamiento, monitoreados en cinco fechas durante el mes de enero de 2014.

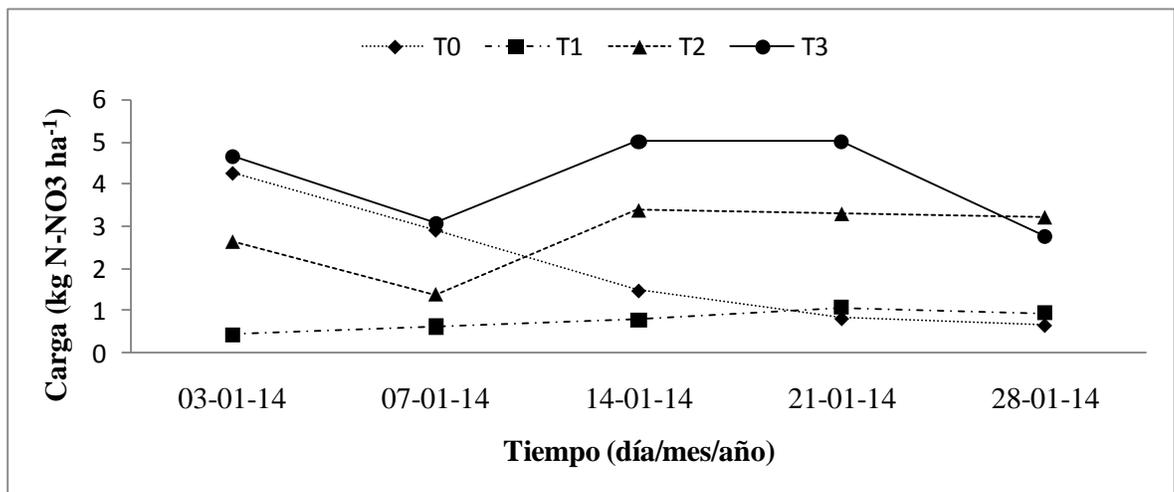


Figura 4. Volumen de percolación promedio (L) en los lisímetros durante enero de 2014.

Aunque los riegos comenzaron en el mes de noviembre, no fue posible colectar muestras de percolado hasta el mes de enero, ya que el riego aplicado no alcanzó a saturar el sistema poroso al inicio del ensayo. Lo anterior fue consecuencia de las altas temperaturas registradas dentro del invernadero, así como también la absorción por parte del cultivo, siendo la evapotranspiración mayor al aporte de riego aplicado hasta esa fecha. En las últimas cuatro fechas de muestreo se logra apreciar una mayor cantidad de agua percolada en los tratamientos con presencia de cultivo, incluso alcanzando los 3 L de agua percolada de los 5 L aplicados mediante riego. Lo antes mencionado, es atribuible que en esas fechas las plantas se encontraban completando su ciclo, donde su tasa de evapotranspiración

disminuye, sumado a esto, un suelo saturado por la frecuencia de riego resulta en una percolación más fácil y rápida.

En T0 a diferencia de los tratamientos con cultivo, en las dos últimas fechas de medición, éste presentó una menor percolación. Lo anterior se explica porque al momento de colectar las muestras (24 horas posteriores al riego), el agua aplicada no lograba infiltrar el suelo en estado de saturación, acumulándose en la superficie el volumen de agua aplicada. Esta acumulación de agua superior puede explicarse por un efecto de sellamiento superficial del suelo (costra física) que se generó por la ausencia de cultivo que rompe esta costra con sus raíces y al efecto de evaporación y acumulación de sales en superficie (costra química).

Cargas de nitratos lixiviados

La carga de N-NO₃ lixiviado (NL) en los tratamientos (Figura 5) se calculó utilizando la Ecuación 1. Se registró una diferencia en el comportamiento de la curva del T2 (urea) y T3 (FEL), presentándose en T2 un menor NL en las dos primeras fechas para ir incrementando en las últimas fechas de medición; a diferencia de T3 donde no hay una tendencia clara, sino una curva menos pronunciada, donde la carga de NL tiene una disminución marcada en la última fecha de medición.

En T0 la primera medición presentó inicialmente una mayor carga de NL la que posteriormente disminuyó en las fechas siguientes. Lo anterior se relacionó con la lixiviación de N-NO₃ presente en el suelo de T0 asociada a la mineralización de N. En tanto, en T1, a diferencia de T0, no hubo esta alza en la primera medición, sino que más bien, un comportamiento estable de la curva, lo que se puede atribuir a que la planta de maíz estaba absorbiendo el N presente en el suelo.

