

DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE USO DEL NITRÓGENO EN MAÍZ (*Zea mays L.*) Y DE LAS PÉRDIDAS POR LIXIVIACIÓN

R. Díaz¹, O. Salazar², M. Quemada³, A. Nario⁴, X. Videla⁴

¹Programa de Magíster en Manejo de suelos y aguas, Universidad de Chile Casilla 1004, Santiago Chile, Email: renato.diaz@ug.uchile.cl

²Departamento de Ingeniería y Suelos, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile, Casilla 1004, Santiago, Chile. osalazar@uchile.cl

³Departamento Producción Agraria/CEIGRAM, Universidad Politécnica de Madrid, 28040, España, Email: miguel.quemada@upm.es

⁴Departamento de Tecnologías Nucleares, División de Investigación y Aplicaciones Nucleares, Comisión Chilena de Energía Nuclear Email: Adriana.nario@cchen.cl, ximena.videla@cchen.cl

RESUMEN. Considerando que el nitrógeno (N) tiene una relación directa con el incremento del rendimiento del cultivo, muchos agricultores aplican excesiva fertilización nitrogenada, favoreciendo procesos de contaminación y elevando los costos de producción. Se estableció un estudio en la zona mediterránea de Chile, en un suelo Entic Haploxeroll a fin de determinar y comparar la eficiencia de uso de fertilizante N (EUN), mediante técnicas isotópicas (¹⁵N-urea al 5% a.e.). Los tratamientos fueron una combinación de la rotación de cultivo (maíz-barbecho y maíz –cultivo cubierta) con la dosis óptima (250 kg N ha⁻¹) o excesiva de N (400 kg N ha⁻¹). Se determinó que la dosis excesiva tiene menor EUN y mayores pérdidas de N frente a la dosis óptima siendo más eficiente cuando se asocia a una rotación de *Lolium multiflorum*. Se sugiere que se realicen más estudios en el sistema de rotación de cultivo de maíz asociada a cultivos cubierta y dosis óptima de N a fin de aumentar la EUN.

ABSTRACT. Considering that nitrogen (N) increases crop yield, many farmers tend to apply excessive N fertilization, favoring pollution processes and also raising production costs. For this reason, we set a study in the Mediterranean zone of Chile, in an Entic Haploxeroll soil, to determine and compare the N Use Efficiency (NUE), using isotopic techniques (¹⁵N-urea, 5% a.e.). The treatments were combinations of crop rotation (maize-fallow and maize -cover crop) and optimal N dose (250 kg N ha⁻¹) or excessive (400 kg N ha⁻¹). It was found that the excessive N dose had lower NUE and greater losses of N compared to the optimal N dose, being more efficient when associated with a rotation of *Lolium multiflorum*. It is suggested that more studies be carried out in the maize crop rotation system associated with cover crop and optimum N rate to increase the NUE.

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura tiene como reto producir alimentos adaptando métodos eficientes y sostenibles en el uso de agroquímicos, reduciendo así su impacto en los recursos naturales. En este sentido, se identifica el uso del nitrógeno (N) como un manejo prioritario a mejorar. Aunque existe una relación entre la aplicación de fertilizante de N y el incremento de los rendimientos de los cultivos (hasta cierto umbral), muchos agricultores en forma equivocada han estado aplicando una

sobre-fertilización de N, favoreciendo procesos de contaminación de aguas superficiales y subterráneas y elevando además los costos de producción (FAO, 2017).

La rotación de cultivos es considerada una estrategia de producción eficaz y sostenible asociada a estrategias de adaptación y mitigación frente al cambio climático (FAO, 2017). Por ello se puede considerar que la introducción del cultivo de ballica (*Lolium sp*) en monocultivo de maíz (*Zea mays L.*) aumenta su diversidad y provee múltiples servicios ecosistémicos (Bowman *et al.*, 1998). Además, la ballica ha demostrado ser adaptable para las estaciones de otoño e invierno de Chile por sus condiciones de humedad y temperatura (INIA, 2008). El empleo de otras gramíneas como cultivos cubierta ha dado buenos resultados en climas Mediterráneos, así la introducción de cebada (*Hordeum vulgare L.*) durante 10 años permitió concluir que la sustitución del barbecho por cultivos cubierta, mejora la calidad de un suelo degradado (García-González *et al.*, 2018). La principal razón fue el aumento de la materia orgánica con la consiguiente mejora de la estabilidad del suelo y el aumento de nutrientes. Este tipo de investigación hizo posible mejorar los sistemas agrícolas en zonas de regadío bajo un clima tan peculiar como el mediterráneo, con inviernos fríos y veranos secos y al mismo tiempo se puede utilizar como estrategia para mejorar los beneficios ambientales y si se maneja adecuadamente, puede proporcionar ventajas económicas y agronómicas (Gabriel *et al.*, 2016).

La eficiencia de uso de fertilizante es una medida cuantitativa de la absorción real del nutriente por el cultivo, en relación con la cantidad de nutriente agregado al suelo como fertilizante (IAEA, 2001). El uso de técnicas isotópicas, tal es el caso del N que está formado por dos isótopos estables (¹⁴N y ¹⁵N), permite de manera precisa y eficiente determinar la EUN.

