



# **UNIVERSIDAD DE CHILE**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**

**ESCUELA DE POSTGRADO**

**ESTUDIO DE LA CAPACIDAD TAMPÓN DEL pH DEL SUELO DE LA  
ESTACIÓN EXPERIMENTAL OROMO – REGIÓN DE LOS LAGOS**

**STUDY OF THE pH BUFFER CAPACITY OF SOIL IN THE OROMO  
EXPERIMENTAL STATION – LOS LAGOS REGION**

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

**DOUGLAS ORLANDO MOLINA GARCIA**

Ingeniero Agrónomo

Guía de Tesis

**OSVALDO SALAZAR GUERRERO**

Profesores Consejeros

**OSCAR SEGUEL SEGUEL**

**YASNA TAPIA FERNÁNDEZ**

**SANTIAGO - CHILE**

**2024**

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**  
**ESCUELA DE POSTGRADO**

**ESTUDIO DE LA CAPACIDAD TAMPÓN DEL pH DEL SUELO DE LA  
ESTACIÓN EXPERIMENTAL OROMO – REGIÓN DE LOS LAGOS**

**STUDY OF THE pH BUFFER CAPACITY OF SOIL IN THE OROMO  
EXPERIMENTAL STATION – LOS LAGOS REGION**

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

**DOUGLAS ORLANDO MOLINA GARCIA**

	Calificación
<b>DIRECTOR DE TESIS</b>	
Osvaldo Salazar Guerrero Ingeniero Agrónomo, MS, Ph.D.	7,0
<b>PROFESORES CONSEJEROS</b>	
Oscar Seguel Seguel Ingeniero Agrónomo, Dr. Ciencias Agrarias	6,1
Yasna Tapia Fernández Ingeniera en Alimentos, Dra. Química Agrícola	6,2

Santiago, Chile

2024

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, mi más profundo agradecimiento a Dios, quien ha sido mi guía y fortaleza a lo largo de este proceso. Sin Su apoyo y bendiciones, este logro no habría sido posible.

A mis queridos padres, Leonardo y Victoria, por su amor incondicional, su sabiduría y sus consejos, que siempre me han inspirado a seguir adelante y a dar lo mejor de mí mismo. Gracias por creer en mí y por su incansable apoyo en cada etapa de mi vida.

A mis hermanos, Willians, Gustavo, Marlon y Jennifer, por ser mi fuente de alegría y motivación. Sus palabras de aliento y su compañía me han dado la energía necesaria para superar los momentos difíciles y continuar con determinación.

A mi profesor guía de tesis, Profesor Osvaldo Salazar, por su orientación experta, su paciencia y su constante apoyo. Sus conocimientos y consejos han sido fundamentales para la realización de este trabajo.

A mis amigos Sebastián Casali, Cristóbal G, Tamara P, Antonia G, Joaquín V, por su apoyo incondicional y su comprensión a lo largo de este viaje. Y demás amigos, gracias por estar siempre dispuestos a escuchar, por ofrecer su ayuda desinteresada y por ser pilares en el que siempre puedo confiar.

Finalmente, a la Facultad de Agronomía de la Universidad de Chile, a todos los profesores, personal del laboratorio de Química y compañeros que formaron parte de mi experiencia en el programa de Magíster en Manejo de Suelo y Agua. Este sueño hecho realidad es el resultado del esfuerzo conjunto y del valioso conocimiento compartido a lo largo de estos dos años.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>RESUMEN</b> .....	<b>1</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>2</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>3</b>
La capacidad tampón de los suelos .....	3
Disolución y precipitación de carbonatos .....	5
Manejo del pH del suelo .....	7
Suelos de la zona de estudio .....	8
Caracterización Agroclimática de la zona.....	9
Manejos del sistema de producción pecuario.....	9
<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>10</b>
Objetivo general .....	10
Objetivos específicos (OE) .....	10
<b>MATERIALES Y MÉTODO</b> .....	<b>11</b>
Área de estudio.....	11
Métodos.....	11
Requerimientos de encalado .....	11
Ensayo de invernadero .....	12
Análisis estadístico.....	14
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>15</b>
Propiedades del suelo con mayor relación a la capacidad tampón .....	15
Caracterización de las variables respuesta a la aplicación de cal (encalado).....	16
Análisis comparativo entre los tratamientos de la variable respuesta (pH) .....	17
Análisis comparativo entre los sectores de la variable respuesta Fósforo (P-Olsen).....	18
Rendimiento de materia seca (MS) de la mezcla forrajera .....	19
Análisis comparativo entre los sectores y tratamiento de la variable respuesta materia seca (MS) .....	21
<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>25</b>
<b>LITERATURA CITADA</b> .....	<b>26</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

