



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE POSTGRADO

**EFFECTOS DE LA ROTACIÓN (MAÍZ–CULTIVOS CUBIERTA) Y
FERTILIZACIÓN NITROGENADA, EN LA LIXIVIACIÓN DE
NITRÓGENO Y CARBONO ORGÁNICO DISUELTOS. TERCER AÑO
DE EVALUACIÓN**

Tesis para optar al Grado de Magíster en Manejo de Suelos y Aguas

ALICIA MARIELA GALDAMES VARGAS

Ingeniera en Recursos Naturales Renovables

Directores de Tesis

Dr. Osvaldo Salazar Guerrero

Dr. Miguel Quemada Sáenz-Badillos

Profesore/as consejero/as

Dra. Yasna Tapia Fernández

MSc. Manuel Casanova Pinto

SANTIAGO - CHILE

2021

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE POSTGRADO

EFECTOS DE UNA ROTACIÓN (MAÍZ-CULTIVOS CUBIERTA) Y FERTILIZACIÓN
NITROGENADA, EN LA LIXIVIACIÓN DE NITRÓGENO Y CARBONO ORGÁNICO
DISUELTOS-TERCER AÑO DE EVALUACIÓN

EFFECTS OF A (MAIZE-COVER CROP ROTATION) AND NITROGEN
FERTILIZATION ON THE LEACHING OF DISSOLVED NITROGEN AND ORGANIC
CARBON. THIRD YEAR OF EVALUATION

Tesis presentada como parte de los requisitos para optar al Grado de Magíster en Manejo de
Suelos y Aguas

ALICIA MARIELA GALDAMES VARGAS

	Calificaciones
DIRECTORES DE TESIS	
Osvaldo Salazar Guerrero Ingeniero Agrónomo, MS, Ph.D.	7,0
Miguel Quemada Sáenz-Badillos Ingeniero Agrónomo, MS, Ph.D.	6,5
PROFESORES CONSEJEROS	
Yasna Tapia Fernández Ingeniera en Alimentos, Ph.D.	6,5
Manuel Casanova Pinto Ingeniero Agrónomo, MSc.	6,8

Santiago, Chile
2021

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS

Agradecer a cada una de las personas con las que pude compartir durante esta etapa de mi vida, con diversos aprendizajes y experiencias que recordaré siempre.

Al Profesor Osvaldo, que sin duda ha sido un guía fundamental en mi crecimiento profesional. Siempre estaré agradecida de su constante apoyo, confianza y motivación durante mi etapa universitaria.

Al Profesor Miguel, por su colaboración en el desarrollo de mi investigación, y por su acogida durante mi pasantía de investigación en el CEIGRAM de la Universidad Politécnica de Madrid.

Al laboratorio de Química de Suelos y Aguas de la Universidad de Chile, especialmente a la Profesora Yasna, Sra. Marisol, Sra. Consuelo, Benjamín y Edouard, fueron un gran pilar de apoyo durante este proceso, muchas gracias por recibirme nuevamente y los momentos compartidos.

A los académicos de la Escuela de Postgrado de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Chile, por todos los conocimientos brindados. Y a sus funcionarias Sra. Jeanette, Marjorie y Sra. Mercedes, por su amabilidad y compañía durante este proceso.

Al Laboratorio de Ecología de Suelos de la Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza, por su buena disposición para contribuir al desarrollo de esta investigación.

A todos mis amigos y compañeros Silvi, Carlita, Dani, Julián, Marce, Prisci, Kiri y Lili, muchas gracias por el apoyo, compañía, y por sobre todo los lindos momentos compartidos.

A mi familia, pilar fundamental en cada etapa de mi vida, sin ustedes esto no sería posible, a mis padres Alicia y Alfredo, mi hermana Daniela, y no puedo dejar de mencionar a mi Plomy, compañero fiel en las noches de estudio.

FONDECYT Regular N°1150572 “Effect of Inorganic Nitrogen Fertilization And Cover Crops On Maize Production In Dissolved Inorganic And Organic Nitrogen Leaching In A Coarse-Textured Soil”.

FONDEQUIP N°160084 “Analizador Elemental CNS”.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3
HIPÓTESIS	5
OBJETIVOS	5
Objetivo general	5
Objetivos específicos	5
MATERIALES Y MÉTODOS	6
Ubicación del estudio.....	6
Material biológico	6
Tratamientos y diseño experimental	6
Manejo del experimento.....	8
Establecimiento	8
Siembra – Cosecha.....	9
Fertilización.....	9
Riego	10
Variables medidas	10
Análisis muestras de agua	10
Análisis muestras de material vegetal	11
Análisis estadísticos	11
RESULTADOS	12
Ensayo 1: lixiviación en suelo desnudo y cultivos cubierta permanentes con fertilización nitrogenada.....	12
Balance hídrico.....	12
Biomasa aérea	13
Lixiviación de nitrógeno y carbono orgánico	14
Parámetros fisicoquímicos de los lixiviados	16
Relación cultivo cubierta permanente y fertilización nitrogenada en la lixiviación de nitrógeno y carbono orgánico.....	18
Ensayo 2: lixiviación en maíz-barbecho y rotación maíz-cultivos cubierta con fertilización nitrogenada.....	19
Balance hídrico.....	19
Biomasa aérea	20
Lixiviación de nitrógeno y carbono orgánico	22
Parámetros fisicoquímicos de los lixiviados	25

Relación rotación maíz-cultivo cubierta y fertilización nitrogenada en la lixiviación de nitrógeno y carbono orgánico.....	27
DISCUSIÓN	28
Efectos de la incorporación de cultivos cubierta y fertilización nitrogenada en la lixiviación de NID.....	28
Efectos de la incorporación de cultivos cubierta y fertilización nitrogenada en la lixiviación de NOD	29
Efectos de la incorporación de cultivos cubierta y fertilización nitrogenada en la lixiviación de COD	30
CONCLUSIONES.....	32
LITERATURA CITADA	33
APÉNDICES.....	37
ANEXOS	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura de las columnas de lixiviación establecidas en el invernadero.	8
Figura 2. Balance hídrico del Ensayo 1. Periodo total de evaluación.	12
Figura 3. Percolación profunda acumulada por temporada del Ensayo 1. Periodo total de evaluación.	13
Figura 4. Biomasa aérea acumulada por temporada del Ensayo 1. Periodo total de evaluación.	13
Figura 5. Biplot del análisis de componentes principales para las variables medidas en el Ensayo 1. Tercer año de evaluación.	18
Figura 6. Balance hídrico del Ensayo 2. Periodo total de evaluación.	19
Figura 7. Percolación profunda acumulada por temporada del Ensayo 2. Periodo total de evaluación.	20
Figura 8. Biomasa aérea acumulada por temporada del Ensayo 2. Periodo total de evaluación.	21
Figura 9. Biplot del Análisis de Componentes Principales para las variables medidas en el Ensayo 2. Tercer año de evaluación.	27

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Características del material biológico utilizado en el experimento.....	6
Cuadro 2. Tratamientos utilizados en el diseño experimental del Ensayo 1.....	7
Cuadro 3. Tratamientos utilizados en el diseño experimental del Ensayo 2.....	7
Cuadro 4. Mediciones realizadas en el periodo total de evaluación.	9
Cuadro 5. Contenido porcentual de carbono y nitrógeno de la biomasa aérea del Ensayo 1. Tercer año de evaluación.	14
Cuadro 6. Cargas acumuladas de NID, NOD y COD por temporada del Ensayo 1. Periodo total de evaluación.....	15
Cuadro 7. Parámetros fisicoquímicos de los lixiviados por temporada del Ensayo 1. Tercer año de evaluación.....	17
Cuadro 8. Contenido porcentual de carbono y nitrógeno en la biomasa aérea del Ensayo 2. Tercer año de evaluación.	21
Cuadro 9. Cargas acumuladas de NID, NOD y COD por temporada del Ensayo 2. Periodo total de evaluación.....	23
Cuadro 10. Parámetros fisicoquímicos de los lixiviados por temporada del Ensayo 2. Tercer año de evaluación.....	26

RESUMEN

En campos de maíz, la excesiva aplicación de fertilizantes representa un alto riesgo de lixiviación de nitrógeno inorgánico disuelto (NID) hacia las aguas subterráneas. La incorporación de cultivos cubierta (CC) se plantea como la principal medida destinada a disminuir la lixiviación de NID. Sin embargo, se ha relacionado el crecimiento de los CC con un incremento de las concentraciones de nitrógeno orgánico disuelto (NOD) y carbono orgánico disuelto (COD) en la solución suelo. En este estudio se evaluó el efecto combinado de las inclusiones de CC y fertilización nitrogenada, sobre la lixiviación de NID, NOD y COD desde columnas de suelo ubicadas en un invernadero con temperatura controlada (25 °C). Fueron analizados 13 tratamientos con 4 repeticiones, considerando 2 ensayos: 1) suelo desnudo en comparación con CC permanentes (*Lolium multiflorum* o *Trifolium repens*), con 0 ó 150 kg N ha⁻¹; y 2) rotación maíz-barbecho en comparación con la rotación maíz-CC (*L. multiflorum* o *T. repens*), con 250 ó 400 kg N ha⁻¹. Durante cinco temporadas de evaluación (junio de 2016 a octubre de 2018) se aplicaron cargas de 4 L de agua para generar lixiviados, midiendo la concentración de NID, NOD y COD. Los resultados obtenidos indican que la incorporación de CC permanentes disminuye significativamente la lixiviación de NID en relación con el suelo desnudo; se observó una reducción promedio de las cargas de NID de 57% con la cubierta *T. repens* y de 90% con *L. multiflorum*. Sin embargo, se confirmó que la inclusión de CC permanentes incrementa la lixiviación NOD y COD, especialmente en los tratamientos con *T. repens*. El Ensayo 2 demostró que reemplazar el barbecho por un CC de *L. multiflorum* con fertilización N óptima (250 kg N ha⁻¹), fue la medida más eficaz para disminuir la lixiviación de NID. Por el contrario, la rotación maíz-CC de *T. repens* y fertilización N excesiva (400 kg N ha⁻¹) generó la mayor carga de NID. En general, la incorporación de CC en la rotación con maíz incrementó la lixiviación de NOD y COD por la mayor acumulación de biomasa. Se recomienda evaluar a escala de campo el efecto combinado de la rotación maíz-CC y fertilización N óptima, como una medida para proteger las cuencas hidrográficas de la contaminación por N desde suelos agrícolas de la zona Mediterránea de Chile Central.

Palabras claves: Agricultura, Contaminación difusa, Prácticas sustentables, Calidad del agua.

ABSTRACT

In maize fields, excessive application of fertilizers represents a high risk of leaching of dissolved inorganic nitrogen (DIN) into groundwater. Incorporation of cover crops (CC) is proposed as the main measure aimed at reducing leaching of DIN. However, growth of CC has been related to an increase in concentrations of dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic carbon (DOC) in the soil solution. In this study, combined effect of CC inclusions and nitrogen (N) fertilization on leaching of DIN, DON and DOC from soil columns located in a greenhouse with controlled temperature (25 °C). They were analyzed 13 treatments with 4 repetitions, considering 2 trials: 1) bare soil in comparison with permanent CC (*Lolium multiflorum* o *Trifolium repens*), with 0 or 150 kg N ha⁻¹; and 2) maize-fallow rotation compared to the maize-CC rotation (*L. multiflorum* o *T. repens*), with 250 or 400 kg N ha⁻¹. During five evaluation seasons (June 2016 to October 2018) loads of 4 L of water were applied to generate leachates, measuring the concentration of DIN, DON, and DOC. The results obtained indicate that the incorporation of permanent cover crops significantly reduces leaching of DIN in relation to bare soil; an average reduction of DIN loads of 57% was observed with *T. repens* cover and of 90% with *L. multiflorum*. However, it was confirmed that the inclusion of permanent cover crops increases DON and DOC leaching, especially in with *T. repens* treatments. Trial 2 demonstrated that replacing fallow by *L. multiflorum* with optimal N fertilization (250 kg N ha⁻¹), was the most effective practice to reduce leaching of DIN. By contrast, maize-CC rotation of *T. repens* and excessive N fertilization (400 kg N ha⁻¹) generated the highest DIN load. In general, incorporation of cover crops in the rotation with maize increased leaching of DON and DOC due to greater accumulation of biomass. It is recommended to evaluate on a field scale combined effect of the maize-cover crop rotation and optimal N fertilization, as a measure to protect hydrographic basins from N contamination at agricultural soils of Mediterranean Central Chile.

Keywords: Agriculture; Non-point pollution; Sustainable practices; Water quality.

INTRODUCCIÓN

La contaminación difusa por nitrógeno (N) es uno de los principales impactos ambientales de la agricultura, provocando una grave amenaza para la salud humana y los ecosistemas del mundo (FAO, 2018). El nitrógeno inorgánico disuelto (NID), como el nitrato (N-NO_3) y amonio (N-NH_4) constituyen las formas dominantes de N soluble, y han sido establecidas como las más importantes en el proceso de lixiviación en suelos cultivados, especialmente en periodos de riego excesivo o precipitaciones invernales (Casalí *et al.*, 2008; Vitousek *et al.*, 2009; Salazar *et al.*, 2014).

El maíz es el cultivo que emplea más fertilizantes en su producción a nivel mundial (Heffer, 2013), representado un alto riesgo de lixiviación de NID debido a la baja eficiencia del uso del N. Tal es el caso, de los campos de maíz de la zona mediterránea de Chile, donde se estiman excedentes de N que varían entre 232 y 1.466 kg N ha⁻¹ (Corradini *et al.*, 2015). Esta preocupación se incrementa en campos en barbecho durante la temporada otoño-invierno, cuando ocurren los eventos de precipitación intensiva, existiendo más posibilidades de lixiviar NID a través del perfil de suelo (Nájera *et al.*, 2015).

Esta problemática constituye la base para la principal medida destinada a disminuir la lixiviación de NID, mantener los campos verdes con cultivos de invierno (Böckman *et al.*, 1990). En la literatura se define dentro del término cultivo cubierta (CC), ya que tiene por objetivo proporcionar servicios agrícolas o ecológicos, sin obtener ningún beneficio comercial de la biomasa producida (Justes, 2017). Diversos estudios han comprobado la eficacia de los CC para reducir el riesgo de lixiviación de NID hacia los acuíferos (Salmerón *et al.*, 2011; Gabriel *et al.*, 2012; Salazar *et al.*, 2019). Sin embargo, se considera que el éxito de esta medida puede estar determinado por las especies seleccionadas en el sistema de cultivo; por una parte, se ha demostrado que las no leguminosas son muy efectivas en el agotamiento de los minerales del suelo, mientras que las leguminosas mejoran la fertilidad del suelo y la fijación simbiótica de N (Kramberger *et al.*, 2009). Al respecto, varios autores han concluido que solo las especies no leguminosas tienen un efecto significativo en la reducción de la lixiviación de NID (Quemada *et al.*, 2013; Kaspar *et al.*, 2012; Blanco-Canqui, 2018; Singh *et al.*, 2018). Por otro lado, se plantea que la mezcla de leguminosa y no leguminosa puede considerarse como una estrategia eficaz para el manejo de los CC, ya que permite obtener ventajas ambientales óptimas y efectos positivos en los cultivos comerciales sucesivos (Tosti *et al.*, 2014; Abdalla *et al.*, 2019).