En Chile, el cultivo de maíz es un producto de gran importancia en las explotaciones agrícolas, abarcando una superficie aproximada de 89 mil hectáreas con una producción de 1.1 millones de Mg y rendimiento promedio de 12,5 Mg ha⁻¹ durante la temporada 2017-18 (ODEPA, 2018). Siendo el cultivo más importante para los pequeños productores, quienes asocian el máximo rendimiento a la aplicación de fertilizante nitrogenado. Por ello, es común

realizar aplicaciones excesivas de N en la fertilización, llegando a superar los 400 kg N ha⁻¹ (INDAP, 2011). Las dosis recomendadas se basan en los manuales de producción de maíz (ej. Faiguenbaum, 2003) donde se indica que para un sistema de monocultivo de maíz con rendimientos entre 10 y 20 Mg ha⁻¹, recomienda aplicar dosis de N entre 265 y 545 kg ha⁻¹ y entre 295 y 595 kg ha⁻¹ para casos que se incorpore el 50% y solo el 25% de los residuos, respectivamente. Por otro lado, las investigaciones realizadas en la zona central de Chile por Opazo *et al.* (2008) para el cultivo de maíz dulce bajo la metodología de Stanford (1973) adaptada en Chile concluyen que la aplicación de dosis de N son muy altas, superiores a 260 kg de N ha⁻¹. Para aclarar estas aparentes contradicciones, se estableció un estudio en la estación experimental Antumapu perteneciente a la Universidad de Chile, que tuvo como objetivo principal comparar la eficiencia de uso de N mediante técnicas isotópicas y comparar la lixiviación de N en el suelo, cuando se establece: i) una rotación de cultivo de maíz-barbecho versus maíz – cultivo cubierta y ii) una dosis óptima de N versus excesiva de fertilización.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Ubicación del Estudio

El estudio se realizó en la Estación Experimental Antumapu, perteneciente a la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, ubicada en la Región Metropolitana de Santiago (33°34'13" S, 70°38'5" W) a una altitud de 625 msnm. Caracterizada por un clima mediterráneo seco con régimen de humedad semiárido, con temperaturas máximas de 30,2°C durante el mes de enero y mínimas de 3,6°C en el mes de junio y precipitación anual de 372 mm, AGRIMED (2018).

2.2. Diseño Experimental y manejo del Cultivo

En el experimento se evaluaron cuatro tratamientos, correspondientes a la combinación de 2 rotaciones de cultivo y 2 dosis de N (250 y 400 kg ha⁻¹), con 3 repeticiones (Tabla 1). Así, se establecieron 12 parcelas experimentales (4 m x 2,65 m) con orientación N-S. El sitio del ensayo contaba con riego por goteo automatizado, con emisores de 1,4 L h⁻¹ y un marco de emisores de 0,20 x 0,65 m. Las variables climáticas fueron medidas con la estación meteorológica ubicada en el sitio de ensayo. En el medio de las unidades experimentales se instalaron los detectores de frente agua (FullStop™) a 50 cm de profundidad (Salazar *et al.*, 2014). El suelo del sitio experimental pertenece a la Serie de Santiago (CIREN, 1996) donde las características químicas del suelo son pH 8,99, materia orgánica (MOS) 1,12 %, conductividad eléctrica 0,97 dS m⁻¹, capacidad de campo 30%, punto de marchitez permanente 15%, densidad aparente 1,42 Mg m⁻³ y textura franca arcillosa.

El material vegetal en estudio fue el maíz grano (*Z. mays*) variedad tardía 33Y74 – Pioneer que se sembró con una dosis

de 9 semillas por metro lineal con una distancia de entre hilera de 0,7 m. Previo a la siembra, se realizó una preparación manual de las parcelas a una profundidad de 10 cm. En los tratamientos Zm-Lm se incorporó el cultivo de ballica (*L. multiflorum* Lam.) variedad Winter Star II de ANASAC, que fue sembrada en abril de 2018 a una dosis de semilla equivalente a 35 kg ha⁻¹; mientras que en los tratamientos Zm-B se realizó el barbecho.

Tabla 1. Tratamientos estudiados, rotación de cultivo y dosis de N aplicada.

Tratamiento	Rotación anual de cultivos	Dosis N
		kg ha ⁻¹
Zm ₂₅₀ -B	<i>Z. mays</i> – Barbecho	250
Zm ₄₀₀ -B	<i>Z. mays</i> – Barbecho	400
Zm ₂₅₀ -Lm	<i>Z. mays</i> - <i>L. multiflorum</i>	250
Zm ₄₀₀ -Lm	<i>Z. mays</i> - <i>L. multiflorum</i>	400

2.3. Riego, fertilización y manejo

El riego se inició en Octubre del 2018 junto a la siembra del cultivo de maíz grano y aplicación de fertilizante nitrogenado y finalizó en abril del 2019 en el estado R6 (madurez fisiológica) del maíz. La evaporación de referencia (ET_o) fue calculada a través de la ecuación de Penman – Monteith, utilizando las variables obtenidas de la estación meteorológica instalada en el sitio de estudio. Mientras que para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) se utilizó el valor de coeficiente único del cultivo (K_c), Allen *et al.*, (2006).

La aplicación de la fertilización nitrogenada, se realizó basada en dos criterios: la dosis de 250 kg N ha⁻¹ que corresponde al resultado de la aplicación del método racional, en el cual la dosis aplicada se estimó a partir del suministro potencial del suelo (mineralización) y la demanda del cultivo, en base al rendimiento potencial esperado (Rodríguez, 1993); mientras que la dosis de 400 kg N ha⁻¹ corresponde a una fertilización excesiva de N, habitualmente usada por los productores de maíz grano en la zona central de Chile (Salazar y Nájera, 2011). La fuente nitrogenada fue urea (46% de N) y se agregó urea enriquecida al 5% átomos en exceso de ¹⁵N a 10 cm de las plantas de maíz en un área de 1 m² (microparcela) (González, 2012; Landriscini *et al.*, 2015). Dentro de cada unidad experimental al momento de cosechar las muestras se consideró las recomendaciones para evitar el efecto borde (Gabriel y Quemada, 2011; Gabriel *et al.*, 2016). La fuente de K fue cloruro de potasio (60% de K₂O) y para la fertilización de P se aplicó súper fosfato triple (46% de P₂O₅) en una dosis calculada de acuerdo a las características del suelo y los niveles de P y K disponibles. Para los tratamientos de 400 kg N ha⁻¹ la primera dosis (150 kg N ha⁻¹) se aplicó en Octubre de 2018 junto a la siembra, posteriormente, en diciembre de 2018 se aplicó la dosis de

250 kg N ha⁻¹, para ambos tratamientos, cuando el cultivo alcanzó la octava hoja (V8). Sin embargo, en los tratamientos de 250 kg N ha⁻¹ no se aplicó N en la siembra y el total de la dosis se aplicó en V8.