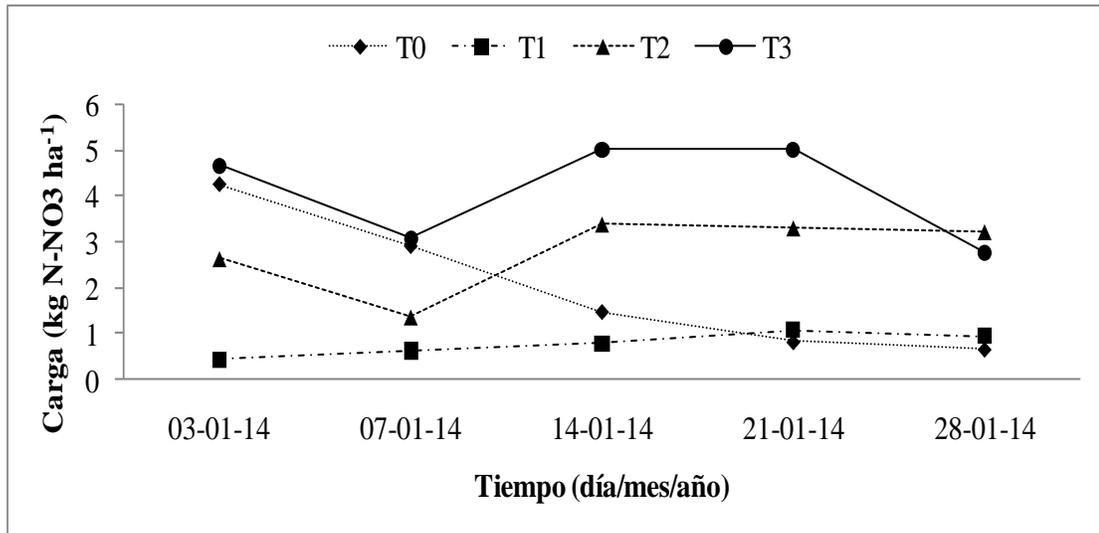


Figura 5. Carga de lixiviación de nitrato ($\text{kg N-NO}_3 \text{ ha}^{-1}$) durante enero de 2014.

En el Apéndice I, se muestran los resultados de NL, obtenidos en cada una de las 5 fechas de monitoreo del agua colectada en los bidones dispuestos bajo los lisímetros. El T3 presentó el NL más alto en cada fecha de medición. En la Figura 5, se aprecia que T0 en la primera fecha presentó una mayor lixiviación que en las mediciones posteriores, siendo en la última fecha, el tratamiento que menos lixivió. Esto es esperable, puesto que T0 no presentó cultivo y esto favoreció una mayor percolación de agua y en consecuencia mayor lixiviación de N-NO_3 . Como se mencionó anteriormente, este N-NO_3 proviene del N orgánico que se mineraliza a amonio y que posteriormente se nitrifica a N-NO_3 . Se destaca que este es un proceso natural que ocurre en todos los suelos independientemente de la presencia de cultivo o de la aplicación de fertilizantes y que aporta al NL. Además es importante tener presente que la mayor parte del N no absorbido por la planta, podría ser lixiviado por el riego excesivo durante la estación de crecimiento del cultivo (primavera-verano) (Salazar et al., 2014).

En el Cuadro 3 se presentan los resultados de lixiviación total por tratamiento obtenido en las cinco fechas de mediciones.

Cuadro 3. Lixiviación total de nitrógeno-nitrato (N-NO₃) en los tratamientos (media ± DE, n=4).

Tratamiento ¹	Lixiviación ²
	--- kg N-NO ₃ ha ⁻¹ ---
T0	10,19 ± 1,75 ab
T1	3,88 ± 0,7 b
T2	13,98 ± 7,9 ab
T3	20,6 ± 7,44 a

¹Ver descripción de los tratamientos en Cuadro 2.

²Letras distintas en una columna indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0,05$, PCM de Tukey).

En lixiviación, se pueden apreciar diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre T1 y T3, donde T1 no recibió fertilización nitrogenada y presentaba cultivo, por lo que era probable que su carga de NL fuese menor, tal como muestra el Cuadro 3. El T1, fue el tratamiento con menos NL, ya que el cultivo absorbió lo que estaba presente en el suelo, sumado a que no hubo un aporte adicional de N. El T3, fue el que presentó el nivel de NL más alto, aunque no presentó diferencias estadísticas significativas ($p > 0,05$) con T0 y T2. Asimismo, se destaca que en T0, por no tener cobertura vegetal, no hay absorción de N lo que aumenta su NL. Estos resultados coinciden en parte con lo expuesto por Apablaza (2014), quien en un estudio de campo, utilizando el mismo suelo que en este estudio, obtuvo resultados similares, en cuanto a que el suelo desnudo (T0) presentó un mayor NL. Tampoco evidenció diferencias significativas ($p > 0,05$) entre el tratamiento con presencia de maíz sin fertilizar y presencia de maíz con fertilización en base a urea, tal como ocurre en el caso de este estudio entre T1 y T2.

Aunque los tratamientos T2 y T3 no presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p > 0,05$) en NL calculado utilizando la Ecuación 1, el T3 presentó un valor promedio mayor respecto a T2. El resultado anterior difiere de lo esperado, ya que en T3 se utilizó un fertilizante de entrega lenta y se esperaría que tuviera el valor más bajo de NL respecto a los otros tratamientos. Barbieri et al. (2010) señala en su estudio que la volatilización de amoníaco (NH₃), es una importante vía de pérdida de N después de la aplicación de fertilizantes compuestos por urea y que son aplicados a la superficie del suelo. A su vez, una rápida hidrólisis de la urea resulta en mayores pérdidas de NH₃, debido a que su velocidad depende de la actividad de la enzima ureasa. Esto podría explicar que T3 presentara mayor NL, debido a que T2 fue fertilizado con urea lo que pudo resultar en menor NL, pero en una mayor volatilización de NH₃.

Producción de materia seca del cultivo de maíz grano

En el Cuadro 4, se muestra la producción de materia seca (MS) total en promedio por cada tratamiento. En cuanto a la producción de MS en T2 y T3 no se encontraron diferencias estadísticas significativas ($p>0,05$), teniendo valores promedios muy cercanos. El T1 presentó diferencias estadísticas significativas ($p<0,05$) con T2 y T3 en cuanto a la producción de MS total, resultado esperable debido a que T1 no fue fertilizado con N.