De acuerdo con Blanco-Canqui *et al.* (2015) los CC influyen en las vías de ganancia y pérdida de carbono (C) orgánico en el suelo. Por una parte, el crecimiento de los CC se puede relacionar con un incremento del C orgánico del suelo debido a las entradas adicionales de C de la biomasa aérea y biomasa subterránea; mientras que las moléculas de C orgánico disuelto (COD) más lábiles, pueden estar susceptibles a perderse por lixiviación cuando no se encuentren interactuando con la fase de intercambio del suelo, especialmente en eventos de abundante precipitación (Bolan *et al.*, 2011; Kaiser y Kalbitz, 2012). La tasa de mineralización de los residuos vegetales tiene un rol importante en las concentraciones de materia orgánica disuelta (MOD), una baja relación C/N de los residuos vegetales, como es el caso de las leguminosas, se puede relacionar con un incremento del C y N orgánico (Gentry

et al., 2013; Wang *et al.*, 2016; Justes, 2017). Liu *et al.* (2016) señalan que existe una estrecha relación entre la lixiviación de COD y N orgánico disuelto (NOD), ya que estas formas son liberadas desde la misma fuente de materia orgánica. Por otro parte, la aplicación de altas tasas de N también es un factor importante en la producción de MOD, debido a que estimula el crecimiento de biomasa y la exudación radicular (Vinther *et al.*, 2006; Ghani *et al.*, 2010).

Estudios recientes mencionan la lixiviación de nitrógeno orgánico disuelto (NOD) como otra vía de pérdida significativa de N en sistemas agrícolas (Ros *et al.*, 2009; McGovern *et al.*, 2014; Scott y Rothstein, 2014; Kušlienė *et al.*, 2015; Hussain *et al.*, 2020). Una revisión de Van Kessel *et al.* (2009) encontró que las pérdidas de NOD representaron el 26% de las pérdidas totales de N soluble (NO_3^- y NOD) en diversos agroecosistemas, pudiendo provocar impactos en la calidad del agua.

Por lo anterior, en este estudio se evaluaron los efectos combinados de la incorporación de CC y fertilización nitrogenada en la lixiviación de NID, NOD y COD en columnas de suelo.

HIPÓTESIS

La combinación de inclusión de cultivos cubierta en las rotaciones de maíz y fertilización nitrogenada óptima (250 kg N ha^{-1}), disminuye la carga de nitrógeno inorgánico disuelto e incrementa las cargas de nitrógeno y carbono orgánico disueltos.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar el efecto combinado de las inclusiones de cultivos cubierta y fertilización nitrogenada, sobre las cargas de lixiviación de nitrógeno y carbono orgánico en columnas de suelo, durante el tercer año de evaluación.

Objetivos específicos

1. Evaluar el efecto combinado de la incorporación de cultivos cubierta permanentes y fertilización nitrogenada, sobre las cargas de lixiviación de nitrógeno y carbono orgánico durante tres años de evaluación (Ensayo 1).
2. Evaluar el efecto combinado de la rotación maíz-cultivos cubierta y fertilización nitrogenada, sobre las cargas de lixiviación de nitrógeno y carbono orgánico durante tres años de evaluación (Ensayo 2).
3. Analizar la variabilidad temporal de la percolación profunda y las cargas de lixiviación de nitrógeno y carbono orgánico, con las inclusiones de cultivos cubierta y fertilización nitrogenada.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del estudio

El estudio se realizó sobre columnas de suelo situadas en un invernadero de la Estación Experimental Antumapu, ubicada en Santiago, Chile (33°34'13" S, 70°38'5" W). La estructura es de policarbonato y sus dimensiones son 20 m de largo, 8 m de ancho y 9 m de alto, con un sistema de ventilación automática y ventanas semi-móviles para mantener una temperatura controlada (25 °C).

El suelo utilizado se encuentra clasificado por CIREN (2015) en la Serie Santiago, miembro de la Familia franca gruesa sobre arenosa esquelética, mixta, térmica de los Entic Haploxerolls. La descripción morfológica del perfil de suelo y la caracterización de las propiedades físicas y químicas, se presentan en los anexos 1, 2 y 3, respectivamente.

Material biológico

En el Cuadro 1 se muestran las características del material biológico utilizado en el experimento. Considerando las dosis recomendadas por los fabricantes, se aplicó en los periodos de siembra 5 kg ha⁻¹ de semillas de trébol blanco (Tr) y 35 kg ha⁻¹ de ballica anual (Lm). En el caso de maíz grano (Zm) se sembraron 2 semillas por columna, y luego de su emergencia solo se seleccionó la planta más vigorosa y sana. En los tratamientos combinados Tr + Lm, se utilizó una proporción de 70% Tr y 30% Lm, en base a las dosis mencionadas anteriormente.

Cuadro 1. Características del material biológico utilizado en el experimento.

Especie	Nombre común	Familia	Características
<i>Lolium multiflorum</i>	Ballica anual	Poaceae	"Winter Star II" (ANASAC).
<i>Trifolium repens</i>	Trébol blanco	Fabaceae	"Kopu II" inoculado con rizobios (ANASAC).
<i>Zea mays</i>	Maíz grano	Poaceae	Variedad tardía 33Y74 (Pioneer).

Tratamientos y diseño experimental

En el diseño experimental se establecieron trece tratamientos para representar la dinámica de lixiviación de NID, NOD y COD, considerando dos ensayos para su evaluación. El Ensayo 1 estudió el efecto del suelo desnudo y la incorporación de cultivos cubierta (CC) permanentes con dosis de N de 0 y 150 kg ha⁻¹ (Cuadro 2). Por otro lado, el Ensayo 2 representó el efecto de la rotación maíz-barbecho y rotación maíz-CC con dosis de N de 250 y 400 kg ha⁻¹ (Cuadro 3).

Cuadro 2. Tratamientos utilizados en el diseño experimental del Ensayo 1.

Tratamiento ^a	Rotación anual de cultivos	Dosis de N kg ha ⁻¹
B-B0	Barbecho – Barbecho	0
Lm-Lm0	<i>Lolium multiflorum</i> – <i>L. multiflorum</i>	0
Lm-Lm150	<i>L. multiflorum</i> – <i>L. multiflorum</i>	150
Tr-Tr0	<i>Trifolium repens</i> – <i>T. repens</i>	0
Tr-Tr150	<i>T. repens</i> – <i>T. repens</i>	150

^a B: barbecho; Lm: *Lolium multiflorum*; Tr: *Trifolium repens*; Zm: *Zea mays*.

Cuadro 3. Tratamientos utilizados en el diseño experimental del Ensayo 2.

Tratamiento ^a	Rotación anual de cultivos	Dosis de N kg ha ⁻¹
Zm-B250	<i>Zea mays</i> – Barbecho	250
Zm-B400	<i>Z. mays</i> – Barbecho	400
Zm-Lm250	<i>Z. mays</i> - <i>Lolium multiflorum</i>	250
Zm-Lm400	<i>Z. mays</i> – <i>L. multiflorum</i>	400
Zm-Tr250	<i>Z. mays</i> - <i>Trifolium repens</i>	250
Zm-Tr400	<i>Z. mays</i> – <i>T. repens</i>	400
Zm-Lm+Tr250	<i>Z. mays</i> – <i>T. repens</i> + <i>L. multiflorum</i>	250
Zm-Lm+Tr400	<i>Z. mays</i> – <i>T. repens</i> + <i>L. multiflorum</i>	400

^a B: barbecho; Lm: *Lolium multiflorum*; Tr: *Trifolium repens*; Zm: *Zea mays*.

En el estudio se estableció un diseño de cuatro bloques completamente aleatorizados, la unidad experimental corresponde a la columna de suelo, y los factores son la rotación de cultivo con fertilización N y tiempo. El factor de bloqueo corresponde a la heterogeneidad en la cantidad de luz recibida en cada bloque.

La variable respuesta se obtendrá utilizando el siguiente modelo lineal mixto (MLM):

$$Y = \mu + R_i + \tau_j + (R\tau)_{ij} + \beta_{ik} + P_{i(k)} + \epsilon_{ijk} \quad (1)$$

Donde:

Y = variable de respuesta

μ = media general

R = efecto rotación cultivo-fertilización N

τ = efecto tiempo

R_τ = interacción: rotación cultivo-fertilización N-tiempo

β = efecto bloque

P = efecto parcela

ϵ = error experimental, el cual se asume normalmente distribuido

i = número de tratamientos ($n = 13$)

j = número de temporadas ($n = 5$)

k = número de bloques ($n = 4$)

Los componentes aleatorios del modelo son el efecto bloque (β), las parcelas incluidas dentro del bloque (P) y el error experimental (ϵ). Los componentes fijos del modelo corresponden a la media general de los tratamientos (μ), el factor tratamiento (R), el tiempo (τ), y la interacción tratamiento y tiempo (R_τ).

Manejo del experimento

Establecimiento

El experimento se inició en mayo de 2015 con la instalación de 52 columnas de suelo dentro del invernadero. La Figura 1 representa la estructura de la unidad experimental, compuesta principalmente por una tubería de polietileno de alta densidad (HDPE) de 50 cm de largo y 20 cm de diámetro. La base presenta un embudo relleno con arena de cuarzo, conectado en su orificio a un tubo de PVC de 15,00 cm de largo y 2,65 cm de diámetro, recubierto por una malla metálica fina para filtrar el agua percolada. La recolección de las muestras se realizó con un bidón plástico con una capacidad de almacenaje de 4 L, que fue situado bajo la columna (Rossi, 2017).

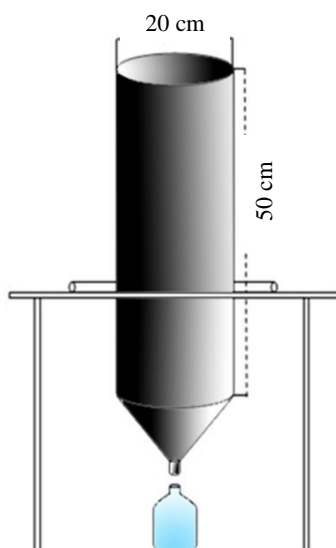


Figura 1. Estructura de las columnas de lixiviación establecidas en el invernadero.

La instalación de las columnas de suelo se realizó perforando horizontalmente la tubería de HDPE con dos cilindros de acero, que quedaron sujetos a un mesón metálico. Posteriormente, fueron rellenas de suelo considerando una profundidad de 45 cm, siguiendo la secuencia de horizontes original (ver Anexo 1). Los 5 cm restantes fueron dejados en superficie para permitir la aplicación de las cargas de agua.

El funcionamiento de las columnas comenzó con un periodo de prueba (PV-2015), para posteriormente iniciar la evaluación de los lixiviados (Cuadro 4). Cabe señalar, que el tercer año consideró las temporadas PV-2017 y OI-2018.

Cuadro 4. Mediciones realizadas en el periodo total de evaluación.

Temporada	Periodo	Cantidad de mediciones
PV-2015	Diciembre 2015 a mayo 2016	0
OI-2016 ^a	Junio 2016 a noviembre 2016	3
PV-2016 ^a	Diciembre 2016 a mayo 2017	4
OI-2017 ^a	Mayo 2017 a septiembre 2017	3
PV-2017 ^b	Octubre 2017 a marzo 2018	3
OI-2018 ^b	Abril 2018 a octubre 2018	2

^a Resultados publicados por Salazar *et al.* (2019).

^b Tercer año de evaluación.

Siembra – Cosecha

La siembra de las columnas se realizó en el inicio de las temporadas primavera-verano (PV-2015, PV-2016, PV-2017), considerando las dosis mencionadas en la sección “Material biológico”. En el Ensayo 2 fue establecido el cultivo de maíz, para posteriormente, realizar la rotación con los CC en las temporadas otoño-invierno (OI- 2016, OI-2017, OI-2018), con excepción de los tratamientos maíz-barbecho (Zm-B) que se mantuvieron con suelo desnudo.

La cosecha de las temporadas primavera-verano, se realizó considerando como referencia la madurez fisiológica del maíz. En las columnas del Ensayo 2, la mitad de la fracción cosechada de Zm fue triturada e incorporada al suelo a una profundidad de 10 cm; mientras que en el Ensayo 1, la biomasa aérea de los CC permanentes fue cortada, sin incorporar el material al suelo. En las temporadas otoño-invierno la cosecha se realizó considerando el estado fenológico grano acuoso-lechoso de la ballica anual.

Fertilización

La fertilización nitrogenada se realizó considerando distintas dosis para cada ensayo, con el objetivo de evaluar las diferencias generadas en la lixiviación de NID, NOD y COD. En el Ensayo 1 para los CC permanentes (Tr y Lm), se aplicaron dosis de 0 y 150 kg N ha⁻¹, esta última representa una fertilización excesiva del 50% en comparación con los programas de fertilización con N recomendados en Chile. En el Ensayo 2 para el maíz, fue considerada una dosis óptima de 250 kg N ha⁻¹, y una dosis excesiva de 400 kg N ha⁻¹ que representa la sobre fertilización practicada generalmente por los agricultores de Chile Central (Nájera *et al.*, 2015).

La fuente nitrogenada correspondió a salitre potásico (13,5% N y 45,0% K₂O), nivelando con cloruro de potasio (60,0% K₂O) la demanda por K en los tratamientos que no recibieron salitre potásico. En cuanto al fósforo (P), se aplicó súper fosfato triple (46% P₂O₅), considerando la dosis calculada por la capacidad tampón del suelo, para aumentar el P disponible y a los resultados de disponibilidad de P-Olsen. La aplicación de N y K se parcializó en dos fechas (Apéndice 1 y Apéndice 2), la primera dosis se aplicó al inicio de las temporadas primavera-verano junto a la siembra de las columnas, y posteriormente, en el momento que el maíz alcanzó su estadio de octava hoja (V8).

Riego

Los tratamientos fueron regados tres veces por semana, con un monto total de 1,5 L de agua en la temporada primavera-verano y 0,5 L de agua en la temporada otoño-invierno (Apéndice 4). Paralelamente, con el objetivo de obtener lixiviados de las columnas, fueron aplicadas cargas de 4 L de agua potable, simulando un riego o precipitación intensa de 130 mm.

Durante el tercer año de evaluación, en la temporada PV-2017 las cargas se aplicaron según el estado fisiológico del maíz, contemplando el estadio de quinta hoja (V5), estadio de la octava hoja (V8) y madurez fisiológica. En OI-2018, se tomaron como referente los estados fenológicos de la ballica anual, considerando el inicio de espigadura y grano acuoso-lechoso.

Variables medidas

Análisis muestras de agua

La obtención de las muestras de lixiviados se realizó transcurridas 12 h a partir de la aplicación de las cargas de agua. En los recipientes plásticos el agua percolada fue masada, y posteriormente, analizada con un medidor portátil (Hanna Instruments HI 991301, Romania) de pH, conductividad eléctrica y temperatura.

Para el análisis en laboratorio, se realizó la extracción de una submuestra de 100 mL por columna, la cual fue filtrada en filtros de pirinola de 0,45 μm , con el objetivo de obtener la fracción disuelta de N y C en el agua

La determinación de las concentraciones de NID, NOD y COD, se realizó de acuerdo a las siguientes ecuaciones (Murphy *et al.*, 2000; Jones y Willett, 2006; van Kessel *et al.*, 2009).

$$\text{NID} = \text{N-NH}_4 + \text{N-NO}_3 \quad (2)$$

$$\text{NOD} = \text{NTD} - \text{NID} \quad (3)$$

$$\text{COD} = \text{CTD} - \text{CID} \quad (4)$$

La concentración de N-NH₄ y N-NO₃ fue calculada por colorimetría con un espectrofotómetro (Hach DR 5000, USA), utilizando los métodos del ácido cromotrópico y amonio salicilato, respectivamente (Hach, 2005). El carbono total disuelto (CTD), carbono inorgánico disuelto (CID) y nitrógeno total disuelto (NTD), fueron determinados utilizando un analizador TOC-L (Shimadzu Corp., Japón) que lleva integrado un módulo (TNM-L) para cuantificar N. La metodología se basa en una combustión oxidativa de las muestras donde el C es detectado por un sensor de infrarrojo no dispersivo, mientras que el N es detectado por quimioluminiscencia. Debido a que el NTD y el NID son estimados por métodos diferentes, la cuantificación de NOD es inexacta (Lee y Westerhoff, 2005), en los casos que se obtuvo resultados negativos se asumió un valor igual a cero.