2.4. Muestras vegetales y determinación de N¹⁵

La toma de muestras se realizó en la madurez fisiológica (R6). Se procedió a tomar las muestras de los órganos vegetales de la microparcela delimitada en cada unidad experimental. Las fracciones vegetales (raíz, tallo, coronta y grano) fueron secadas en horno a 70°C, pesadas y molidas para la determinación del contenido de N_T por el método Kjeldahl, siguiendo el protocolo de Sadzawka (2006). En el caso del grano se llegó a secar a 14,5% H^o. La relación isotópica N¹⁵/N¹⁴, se determinó por espectrometría de emisión óptica en el laboratorio de la CCHEN siguiendo los protocolos descritos por Reinhardt y Russow (1991). La fracción de N derivado del fertilizante (Nddf, %) se calculó utilizando la ecuación 1:

$$Nddf = \frac{\% N^{15} \text{ exceso planta}}{\% N^{15} \text{ exceso en fertilizante}} \times 100 \quad [1]$$

Donde, % N¹⁵ exceso planta es el porcentaje de átomos de N¹⁵ en exceso en la muestra de material vegetal; y % N¹⁵ exceso en fertilizante se refiere al porcentaje de átomos de ¹⁵N en exceso aplicados con el fertilizante marcado.

Para el cálculo del porcentaje de nitrógeno derivado del suelo (Ndds) se utilizó la ecuación 2:

$$Ndds = 100 - Nddf(\%) \quad [2]$$

Los cálculos para determinar la Eficiencia de Uso del Nitrógeno EUN (%) se realizaron siguiendo el protocolo descrito en el manual del IAEA (2001).

2.5. Recolección y análisis de lixiviados

La recolección de lixiviados se realizó en cuatro etapas fenológicas del maíz: V6, V9, VT y R3, en las respectivas cápsulas-colecta de los FullStopTM. Para ello se simuló eventos de precipitación mayores a 15 mm. Las muestras de lixiviados fueron recolectadas 24 h después del riego. De los lixiviados se tomaron submuestras de 30 mL para el análisis de N total (Nt) y N inorgánico disuelto (NID) con el objetivo de obtener la fracción disuelta de la solución suelo, las muestras se filtraron con filtros de 0,45 µm. El Nt fue determinado por el método Kjeldahl y los átomos en exceso de N¹⁵ por espectrometría de emisión óptica. Las concentraciones de NO₃⁻ y NH₄⁺ fueron determinadas por colorimetría (Hach, 2005). El NID se estimó como la suma del contenido de NO₃⁻ y NH₄⁺. Los datos fueron analizados mediante modelos lineales mixtos (MLM), realizando la prueba de comparaciones múltiples de Fisher (α= 0,05), mediante el programa InfoStat, Di Rienzo *et al.*, (2018).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Eficiencia de Uso de Nitrógeno

Los resultados obtenidos muestran que, para el tratamiento con dosis de 250 kg N ha⁻¹ asociados a la rotación de cultivos con *L. multiflorum* (Zm₂₅₀-Lm), de los 382 kg N ha⁻¹ presentes en la planta, 97 kg N ha⁻¹ son derivados del fertilizante (Nddf). El resto del N absorbido estaría dado por el aporte propio del suelo 285 kg N ha⁻¹ (Ndds). Esta misma tendencia se observó en el tratamiento Zm₂₅₀-B, donde el Nddf fue de 83 kg N ha⁻¹ y el Ndds registró 299 kg N ha⁻¹ (Tabla 2). En el caso de los tratamientos con dosis excesiva de N combinadas con maíz-cultivo cubierta y maíz-barbecho, la cantidad de N absorbido fue de 106 kg ha⁻¹ y 109 kg ha⁻¹, respectivamente, cifras que representan cerca del 27% del fertilizante aplicado. Los valores de Ndds son cercanos a 300 kg N ha⁻¹ para los tratamientos con dosis óptimas, mientras que en los tratamientos con dosis excesivas fueron por encima de 300 llegando a cifras cercanas a 350 kg N ha⁻¹ (Tabla 2). Estas cantidades altas de N derivado del suelo podrían deberse a los antecedentes en el manejo de la parcela, destacando la acumulación de N. Estos resultados contradicen aparentemente la observación de Zagal *et al.* (2003) en un suelo Volcánico (Typic Melanoxerand) en el que estudiaron una rotación de cultivos de maíz trigo por 4 años y llegaron a concluir que los residuos de maíz no constituyeron una fuente de N importante para los cultivos siguientes y que el manejo de residuos (adición extra de C) no conducía a una mayor retención de N en el sistema. En cualquier caso, la utilización de cultivos cubierta proporcionaría mejoras a largo plazo del suelo en materia orgánica y propiedades relacionadas Teasdale *et al.*, (2008).