Cuadro 4. Producción de Materia Seca (MS) total en promedio por tratamiento (media \pm DE, n=4).

Tratamiento ¹	MS ²
	kg ha ⁻¹
T1	9.119 \pm 682 b
T2	16.793 \pm 3245a
T3	17.067 \pm 3853 a

¹Ver descripción de los tratamientos en Cuadro 2.

²Letras distintas en una columna indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p<0,05$, PCM de Tukey).

En la Figura 6 se muestra el rendimiento en base a materia seca detallado por órgano.

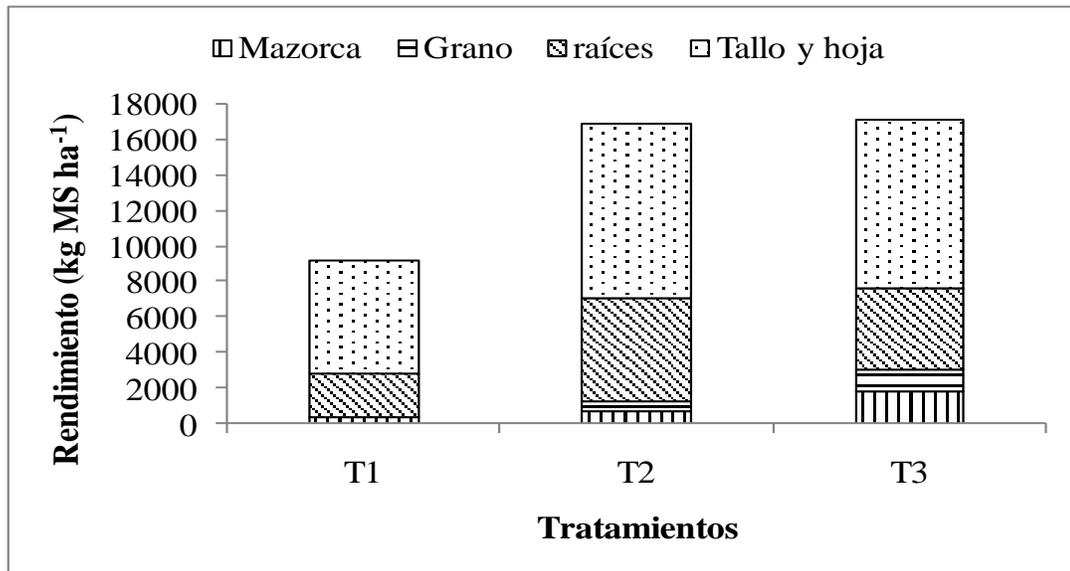


Figura 6. Rendimiento en base a materia seca (MS) en los tratamientos. Ver descripción de los tratamientos en Cuadro 2.

En todos los tratamientos se evidenció que el mayor aporte al rendimiento total fue por tallos+hojas, seguido por las raíces (ver Figura 6). También en la Figura 6 se puede apreciar la similitud de T2 y T3 en la producción de MS, por lo que no se puede concluir que la forma del fertilizante haya influido en el rendimiento. Estos resultados concuerdan con lo expuesto por Barbieri et al. (2010), donde la utilización de FEL fue efectiva para reducir las pérdidas por volatilización, pero no produjo incrementos significativos en rendimiento y contenido de N en grano respecto a la urea.

Debido a que T1 no presentó producción de grano no se pudo comparar entre tratamientos en términos de rendimiento en base a grano.

Absorción de nitrógeno por el cultivo de maíz

En el Cuadro 5 se muestran los valores promedios de absorción de N por los distintos órganos de la planta de maíz. Se observaron diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) en la absorción de N en los tratamientos T2 y T3 que presentaron valores mayores con respecto al T1 ($p < 0,05$), lo que se explicaría dado que en este último no se realizó una fertilización con N.

En la absorción en grano+mazorca, T3 fue el tratamiento que más absorbió N, presentando diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) respecto a T1. Lo anterior se relaciona también a que T3 fue el tratamiento que generó mayor producción de grano y mazorca. Esto sería explicado por la mayor disponibilidad de N en el tiempo, lo que ha sido reconocido como una de las ventajas del uso de FEL.

Por otra parte, se destaca que en todos los tratamientos evaluados la salida de N más importante fue a través de tallos y hojas.

Cuadro 5. Absorción de N por los órganos de maíz (media \pm DE, n=4).

Tejido vegetal	Tratamiento ¹		
	T1	T2	T3
	---kg N ha ⁻¹ ---		
Tallo+hojas	26,41 \pm 4,20 b	132,69 \pm 18,96 a	157,13 \pm 48,30 a
Raíz	12,63 \pm 2,81 b	66,54 \pm 37,93 a	41,62 \pm 7,17 ab
Grano+Mazorca	5,32 \pm 2,00 b	30,07 \pm 52,96 ab	56,19 \pm 38,99 a
Total	44,36 \pm 6,93 b	245,94 \pm 64,24 a	273,69 \pm 46,55 a

¹Letras distintas en una fila indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

En condiciones de campo, Apablaza (2014) obtuvo resultados similares en cuanto a la diferencia en la absorción total de N en toda la planta. En su reporte, Apablaza (2014) encontró diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) en la absorción de N por parte de la planta, con fertilización y sin ella, con valores mayores en absorción asociado al aporte extra de N mediante fertilización.