La lixiviación de NID, NOD y COD se expresó en cargas (kg ha^{-1}), calculadas como el producto del volumen de agua percolada y la concentración de soluto medida.

De forma adicional, durante el desarrollo del estudio se analizó en tres ocasiones el agua de riego, considerando la metodología mencionada anteriormente para las muestras de lixiviados. En el Apéndice 3 se presentan los resultados obtenidos.

Los materiales e instrumentos que fueron utilizados pertenecen al Laboratorio de Química de Suelos y Aguas de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile.

Análisis muestras de material vegetal

En cada columna se cosechó el componente aéreo, masando en terreno la biomasa total y obteniendo submuestras, que también fueron masadas y posteriormente secadas en un horno a 70 °C durante 72 h. De esta manera se calculó la biomasa seca por columna, la cual se expresó en Mg ha⁻¹.

Por otra parte, en el tercer año de evaluación (PV-2017 y OI-2018), se estimaron los contenidos de C y N de la biomasa seca obtenida de cada columna, utilizando un Analizador Elemental (LECO - TruMac CNS) perteneciente al Laboratorio de Ecología de Suelos de la Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza de la Universidad de Chile.

Análisis estadísticos

Los datos de cada ensayo fueron analizados mediante modelos lineales mixtos (MLM), considerando lo planteado en la ecuación 1. Para determinar si hubo efectos de los tratamientos en las variables medidas se realizó la prueba de comparaciones múltiples de Fisher ($\alpha= 0,05$) utilizando el software InfoStat.

Por otro lado, en el software RStudio se llevó a cabo el análisis de componentes principales, para visualizar la correlación entre las variables medidas en los diferentes tratamientos durante el tercer año de evaluación.

RESULTADOS

Ensayo 1: lixiviación en suelo desnudo y cultivos cubierta permanentes con fertilización nitrogenada

Balance hídrico

El balance hídrico de las columnas de lixiviación durante el periodo total de evaluación (abril 2016 a octubre 2018) registró 3.655 mm de agua aplicada en cada parcela, siendo cuantificadas las salidas por evapotranspiración (ETc) y percolación profunda. En la Figura 2, se observa que el tratamiento con suelo desnudo (B-B0) presentó diferencias significativas respecto a los tratamientos con CC permanentes (Lm-Lm0, Lm-Lm150, Tr-Tr0 y Tr-Tr150), generando la percolación profunda más alta (1.314 mm) y menor ETc (2.341 mm); mientras que el tratamiento con inclusión de trébol blanco (Tr-Tr0) registró la percolación profunda más baja (595 mm) y mayor ETc (3.060 mm), presentando diferencias significativas con los tratamientos con ballica anual (Lm-Lm0 y Lm-Lm150).

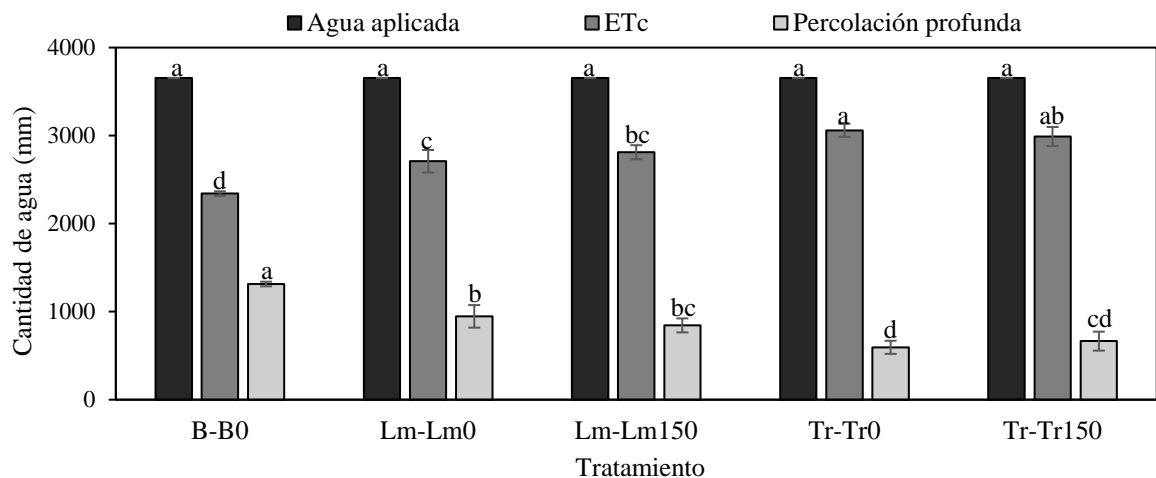


Figura 2. Balance hídrico del Ensayo 1. Periodo total de evaluación.

En la Figura 3 se muestra la percolación profunda acumulada por temporada en las columnas de lixiviación durante el periodo total de evaluación. El análisis temporal de los tratamientos permite identificar que la percolación profunda disminuyó entre 40 y 85% durante los tres años de evaluación. Por otro lado, se destaca un incremento de la percolación profunda en las temporadas primavera-verano (PV-2016 y PV-2017) por la mayor aplicación de agua de riego (Apéndice 2).

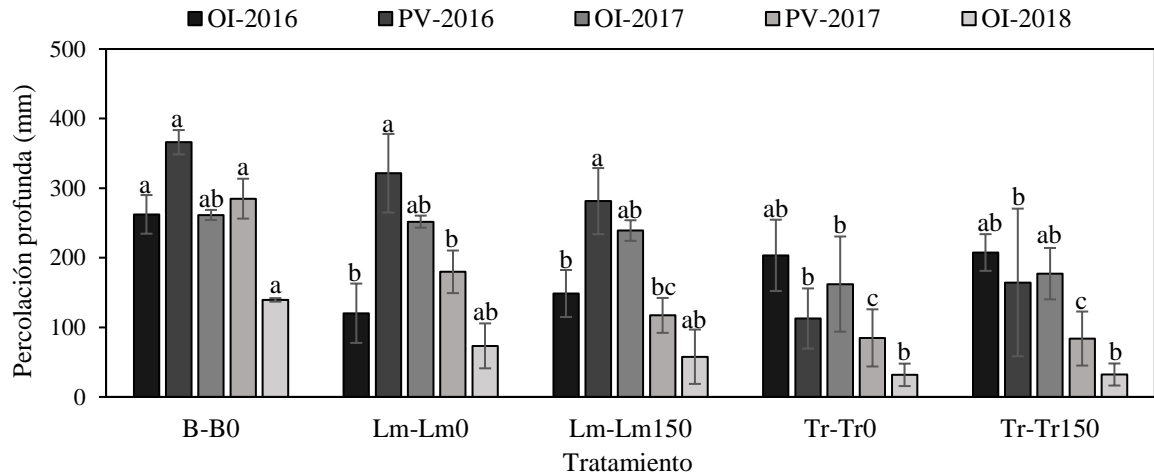


Figura 3. Percolación profunda acumulada por temporada del Ensayo 1. Periodo total de evaluación.

Biomasa aérea

La biomasa aérea de los tratamientos con CC permanente se determinó midiendo la materia seca (MS) generada al término de cada temporada, presentando la Figura 4 la MS acumulada durante el periodo total de evaluación. Los resultados indican que los tratamientos con trébol blanco (Tr-Tr0 y Tr-Tr150) registraron los valores más altos de biomasa con una media de 65 Mg MS ha⁻¹, presentando diferencias significativas con Lm-Lm0 que obtuvo 34 Mg MS ha⁻¹. En el análisis por temporada se observa que los tratamientos con ballica anual (Lm-Lm0 y Lm-Lm150) presentan valores muy elevados en OI-2016, sobrepasando en promedio en 15 Mg MS ha⁻¹ a los valores registrados en las temporadas OI-2017 y OI-2018.

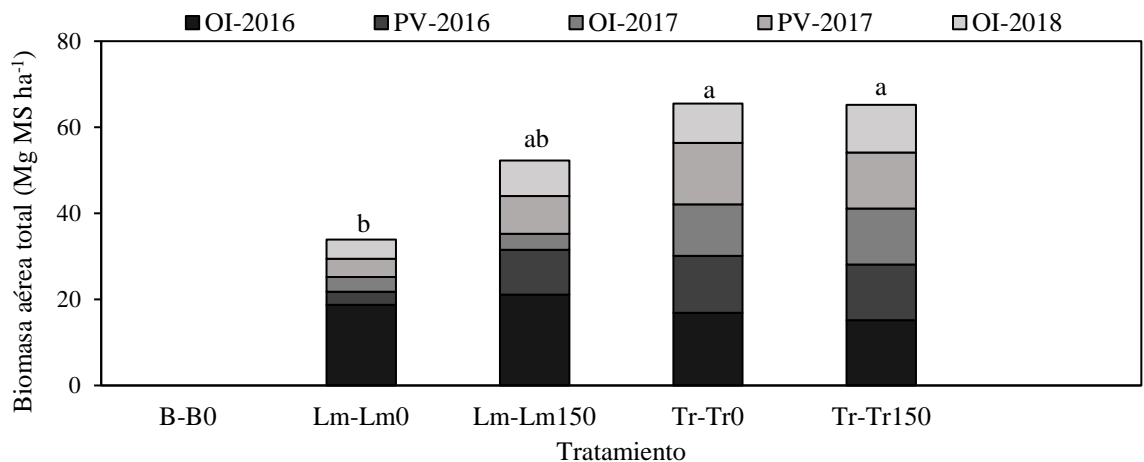


Figura 4. Biomasa aérea acumulada por temporada del Ensayo 1. Periodo total de evaluación.

En el tercer año de evaluación se midió el contenido porcentual de C y N de la biomasa aérea (Cuadro 5). Los resultados obtenidos para el contenido de C (%) registran valores aproximados entre 40 y 43% en los CC permanentes. En la temporada PV-2017 el tratamiento

con CC de ballica anual y fertilización nitrogenada (Lm-Lm150) reportó el valor (%) más alto de C, presentando diferencias significativas con los tratamientos de CC permanentes sin fertilización (Lm-Lm0 y Tr-Tr0); mientras que en OI-2018 se incrementó el C (%) en todos los tratamientos, mostrando Tr-Tr150 el mayor contenido de C (%). En el caso del contenido de N (%) los CC permanentes de trébol blanco (Tr-Tr0 y Tr-Tr150) sobrepasan en promedio tres a cuatro veces el contenido porcentual de ballica anual (Lm-Lm0 y Lm-Lm150), presentando diferencias significativas entre tratamientos en ambas temporadas.

Cuadro 5. Contenido porcentual de carbono y nitrógeno de la biomasa aérea del Ensayo 1. Tercer año de evaluación.

Tratamiento	Carbono ^a		Nitrógeno ^a	
	PV-2017	OI-2018	PV-2017	OI-2018
	----- % -----			
B-B0	-	-	-	-
Lm-Lm0	40,11 ± 0,47 b	42,26 ± 0,47 a	0,89 ± 0,07 b	0,82 ± 0,07 b
Lm-Lm150	42,33 ± 0,35 a	42,99 ± 0,35 a	0,74 ± 0,03 b	0,74 ± 0,03 b
Tr-Tr0	40,65 ± 0,29 b	43,32 ± 0,29 a	2,22 ± 0,17 a	2,35 ± 0,17 a
Tr-Tr150	41,49 ± 0,65 ab	42,31 ± 0,65 a	2,29 ± 0,20 a	2,72 ± 0,20 a

^a Media ± error estándar. Letras diferentes en las columnas indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

Lixiviación de nitrógeno y carbono orgánico

En el Cuadro 6 se reportan las cargas acumuladas de NID, NOD y COD del periodo total de evaluación, integrando los efectos de la percolación del suelo (Figura 3) y las concentraciones de solutos (Apéndice 5).

Cuadro 6. Cargas acumuladas de NID, NOD y COD por temporada del Ensayo 1. Periodo total de evaluación.

Tratamiento	Carga de NID ^a					
	OI-2016	PV-2016	OI-2017	PV-2017	OI-2018	Total
	----- kg NID ha ⁻¹ -----					
B-B0	155,60 ± 13,35 a	53,61 ± 13,35 a	42,86 ± 13,35 a	76,43 ± 13,35 a	31,06 ± 13,35 a	359,56 ± 30,38 a
Lm-Lm0	4,53 ± 3,47 c	18,14 ± 3,47 b	3,78 ± 3,47 b	4,56 ± 3,47 b	1,07 ± 3,47 ab	32,07 ± 3,14 c
Lm-Lm150	7,13 ± 3,47 c	20,76 ± 3,47 b	9,44 ± 3,47 b	3,87 ± 3,47 b	0,19 ± 3,47 b	41,39 ± 10,27 c
Tr-Tr0	82,95 ± 11,18 b	24,52 ± 11,18 ab	31,94 ± 11,18 ab	10,07 ± 11,18 b	1,28 ± 11,18 ab	150,75 ± 31,44 b
Tr-Tr150	97,09 ± 10,81 b	18,14 ± 10,81 b	27,80 ± 10,81 ab	15,24 ± 10,81 b	0,61 ± 10,81 ab	158,89 ± 25,62 b
Tratamiento	Carga de NOD ^a					
	OI-2016	PV-2016	OI-2017	PV-2017	OI-2018	Total
	----- kg NOD ha ⁻¹ -----					
B-B0	0,08 ± 1,17 c	6,21 ± 1,17 a	0,00 ± 1,17 a	0,00 ± 1,17 a	0,04 ± 1,17 a	6,34 ± 2,66 b
Lm-Lm0	38,82 ± 4,06 b	7,54 ± 4,06 a	0,38 ± 4,06 a	0,27 ± 4,06 a	0,11 ± 4,06 a	47,13 ± 7,03 a
Lm-Lm150	74,38 ± 7,49 a	1,27 ± 7,49 a	0,88 ± 7,49 a	0,00 ± 7,49 a	0,28 ± 7,49 a	76,80 ± 17,04 a
Tr-Tr0	6,62 ± 1,66 c	2,17 ± 1,66 a	1,02 ± 1,66 a	0,79 ± 1,66 a	0,73 ± 1,66 a	11,32 ± 4,19 b
Tr-Tr150	5,13 ± 1,71 c	3,64 ± 1,71 a	0,62 ± 1,71 a	0,32 ± 1,71 a	0,65 ± 1,71 a	10,35 ± 2,35 b
Tratamiento	Carga de COD ^a					
	OI-2016	PV-2016	OI-2017	PV-2017	OI-2018	Total
	----- kg COD ha ⁻¹ -----					
B-B0	38,22 ± 4,16 a	45,94 ± 4,16 a	33,33 ± 4,16 ab	33,67 ± 4,16 a	26,24 ± 4,16 a	177,39 ± 8,03 a
Lm-Lm0	21,72 ± 6,34 a	45,56 ± 6,34 a	45,71 ± 6,34 a	20,69 ± 6,34 ab	14,59 ± 6,34 ab	148,28 ± 19,86 ab
Lm-Lm150	33,32 ± 9,70 a	33,02 ± 9,70 ab	41,16 ± 9,70 ab	19,49 ± 9,70 ab	15,15 ± 9,70 ab	142,13 ± 27,17 ab
Tr-Tr0	28,08 ± 4,16 a	22,28 ± 4,16 b	29,56 ± 4,16 b	18,28 ± 4,16 ab	10,23 ± 4,16 b	108,42 ± 9,26 b
Tr-Tr150	30,64 ± 4,16 a	20,45 ± 4,16 b	28,40 ± 4,16 b	14,42 ± 4,16 b	13,30 ± 4,16 ab	107,21 ± 9,30 b

^a Media ± error estándar. Letras diferentes en las columnas indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos (p < 0,05).