Tabla 2. Eficiencia de uso del nitrógeno (EUN) expresada como porcentaje del N aplicado con el fertilizante, fracción del N derivado del fertilizante (Nddf) y fracción del N derivado del suelo (Ndds) para cada tratamiento.

Tratamiento	Nddf ¹	Ndds ¹	EUN ³
	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	%
Zm ₂₅₀ -Lm	96,98 ab	285,41 b	38,24 a
Zm ₂₅₀ -B	83,20 b	299,04 b	33,28 b
Zm ₄₀₀ -B	108,71 a	347,12 a	27,18 bc
Zm ₄₀₀ -Lm	106,19 a	306,85 b	26,39 c
² P value	0,0456	0,0376	0,0121

¹Valores promedio de los tratamientos. Letras diferentes en la columna indican diferencias estadísticamente significativas. En base a la comparaciones múltiples de LSD Fischer (α ≤ 0,05);

² P value (< 0,05) corresponde a diferencias estadísticas significativas.

³ EUN Total es en base a la suma de todas las partes de la planta.

Es relevante destacar que EUN fue mayor en los tratamientos con 250 kg N ha⁻¹ que en los en los que recibieron 400. Ello nos permitió inferir que este efecto podría deberse al tiempo de aplicación. Dado que en las primeras etapas de

crecimiento el aporte del suelo suple la demanda de N del cultivo Lindquist *et al.*, (2010) y que casi el 50% del N total acumulado a madurez fisiológica es absorbido entre los estadios V3 y floración Ciampitti *et al.*, (2010); las pérdidas de N durante las fases iniciales serán menores, lo que aumenta la EUN en los tratamientos de 250 kg N ha⁻¹ en los que no se aplicó en siembra.

Por otro lado, observamos que existieron diferencias estadísticas significativas en la EUN entre los tratamientos (Tabla 2). Así, el tratamiento Zm₂₅₀-Lm que recibió dosis de 250 kg N ha⁻¹ combinado con maíz-cultivo cubierta presentó una EUN de 38%. Sin embargo, la misma dosis de N asociada a una rotación maíz-barbecho manifestó tan solo un 33% de eficiencia de uso del N. En el caso del tratamiento de Zm₂₅₀-Lm fue muy semejante a los reportados por Nario *et al.* (2012) en un clima mediterráneo con una precipitación media anual 550 mm y temperatura media 15°C y un manejo de riego por surcos. En las dosis excesivas como son los tratamientos Zm₄₀₀-B y Zm₄₀₀-Lm que corresponden a una fertilización de 400 kg N ha⁻¹ se obtuvo una EUN del 27 y 26%, respectivamente (Tabla 2).

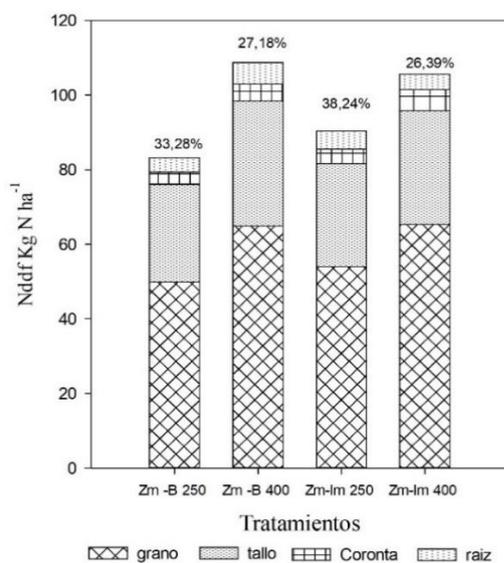


Fig 1. Eficiencia de uso de Nitrógeno (EUN) en los tratamientos y distribución del N en el maíz.

Se observó que los tratamientos Zm₂₅₀-Lm y Zm₂₅₀-B presentaron mayores EUN que los tratamientos que recibieron dosis excesivas de 400 kg N ha⁻¹ (Fig. 1). Sin embargo, Zm₂₅₀-Lm y Zm₂₅₀-B absorbieron menos N proveniente del fertilizante. Es destacable que en todos los tratamientos cerca del 40% del N absorbido se concentró en el grano (rango de 50 – 65 kg N ha⁻¹), lo cual corrobora el supuesto de que la cantidad de N absorbido en post-floración se encuentra directamente determinada por la demanda del grano (Ciampitti *et al.*, 2010; Havlin *et al.*, 2005).

De manera general esta baja EUN proveniente del fertilizante podría deberse a las labores de manejo de suelo tal como lo

señala Pino *et al.* (2002), quien observó que un suelo similar al utilizado en este experimento en condiciones de cero labranza y sin quema de rastrojo, era capaz de suministrar una elevada cantidad de N por mineralización. Por otro lado, Gonzales *et al.*, (2016) reportaron que los valores de EUN fueron mayores en suelos de textura arcillosa con dosis bajas de N, frente a los suelos de textura gruesa y dosis alta. Nuestro experimento tenía un suelo de textura franca, por lo que se encontraría en una situación intermedia. Así mismo, se trata de un suelo con un pH muy elevado (8,99) y en vista que el rango óptimo para la absorción del N por el cultivo es de 6 – 8 pudo afectar a una baja NUE. Además hay que tener en cuenta que en un pH elevado es de esperar que las pérdidas por volatilización de urea sean altas.