Apablaza (2014) también estimó en condiciones de campo que el maíz fertilizado con urea presentó una absorción de 237 kg ha^{-1} , mientras que en este estudio bajo condiciones controladas se obtuvo una absorción similar de 256 kg ha^{-1} , en el tratamiento fertilizado con urea (T2). En el tratamiento sin fertilizar, Apablaza (2014) obtuvo una absorción por parte del cultivo de maíz de 112 kg ha^{-1} en condiciones de campo y en este estudio se alcanzó una absorción por parte del cultivo sin aporte extra de N de 44 kg ha^{-1} . En otro estudio realizado por Gallyas (2014), aplicó una fertilización parcializada de $359 \text{ kg de N ha}^{-1}$, lo que permitió mayor disponibilidad de N para el cultivo y por lo tanto, una mayor absorción, alcanzando $424 \text{ kg de N ha}^{-1}$. El contenido de N presente en el suelo está estrechamente relacionado con el contenido de N presente en hojas, el cual es removilizado hacia los granos y transformado en proteína lo que se puede reflejar en mayor rendimiento (Figueroa, 2013).

Cabe destacar que en un estudio en lisímetros el sistema radical se encuentra restringido en el volumen de suelo que puede explorar. Así en este estudio el sistema radical del maíz se concentró en los primeros 20 cm de suelo. En once de las doce plantas cosechadas hubo presencia de mazorca, sólo cuatro generaron granos, siendo tres de éstas en T3 y una en T2, lo que se puede relacionar a la fertilización aplicada a estos tratamientos y su nivel de absorción de N.

La producción de MS, así como el rendimiento en granos se vieron afectados por las temperaturas altas en la sala de invernadero, así como también por la aplicación de riego que en un principio no logró satisfacer la demanda de las plantas de maíz, que presentaron evidentes síntomas de estrés hídrico.

A pesar de no existir diferencias significativas entre T2 y T3, fue este último tratamiento donde el cultivo presentó una mayor absorción de N. La tendencia anterior se puede atribuir a la aplicación de FEL que permite una mayor disponibilidad de N durante su desarrollo del cultivo.

Es importante destacar que T2 y T3 no presentaron diferencias estadísticas significativas ($p > 0,05$) de la carga de NL. En promedio, T2 presentó una menor carga de NL y también una menor absorción de N respecto a T3. Lo anterior, se podría asociar a que en T2 una cantidad importante del N que fue aportado por la urea se habría perdido como amoniaco (NH_3) por volatilización, antes de quedar disponible para otros procesos del ciclo del N. En este sentido, se destacan dos indicadores que apoyarían lo antes mencionado, asociado a que en T2 se registró menos NL y una menor absorción con respecto a T3, que aunque presentó niveles de NL superior, también alcanzó una mayor absorción de N que T2. Así se

puede inferir que en T3, la volatilización fue menor en comparación que T2. Sin embargo, se necesitarían a futuro mediciones de pérdidas por volatilización de N para poder confirmar lo anterior. Esto puede sostenerse además en los resultados de Casanova (1991), que realizó un estudio sobre la volatilización amoniacal derivada de las aplicaciones de urea en forma superficial, en suelos de la zona central del país. Sus resultados sugieren que los factores involucrados en las pérdidas gaseosas de N a partir de la incorporación de urea al suelo son: i) la temperatura, que afecta la magnitud de la volatilización de NH_3 , e incrementa la actividad de la enzima ureasa, por tanto la tasa hidrolítica, lo cual resulta en un pH más alto y mayor concentración de NH_4^+ cerca de la superficie del suelo; ii) las mayores tasas de pérdida de NH_3 , están relacionadas a una superficie inicialmente húmeda seguida por varios días de lento desecamiento con escasos o sin eventos de lluvia; iii) la CIC, cuando desciende por debajo de $10 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$ la volatilización podría alcanzar entre un 20% y 75% y iv) la arena por su carácter inerte, reduce la capacidad tampón del sistema, como es el caso del suelo de este estudio. Todos estos factores se presentaron durante este estudio: altas temperaturas en el invernadero, la incorporación superficial de la urea, lo que favoreció la volatilización y un tipo de suelo arenoso con baja capacidad tampón y baja CIC, lo que sugiere una pérdida mayor por volatilización en el T2 respecto al resto de los tratamientos.

En el Cuadro 6 se muestra en forma de síntesis, el aporte de N recibido por fertilización, salida de N por medio de la cosecha del maíz y la lixiviación registrada durante el estudio.

Cuadro 6. Resumen de entradas y salidas de N.

Tratamiento ¹	Fertilización	Absorción	Lixiviación
		----- kg N ha ⁻¹ -----	
T1	250	44,36 ± 6,93	3,88 ± 0,7
T2	250	245,94 ± 64,24	13,98 ± 7,9
T3	250	273,69 ± 46,55	20,6 ± 7,44

¹Ver descripción de los tratamientos en Cuadro 2.

Estos datos expuestos en el Cuadro 6 no contabilizan las pérdidas de N por volatilización, en este punto, resultados expuestos por Apablaza (2014) en un estudio similar en condiciones de campo, estimó pérdidas aproximadas por volatilización en tratamientos fertilizados con la misma dosis de urea de hasta de $147 \text{ kg de N ha}^{-1}$. Tampoco se contempla el aporte de N desde el suelo ni cuánto quedó en él luego del ensayo. Como se menciona anteriormente, se presume que T3 logra cubrir la curva de demanda de N del cultivo al estar más disponible por más tiempo en el suelo, por lo que se esperaría una mayor absorción por parte del cultivo. Complementando lo anterior, Figueroa (2013) señala que, en un comienzo el cultivo de maíz presenta una absorción lenta de N, así un 10% de la absorción total de N se realiza hasta el estado de sexta a octava hoja, aumentando gradualmente su absorción desde octava hoja hasta llenado de grano.