Los resultados indican que el tratamiento con suelo desnudo (B-B0) produjo la mayor carga total de NID ($359,56 \pm 30,38$ kg NID ha⁻¹), presentando diferencias significativas con los tratamientos CC permanentes; mientras que los tratamientos con inclusión de ballica anual (Lm-Lm0 y Lm-Lm150) registraron las menores cargas de NID. Cabe destacar que las cargas de NID de los tratamientos con trébol blanco (Tr-Tr0 y Tr-Tr150) fueron en promedio cuatro a cinco veces mayores que para Lm, presentando diferencias significativas entre tratamientos. El análisis temporal de los tratamientos mostró que las cargas de NID disminuyeron entre un 76 a 99% durante los tres años de evaluación, resultados altamente influenciados por las cargas registradas en la primera temporada de evaluación (OI-2016).

Las cargas totales de NOD fueron significativamente más altas en los tratamientos con ballica anual presentando Lm-Lm150 la mayor carga total de NOD ($76,80 \pm 17,04$ kg NOD ha⁻¹), mientras que la columna con suelo desnudo reportó la menor carga de NOD. Considerando el comportamiento de los CC permanentes se observó que la carga total de NOD medida para el tratamiento con Lm fue en promedio cuatro a siete veces mayor que para Tr. Sin embargo, el análisis temporal permite identificar la alta influencia de la temporada OI-2016 en los tratamientos Lm-Lm0 y Lm-Lm150, representando el 82 y 97% de la carga total de NOD, respectivamente. A partir de la temporada OI-2017 se puede observar que el tratamiento Tr-Tr0 generó las mayores cargas de NOD.

Considerando los resultados de la lixiviación de N desde las columnas de suelo, se estima que las cargas totales de NOD en los tratamientos con trébol blanco representan entre 7 y 8% de la carga de NID. En cambio, en los tratamientos con ballica anual las cargas totales de NID representan entre 54 y 68% de las cargas totales de NOD.

Los resultados de las cargas acumuladas de COD indican que el tratamiento con suelo desnudo (B-B0) registró la mayor carga total de COD ($177,39 \pm 8,03$ kg COD ha⁻¹), presentando diferencias significativas con los tratamientos con cubierta de trébol blanco permanente (Tr-Tr0 y Tr-Tr150) que obtuvieron las menores cargas de COD. Respecto a los tratamientos con inclusión de ballica anual (Lm-Lm0 y Lm-Lm150) se demostró que presentan cargas de COD aproximadamente en un 26% superiores que los tratamientos con Tr. El análisis temporal de los tratamientos mostró que las cargas de COD disminuyeron aproximadamente entre 30 y 65% durante los tres años de evaluación.

Parámetros fisicoquímicos de los lixiviados

En el tercer año de evaluación (PV-2017 y OI-2018) fueron medidos en terreno los parámetros conductividad eléctrica (CE), temperatura (T) y pH de los lixiviados. En el Cuadro 7 se presentan los resultados obtenidos por temporada para cada uno de los tratamientos.

Cuadro 7. Parámetros fisicoquímicos de los lixiviados por temporada del Ensayo 1. Tercer año de evaluación.

Tratamiento	Conductividad eléctrica ^a		pH ^a		Temperatura ^a	
	PV-2017	OI-2018	PV-2017	OI-2018	PV-2017	OI-2018
	----- $\mu\text{S cm}^{-1}$ -----		-----		----- $^{\circ}\text{C}$ -----	
B-B0	1.986 \pm 77 b	2.183 \pm 77 b	8,12 \pm 0,14 ab	7,50 \pm 0,14 ab	24,75 \pm 1,01 a	17,08 \pm 1,01 a
Lm-Lm0	2.816 \pm 163 b	2.080 \pm 163 b	8,12 \pm 0,08 ab	7,72 \pm 0,08 a	26,04 \pm 1,01 a	17,98 \pm 1,01 a
Lm-Lm150	2.770 \pm 560 b	3.155 \pm 560 ab	8,20 \pm 0,08 a	7,77 \pm 0,08 a	26,19 \pm 0,99 a	17,00 \pm 0,99 a
Tr-Tr0	7.139 \pm 1.955 a	6.543 \pm 1.955 a	8,04 \pm 0,13 ab	7,31 \pm 0,13 bc	25,67 \pm 1,01 a	15,73 \pm 1,01 a
Tr-Tr150	7.760 \pm 1.095 a	6.250 \pm 1.095 a	7,99 \pm 0,10 b	7,05 \pm 0,10 c	26,38 \pm 0,96 a	16,78 \pm 0,96 a

^a Media \pm error estándar. Letras diferentes en las columnas indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

La conductividad eléctrica (CE) indica que los tratamientos cultivo cubierta permanente de trébol blanco (Tr-Tr0 y Tr-Tr150), presentaron valores significativamente más altos que los tratamientos con ballica anual (Lm-Lm0 y Lm-Lm150) y suelo desnudo (B-B0). Analizando el comportamiento temporal, se pueden observar que en PV-2017 fue registrada mayor CE en los tratamientos con inclusión de CC permanentes.

El pH de los lixiviados indica que los tratamientos con inclusión de ballica anual generaron mayor alcalinidad que los CC permanente trébol blanco, presentando diferencias significativas entre tratamientos en ambas temporadas. El análisis temporal permitió identificar que PV-2017 reportó mayor alcalinidad en todos los tratamientos.

El análisis de la temperatura (T) no evidencia diferencias significativas entre tratamientos, registrando para la temporada PV-2017 una temperatura promedio de 25,81°C en los lixiviados, mientras que OI-2018 presentó un valor promedio de 16,91°C. La variabilidad de T entre temporadas fue de 8,89°C.

Relación cultivo cubierta permanente y fertilización nitrogenada en la lixiviación de nitrógeno y carbono orgánico

La Figura 5 permite visualizar las relaciones existentes entre la inclusión de CC permanentes con fertilización nitrogenada y las mediciones realizadas durante el tercer año de evaluación. Para el Ensayo 1 se encontraron dos componentes principales que explicaron el 69,06% de la variabilidad total.

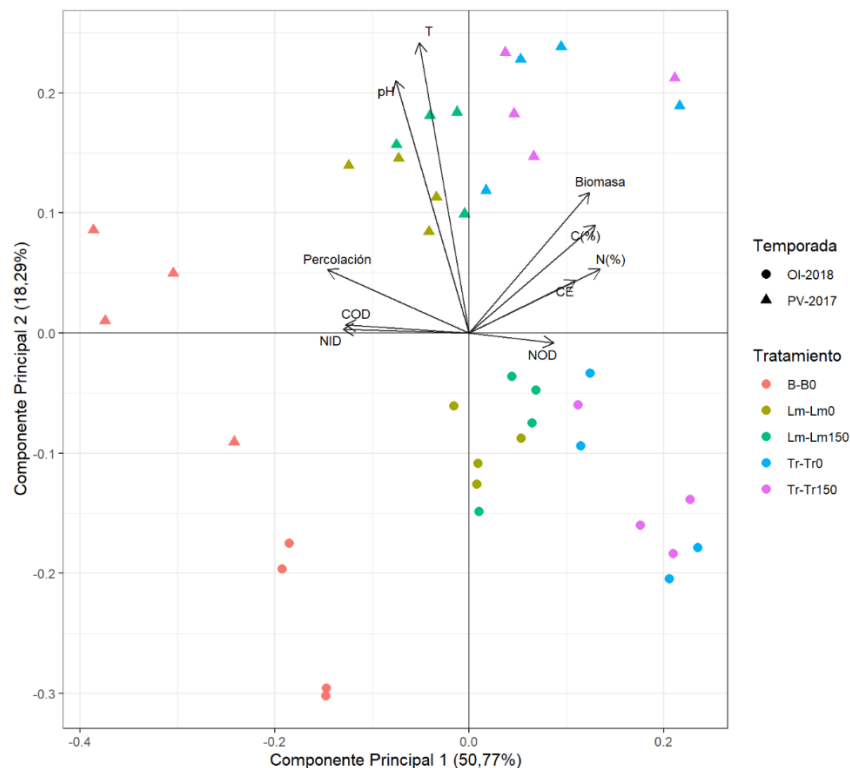


Figura 5. Biplot del análisis de componentes principales para las variables medidas en el Ensayo 1. Tercer año de evaluación.

En la Componente Principal 1, se observa hacia la derecha del gráfico que existe una correlación positiva entre la carga de NOD y las variables biomasa, contenido de C (%), contenido de N (%) y conductividad eléctrica (CE). Los tratamientos que mostraron estar más asociados a este sistema fueron los CC permanentes con trébol blanco (Tr-Tr0 y Tr-Tr150) y en menor medida los tratamientos con inclusión de ballica anual (Lm-Lm0 y Lm-Lm150). Por el contrario, en la parte izquierda del gráfico tuvieron mayor inercia las cargas de NID y COD correlacionadas positivamente con la variable percolación, lo que se relaciona con el efecto del tratamiento con suelo desnudo (B-B0).

En la Componente Principal 2 se muestra mayor contribución de las variables temperatura (T) y pH, relacionadas con las mediciones realizadas en PV-2017; mientras que en la temporada OI-2018 solo se observan mayores cargas de NOD en los tratamientos con CC permanentes.

Ensayo 2: lixiviación en maíz-barbecho y rotación maíz-cultivos cubierta con fertilización nitrogenada

Balance hídrico

El balance hídrico de las columnas de lixiviación durante el periodo total de evaluación (abril 2016 a octubre 2018) registró 3.655 mm de agua aplicada en cada parcela, siendo cuantificadas las salidas por evapotranspiración (ETc) y percolación profunda. En la Figura 6 se observa que los tratamientos maíz-barbecho (Zm-B250 y Zm-B400) presentaron diferencias significativas con la rotación maíz-cubierta combinada de ballica anual y trébol blanco (Zm-Lm+Tr250 y Zm-Lm+Tr400), generando Zm-B250 la percolación profunda más alta (1.053 mm) y menor ETc (2.602 mm); mientras que Zm-Lm+Tr400 registró la percolación profunda más baja (792 mm) y mayor ETc (2.863 mm).

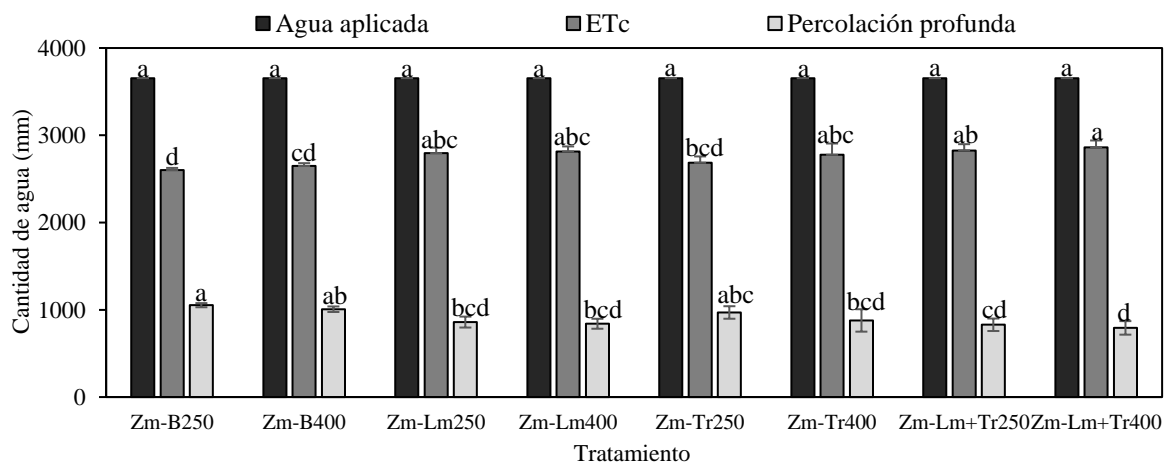


Figura 6. Balance hídrico del Ensayo 2. Periodo total de evaluación.

En la Figura 7 se muestra la percolación profunda acumulada por temporada en las columnas de lixiviación durante el periodo total de evaluación. El análisis temporal de los tratamientos

permite identificar que la percolación profunda disminuyó aproximadamente entre 45 y 80% en el tercer año de evaluación. Por otro lado, los resultados indican que la inclusión de CC en las temporadas OI-2016, OI-2017 y OI-2018, redujo la percolación profunda del suelo en barbecho (Zm-B250 y Zm-B400), presentando diferencias significativas con los tratamientos Zm-Lm250, Zm-Lm400, Zm-Lm+Tr250 y Zm-Lm+Tr400; mientras que en las temporadas PV-2016 y PV-2017 el tratamiento Zm-Lm250 registró la mayor percolación profunda.

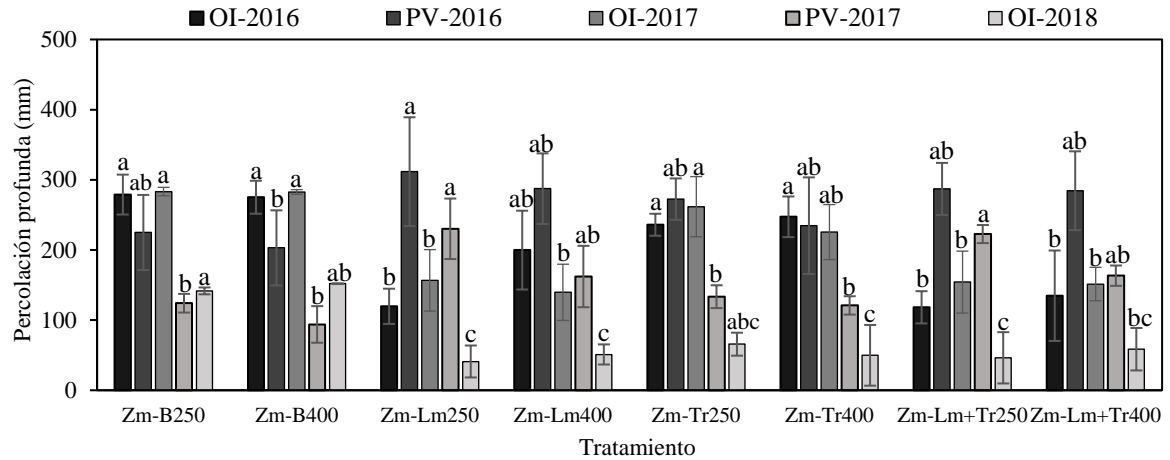


Figura 7. Percolación profunda acumulada por temporada del Ensayo 2. Periodo total de evaluación.

Biomasa aérea

La biomasa aérea de los tratamientos maíz-barbecho y rotación maíz-CC con fertilización nitrogenada (250 y 400 kg N ha⁻¹), se determinó midiendo la materia seca (MS) generada al término de cada temporada, presentando la Figura 8 la MS acumulada durante el periodo total de evaluación. Los resultados indican que el tratamiento rotación maíz-cultivo cubierta de ballica anual (Zm-Lm400) generó la mayor biomasa con una media de 74 Mg ha⁻¹, y presentó diferencias significativas con Zm-Tr250 que registró 54 Mg ha⁻¹. Por otro lado, en las temporadas PV-2016 y PV-2017 los tratamientos Zm-B250 y Zm-B400 reportaron 32 Mg ha⁻¹ y 39 Mg ha⁻¹, respectivamente.