3.2. Materia seca, Rendimiento y EUN en el grano.

En la Tabla 3, podemos observar el rendimiento de grano, donde los tratamientos tuvieron diferencias estadísticas significativas. Se observó que los tratamientos con dosis óptimas donde se aplicó 250 kg N ha⁻¹ tuvieron menor rendimiento respecto a las dosis excesivas donde se aplicó 400 kg N ha⁻¹. Estos rendimientos son elevados y en consonancia con los indicados para el maíz híbrido empleado en este experimento, al que se le asigna rendimientos por encima de 20 Mg ha⁻¹ (Pioneer, 2018). El tratamiento Zm₂₅₀-B presentó un rendimiento de 16 Mg ha⁻¹ a comparación con la combinación de dosis óptima con la maíz-cultivo cubierta (*L. multiflorum*) que registró un rendimiento de 17,2 Mg ha⁻¹, a pesar de que el Nddf fue de tan solo 92 kg N ha⁻¹. Lo anterior, podría estar relacionado con que el aporte del suelo que fue significativo para poder suplir la demanda de N del cultivo, por ello la EUN fue de 38% lo que podría deberse a las prácticas de manejo, como incorporación de rastrojos, labranza y dosis realizadas durante tres años de rotaciones. Siendo la práctica más relevante la dosis y el tiempo de aplicación en vista de que se aplicó la segunda dosis de N en la fase V8. Tal como señala Cueto *et al.* (2013), que estudiaron la aplicación de N en forma fraccionada en maíz forrajero, durante el ciclo de crecimiento la mayor eficiencia se da en la fase V6, que es cuando el maíz inicia el crecimiento de los órganos vegetativos y los órganos reproductivos se están diferenciando. Sin embargo, también se debe considerar la gestión del riego tal como lo considera Lasa *et al.* (2011), quienes señalan que la eficiencia de N en el cultivo de maíz está influenciada por el riego. Estos autores indican que en el riego por surcos se provocan situaciones de déficit hídrico temporal y se manifiestan mayores pérdidas de N por lixiviación y desnitrificación, lo cual al final se traduce en un menor rendimiento de grano. En principio en nuestro estudio la aplicación de agua se realizó usando riego por goteo y ajustada a las necesidades del cultivo, Allen *et al.*, (2016) por lo que se esperaría que no fuese un causa relevante de la baja EUN registrada; sin embargo, posteriormente se verá que las pérdidas de lixiviación de nitratos fueron relevantes por las simulaciones de riego tal como lo hacen los agricultores de Chile, Salazar y Nájera (2011).

Tabla 3. Rendimiento de grano, materia seca y EUN en la fracción grano.

Tratamientos	Rendimiento	Biomasa	EUN
	grano		Grano
	Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	%
Zm ₄₀₀ -B	19,42 a	27,57 a	16,22 c
Zm ₄₀₀ -Lm	18,72 a	27,53 ab	16,34 c
Zm ₂₅₀ -Lm	17,24 b	25,76 bc	23,68 a
Zm ₂₅₀ -B	16,08 c	24,80 c	19,92 b
<i>P value</i> ²	0,0201	0,0456	0,0121

Valores promedio para los tratamientos. Letras diferentes en la columna indican diferencias estadísticamente significativas. En base a la comparaciones múltiples de LSD Fischer ($\alpha \leq 0,05$);

P value ($< 0,05$) corresponde a diferencias estadísticas significativas.

Por otro lado los tratamientos Zm₄₀₀-B y Zm₄₀₀-Lm presentaron los rendimientos en grano más altos, cercanos a 19 Mg ha⁻¹. Estos rendimientos próximos a los reportes del proveedor, Pioneer (2018). De hecho se vuelve a mencionar al tratamiento con dosis óptima y asociada a un cultivo cubierta (Zm₂₅₀-Lm) presentó un rendimiento destacable lo cual se podría deber a la aplicación oportuna del N fertilizante. Estos resultados coinciden con los estudios realizados por Snapp y Surapur (2017) que durante 8 años evaluaron la cobertura de centeno en invierno vs. barbecho en una secuencia de rotaciones maíz-maíz-soja y concluyeron que los rendimientos de maíz no se redujeron en parcelas con cubierta de centeno en invierno. Igualmente, estos autores observaron que el centeno como cultivo cubierta fue una herramienta eficaz en la gestión del N.

Finalmente las cantidades de materia seca total de los tratamientos Zm₄₀₀-B y Zm₄₀₀-Lm, concentraron 29,5 y 26,9 Mg ha⁻¹, respectivamente considerando la raíz, el tallo y la coronta (= zuro). Por otra parte, los tratamientos con dosis óptimas: Zm₂₅₀-B y Zm₂₅₀-Lm produjeron 23,2 y 25,8 Mg ha⁻¹, respectivamente. En este caso, destaca el tratamiento Zm₂₅₀-Lm que se instaló sobre una rotación de cultivo con (*L. multiflorum*) y con una dosis de 250 kg N ha⁻¹ y cuyo rendimiento no se diferenció estadísticamente del tratamiento Zm₄₀₀-Lm. Por ello podemos observar que el rendimiento del grano y acumulación de materia seca tienen mayor relación con el tiempo de aplicación y no con la dosis. En este sentido, los resultados coinciden con la recomendación de la tecnología de fertilización 4R, que implica fertilizar con la fuente, dosis, tiempo y lugar correcto (Johnston y Bruulsema, 2014).

3.3. Lixiviación de Nitrógeno Inorgánico Disuelto

En la Figura 2 podemos observar el comportamiento del NID durante el período del cultivo de maíz. En particular, se puede visualizar el comportamiento de los tratamientos en los días 47, 92, 122, 158 que corresponde a las fases V7, V9, VT, R3

del cultivo de maíz.