	<b>Página</b>
<b>Cuadro 1.</b> Capacidad tampón ( $CT_{pH}$ ) de pH de algunos suelos de Chile (Casanova et al., 2006).....	6
<b>Cuadro 2.</b> Capacidad tampón de pH de los distintos grupos de suelos (Casanova et al., 2006).....	7
<b>Cuadro 3.</b> Tratamientos para evaluar en el ensayo en invernadero .....	13
<b>Cuadro 4.</b> Valores promedios del pH-H <sub>2</sub> O, fósforo disponible (P-Olsen) y capacidad tampón de pH ( $CT_{pH}$ ) en los tres sectores (S) evaluados en el intervalo de profundidad de 0-20 cm .....	15
<b>Cuadro 5</b> Valores promedios del pH-H <sub>2</sub> O, fósforo disponible (P-Olsen) y producción de materia seca (MS) en los tres sectores (S) evaluados con cal (TI) y sin la aplicación de cal (TII) en el ensayo de macetas.....	16
<b>Cuadro 6.</b> Matriz de correlación de las propiedades químicas del suelo.....	23

## ÍNDICE DE FIGURAS

### Página

<b>Figura 1.</b> Mecanismos involucrados en la capacidad tampón del pH en el suelo ( $CT_{pH}$ ). Adaptado de (Casanova et al., 2006). .....	4
<b>Figura 2.</b> Causas que provocan la acidez en los suelos con alta pluviometría según (Navarro y Navarro, 2003). .....	4
<b>Figura 3.</b> Valores de pH-H <sub>2</sub> O de los primeros 0,20 m de las Series y Asociaciones de suelos de la Región de Los Lagos (Sadzawka, 2006). .....	8
<b>Figura 4.</b> Sectores (S) de muestreo de suelo en la Estación Experimental Oromo .....	12
<b>Figura 5.</b> pH de los suelos, con dos tipos de tratamientos (TI con cal; TII sin cal). .....	17
<b>Figura 6.</b> Concentración de fósforo disponible (P-Olsen) en suelos de los 3 sectores con la aplicación de cal. ....	18
<b>Figura 7.</b> Producción de materia seca (MS en kg ha <sup>-1</sup> ) en el primer (31 de enero 2024) y segundo corte (18 de marzo 2024). (TI con cal; TII sin cal). .....	20
<b>Figura 8.</b> Materia seca (kg ha <sup>-1</sup> ) de la pradera en los 3 sectores y tratamientos (TI con cal; TII sin cal). .....	22

## RESUMEN

Una de las propiedades químicas más importantes del suelo es el pH, que está relacionado al nivel de acidez o alcalinidad. La acidez del suelo se caracteriza por una dominancia de la concentración de iones de hidrógeno ( $H^+$ ), con efectos sobre las plantas por la solubilización de elementos tóxicos, como el aluminio intercambiable en el suelo ( $Al^{3+}$ ). Por su parte, la capacidad tampón del pH del suelo ( $CT_{pH}$ ) ejerce una resistencia al cambio de la concentración de  $H^+$ . Para la corrección de la acidez, se utilizan fuentes como el carbonato de calcio ( $CaCO_3$ ) o cal, que aumenta el pH inicial a un pH deseado. El objetivo del estudio fue aplicar el método de cálculo de la  $CT_{pH}$  para recomendar un manejo sitio específico de encalado en un suelo de origen volcánico bajo producción de pradera. En particular, este estudio ha permitido contribuir a las necesidades de mejoras del manejo de la fertilidad de suelos de la Estación Experimental (E.E.) Oromo de la Universidad de Chile, ubicada en la Comuna de Purranque, Región de Los Lagos. Se recolectaron muestras de suelo superficial (0-20 cm) desde 6 sectores (S1, S2, S3, S4, S5 y S6) de la E.E. para medir la  $CT_{pH}$  y determinar una dosis sitio específica de cal. Además, se recolectaron muestras de suelo de S3, S4 y S5 para establecer un ensayo de invernadero en macetas, donde se evaluó la efectividad de la dosis de cal determinada con la  $CT_{pH}$  medida. En cada maceta se sembró una mezcla forrajera de ballica perenne (*Lolium perenne* L.) y trébol blanco (*Trifolium repens* L.), evaluando el crecimiento y la producción de materia seca.

**Palabras clave:** Encalado; fertilidad de suelos; manejo de suelos; Andisoles; praderas.

## ABSTRACT

One of the most important chemical properties of soil is pH, related to the degree of acidity or alkalinity. Soil acidity is characterized by a dominance of the concentration of hydrogen ions ( $H^+$ ), where its effect on plants is through the solubilization of toxic elements, such as exchangeable aluminum ( $Al^{3+}$ ). By other hand, the buffer capacity of soil pH ( $CT_{pH}$ ) exerts a resistance to the change in  $H^+$  concentration. To correct acidity, sources such as calcium carbonate ( $CaCO_3$ ) or lime are used, which modifies the initial pH to a target pH. The main objective of the study was to apply the  $CT_{pH}$  calculation method to recommend site-specific management of liming in a soil of volcanic origin under grassland production. In particular, this study has made it possible to contribute to the needs for improvements in soil fertility management of the Oromo Experimental Station (E.E.) of the University of Chile, located in the Purranque Commune, Los Lagos Region. Surface soil samples (0-20 cm) were collected from 6 sectors (S1, S2, S3, S4, S5 and S6) of the E.E. to measure  $CT_{pH}$  and determine a site-specific dose of lime. Complementary, soil samples were collected from S3, S4 and S5 to establish a potted greenhouse trial, where the effectiveness of the lime dose was evaluated with the measured  $CT_{pH}$ . A forage mixture of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) and white clover (*Trifolium repens* L.) was sown in each pot, evaluating growth and dry matter production.