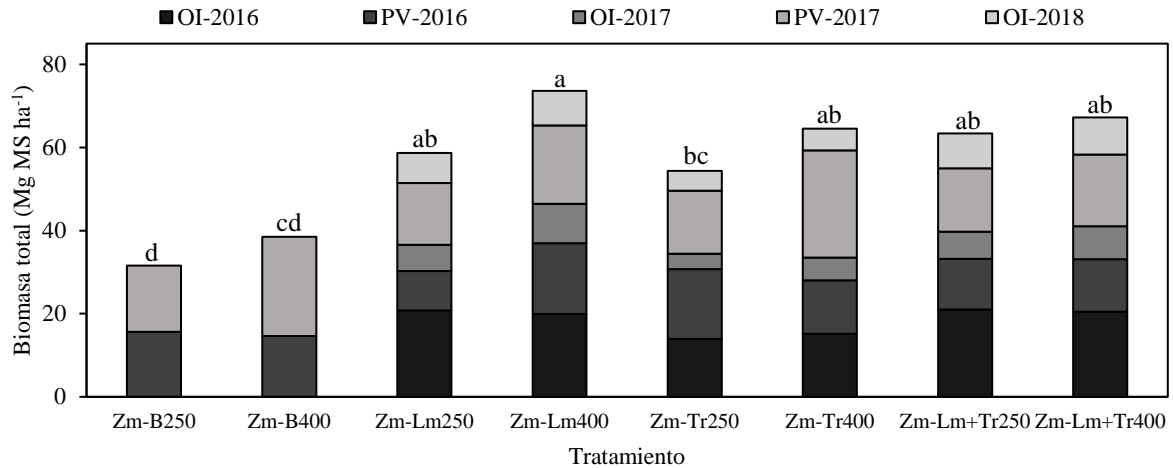


Figura 8. Biomasa aérea acumulada por temporada del Ensayo 2. Periodo total de evaluación.

En el tercer año de evaluación se midió el contenido porcentual de C y N de la biomasa aérea (Cuadro 8). Los contenidos de C (%) presentaron diferencias significativas para el factor tratamiento, reportando en PV-2017 la rotación maíz-trébol blanco con exceso de N (Zm-Tr400) el valor más alto, mientras que el menor contenido de C (%) se registró en el maíz del tratamiento Zm-Lm400. En la temporada OI-2018 se incrementó el C (%) en todos los tratamientos, mostrando nuevamente que el tratamiento Zm-Tr400 presentó el mayor contenido de C (%) y Zm-Lm+Tr250 el valor más bajo.

En el caso del contenido de N (%) la medición realizada en PV-2017 no registró diferencias significativas entre los tratamientos, sin embargo, se destaca un mayor N (%) en la rotación maíz-trébol blanco con N óptimo (250 kg N ha^{-1}). Por otro lado, en la temporada OI-2018 las rotaciones Zm-Tr250 y Zm-Tr400 resultaron ser significativamente más altas que los demás tratamientos.

Cuadro 8. Contenido porcentual de carbono y nitrógeno en la biomasa aérea del Ensayo 2. Tercer año de evaluación.

Tratamiento	Carbono ^a		Nitrógeno ^a	
	PV-2017	OI-2018	PV-2017	OI-2018
Zm-B250	41,74 ± 0,27 ab	-	1,62 ± 0,05 a	-
Zm-B400	41,39 ± 0,12 b	-	1,40 ± 0,14 a	-
Zm-Lm250	41,70 ± 0,33 ab	44,01 ± 0,33 abc	1,60 ± 0,07 a	0,79 ± 0,07 b
Zm-Lm400	41,33 ± 0,26 b	43,44 ± 0,26 c	1,51 ± 0,09 a	0,82 ± 0,09 b
Zm-Tr250	41,81 ± 0,20 ab	43,76 ± 0,20 bc	1,67 ± 0,29 a	1,99 ± 0,29 a
Zm-Tr400	42,34 ± 0,19 a	44,41 ± 0,19 a	1,38 ± 0,27 a	2,56 ± 0,27 a
Zm-Lm+Tr250	41,73 ± 0,23 ab	43,31 ± 0,23 c	1,56 ± 0,08 a	0,88 ± 0,08 b
Zm-Lm+Tr400	41,53 ± 0,22 b	44,20 ± 0,22 ab	1,58 ± 0,13 a	0,92 ± 0,13 b

^a Media ± error estándar. Letras diferentes en las columnas indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

Lixiviación de nitrógeno y carbono orgánico

En el Cuadro 9 se reportan las cargas acumuladas de NID, NOD y COD del periodo total de evaluación, integrando los efectos de la percolación del suelo (Figura 8) y las concentraciones de solutos (Apéndice 6).

Las cargas totales de NID presentaron diferencias significativas para el factor tratamiento, reportando la rotación maíz-trébol blanco con exceso de N (Zm-Tr400) la mayor carga de NID ($299,47 \pm 44,58$ kg NID ha⁻¹), duplicando el valor registrado en la rotación maíz-ballica anual con N óptimo (Zm-Lm250) que obtuvo la menor carga ($127,69 \pm 18,56$ kg NID ha⁻¹). Los tratamientos combinados Lm+Tr también demostraron ser eficaces en la reducción de las cargas totales de NID en comparación con los tratamientos maíz-barbecho y maíz-trébol con ambas dosis de N. El análisis temporal de los tratamientos mostró que las cargas de NID disminuyeron entre 76 y 99% durante los tres años de evaluación, resultados altamente influenciados por las cargas registradas en la primera temporada de evaluación (OI-2016).

Las cargas totales de NOD fueron significativamente más altas en los tratamientos rotación de maíz-ballica anual con ambas dosis de N (250 y 400 kg N ha⁻¹) y maíz con cubierta combinada de Lm+Tr con exceso de N (400 kg N ha⁻¹), registrando Zm-Lm250 la mayor carga de NOD ($18,16 \pm 2,38$ kg NOD ha⁻¹), mientras que la columna maíz-barbecho con dosis óptima de N (Zm-B250) reportó la menor carga de NOD ($4,00 \pm 1,95$ kg NOD ha⁻¹). El análisis temporal de los tratamientos permite identificar que las cargas de NOD disminuyeron aproximadamente entre 60 y 99% durante los tres años de evaluación, resultados altamente influenciados por las cargas registradas en la primera temporada de evaluación (OI-2016). Considerando los resultados de la lixiviación de N desde las columnas de suelo, se estima que las cargas totales de NOD en la rotación maíz-trébol blanco representan entre 3 y 4% de la carga de NID, mientras que en los tratamientos rotación maíz con ballica anual representan entre 7 y 14% de la carga total de NID.

Los resultados de las cargas acumuladas de COD indican que el factor tratamiento presentó diferencias significativas, registrando la rotación maíz-barbecho con dosis de N óptima (Zm-B250) la mayor carga total de COD ($171,82 \pm 12,34$ kg COD ha⁻¹), mientras que la rotación maíz-trébol blanco con exceso de N (Zm-Tr400) reportó el valor más bajo ($131,07 \pm 10,80$ kg COD ha⁻¹), seguido por los tratamientos Zm-Lm+Tr250 ($132,75 \pm 13,39$ kg COD ha⁻¹) y Zm-Lm+Tr400 ($138,71 \pm 10,80$ kg COD ha⁻¹). El análisis temporal mostró que las cargas de COD disminuyeron aproximadamente entre 40 y 60% durante los tres años de evaluación, con excepción de los tratamientos Zm-B400 y Zm-Lm+Tr400 que no evidenciaron variaciones entre las temporadas OI-2016 y OI-2018.

Cuadro 9. Cargas acumuladas de NID, NOD y COD por temporada del Ensayo 2. Periodo total de evaluación.

Tratamiento	Carga de NID ^a					
	OI-2016	PV-2016	OI-2017	PV-2017	OI-2018	Total
	----- kg NID ha ⁻¹ -----					
Zm-B250	119,40 ± 13,22 c	18,85 ± 13,22 a	42,69 ± 13,22 a	23,05 ± 13,22 a	28,68 ± 13,22 a	232,66 ± 17,42 ab
Zm-B400	158,32 ± 9,56 ab	36,16 ± 9,56 a	27,76 ± 9,56 ab	17,25 ± 9,56 a	27,23 ± 9,56 a	266,72 ± 26,86 a
Zm-Lm250	54,15 ± 7,22 d	26,75 ± 7,22 a	1,28 ± 7,22 b	44,80 ± 7,22 a	0,71 ± 7,22 a	127,69 ± 18,56 d
Zm-Lm400	129,95 ± 12,89 bc	43,56 ± 12,89 a	7,90 ± 12,89 ab	29,51 ± 12,89 a	0,38 ± 12,89 a	211,29 ± 24,02 abc
Zm-Tr250	123,77 ± 12,89 c	34,98 ± 12,89 a	43,15 ± 12,89 a	29,15 ± 12,89 a	6,10 ± 12,89 a	237,16 ± 3,40 a
Zm-Tr400	186,94 ± 18,70 a	41,76 ± 18,70 a	36,56 ± 18,70 ab	27,50 ± 18,70 a	6,70 ± 18,70 a	299,47 ± 44,58 a
Zm-Lm+T250	137,55 ± 11,81 bc	21,40 ± 11,81 a	2,33 ± 11,81 b	34,60 ± 11,81 a	0,66 ± 11,81 a	196,54 ± 18,56 bc
Zm-Lm+Tr400	67,73 ± 11,81 d	25,11 ± 11,81 a	7,73 ± 11,81 ab	41,81 ± 11,81 a	0,68 ± 11,81 a	143,07 ± 24,02 cd
Tratamiento	Carga de NOD ^a					
	OI-2016	PV-2016	OI-2017	PV-2017	OI-2018	Total
	----- kg NOD ha ⁻¹ -----					
Zm-B250	1,16 ± 0,71 b	2,39 ± 0,71 b	0,00 ± 0,71 a	0,00 ± 0,71 a	0,45 ± 0,71 a	4,00 ± 1,95 c
Zm-B400	3,55 ± 1,42 b	4,84 ± 1,42 ab	0,00 ± 1,42 a	0,00 ± 1,42 a	0,57 ± 1,42 a	8,95 ± 3,60 bc
Zm-Lm250	10,87 ± 1,50 a	4,71 ± 1,50 ab	2,37 ± 1,50 a	0,00 ± 1,50 a	0,21 ± 1,50 a	18,16 ± 2,38 a
Zm-Lm400	3,18 ± 2,03 b	9,24 ± 2,03 a	1,05 ± 2,03 a	0,00 ± 2,03 a	0,35 ± 2,03 a	13,82 ± 2,22 ab
Zm-Tr250	6,21 ± 2,50 ab	3,24 ± 2,50 ab	0,00 ± 2,50 a	0,00 ± 2,50 a	0,25 ± 2,50 a	9,70 ± 5,62 abc
Zm-Tr400	2,79 ± 1,73 b	5,05 ± 1,73 ab	0,91 ± 1,73 a	0,00 ± 1,73 a	0,26 ± 1,73 a	9,01 ± 3,80 bc
Zm-Lm+T250	1,42 ± 1,56 b	6,47 ± 1,56 ab	1,25 ± 1,56 a	0,00 ± 1,56 a	0,16 ± 1,56 a	9,29 ± 2,22 bc
Zm-Lm+Tr400	11,45 ± 1,46 a	4,50 ± 1,46 ab	1,24 ± 1,46 a	0,21 ± 1,46 a	0,16 ± 1,46 a	17,56 ± 2,98 ab

Tratamiento	Carga de COD ^a					
	OI-2016	PV-2016	OI-2017	PV-2017	OI-2018	Total
	----- kg COD ha ⁻¹ -----					
Zm-B250	46,95 ± 5,19 a	30,59 ± 5,19 c	50,88 ± 5,19 a	21,62 ± 5,19 ab	21,78 ± 5,19 a	171,82 ± 12,34 a
Zm-B400	35,70 ± 3,94 ab	30,44 ± 3,94 c	32,98 ± 3,94 b	10,70 ± 3,94 b	32,49 ± 3,94 a	142,30 ± 12,34 bc
Zm-Lm250	26,56 ± 4,54 ab	57,19 ± 4,54 a	25,84 ± 4,54 b	30,06 ± 4,54 a	15,19 ± 4,54 a	154,83 ± 10,80 ab
Zm-Lm400	34,18 ± 10,28 ab	55,88 ± 10,28 ab	20,82 ± 10,28 b	25,69 ± 10,28 ab	17,16 ± 10,28 a	153,73 ± 30,33 abc
Zm-Tr250	37,61 ± 5,51 ab	38,07 ± 5,51 bc	33,81 ± 5,51 ab	15,63 ± 5,51 ab	19,43 ± 5,51 a	144,54 ± 13,39 bc
Zm-Tr400	33,03 ± 5,51 ab	30,34 ± 5,51 c	36,94 ± 5,51 ab	16,99 ± 5,51 ab	13,77 ± 5,51 a	131,07 ± 10,80 c
Zm-Lm+Tr250	20,06 ± 4,54 b	39,48 ± 4,54 bc	29,06 ± 4,54 b	29,78 ± 4,54 a	14,37 ± 4,54 a	132,75 ± 13,39 bc
Zm-Lm+Tr400	21,69 ± 4,54 b	46,63 ± 4,54 abc	26,84 ± 4,54 b	21,72 ± 4,54 ab	21,84 ± 4,54 a	138,71 ± 10,80 bc

^a Media ± error estándar. Letras diferentes en las columnas indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

Parámetros fisicoquímicos de los lixiviados

En el tercer año de evaluación (PV-2017 y OI-2018) fueron medidos en terreno los parámetros conductividad eléctrica (CE), temperatura (T) y pH de los lixiviados. En el Cuadro 10 se presentan los resultados obtenidos por temporada para cada uno de los tratamientos.

La conductividad eléctrica (CE) medida para cada tratamiento no presentó diferencias significativas en la temporada PV-2017, sin embargo, las medias obtenidas indican que la mayor CE se registró en la rotación maíz-trébol blanco con exceso de N (400 kg N ha^{-1}); mientras que en OI-2018 los tratamientos Zm-Lm250 y Zm-Tr400 fueron significativamente más altos que el tratamiento maíz-barbecho con dosis óptima de N (Zm-B250). Analizando el comportamiento temporal, se pudo observar que en PV-2017 se registró una mayor CE en los tratamientos, exceptuando en la rotación maíz-ballica anual con ambas dosis de N (250 y 400 kg N ha^{-1}) que registró mayor CE en la temporada OI-2018.

El pH de los lixiviados indica que en la temporada PV-2017 los tratamientos no presentaron diferencias significativas, reportando la rotación maíz-barbecho con una dosis alta de N (Zm-B400) la mayor alcalinidad ($8,16 \pm 0,11$). En el caso de la temporada OI-2018 los tratamientos Zm-B250 y Zm-Tr400 fueron significativamente más altos que las rotaciones maíz-ballica anual con ambas dosis de N (250 y 400 kg N ha^{-1}). El análisis temporal permite identificar que PV-2017 reportó mayor alcalinidad en todos los tratamientos.

El análisis de la temperatura (T) no evidencia diferencias significativas entre tratamientos, registrando la temporada PV-2017 una temperatura promedio de $25,71^\circ\text{C}$ en los lixiviados, mientras que OI-2018 presentó un valor promedio de $16,86^\circ\text{C}$. La variabilidad de T entre temporadas fue de $8,85^\circ\text{C}$.

Cuadro 10. Parámetros fisicoquímicos de los lixiviados por temporada del Ensayo 2. Tercer año de evaluación.