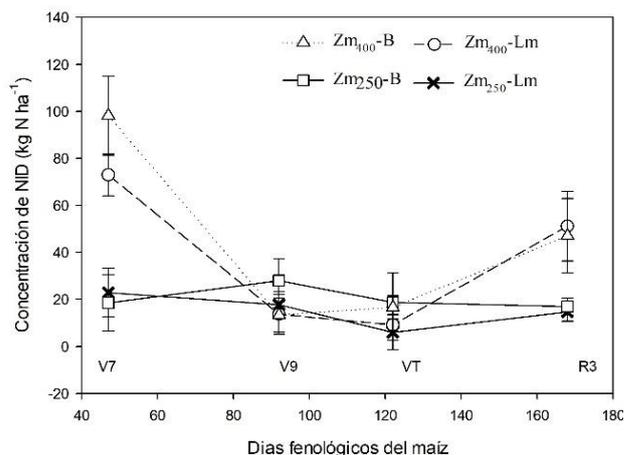


Fig. 2. Nitrógeno inorgánico disuelto para los diferentes momentos de muestreo y tratamientos.

En el análisis de los lixiviados recolectados se observó que la cantidad estuvo influenciada por la gestión del riego. Así, bajo una simulación de eventos de lluvia, equivalente a una precipitación de 25 mm día⁻¹ en cuatro eventos, se pudo observar que cuando el cultivo de maíz se encontraba a 47 días de siembra (V7) el tratamiento Zm-Lm (400 kg N ha⁻¹) presentó las mayores pérdidas de NID llegando a cantidades de 98 kg N ha⁻¹, concentrando más del 58% en forma de NO₃⁻, seguido del tratamiento Zm₄₀₀-B (Fig. 2). Esto nos indica que las pérdidas de lixiviación de NID se asocian a las dosis excesivas de N y están relacionadas con la baja EUN. Este dato es muy relevante en vista que la fertilización en estos tratamientos se presentó en forma fraccionada, aplicando 150 kg de N ha⁻¹ al momento de la siembra tal como lo realizan los agricultores en Chile Nájera *et al.*, (2015). Lo anterior confirmó la información publicada por Cueto *et al.* (2013), donde indican que durante la fase V0 del maíz el requerimiento de N es bajo y la demanda puede ser suplida por el aporte del suelo lo que nos permitió inferir que el N fertilizante aplicado se pierde en el sistema y por ello los valores de NID son más altos en las primeras muestras de lixiviados. Adicionalmente, también podemos relacionarlo a la baja evapotranspiración donde en los primeros estadios el suelo está más descubierto y se produce mayor percolación, tal como lo percibieron Salazar *et al.*, (2019) en un sistema de barbecho continuo donde se produjo la percolación profunda más alta, lo que denotaba la ausencia de evapotranspiración.

Por otro lado en este estudio resalta el tratamiento con dosis excesiva de N combinada con (*L. multiflorum*) tienden a presentar mayores valores de lixiviación NID. Estos resultados se asemejan a lo obtenido por Sánchez *et al.* (2014), donde determinaron que la principal forma de pérdidas de N es como nitrato (representado el 49% del total) y que se asociaba más a los tratamiento con altos contenidos de materia orgánica (MO) y no al tipo de fertilizante utilizado. En el tratamiento Zm₄₀₀-Lm, podría haberse

acumulado alta cantidad de nitrato derivada por la mineralización de los niveles altos de MO provenientes de la incorporación de rastrojos del maíz y *L. multiflorum* en la preparación del suelo para la siembra del maíz. En el resto de tratamientos el aporte de N fue más ajustado a las necesidades del cultivo, lo que hizo que las pérdidas por lixiviación de nitratos fueran menores.

Por otra parte, los cuatro tratamientos en el segundo y tercer muestreo V9 y VT respectivamente, presentaron un comportamiento similar, donde se pudo evidenciar que las pérdidas de NID tienden a reducirse a cantidades de 6 kg N ha⁻¹, siendo el 80% de las pérdidas en forma NO₃. Esto podría deberse a que la máxima demanda de N por el maíz se manifiesta a partir de V8 Bundy y Andrasky (2005), por lo que la planta absorbe mayor cantidad de N del suelo y reduce las pérdidas de N. Esto ocurre incluso a pesar de que se realizó la aplicación de la segunda dosis (250 kg N ha⁻¹) en V8. Sin embargo, a medida que transcurre el tiempo las pérdidas de NID tienden a incrementar sobre todo en los tratamientos con dosis excesivas de N (Fig. 2).

Adicionalmente en el ciclo de mediciones también se pudo observar que las mayores concentraciones de NID se dan en los muestreos I, IV, contando con las menores concentraciones en el muestreo II y III (Fig. 2). Finalmente se observó que, de manera general, el tratamiento Zm₂₅₀-Lm presentó menores concentraciones de NID. Esto concuerda con los estudios de Salazar *et al.*, (2019), quienes concluyeron que una rotación de cultivos con maíz con dosis óptimas y cultivo cubierta (*L. multiflorum*) tuvieron las cargas NID más bajas en un ensayo de columna de suelos.

Considerando los datos obtenidos de NO₃⁻ y NH₄⁺ (kg N ha⁻¹) podemos deducir que la cantidad de NID en el suelo está relacionada con la gestión del riego. Los riegos iniciales fueron abundantes y ocasionaron pérdidas de lixiviación del NID acumulado en el suelo. Estos resultados coinciden con lo que señalan Bortolotto *et al.* (2012), quienes evaluaron la eficiencia del N fertilizante con urea marcada al 5% de átomos en exceso de ¹⁵N en un clima tropical como el de Brasil en el cultivo de café. Por otro lado en un clima Mediterráneo, Vázquez *et al.* (2006) mostraron que el 80% de la lixiviación se generó debido al riego excesivo y una baja demanda de agua y N en el cultivo de tomate durante las 4 semanas siguientes a la plantación.