Uso de clorofilómetro y tabla Munsell

En la primera fecha, se presentó uniformidad en cuanto al desarrollo del maíz donde el 75% se encontraba en 4° hoja. Por el contrario, durante la segunda medición, el estado de desarrollo fue mucho más heterogéneo como se muestra en el Apéndice II, cuando en esta medición al menos el 40% del maíz se encontraba en 7° hoja.

Cabe mencionar que, el efecto de estrés hídrico mencionado previamente, se reflejó en una coloración amarilla en hojas así como también en la pérdida de turgencia en éstas.

En el Cuadro 7, se muestra el índice de contenido de clorofila (ICC), donde se observan diferencias significativas entre T2 y T3 con respecto a T1 ($p < 0,05$). En los tratamientos T2 y T3 se reflejó un mayor nivel de ICC, lo que es consecuente con la aplicación de N de ambos tratamientos, resultados que coinciden con lo informado por Apablaza (2014) en su estudio de campo.

Cuadro 7. Índice del contenido de clorofila en diferentes estados fisiológicos (media \pm DE, n=4).

Tratamiento ¹	Fecha muestreo ²	
	06-12-2013	13-12-2013
	----- ICC -----	
T1	6,18 \pm 2,91 b	6,93 \pm 0,3 b
T2	27,89 \pm 10,15 a	16,68 \pm 4,32 a
T3	23,06 \pm 4,16 a	18,77 \pm 5,14 a

¹Ver descripción de los tratamientos en Cuadro 2.

²Letras distintas en una columna indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0,05$, PCM de Tukey).

En las Figuras 7 y 8, se muestran los resultados obtenidos en dos fechas de medición en relación a los contenidos relativos de clorofila ICC (Figura 7), medidos por el clorofilómetro y los valores estimados por tabla Munsell (Figura 8).

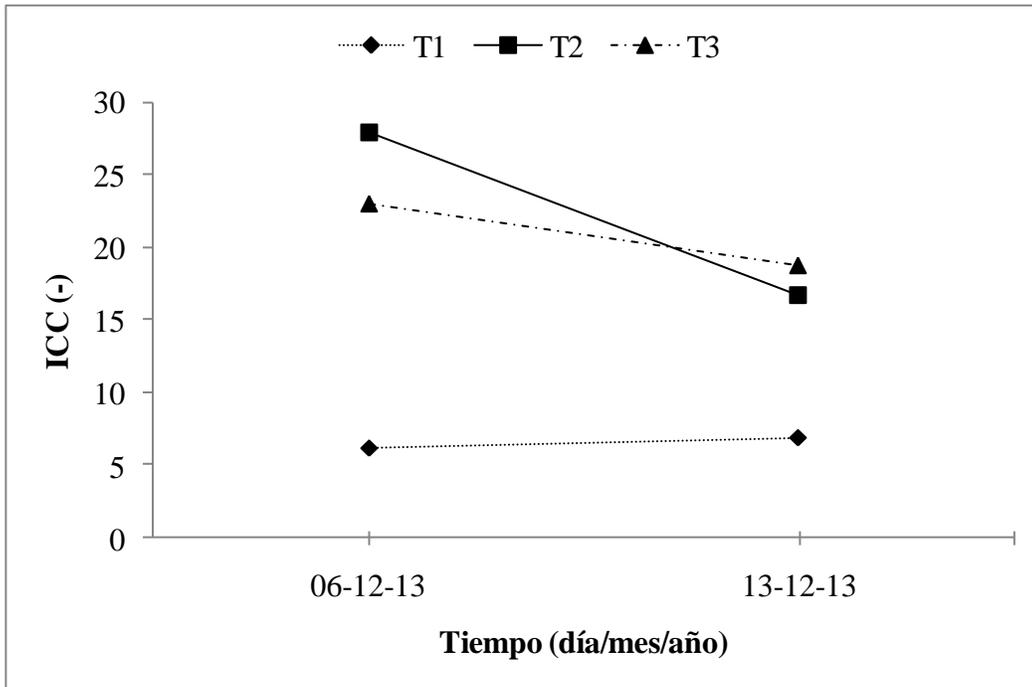


Figura 7. Índice relativo de clorofila (ICC) medido con clorofilómetro en los tratamientos.