Tratamiento	CE ^a		pH ^a		Temperatura ^a	
	PV-2017	OI-2018	PV-2017	OI-2018	PV-2017	OI-2018
	----- $\mu\text{S cm}^{-1}$ -----		-----		----- $^{\circ}\text{C}$ -----	
Zm-B250	3.588 ± 152 a	2.591 ± 152 b	8,09 ± 0,06 a	7,76 ± 0,06 a	26,16 ± 0,96 a	17,01 ± 0,96 a
Zm-B400	3.884 ± 554 a	3.172 ± 554 ab	8,16 ± 0,11 a	7,57 ± 0,11 ab	25,25 ± 1,15 a	16,78 ± 1,15 a
Zm-Lm250	3.893 ± 1.159 a	5.454 ± 1.159 a	8,02 ± 0,15 a	7,38 ± 0,15 b	25,88 ± 1,05 a	16,26 ± 1,05 a
Zm-Lm400	3.957 ± 1.031 a	4.253 ± 1.031 ab	8,10 ± 0,19 a	7,30 ± 0,19 b	25,60 ± 0,78 a	16,38 ± 0,78 a
Zm-Tr250	3.904 ± 552 a	3.451 ± 552 ab	8,05 ± 0,18 a	7,56 ± 0,18 ab	26,02 ± 1,02 a	17,55 ± 1,02 a
Zm-Tr400	5.682 ± 682 a	4.289 ± 682 a	8,11 ± 0,07 a	7,83 ± 0,07 a	24,92 ± 1,20 a	17,18 ± 1,20 a
Zm-Lm+Tr250	4.061 ± 617 a	3.129 ± 617 ab	8,03 ± 0,17 a	7,59 ± 0,17 ab	25,83 ± 0,98 a	16,63 ± 0,98 a
Zm-Lm+Tr400	4.028 ± 1.134 a	3.220 ± 1.134 ab	8,08 ± 0,17 a	7,67 ± 0,17 ab	26,00 ± 0,90 a	17,05 ± 0,90 a

^a Media ± error estándar. Letras diferentes en las columnas indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

Relación rotación maíz-cultivo cubierta y fertilización nitrogenada en la lixiviación de nitrógeno y carbono orgánico

La Figura 9 permite visualizar las relaciones existentes entre la rotación maíz-CC con fertilización nitrogenada y las mediciones realizadas durante el tercer año de evaluación. Para el Ensayo 2 se encontraron dos componentes principales que explicaron el 63,12% de la variabilidad total.

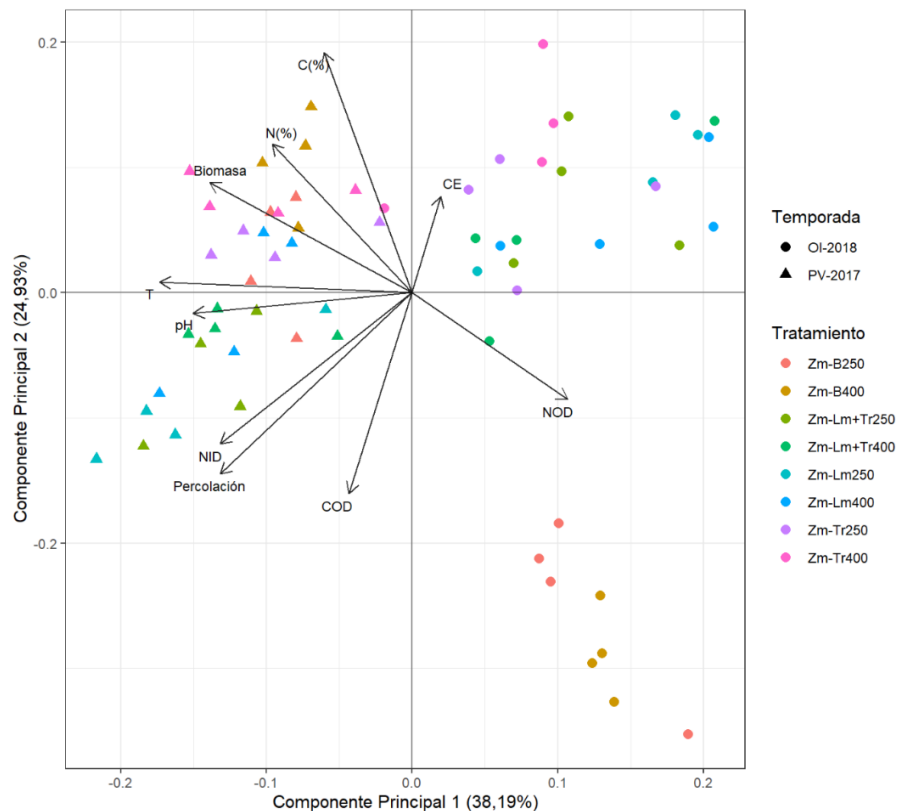


Figura 9. Biplot del Análisis de Componentes Principales para las variables medidas en el Ensayo 2. Tercer año de evaluación.

En la Componente Principal 1 (38,19%), se observa hacia la izquierda del gráfico que existe una correlación positiva entre las cargas de NID y COD y las variables percolación, biomasa, contenidos de C (%) y N (%), temperatura (T) y pH, resultados asociados a las mediciones realizadas en la temporada PV-2017 con la rotación de maíz. Por el contrario, en la parte derecha del gráfico tuvieron mayor inercia la carga de NOD y la conductividad eléctrica (CE), lo que se relaciona con la temporada OI-2018 en la rotación barbecho e incorporación de CC trébol blanco y ballica anual.

En la Componente Principal 2 (24,93%) se muestra relacionadas las cargas de NID y COD con la percolación, mientras que estas se correlacionan negativamente con la biomasa, contenido de C (%), contenido de N (%) y CE.

DISCUSIÓN

Efectos de la incorporación de cultivos cubierta y fertilización nitrogenada en la lixiviación de NID

La evaluación realizada en las columnas de suelo del Ensayo 1, permitió corroborar que la incorporación de CC permanentes disminuye significativamente la lixiviación de NID (principalmente N-NO₃) en relación con el suelo desnudo. Analizando el efecto de la incorporación de CC en la lixiviación de NID, se destaca un incremento de la ETc, disminución de la percolación profunda, modificación de la concentración de NO₃⁻ en la solución del suelo, y absorción de N (Gabriel *et al.*, 2012). Es relevante mencionar que durante los tres años de evaluación se observó una reducción promedio de las cargas de NID de 57% con la cubierta de leguminosa (trébol blanco) y de 90% con gramínea (ballica anual); estos valores se encuentran en el rango reportado por Justes (2017), el cual indica que el uso de CC reduce la lixiviación de nitrato entre un 20 y un 90% en comparación con el suelo desnudo, variabilidad determinada por el sistema de cultivo, condiciones del suelo y clima. En este estudio, la variabilidad podría explicarse por las diferentes propiedades de las especies seleccionadas en los sistemas de cultivo (leguminosa y no leguminosa). En la literatura se menciona que existirán mayores cantidades de N liberado después de un cultivo de leguminosa, debido al mecanismo de fijación biológica de N atmosférico y la mayor mineralización de N de los residuos (Böckman *et al.*, 1990). Cabe destacar que la mineralización de N fue el proceso dominante en condiciones de suelo desnudo y con CC de trébol blanco, especialmente en la primera temporada de evaluación (OI-2016) que registró temperaturas superiores a 25 °C en el invernadero (Rossi, 2017). Según Song *et al.* (2018) existe una relación proporcional entre la tasa de mineralización de N y la temperatura del suelo.

Por otro parte, el efecto combinado de la incorporación de CC y fertilización nitrogenada en la rotación de maíz (Ensayo 2), resultó en una reducción significativa de las cargas de NID con el cultivo de invierno de ballica anual con N óptimo (250 kg N ha⁻¹), disminuyendo durante los tres años de evaluación en un 45% el riesgo de lixiviación de NID en comparación con la rotación maíz-barbecho con N óptimo. Blanco-Canqui (2018) en una revisión de diversos estudios sobre los efectos de los CC en los parámetros de calidad de agua, confirma que los CC de gramíneas pueden reducir la lixiviación de nitratos entre 18 y 95%. Con respecto a la dosis fertilización nitrogenada, fue posible observar que no existieron diferencias significativas entre tratamientos con distintas dosis de N, sin embargo, se destaca que las dosis excesivas (400 kg N ha⁻¹) provocaron mayores cargas totales de NID, con excepción de la rotación maíz con cubierta combinada de trébol y ballica, debido a los efectos de la primera temporada de evaluación (OI-2016). En el estudio realizado por Hussain *et al.* (2020) de lixiviación de C y N en suelos agrícolas de Estados Unidos, también se indica que las mayores dosis de fertilización con N en el maíz provocan un aumento de la lixiviación de NID. De acuerdo con Salmerón *et al.* (2011), para lograr disminuir los riesgos de lixiviación de N, se debe combinar la incorporación de cultivos de cobertura con una reducción de la fertilización del maíz.

En el caso de la rotación maíz-cultivo cubierta de trébol blanco con dosis excesiva de N (400 kg ha^{-1}), registró las mayores cargas totales de NID del Ensayo 2. Estos resultados concuerdan con los estudios realizados por Kramberger *et al.* (2009), Quemada *et al.* (2013) y Singh *et al.* (2018), quienes señalan que las leguminosas no reducen el NID lixiviado con respecto al barbecho. No obstante, es relevante destacar que la rotación continua con CC de leguminosa mejora el suministro de mineralización de N del suelo, estimulando la acumulación de N en la biomasa aérea del maíz (Gentry *et al.*, 2013; Gabriel *et al.*, 2016). Lo anterior, sólo fue posible encontrarlo en el tercer año de evaluación (PV-2017), si bien no se presentaron diferencias significativas entre tratamientos, el maíz en rotación con CC de trébol y una dosis óptima de N obtuvo el mayor contenido de N (%) en la biomasa aérea.

En cuanto a los resultados obtenidos para las rotaciones de maíz con cubierta combinada de 70% trébol y 30% ballica, se observó una reducción de las cargas totales de NID de 16 a 46% en comparación con los tratamientos maíz-barbecho con ambas dosis de N. Este efecto se manifestó en las temporadas invernales (OI-2017 y OI-2018), excluyendo la primera temporada de evaluación (OI-2016) por las anomalías registradas. Según lo planteado por Tosti *et al.* (2014) y Abdalla *et al.* (2019) la mezcla de leguminosa y no leguminosa debe considerarse como una estrategia eficaz para el manejo de los cultivos de cobertura, ya que permite mejorar la autosuficiencia de N del agroecosistema, aumentar el rendimiento del cultivo comercial (~ 13%), como garantizar la protección de las cuencas hidrográficas de la contaminación por N.

Efectos de la incorporación de cultivos cubierta y fertilización nitrogenada en la lixiviación de NOD

La lixiviación de NOD en el Ensayo 1, reveló que la incorporación de CC permanentes incrementa las cargas de NOD en relación con el suelo desnudo. Al comparar los resultados obtenidos para los CC durante los tres años de evaluación, se observa que la ballica anual generó una carga total de NOD significativamente mayor que la cubierta de trébol blanco. Estos resultados fueron reportados anteriormente por Salazar *et al.* (2019), quienes relacionan las cargas de NOD con la mayor producción de biomasa aérea y biomasa de raíces. Es importante mencionar que la carga total de NOD fue aproximadamente el 7% de la carga de NID bajo una cubierta permanente de trébol blanco; mientras que con la cubierta permanente de ballica anual predominaron las cargas totales de NOD, representando la carga total de NID aproximadamente el 61% de la carga de NOD. Esta situación se puede atribuir a la alta producción de biomasa de ballica anual durante la temporada OI-2016. De acuerdo con Dijkstra *et al.* (2007) la carga de NOD aumenta en proporción a la cantidad de restos vegetales y el procesamiento microbiano del N orgánico del suelo.

El análisis temporal de los tratamientos reporta cambios en la dinámica de la lixiviación de NOD desde las columnas de suelo, probablemente debido a las condiciones controladas de temperatura dentro del invernadero ($25 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Las temporadas OI-2017, PV-2017 y OI-2018 registraron mayores cargas de NOD en los tratamientos con CC permanente de trébol blanco, lo que se correlaciona con la mayor producción de biomasa aérea y por su composición C y N de sus residuos. Estas evidencias coinciden con estudios realizados en Europa a escala de

campo. Leimer *et al.* (2016) en un análisis de la lixiviación de N en 62 parcelas experimentales de Alemania, reportan que los pastizales de leguminosas aumentan la lixiviación de NOD debido a su capacidad de fijación de N_2 y su mayor producción de residuos. Por otra parte, Kušlienė *et al.* (2015) en un estudio realizado en pastizales de leguminosas en Dinamarca, explican que la lixiviación de NOD ocurre por la lisis de la biomasa microbiana del suelo que vive en los depósitos recientes.

En cuanto al efecto de la inclusión de CC en la rotación de maíz y fertilización nitrogenada (Ensayo 2), se observó un incremento significativo de las cargas totales de NOD en los tratamiento con CC de ballica anual con ambas dosis de N, y en la cubierta combinada de trébol y ballica con una dosis excesiva de N. De igual forma que en el Ensayo 1, estos resultados se relacionan con el crecimiento anómalo de la biomasa de ballica durante la temporada OI-2016. Al analizar el comportamiento durante el tercer año de evaluación, se destaca una disminución significativa de la lixiviación de NOD desde las columnas de suelo. En la temporada PV-2017 con la rotación de maíz, se obtuvo valores no detectables de las concentraciones de NOD en las muestras de lixiviados (Apéndice 6), los cuales fueron registrados con valor 0 mg L^{-1} ; esto puede explicarse por la estimación de NTD y NID por métodos diferentes, registrándose errores en la cuantificación de NOD de las muestras con concentraciones muy altas de $N\text{-NO}_3$ (Lee y Westerhoff, 2005). Por otro lado, la temporada OI-2018 con la inclusión de CC registró un incremento de las concentraciones de NOD, con valores de $0,29$ a $0,90 \text{ mg L}^{-1}$, presentando el valor más alto la rotación maíz con CC de trébol blanco y una dosis excesiva de fertilizante (400 kg N ha^{-1}).

Respecto a la relación de la dosis de fertilización nitrogenada en la lixiviación de NOD, no se mostró una tendencia clara en ambos ensayos, posiblemente por el corto período de estudio. Sin embargo, en el experimento realizado por Hussain *et al.* (2020) durante 7 años de evaluación señalan que, las mayores dosis de fertilización en el maíz provocaron un aumento de la lixiviación de NOD desde suelos agrícolas. Estos resultados concuerdan con estudios realizados anteriormente bajo suelos agrícolas (Siemens y Kaupenjohann, 2002) y suelos forestales (McDowell *et al.*, 2004).

Efectos de la incorporación de cultivos cubierta y fertilización nitrogenada en la lixiviación de COD

La evaluación realizada en las columnas del Ensayo 1, mostró que bajo condiciones de suelo desnudo se generó un incremento de la carga total de COD en comparación con los CC permanentes. De igual forma, el análisis de la incorporación de CC en la rotación de maíz (Ensayo 2), dio como resultado una carga total de COD más alta en condiciones de barbecho, presentado diferencias significativas con los tratamientos con CC de trébol blanco y CC combinada de 70% trébol y 30% ballica. Estos resultados demuestran que las cargas de COD se encontraron correlacionadas positivamente con la percolación profunda en ambos ensayos, lo cual podría explicarse por la alta ponderación que representa la percolación profunda en el cálculo de las cargas de COD; especialmente en condiciones de suelo desnudo ya que fue donde se generó más percolación profunda, debido a la escasa ETc en ausencia de biomasa.

Por otra parte, al analizar las concentraciones de COD en las columnas con suelo desnudo e incorporación de CC permanentes (Apéndice 5) se observa un efecto opuesto, registrando los tratamientos con CC de trébol blanco concentraciones de COD (20,99 y 22,46 mg COD L⁻¹) significativamente mayores que con suelo desnudo (13,91 mg COD L⁻¹). Estos resultados se pueden relacionar con la MS acumulada durante el periodo total de evaluación, los cuales indican que los CC de trébol blanco registraron los valores más altos de biomasa. Según lo planteado por Vinther *et al.* (2006) y Wang *et al.* (2016) la concentración de COD en la solución del suelo se encuentra determinada por el crecimiento de los cultivos y la biomasa de raíces, debido a la descomposición y exudación de moléculas como aminoácidos, ácidos orgánicos, fenoles y azúcares. En cuanto al efecto de la inclusión de CC en la rotación de maíz, se observó un incremento significativo de las concentraciones de COD en los tratamientos con CC de ballica anual y con cubierta combinada de 70% trébol y 30% ballica (Apéndice 6); de igual forma que en el Ensayo 1, estos resultados se pueden relacionar con la MS acumulada durante el periodo total de evaluación.