Adicionalmente, en los lixiviados intentamos medir el exceso de átomos ¹⁵N, pero no pudimos debido a la dificultad de realizar la determinación en muestras líquidas.

4. CONCLUSIÓN

En el estudio se determinó mediante la aplicación de técnicas isotópicas de ¹⁵N que las dosis excesivas (400 kg N ha⁻¹) tienen un EUN de tan sólo el 28%, sin mostrar diferencias estadísticamente significativas en los sistemas de cultivo maíz-barbecho o maíz-cultivo cubierta. Se observó que la

mayor absorción de N proviene de la mineralización del suelo y no del fertilizante. Mientras que utilizando la dosis óptima de 250 kg N ha⁻¹ en una rotación de maíz cultivo cubierta (*L. multiflorum*) se aumentó la EUN hasta un 40%. Siendo un factor relevante el momento de aplicación del fertilizante, obteniéndose una mayor eficiencia cuando se suprimió la fertilización en siembra. Así los valores de EUN disminuyeron al aumentar la dosis de fertilización.

Las pérdidas más altas de N por lixiviación se presentaron en los tratamientos con dosis excesivas de N. Particularmente en el tratamiento que combinó la incorporación de los residuos del cultivo cubierta con una elevada fertilización en pre-siembra. Al utilizar *L. multiflorum* como cultivo cubierta, el aumento de la dosis de fertilizante de 250 a 400 kg N ha⁻¹ incrementó el rendimiento de maíz en un 8%; mientras que cuando el suelo quedó en barbecho el aumento fue del 20%. Esto indica que el cultivo cubierta contribuyó a reciclar el N en el sistema suelo-cultivo.

De acuerdo a los resultados obtenidos se sugiere que se realice más estudios en el sistema de rotación de cultivo de maíz - cultivos cubierta y dosis óptima de N a fin de aumentar la EUN y reducir los procesos de contaminación difusa de N de aguas superficiales y subterráneas.

Agradecimientos, Este trabajo fue financiado por el proyecto RLA5077 titulado "Enhancing Livelihood through Improving Water Use Efficiency Associated with Adaptation Strategies and Climate Change Mitigation in Agriculture (ARCAL CLVIII)" y el proyecto FONDECYT Regular 2015 N°1150572. Se realizó con la colaboración de la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN) por medio de sus profesionales como el Sr. Marco Acuña.

5. BIBLIOGRAFIA

- AGRIMED (Centro de Agricultura y Medioambiente). 2017. Atlas agroclimático de Chile. Tomo III: Regiones de Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins y del Maule. Universidad de Chile y Fundación para la Innovación Agraria (FIA), Santiago, Chile.
- Allen, R.G., L. S. Pereira, D. Raes y M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO riego y drenaje 56. Rome, Italia 277 p.
- Bowman, G., C. Shirley y C. Cremer. 1998. Benefits of cover crops. In *Managing Cover Crops Profitably* (Ed. A. Clark), pp. 9–11. Beltsville, USA: Sustainable Agriculture Network.
- Bundy, L.G. y T.W. Andraski. 2005. Recovery of fertilizer nitrogen in crop residues and cover crops on an irrigated sandy soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69, 640–648.
- Bortolotto, R. P., I.P. Bruno, K. Reichardt, L.C. Timm, T. J. Amado, y A. Ferreira. 2012. Nitrogen fertilizer (¹⁵N) leaching in a central pivot fertigated coffee crop. *Revista Ceres (Brasil)* 59(4): 466 – 475.
- CIREN. 1996. Estudio agrológico Región Metropolitana. Centro de Información de Recursos Naturales. Publicación CIREN n° 115. ISBN Obra completa 956-7153-23-x. Santiago, Chile.
- Ciampitti, I.A., M. Boxler y F. O. García. 2010. Nutrición de maíz: requerimientos y Absorción de nutrientes. *Instituto Internacional de Nutrición de plantas* 48: 14 – 18.
- Cueto, J. A., D. Guadalupe, U. Figueroa, H. M. Quiroga, A. Ramos, y J.J. Peña. 2013. Recuperación de Nitrógeno aplicado en forma fraccionada en maíz forrajero utilizando ¹⁵N. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas* 5(1): 11 – 16.
- Di Rienzo J.A., F. Casanoves. M.G. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada y