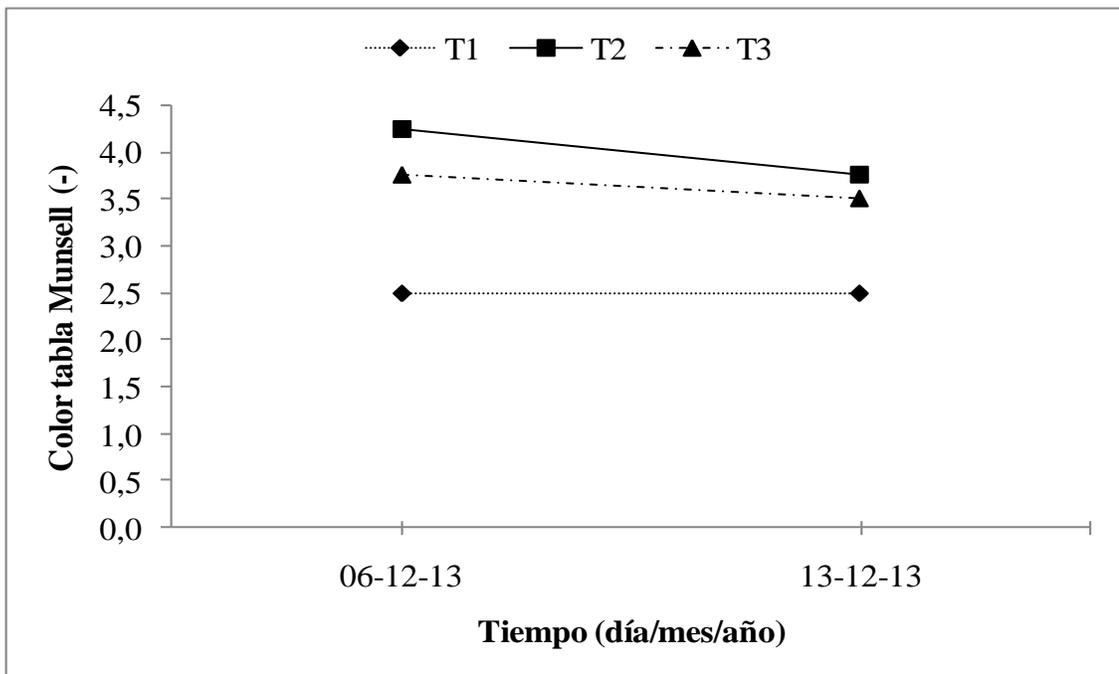


Figura 8. Color de tabla Munsell para los tratamientos.

Los valores observados de ICC y color de tabla Munsell podrían ser utilizados como indicadores, debido a que, como se muestra en el Apéndice II en la primera fecha de muestreo las plantas se encontraban en estado fisiológico V4, donde el cultivo empieza lentamente a aumentar su demanda de N determinando su rendimiento.

En el caso de T1, bajo las condiciones del ensayo los valores de ICC y VM son significativamente ($p < 0,05$) inferiores respecto de T2 y T3, lo que coincide con una baja producción de MS y en una menor absorción de N.

El ICC medido con clorofilómetro fue mayor para T2 y T3, donde ICC disminuyó significativamente en la segunda fecha de medición, lo que puede ser atribuido a que las plantas estaban sometidas bajo un fuerte estrés por las altas temperaturas y a que también durante el comienzo del ensayo el volumen de riego aplicado no suplió la demanda hídrica.

Este ICC coincide con la mayor absorción de N y mayor producción de MS presentada por ambos tratamientos fertilizados, T2 y T3. La aplicación de fertilizantes nitrogenados aumenta la disponibilidad de N para la formación de las moléculas de clorofilas que son importantes en el proceso de fotosíntesis. Lo anterior permite una mayor capacidad de la planta para generar fotoasimilados para formación de estructuras reproductivas y mayor altura de planta, que pueden influir de forma importante en los rendimientos (Havlin et al., 2013).

Tanto la tabla Munsell, como el clorofilómetro permiten identificar diferencias en el contenido de clorofila, es decir, una técnica tradicional con una tabla de colores detectó las mismas diferencias que un método realizado con un equipo óptico de mayor tecnología. Así, ambos métodos no destructivos, son útiles para realizar pronósticos de rendimiento asociado al nivel de N estimado por indicadores asociados al nivel de N de la planta y al contenido de clorofila presente en sus hojas.

Correlación de absorción de N en grano y con herramientas de medición de contenido de clorofila

En el Cuadro 9, se muestra una matriz de correlación entre la absorción de N en grano con ICC y VM, en los estados V4 y V7. En este análisis se encontró una alta correlación entre las variables antes descritas, exceptuando ICC en V7, donde no habría una relación positiva con respecto a la absorción final de N en grano. Bajo las condiciones de este estudio, esta herramienta podría servir para pronosticar en estado V4 cuánto va a absorber el cultivo al final de la temporada. Debido a la estrecha asociación entre el contenido de N y clorofila en hojas de maíz, es posible evaluar el estado nutricional del cultivo a través de la medición del contenido de clorofila de la hoja (Sainz Rosas y Echeverría, 1998), permitiendo hacer correcciones con el fin de incrementar el rendimiento.

Cuadro 9. Correlación entre absorción de N en grano con ICC y VM (n=4).

Variable	ICC _{v4}	ICC _{v7}	VM _{v4}	VM _{v7}
Absorción	0,847	0,1	0,948	0,743

En el Cuadro 10, se muestra una matriz de correlación entre el rendimiento del cultivo en base a MS con ICC y VM, en los estados V4 y V7. Al igual que en el Cuadro 7, se encontró una alta correlación exceptuando ICC en el estado de V7.

Cuadro 10. Correlación entre rendimiento con ICC y VM (n=4).

Variable	ICC _{v4}	ICC _{v7}	VM _{v4}	VM _{v7}
Rendimiento	0,851	0,153	0,948	0,711

Es importante mencionar que ninguna de las correlaciones antes presentadas mostró una significancia menor a 0,05.