Respecto a la relación de la dosis de fertilización nitrogenada en la lixiviación de COD, no se mostró una tendencia clara en ambos ensayos. De igual forma, Hussain *et al.* (2020) indicaron que la lixiviación de COD no se vio afectada por la fertilización con N. Sin embargo, los estudios realizados por Vinther *et al.* (2006) y Ghani *et al.* (2010) plantean que la aplicación de altas tasas de N promueve la formación de COD, ya que representa un estímulo para el crecimiento de la biomasa y exudación radicular. Estos resultados no se evidenciaron en el presente estudio, debido a que la biomasa total generada no presentó diferencias significativas en el Ensayo 1 con dosis de 0 y 150 kg N ha⁻¹, y en el Ensayo 2 con dosis de 250 y 400 kg N ha⁻¹.

CONCLUSIONES

El estudio realizado en columnas de suelo, durante tres años de evaluación, determinó que la incorporación de cultivos cubierta (CC) tuvo efectos significativos en la dinámica de la lixiviación de nitrógeno y carbono orgánico disueltos.

La evaluación del Ensayo 1, permitió corroborar que la incorporación de CC permanentes disminuye significativamente la lixiviación de nitrógeno inorgánico disuelto en relación con el suelo desnudo. Se destaca que la cubierta de ballica anual es significativamente más efectiva que la cubierta de trébol blanco. Por otro lado, se confirmó que la inclusión de CC permanentes incrementa la lixiviación de nitrógeno y carbono orgánico disueltos, especialmente bajo las columnas con cubierta de trébol blanco, debido a su capacidad de fijación de N atmosférico y su mayor producción de residuos vegetales.

El análisis del efecto combinado de la inclusión de CC en la rotación de maíz y fertilización nitrogenada (Ensayo 2), estableció que reemplazar el barbecho de otoño-invierno por un cultivo cubierta de ballica anual con dosis óptima de fertilización (250 kg N ha^{-1}), fue la medida más eficaz para disminuir la lixiviación de nitrógeno inorgánico disuelto desde las columnas de suelo. Por el contrario, la rotación maíz con cultivo cubierta de trébol blanco y dosis excesiva de fertilización (400 kg N ha^{-1}) generó la mayor carga de lixiviación de nitrógeno inorgánico. En este sentido, se sugiere tener en consideración las diferentes propiedades de las especies seleccionadas en los sistemas de cultivo, y combinar la incorporación de cultivos de cobertura con una reducción de la fertilización del maíz.

La evaluación del Ensayo 2, también determinó que la incorporación de CC en la rotación de maíz incrementa la lixiviación de nitrógeno y carbono orgánico disueltos en relación con el barbecho. Si bien los resultados no registraron un comportamiento claro con las distintas combinaciones de CC, si permiten establecer una estrecha relación entre la lixiviación de formas orgánicas de nitrógeno y carbono, y el crecimiento de los cultivos y la biomasa de raíces.

En este experimento, las distintas dosis de fertilización nitrogenada no generaron efectos significativos en la lixiviación de nitrógeno y carbono orgánico, posiblemente por el corto periodo de estudio. Sin embargo, de acuerdo con los análisis se puede indicar que la aplicación de una dosis óptima de fertilización es fundamental para minimizar las pérdidas por lixiviación de nitrógeno y carbono orgánico disueltos.

Finalmente, se sugiere evaluar a escala de campo el efecto combinado de la rotación maíz-CC y fertilización nitrogenada óptima, como una medida para proteger las cuencas hidrográficas de la contaminación por N desde suelos agrícolas de la zona Mediterránea de Chile Central.

LITERATURA CITADA

Abdalla, M., A. Hastings, K. Cheng, Q. Yue, D. Chadwick, M. Espenberg, J. Truu, R. M. Rees, and P. Smith. 2019. A critical review of the impacts of cover crops on nitrogen leaching, net greenhouse gas balance and crop productivity. *Global Change Biology* 25:2530-2543.

Blanco-Canqui, H. 2018. Cover crops and water quality. *Agronomy Journal* 110(5):1633-1647.

Blanco-Canqui, H., T. Shaver, J. Lindquist, C. Shapiro, R. Elmore, C. Francis, and G. Hergert. 2015. Cover crops and ecosystem services: Insights from studies in temperate soils. *Agronomy Journal* 107(6):2449-2474.

Böckman, O.C., O. Kaarstad, O.H. Lie, and I. Richards. 1990. *Agricultura y fertilizantes*. Norsk Hydro, Oslo, Noruega.

Bolan, N. S., D. C. Adriano, A. Kunhikrishnan, T. James, R. McDowell, and N. Senesi. 2011. Dissolved organic matter: biogeochemistry, dynamics, and environmental significance in soils. *Advances in Agronomy* 110:1-62.

Casalí, J., R. Gastesi, J. Álvarez-Mozos, L.M. De Santisteban, J. Del Valle de Lersundi, R. Giménez, A. Larrañaga, M. Goñi, U. Agirre, M.A. Campo, J.J. López, and M. Donézar. 2008. Runoff, erosion, and water quality of agricultural watersheds in central Navarre (Spain). *Agricultural Water Management* 95(10):1111-1128.

CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales). 2015. Estudio Agrológico Región Metropolitana de Santiago. Descripción de suelos materiales y símbolos. Publicación CIREN N° 195, Santiago, Chile. 474 p.

Corradini, F., F. Nájera, M. Casanova, Y. Tapia, R. Singh, and O. Salazar. 2015. Effects of maize cultivation on nitrogen and phosphorus loadings to drainage channels in central Chile. *Environmental Monitoring and Assessment* 187(11):697.

Dijkstra, F.A., J.B. West, S.E. Hobbie, P.R. Reich, and J. Trost. 2007. Plant diversity, CO₂, and N influence inorganic and organic N leaching in grasslands. *Ecology* 88:490-500.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2018. More people, more food, worse water? a global review of water pollution from agriculture. FAO, Rome, Italy. 207 p.

Gabriel, J. L., R. Muñoz-Carpena, and M. Quemada. 2012. The role of cover crops in irrigated systems: Water balance, nitrate leaching and soil mineral nitrogen accumulation. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 155:50-61.

- Gabriel, J.L., M. Alonso-Ayuso, I. García-González, C. Hontoria, and 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.
- Gentry, L.E., S.S. Snapp, R.F. Price, and L.F. Gentry. 2013. Apparent red clover Nitrogen credit to corn: Evaluating cover crop introduction. *Agronomy Journal* 105(6):1658-1664.
- Ghani, A., K. Müller, M. Dodd, and A. Mackay. 2010. Dissolved organic matter leaching in some contrasting New Zealand pasture soils. *European Journal of Soil Science* 61(4):525-538.
- Hach. 2005. DR5000 Spectrophotometer procedures manual. (Tech. Doc. N°2), Hach Company. Germany. 846 p.
- Heffer, P. 2013. Assessment of fertilizer use by crop at the global level 2010-2010/11. IFA (International Fertilizer Industry Association), Paris, France. 9 p.
- Hussain, M.Z., G.P. Robertson, B. Basso, and S.K. Hamilton. 2020. Leaching losses of dissolved organic carbon and nitrogen from agricultural soils in the upper US Midwest. *Science of the Total Environment* 734:139379.
- Jones, D.L., and V.B. Willett. 2006. Experimental evaluation of methods to quantify dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic carbon (DOC) in soil. *Soil Biology and Biochemistry* 38(5):991-999.
- Justes, E. 2017. *Cover crops for sustainable farming*. Springer. Dordrecht, Netherlands. 95 p.
- Kaiser, K., and K. Kalbitz. 2012. Cycling downwards—dissolved organic matter in soils. *Soil Biology and Biochemistry* 52:29-32.
- Kaspar, T., D. Jaynes, T. Parkin, T. Moorman, and J. Singer. 2012. Effectiveness of oat and rye cover crops in reducing nitrate losses in drainage water. *Agricultural Water Management* 110:25-33.
- Kramberger, B., A. Gselman, M. Janzekovic, M. Kaligalic, and B. Bracko. 2009. Effects of cover crops on soil mineral nitrogen and on the yield and nitrogen content of maize. *European Journal of Agronomy* 31(2):103-109.
- Kušlienė, G., J. Eriksen, and J. Rasmussen. 2015. Leaching of dissolved organic and inorganic nitrogen from legume-based grasslands. *Biology and Fertility of Soils* 51:217-230.
- Lee, W., and P. Westerhoff. 2005. Dissolved organic nitrogen measurement using dialysis pretreatment. *Environmental Science & Technology* 39(3):879–884.

- Leimer, S., Y. Oelmann, N. Eisenhauer, A. Milcu, C. Roscher, S. Scheu, A. Weigelt, C. Wirth, and W. Wilcke. 2016. Mechanisms behind plant diversity effects on inorganic and organic N leaching from temperate grassland. *Biogeochemistry* 131:339-353.
- Liu, M., D. Ussiri, and R. Lal. 2016. Soil organic carbon and nitrogen fractions under different land uses and tillage practices. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 47(12):1528-1541.
- McDowell, W.H., A.H. Magill, J.A. Aitkenhead-Peterson, J.D. Aber, J.L. Merriam, and S.S. Kaushal. 2004. Effects of chronic nitrogen amendment on dissolved organic matter and inorganic nitrogen in soil solution. *Forest Ecology and Management* 196:29-41.
- McGovern, S.T., C.D. Evans, P. Dennis, C.A. Walmsley, A. Turner, and M.A. McDonald. 2014. Increased inorganic nitrogen leaching from a mountain grassland ecosystem following grazing removal: a hangover of past intensive land-use?. *Biogeochemistry* 119:125-138.
- Murphy, D.V., A.J. Macdonald, E.A. Stockdale, K.W.T. Goulding, S. Fortune, J.L. Gaunt, P.R. Poulton, J.A. Wakefield, C.P. Webster, and W.S. Wilmer. 2000. Soluble organic nitrogen on agricultural soils. *Biology and Fertility of Soils* 30(5):374-387.
- Nájera, F., Y. Tapia, C. Baginsky, V. Figueroa, R. Cabeza, and 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.
- Quemada, M., M. Baranski, M. N. J. Nobel-de Lange, A. Vallejo, and J. Cooper. 2013. Meta-analysis of strategies to control nitrate leaching in irrigated agricultural systems and their effects on crop yield. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 174:1-10.
- Ros, G.H., E. Hoffland, C. van Kessel, and E.J.M. Temminghoff. 2009. Extractable and dissolved soil organic nitrogen—A quantitative assessment. *Soil Biology and Biochemistry* 41(6):1029-1039.
- Rossi, M. 2017. Efectos de la rotación maíz—cultivos cubierta y de la fertilización nitrogenada, en la lixiviación de carbono orgánico y nitrógeno disueltos. 63 h. Tesis Magíster en Manejo de Suelos y Aguas. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Santiago, Chile.
- Salazar, O., J. Vargas, F. Nájera, O. Seguel, and M. Casanova. 2014. Monitoring of nitrate leaching during flush flooding events in a coarse-textured floodplain soil. *Agricultural Water Management* 146:218-227.
- Salazar, O., L. Balboa, K. Peralta, M. Rossi, M. Casanova, Y. Tapia, R. Singh, and M. Quemada. 2019. Effect of cover crops on leaching of dissolved organic nitrogen and carbon in a maize-cover crop rotation in Mediterranean Central Chile. *Agricultural Water Management* 212:399-406.

- Salmerón, M., R. Isla, and J. Caveró. 2011. Effect of winter cover crop species and planting methods on maize yield and N availability under irrigated Mediterranean conditions. *Field Crops Research* 123:89-99.
- Scott, E.E., and D.E. Rothstein. 2014. The dynamic exchange of dissolved organic matter percolating through six diverse soils. *Soil Biology and Biochemistry* 69:83-92.
- Siemens, J., and M. Kaupenjohann. 2002. Contribution of dissolved organic nitrogen to N leaching from four German agricultural soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 165(6):675-681.
- Singh G., K.W.J. Williard, and J.E. Schoonover. 2018. Cover crops and tillage influence on nitrogen dynamics in plant-soil-water pools. *Soil Science Society of America Journal* 82:1572-1582.
- Song Y., C. Song, A. Hou, J. Ren, X. Wang, Q. Cui, and M. Wang. 2018. Effects of temperature and root additions on soil carbon and nitrogen mineralization in a predominantly permafrost peatland. *Catena* 165:381-389.
- Tosti, G., P. Benincasa, M. Farneselli, F. Tei, and M. Guiducci. 2014. Barley-hairy vetch mixture as cover crop for green manuring and the mitigation of N leaching risk. *European Journal of Agronomy* 54:34-39.
- van Kessel, C., T. Clough, and J.W. van Groenigen. 2009. Dissolved organic nitrogen: An overlooked pathway of nitrogen loss from agricultural systems?. *Journal of Environmental Quality* 38(2):393-401.
- Vinther, F.P., E.M. Hansen, and J. Eriksen. 2006. Leaching of soil organic carbon and nitrogen in sandy soils after cultivating grass-clover swards. *Biology and Fertility of Soils* 43:12-19.
- Vitousek, P.M., R. Naylor, T. Crews, M.B. David, L.E. Drinkwater, E. Holland, P.J. Johnes, J. Katzenberger, L.A. Martinelli, P.A. Matson, G. Nziguheba, D. Ojima, C.A. Palm, G.P. Robertson, P.A. Sanchez, A.R. Townsend, and F.S. Zhang. 2009. Nutrient imbalances in agricultural development. *Science* 324:1519-1520.
- Wang, X., C. Li, Y. Luo, K. Hua, and M. Zhou. 2016. The impact of nitrogen amendment and crop growth on dissolved organic carbon in soil solution. *Journal of Mountain Science* 13(1):95-103.

APÉNDICES

Apéndice 1. Dosis de fertilizantes suministradas a los tratamientos del Ensayo 1.

Tratamiento	Dosis 1			Dosis 2			Total		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
----- kg ha ⁻¹ -----									
B-B0	0	10	0	0	0	0	0	10	0
Lm-Lm0	0	10	450	0	0	750	0	10	1200
Lm-Lm150	150	10	450	0	0	750	150	10	1200
Tr-Tr0	0	10	450	0	0	750	0	10	1200
Tr-Tr150	150	10	450	0	0	750	150	10	1200

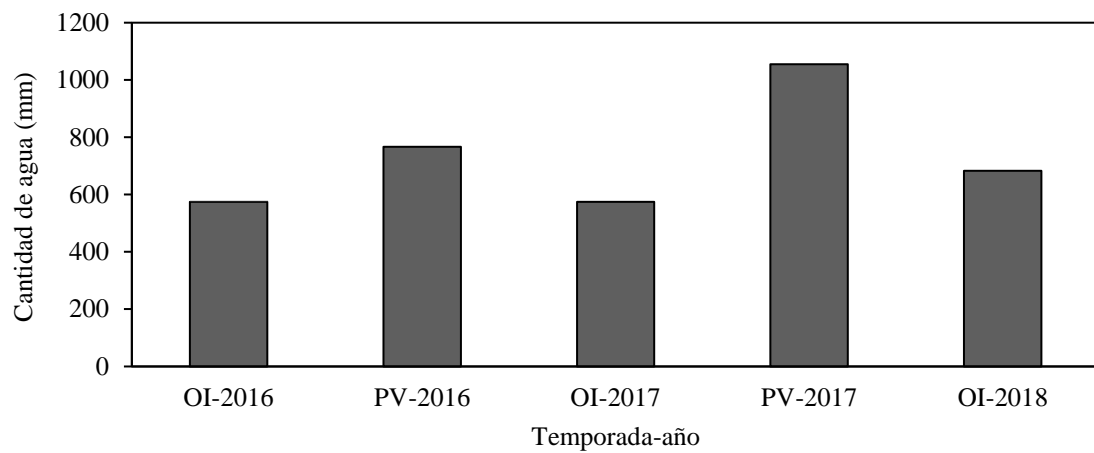
Apéndice 2. Dosis de fertilizantes suministradas a los tratamientos del Ensayo 2.