- C.W. Robledo. 2018. InfoStat versión 2018. Centro de Transferencias InfoStat, FCA, Universidad de Córdoba, Argentina.
- Faiguenbaum, H. 2003. Labranza, siembra y producción de los principales cultivos de Chile. Universidad de Chile. Santiago de Chile, Chile.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2017. El futuro de la alimentación y la agricultura. Tendencias y desafíos. Rome, Italia. 47 p.
- Havlin, J. L., S. L. Tosdale, J.D. Beaton y W.L. Nelson. 2005. Soil fertility and Fertilizers. An introduction to nutrient management. 7^o Edition Pearson Education Asia Ltd. China.
- INDAP (Instituto Nacional de Desarrollo Agropecuario). 2011. Manual de recomendaciones cultivo de maíz grano. Gobierno de Chile, Santiago de Chile 48 p.
- IAEA (International Atomic Energy Agency). 2001. Applications of nuclear techniques in soil fertility and plant nutrition studies. Use of isotope and radiation methods in soil and water management and crop nutrition. Vienna, Austria 247 p.
- INIA (Instituto de Investigación Agropecuaria). 2008. Balizas de rotación corta asociadas a avena. Boletín informativo N° 64. Gobierno de Chile. Santiago de Chile. 4 p.
- García-González, I., C. Hontoria, J.L. Gabriel, M. Alonso-Ayunso, y M. Quemada. 2018. Cover crops to mitigate soil degradation and enhance soil functionality in irrigated land. *Geoderma* 322: 81-88.
- Gabriel, J. L., M. Alonso-Ayuso, I. García-González, C. Hontoria y M. Quemada. 2016. Nitrogen use efficiency and fertiliser fate in a long-term experiment with winter cover crops. *European Journal of Agronomy* 79: 14 -22.
- Gabriel, J.L. y M. Quemada. 2011. Replacing bare fallow with cover crops in a maize cropping system: yield, N uptake and fertiliser fate. *European Journal of Agronomy* 34: 133-143
- González, A. I. 2012. Determinación de destino del nitrógeno aplicado a un cultivo de sésamo mediante la técnica isotópica. Tesis de Magister. Universidad Nacional de Asunción. Facultad de Ciencias Agrarias. San Lorenzo, Paraguay 113 h.
- Johnston, A.M. y T.W. Bruulsema. 2013. 4R Nutrient stewardship for improved nutrient use efficiency. *El Sevier* 83: 365 – 370.
- Landriscini, M. R., J.A. Galantini y J.M. Martínez. 2015. Eficiencia de recuperación de nitrógeno por métodos de la diferencia y de la dilución isotópica. *Ciencia Suelo (Argentina)* 34: 155 -162.
- Lasa, B., I. Irañeta, J. Muro, I. Irigoyen y P.M. Aparicio. 2011. Isotopic composition of maize as related to N-fertilization and irrigation in the Mediterranean Region. *Scientia Agrícola (Brasil)* 68(2): 182 -190.
- Lindquist, J. I., S.P. Evans, C. A. Shapiro y S.Z. Knezevic. 2010. Effect of nitrogen addition and weed interference on soil nitrogen and corn nitrogen nutrition. *Weed Technology* 24: 50 – 58.
- Nario, A., A.M. Parada, X.Videla, M. Casanova y O. Seguel. ¹⁵N Fertilizer efficiency in Maize Cropped by small farmers at the VI Region of Chile. International symposium on Managing soils for food security and climate change adaptation and mitigation. 2012, Viña Australia.
- 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. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 15, 84–97.
- ODEPA (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias), Chile.2018. Cereales: Producción, precios y comercio exterior de Trigo, Maíz y Arroz. Gobierno de Chile, Santiago: ODEPA. 60 p.
- Opazo, J. D., A. Luchsinger y O. Neyra. 2008. Factores de suelo y planta para determinar la fertilización nitrogenada en maíz dulce en la zona central de Chile. *Revista de Agricultura de Zonas Áridas IDESA (Chile)* 26(2) 53 -58.
- Pino, I., J.L. Rouanet, F. Zapata, A.M. Parada y A. Nario. 2002. Eficiencia de recuperación de nitrógeno en el sistema planta-suelo en un cultivo de trigo bajo manejo de suelo alternativos en un ultisol de la IX región. *Agricultura Técnica (Chile)* 62(2): 272 - 283.
- PIONEER. 2018. Catálogo de Híbridos de maíz. Híbrido 33Y74 de maíz.
- Rodríguez, J. 1993. Manual de fertilización. Facultad de Agronomía, Pontificia Universidad Católica de Chile. Colección en Agricultura.
- Reinhardt, R y R. Roussow. 1991. Use of the ¹⁵N isotope dilution technique to study the of mineral nitrogen on biological nitrogen fixation in red clover Abstract pp.193 – 200.
- Snapp, S y S. Surapur. 2017. Rye cover crop retains nitrogen and doesn't reduce corn yields. *Soil & Tillage Research.* 180: 107-115.
- Sadzawka, A., A. Carrasco, R. Grez, M. Mora, H. Flores y A. Reaman. 2006. Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile. Revisión 2006. Manual INIA y CNA de la Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo. Centro regional de investigación La Platina, Chile 164 p.
- Salazar, O., L. Balboa, K. Peralta, M. Rossi, M. Casanova, Y. Tapia, R. Singh y M. Quemada. 2019. Effect of cover on leaching of dissolved organic nitrogen and carbón in a maize-cover crop rotation in Mediterranean Central Chile. *Agricultural Water Management.* 212: 399 – 406.
- Salazar, O y F. Nájera. 2011. Contaminación de las aguas por el uso de fertilizantes nitrogenados y enmiendas orgánicas *Boletín de la Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo* 24: 147–152.
- Salazar, O. J. Vargas, F. Nájera, O. Seguel, y M. Casanova. Monitoring of nitrate leaching during flush flooding events in a coarse-textured floodplain soil. *Agriculture Water Management.* 146: 218 -227.
- Sánchez, E., C.D. Améndola y M. Soto. 2014. Nitrogen Losses by leaching in a midex grassland grazed in temperature climate. *Revista fitotecnia Mexicana* 37(3) 271 - 278.
- Teasdale, J.R., A. A. Abdul-Baki y Y. Bong Park. 2008. Sweet corn production and efficiency of nitrogen use in high cover crop residue. *Agronomy for sustainable Development. Journal.* 28: 559 -565.
- Vázquez, N., A. Pardo, M.L. Suso y M. Quemada. 2006. Drainage and nitrate leaching in processing tomato under drip irrigation and plastic mulching. *Agriculture Ecosystems & Environment.* 112: 313-323.
- Zagal, E., N. Rodríguez, I. Vidal y G. Hofmann. 2003. Eficiencia de uso y dinámica del nitrógeno en una rotación con y sin uso de residuos. *Agricultura Técnica (Chile)* 63(3): 293 – 310.