Se han encontrado bajas correlaciones entre los valores del contenido relativo de clorofila en el estadio V6 y el rendimiento del cultivo de maíz, destacando que su uso como herramienta de diagnóstico en aquel estadio tiene un limitado potencial, no siendo capaz de estimar rendimiento. Por otra parte a partir de V8, esta herramienta presenta una alta correlación entre el contenido de clorofila en hoja con el rendimiento, lo que ha sido reportado en otros estudios (Sainz Rozas y Echeverría, 1998; Castillo y Ligarreto, 2010; Figueroa, 2013). Por lo tanto, estimar el rendimiento en estados de desarrollo más tempranos podría inducir a errores, debido a que buena parte del N absorbido es utilizado para producir otras estructuras de la planta además de clorofila (Figueroa, 2013).

CONCLUSIONES

La aplicación de fertilizante de entrega lenta (Metli-Urea) respecto a las pérdidas por lixiviación de nitratos no mostró diferencias significativas con respecto a la aplicación de un fertilizante tradicional (Urea), incluso fue mayor la carga de nitratos en el tratamiento con aplicación de Metil-Urea. Lo antes mencionado es atribuible a una menor volatilización de N desde los lisímetros. El tratamiento sin fertilización presentó las menores pérdidas por lixiviación de nitratos con respecto a los tratamientos que fueron fertilizados y con presencia de cultivo.

Respecto al rendimiento en base a la producción de materia seca y absorción de N en el cultivo de maíz grano bajo las condiciones de este estudio la aplicación de fertilizante de entrega lenta no mostró diferencias significativas ($p > 0,05$) con respecto a la aplicación de un fertilizante tradicional (Urea). Respecto a la producción de materia seca se obtuvo resultados similares, presentando en ambos tratamientos T2 y T3 diferencia significativa con el tratamiento sin fertilizar (T1).

En las mediciones de contenido relativo de clorofila (ICC) y tabla de colores Munsell (VM), se presentaron diferencias significativas entre tratamientos con fertilización y sin fertilizar. Se pudo establecer una relación directa entre el ICC y el color obtenido en la tabla Munsell en hojas de maíz con la absorción de N por el cultivo. En este estudio, los resultados señalan que a mayor ICC y mayor VM existe una mayor absorción de N y mayor producción de materia seca.

En las correlaciones del rendimiento y absorción con las variables de contenido relativo de clorofila y color Munsell, en los estados V4 y V7, se obtuvo una alta correlación pero los resultados no fueron significativos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Apablaza, N. 2014. Impacto de la aplicación de fertilizantes nitrogenados en la lixiviación y absorción de nitrógeno en un suelo de textura gruesa cultivado con maíz grano en la región de O'Higgins. Memoria Ingeniera agrónoma. Santiago, Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 39h.

Barbieri, P., H. Hecheverría, H. Sainz, y M. Maringolo. 2010, julio. Fertilización de maíz con urea de liberación lenta: pérdida por volatilización y eficiencia de uso de nitrógeno. *Ciencias del suelo*, 28(1): 57-66.

Camargo, J. y A. Alonso. 2006. Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: A global assessment. *Environment International*, 32(6):831-849.

Canfield, D., A. Glazer y P. Falkowski. 2010. The Evolution and Future of Earth's Nitrogen Cycle. *Science*, 330(6001): 192-196.

Casanova, M. 1991. Volatilización potencial de amoníaco a partir de urea aplicada superficialmente en suelos de la zona central de Chile. Memoria de título Ingeniero agrónomo. Santiago, Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 21-130h.

Castillo, A. y G Ligarreto. 2010. Relación entre nitrógeno foliar y el contenido de clorofila, en maíz asociado con pastos en el Piedemonte Llanero colombiano. *Revista Corpoica-Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 11(2): 122-128.

Ciren (Centro de Información de Recursos Naturales), Chile. 1996. Estudio Agrológico VI Región: descripción de suelos materiales y símbolos. Publicación N°114.

Dirección Meteorológica de Chile. [En línea]. Santiago, Chile. Recuperado en: <<http://164.77.222.61/climatologia/>>. Consultado el: 05 de mayo de 2016.

Galloway, J., A. Townsend, J. Erisman, M. Bekunda, Z. Cai, J. Freney et al. 2008. Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, 320(5878): 889-892.

Gallyas J. 2014. Efecto de la aplicación de purines de cerdo en la dinámica del nitrógeno, en suelos de textura gruesa bajo cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en la comuna de San Pedro, Región

Metropolitana. Memoria Ingeniero agrónomo. Santiago, Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 34h.

Espinoza, J. 2009. Fertilizantes en Chile: Coyuntura y Perspectivas. [En línea]. Santiago, Chile. ODEPA (Oficina de estudios y políticas agrarias). Recuperado en: <<http://www.odepa.gob.cl/odepaweb/servicios-informacion/Mercados/ago-09.pdf>>. Consultado el: 05 de Junio de 2015

Figueroa, V. 2013. Evaluación del índice de suficiencia de nitrógeno como mejorador de la capacidad predictiva de las lecturas de SPAD en híbridos de maíz. Tesis Ingeniera Agrónoma y Magíster en Ciencias Agropecuarias, Mención Producción de cultivos. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 103h.

Hach. 2005. DR5000 Spectrophotometer procedures manual. 2th Edition. Hach Company. Germany. 864p.

Havlin, J., S. Tisdale, W. Nelson y J. Beaton. 2013. Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management. 8th edition. Pearson, Inc. Upper Saddle River. New Jersey. United State of America. 516p.