Tratamiento	Dosis 1			Dosis 2			Total		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
----- kg ha ⁻¹ -----									
Zm-B250	0	10	450	250	0	750	250	10	1200
Zm-B400	150	10	450	250	0	750	400	10	1200
Zm-Lm250	0	10	450	250	0	750	250	10	1200
Zm-Lm400	150	10	450	250	0	750	400	10	1200
Zm-Tr250	0	10	450	250	0	750	250	10	1200
Zm-Tr400	150	10	450	250	0	750	400	10	1200
Zm-Lm+Tr250	0	10	450	250	0	750	250	10	1200
Zm-Lm+Tr400	150	10	450	250	0	750	400	10	1200

Apéndice 3. Media aritmética (\pm desviación estándar) de los parámetros físico-químicos del agua de riego de las columnas de lixiviación (n=3).

	Parámetros físico-químicos				
	NID	NOD	COD	pH	CE
	----- mg L ⁻¹ -----			-	$\mu\text{S cm}^{-1}$
Agua de riego	0,30 \pm 0,10	0,17 \pm 0,41	22,44 \pm 1,47	8,12 \pm 0,04	1.870 \pm 130

Apéndice 4. Agua aplicada (mm) en las columnas de lixiviación por temporada. Periodo total de evaluación.



Apéndice 5. Concentraciones medias de NID, NOD y COD por temporada del Ensayo 1. Periodo total de evaluación.

Tratamiento	NID ^a					
	OI-2016	PV-2016	OI-2017	PV-2017	OI-2018	Total
	----- mg L ⁻¹ -----					
B-B0	27,57 ± 3,15 a	20,62 ± 3,15 a	16,59 ± 3,15 a	26,54 ± 3,15 a	22,28 ± 3,15 a	22,72 ± 1,53 a
Lm-Lm0	8,77 ± 1,96 c	6,12 ± 1,96 b	1,48 ± 1,96 c	2,43 ± 1,96 c	1,29 ± 1,96 b	4,02 ± 1,06 c
Lm-Lm150	10,17 ± 1,96 c	6,99 ± 1,96 b	3,75 ± 1,96 bc	3,30 ± 1,96 c	0,50 ± 1,96 b	4,94 ± 1,06 c
Tr-Tr0	13,21 ± 3,64 bc	8,60 ± 3,64 b	14,18 ± 3,64 ab	11,32 ± 3,64 bc	3,16 ± 1,96 b	10,09 ± 1,74 b
Tr-Tr150	22,87 ± 5,71 ab	12,55 ± 5,71 ab	11,01 ± 5,71 abc	19,13 ± 5,71 ab	1,98 ± 5,71 b	13,51 ± 2,63 b
Tratamiento	NOD ^a					
	OI-2016	PV-2016	OI-2017	PV-2017	OI-2018	Total
	----- mg L ⁻¹ -----					
B-B0	0,03 ± 0,30 c	1,56 ± 0,30 c	0,00 ± 0,30 c	0,00 ± 0,30 c	0,03 ± 0,30 c	0,33 ± 0,13 c
Lm-Lm0	28,90 ± 0,81 b	2,04 ± 0,81 c	0,18 ± 0,81 c	0,16 ± 0,81 c	0,24 ± 0,81 c	6,30 ± 0,36 a
Lm-Lm150	44,39 ± 3,39 a	0,44 ± 3,39 c	0,40 ± 3,39 c	0,00 ± 3,39 c	0,49 ± 3,39 c	9,14 ± 1,51 a
Tr-Tr0	3,10 ± 1,44 c	1,14 ± 1,44 c	0,93 ± 1,44 c	2,17 ± 1,44 c	2,43 ± 1,44 c	1,95 ± 0,64 b
Tr-Tr150	2,59 ± 1,26 c	1,90 ± 1,26 c	1,25 ± 1,26 c	0,88 ± 1,26 c	2,05 ± 1,26 c	1,74 ± 0,56 b
Tratamiento	COD ^a					
	OI-2016	PV-2016	OI-2017	PV-2017	OI-2018	Total
	----- mg L ⁻¹ -----					
B-B0	14,19 ± 1,68 a	12,41 ± 1,68 ab	12,41 ± 1,68 a	11,71 ± 1,68 b	18,83 ± 1,68 c	13,91 ± 0,81 c
Lm-Lm0	14,98 ± 1,68 a	14,86 ± 1,68 ab	18,01 ± 1,68 a	11,44 ± 1,68 b	20,74 ± 1,68 bc	16,01 ± 0,81 bc
Lm-Lm150	17,71 ± 5,62 a	11,17 ± 5,62 ab	19,34 ± 5,62 a	16,66 ± 5,62 ab	33,61 ± 5,62 ab	19,70 ± 2,53 ab
Tr-Tr0	13,04 ± 2,74 a	20,40 ± 2,74 a	22,36 ± 2,74 a	24,27 ± 2,74 a	32,25 ± 2,74 b	22,46 ± 1,27 a
Tr-Tr150	13,13 ± 2,68 a	9,21 ± 2,68 b	21,01 ± 2,68 a	18,42 ± 2,68 ab	43,20 ± 2,68 a	20,99 ± 1,24 a

^a Media ± error estándar. Letras diferentes en las columnas indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos (p < 0,05).

Apéndice 6. Concentraciones medias de NID, NOD y COD por temporada del Ensayo 2. Periodo total de evaluación.

Tratamiento	NID ^a					
	OI-2016	PV-2016	OI-2017	PV-2017	OI-2018	Total
	----- mg L ⁻¹ -----					
Zm-B250	41,60 ± 5,13 de	6,87 ± 5,13 a	18,23 ± 5,13 a	18,34 ± 5,13 a	20,21 ± 5,13 a	21,05 ± 2,29 abc
Zm-B400	54,82 ± 5,13 bcd	14,62 ± 5,13 a	12,99 ± 5,13 ab	20,15 ± 5,13 a	17,93 ± 5,13 a	24,10 ± 2,29 ab
Zm-Lm250	30,49 ± 4,04 e	7,73 ± 4,04 a	0,80 ± 4,04 b	19,17 ± 4,04 a	1,30 ± 4,04 b	11,90 ± 1,81 d
Zm-Lm400	55,50 ± 4,23 bc	12,94 ± 4,23 a	3,43 ± 4,23 b	18,02 ± 4,23 a	0,73 ± 4,23 b	18,12 ± 1,89 bc
Zm-Tr250	49,41 ± 4,95 cd	10,56 ± 4,95 a	17,45 ± 4,95 a	21,55 ± 4,95 a	8,56 ± 4,95 ab	21,51 ± 2,21 abc
Zm-Tr400	69,72 ± 7,10 ab	15,84 ± 7,10 a	14,59 ± 7,10 ab	22,90 ± 7,10 a	9,93 ± 7,10 ab	26,60 ± 3,17 a
Zm-Lm+T250	71,14 ± 4,04 a	7,37 ± 4,04 a	1,27 ± 4,04 b	15,31 ± 4,04 a	1,66 ± 4,04 b	19,35 ± 1,81 abc
Zm-Lm+Tr400	39,02 ± 4,95 de	10,91 ± 4,95 a	3,43 ± 4,95 b	25,78 ± 4,95 a	1,11 ± 4,95 b	16,05 ± 2,21 cd
	----- mg L ⁻¹ -----					
Tratamiento	NOD ^a					
	OI-2016	PV-2016	OI-2017	PV-2017	OI-2018	Total
	----- mg L ⁻¹ -----					
Zm-B250	2,93 ± 1,19 b	1,44 ± 1,19 a	0,00 ± 1,19 a	0,00 ± 1,19 a	0,33 ± 1,19 a	0,94 ± 0,57 b
Zm-B400	1,47 ± 1,19 b	4,65 ± 1,19 a	0,00 ± 1,19 a	0,00 ± 1,19 a	0,37 ± 1,19 a	1,30 ± 0,57 ab
Zm-Lm250	14,51 ± 1,20 a	2,04 ± 1,20 a	1,38 ± 1,20 a	0,00 ± 1,20 a	0,73 ± 1,20 a	3,73 ± 0,58 a
Zm-Lm400	1,22 ± 1,20 b	2,97 ± 1,20 a	1,34 ± 1,20 a	0,00 ± 1,20 a	0,77 ± 1,20 a	1,26 ± 0,58 ab
Zm-Tr250	2,99 ± 1,49 b	1,84 ± 1,49 a	2,23 ± 1,49 a	0,00 ± 1,49 a	0,39 ± 1,49 a	1,49 ± 0,70 ab
Zm-Tr400	1,42 ± 0,72 b	1,76 ± 0,72 a	0,39 ± 0,72 a	0,00 ± 0,72 a	0,90 ± 0,72 a	0,89 ± 0,39 b
Zm-Lm+T250	3,87 ± 1,20 b	2,02 ± 1,20 a	0,95 ± 1,20 a	0,00 ± 1,20 a	0,29 ± 1,20 a	1,43 ± 0,58 ab
Zm-Lm+Tr400	16,74 ± 2,92 a	1,70 ± 2,92 a	1,00 ± 2,92 a	0,12 ± 2,92 a	0,46 ± 2,92 a	4,00 ± 1,32 a

^a Media ± error estándar. Letras diferentes en las columnas indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos (p < 0,05).

Tratamiento	COD ^a					
	OI-2016	PV-2016	OI-2017	PV-2017	OI-2018	Total
	----- mg L ⁻¹ -----					
Zm-B250	15,91 ± 2,95 ab	18,85 ± 2,95 a	15,90 ± 2,95 ab	17,28 ± 2,95 a	15,43 ± 2,95 c	16,67 ± 1,49 bc
Zm-B400	12,17 ± 2,16 b	16,78 ± 2,16 a	11,85 ± 2,16 b	12,39 ± 2,16 a	21,36 ± 2,16 c	14,91 ± 1,19 c
Zm-Lm250	23,27 ± 2,95 a	19,49 ± 2,95 a	18,13 ± 2,95 ab	13,08 ± 2,95 a	38,41 ± 2,95 a	22,47 ± 1,49 a
Zm-Lm400	16,91 ± 4,50 ab	22,93 ± 4,50 a	16,31 ± 4,50 ab	15,88 ± 4,50 a	34,06 ± 4,50 ab	21,22 ± 2,13 ab
Zm-Tr250	15,00 ± 2,95 b	15,25 ± 2,95 a	15,31 ± 2,95 ab	11,82 ± 2,95 a	30,39 ± 2,95 ab	17,55 ± 1,49 bc
Zm-Tr400	12,31 ± 2,16 b	13,40 ± 2,16 a	16,49 ± 2,16 ab	14,26 ± 2,16 a	29,85 ± 2,16 b	17,26 ± 1,19 bc
Zm-Lm+Tr250	15,56 ± 2,95 ab	15,80 ± 2,95 a	19,71 ± 2,95 ab	13,33 ± 2,95 a	35,76 ± 2,95 ab	20,03 ± 1,49 ab
Zm-Lm+Tr400	20,46 ± 3,97 ab	17,52 ± 3,97 a	24,61 ± 3,97 a	13,24 ± 3,97 a	38,67 ± 3,97 a	22,90 ± 1,91 a

^a Media ± error estándar. Letras diferentes en las columnas indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

ANEXOS

Anexo 1. Descripción morfológica del perfil de suelo utilizado en las columnas de lixiviación. Ubicación Comuna de La Pintana, Provincia de Santiago, Región Metropolitana de Santiago (33° 34' S – 70° 37' O, altitud 454 msnm).

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción morfológica
A _p	0 – 37	Pardo oscuro (10 YR 3/3); franco arcillo limosa; muy plástico y muy adhesivo; bloques subangulares medios y gruesos moderados; poros finos y medios abundantes; raíces finas y medias comunes; gravas angulares y redondeadas escasas (<5%); fuerte reacción al HCl. Límite lineal abrupto.
C	37 – 55	Variegado; arenosa; no plástico y no adhesivo; bloques subangulares medios y finos débiles; poros muy finos abundantes; raíces finas y medias escasas; reacción moderada al HCl. Límite lineal abrupto.
2C	55 – 65+	Pardo amarillento oscuro (10 YR 3/4); arcillo limosa; muy plástico y muy adhesivo; maciza; poros muy finos abundantes; raíces medias y finas comunes; fuerte reacción al HCl.

Anexo 2. Caracterización de propiedades físicas del suelo utilizado en el estudio.

Horizonte (profundidad)	Propiedades físicas e hidráulicas del suelo ^{1,2}											
	Textura			Clase textural	Da	Dr	Contenido volumétrico					K _{sat}
	A	L	a				CC	PMP	PDR	PDL	AA	
cm	----- % -----			-	----- Mg m ⁻³ -----	----- cm ³ cm ⁻³ -----					cm h ⁻¹	
Ap (0–42)	20,9	44,7	34,4	F	1,42 ± 0,02	2,40	0,30 ± 0,02	0,15 ± 0,00	0,10 ± 0,02	0,06 ± 0,00	0,15 ± 0,02	11,88 ± 13,32
C (42–70)	5,3	26,9	77,8	aF	1,38 ± 0,03	2,65	0,20 ± 0,02	0,06 ± 0,01	0,21 ± 0,02	0,07 ± 0,00	0,14 ± 0,03	17,64 ± 13,32
2C (70–90)	25,1	42,9	32,0	F	1,31 ± 0,06	2,72	0,28 ± 0,02	0,17 ± 0,01	0,12 ± 0,01	0,11 ± 0,00	0,11 ± 0,00	–

¹ Media ± error estándar (n = 3)

² Da, densidad aparente; Dr, densidad real; CC, capacidad de campo (33 kPa); PMP, punto de marchitez permanente (1500 kPa); PDR, poros de drenaje rápido; PDL, poros de drenaje lento; AA, agua aprovechable; K_{sat}, conductividad hidráulica a saturación (n = 13).

Anexo 3. Caracterización de propiedades químicas del suelo utilizado en el estudio.

Horizonte (profundidad)	Propiedades químicas del suelo																
	MO	CE	pH (1:2,5 p/v)		TDC	TOC	TDN	C:N	Nutrientes disponibles					Cationes de intercambio			
			H ₂ O	KCl					Cu	Fe	Mn	P-Olsen	Zn	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
cm	%	dS m ⁻¹	-----		-----	H ₂ O (1:5 m/v)	-----	-----	----- mg kg ⁻¹ -----					----- cmol (+) kg ⁻¹ -----			
Ap (0–22)	1,12	0,97	8,99	7,56	115,38	103,72	19,99	6	4,04	5,99	5,56	12,6	1,38	–	–	0,2	2,2
C (42–70)	0,19	1,10	8,10	7,70	28,51	15,07	9,22	3	0,80	4,41	1,24	0,5	0,33	21,3	2,3	0,5	0,6
2C (70–90)	0,52	1,82	8,74	7,58	23,20	11,39	6,60	4	2,06	6,99	2,03	1,5	0,63	19,5	2,1	0,7	0,5