Nájera, F., Y. Tapia, C. Baginsky, V. Figueroa, R. Cabeza y O. Salazar. 2015. Evaluation of soil fertility and fertilisation practices for irrigated maize (*Zea mays* L.) under Mediterranean conditions in central Chile. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 15(1):84-97.

ODEPA (Oficina de estudios y políticas agrarias). [En línea]. Santiago, Chile. Recuperado en: <<http://www.odepa.cl/cultivos-anales-estimacion-de-superficie-sembrada-a-nivel-nacional-anos-agricolas-201112-y-201213-2/>>. Consultado el: 05 de Junio de 2015.

Realini, P. 2015. Validation of non-destructive techniques to estimate the nitrogen retention in the vegetation components of buffer strips. Tesis de Magister en Manejo de Suelos y Aguas. Santiago, Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. (En desarrollo).

Robertson, G., y P. Vitousek. 2009. Nitrogen in Agriculture: Balancing the Cost of an Essential Resource. *Annual Review of Environment and Resources*, 34: 97-125.

Rojas, C. 2014. Narrow buffer strip as mitigation measure to reduce nitrogen losses from corn fields in central Chile: installing and N budget during the first year. Tesis de Magister en Manejo de Suelos y Aguas, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. (En desarrollo)

Rose, R, D. Haase, y E. Arellano. 2004. Fertilizantes de entrega controlada: potencial para mejorar la productividad de la reforestación. *Bosque*, 25(2), 89-100.

Sadsawka A., A Carrasco, R. Demanet, H. Flores, R. Grez, M. Mora y A. Neaman. 2007. Métodos de análisis de tejidos vegetales. 2a Ed. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Serie Actas INIA N° 40. Santiago, Chile. 139 p.

Sainz Rozas, H. y H. Echeverría. 1998. Relación entre las lecturas del medidor de clorofila (MinoltaSPAD 502) en distintos estadios del ciclo del cultivo de maíz y el rendimiento en grano. *Revista Facultad de Agronomía*, 103(1):37-44.

Salazar, O. 2013, Abril. Informe Final de Efecto de la Aplicación de Metil-Urea, Departamento de Ingeniería y Suelos, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. Santiago, Chile.

Salazar, O., C. Rojas y C. Soto. 2013. Diagnóstico Sectorial y Propuesta de Acuerdo de Producción Limpia. Productores de Maíz de la Región del Libertador Bernardo O'Higgins. Rancagua, Chile: Ministerio de Economía, Fomento y Turismo. 25p.

Salazar, O., J. Vargas, F. Nájera, O. Seguel y M. Casanova. 2014, diciembre. Monitoring of nitrate leaching during flush flooding events in a coarse-textured floodplain soil. *Agricultural Water Management*, 146(1): 218-227.

Vitousek, P., J. Aber, R. Howarth, G. Likens, P. Matson, D. Schindler et al. 1997. Human alteration of the global Nitrogen cycle: Sources and consequences. *Ecological Applications*, 7(3), 737-750.

Ward, M., T. deKok, P. Levallois, J. Brender, G. Gulis, B. Nolan et al. 2005. Workgroup report: Drinking-water nitrate and health-recent findings and research needs. *Environmental Health Perspectives*, 113(11), 1607-1614.

Zotarelli, L., J. Scholberg, M. Dukes y R. Muñoz-Carpena. 2007. Monitoring of nitrate leaching in sandy soils. *Journal of Environmental Quality*, 36(4), 953-962.

APÉNDICE

Apéndice I. Concentraciones de N-NO₃ durante la temporada de riego.

Tratamiento/Fecha	Lixiviación ²
--- kg N ha ⁻¹ ---	
03-01-2014	
T0	4,3 ± 0,8 a
T1	0,4 ± 0,1 b
T2	2,6 ± 2,5 a
T3	4,7 ± 1,5 a
07-01-2014	
T0	2,92 ± 1,07 a
T1	0,63 ± 0,06 c
T2	1,38 ± 0,52 bc
T3	3,11 ± 2,16 ab
14-01-2014	
T0	1,49 ± 0,59 b
T1	0,79 ± 0,18 b
T2	3,4 ± 1,84 ab
T3	5,02 ± 2,3 a
21-01-2014	
T0	0,84 ± 0,79 b
T1	1,08 ± 0,77 ab
T2	3,32 ± 2,09 ab
T3	5,01 ± 2,37 a
28-01-2014	
T0	0,68 ± 0,35 c
T1	0,94 ± 0,28 bc
T2	3,23 ± 1,57 a
T3	2,78 ± 0,84 ab

¹Ver descripción de los tratamientos en Cuadro 2.

²Letras distintas en una columna indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos en cada fecha de muestreo ($p < 0,05$, PCM de Tukey).

Apéndice II. Estado fenológico de los tratamientos en las dos fechas de medición.

Tratamiento ¹	Fecha muestreo	
	06-12-2013	13-12-2013
	Estado fenológico	
T1 B1	4 hoja	8 hoja
T1 B2	4 hoja	9 hoja
T1 B3	4 hoja	8 hoja
T1 B4	3 hoja	7 hoja
T2 B1	4 hoja	7 hoja
T2 B2	4 hoja	7 hoja
T2 B3	4 hoja	6 hoja
T2 B4	4 hoja	6 hoja
T3 B1	4 hoja	8 hoja
T3 B2	5 hoja	7 hoja
T3 B3	4 hoja	7 hoja
T3 B4	3 hoja	6 hoja

¹Ver descripción de los tratamientos en Cuadro 2.