**Keywords:** Whitewashing; soil fertility; soil management; Andisol; meadows.



## INTRODUCCIÓN

### La capacidad tampón de los suelos

La capacidad tampón de pH del suelo ( $CT_{pH}$ ) corresponde a la resistencia que presentan los suelos a un cambio en el pH de la solución suelo cuando se agrega un ácido o una base. Se expresa como la relación entre la cantidad de protones agregados o eliminados del suelo y la variación de pH (Porta et al., 1999) según la Ecuación 1:

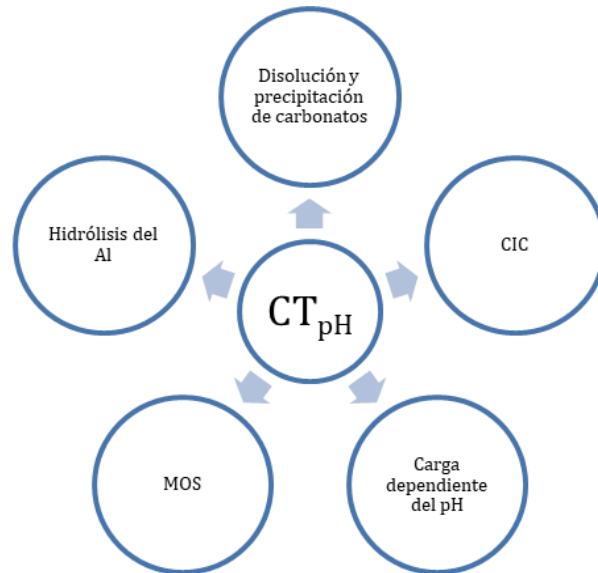
$$CT_{pH} = \frac{\Delta H^+}{\Delta pH} \quad (\text{Ec. 1})$$

donde  $\Delta H^+$  corresponde a los protones agregados o eliminados en moles (+) por kg de suelo; y  $\Delta pH$  es la variación del pH del suelo.

En términos prácticos, la  $CT_{pH}$  se define como la cantidad de  $\text{CaCO}_3$  necesaria para subir en 0,1 unidades el pH- $\text{H}_2\text{O}$  de una hectárea de suelo hasta una profundidad de 0,20 m (Casanova et al., 2006). Según Sadzawka et al. (2006), el requerimiento de encalado y  $CT_{pH}$  se puede determinar en laboratorio por incubación con una base como hidróxido de potasio (KOH), donde el método es aplicable para suelos de pH ácido (pH- $\text{H}_2\text{O}$  < 6,6).

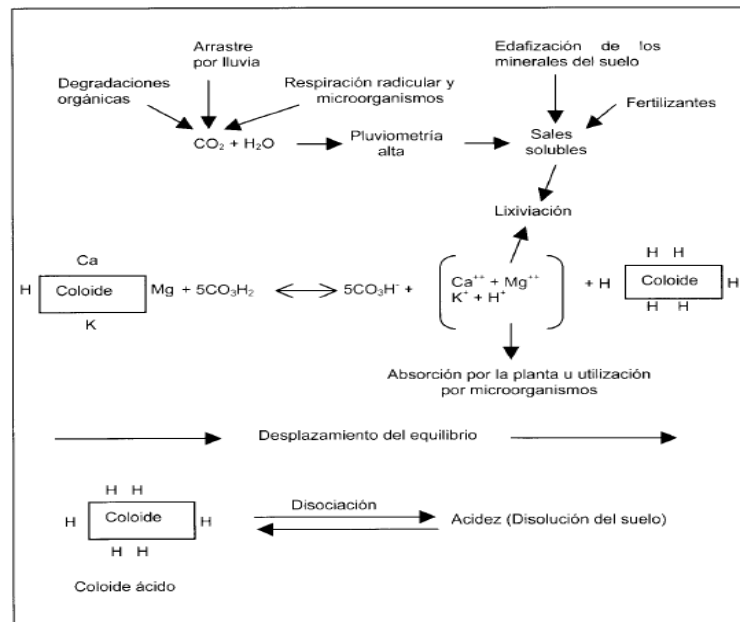
Mientras mayor es la  $CT_{pH}$  de un suelo, mayor es la necesidad de base o ácido para variar el valor de pH. La  $CT_{pH}$  no es igual entre los distintos tipos de suelos e incluso dentro del mismo tipo de suelo (Suárez y Márquez, 1992). Dentro de las razones que se han establecido para la variación de la  $CT_{pH}$  están el material de origen del suelo, el contenido y tipo de arcilla, el contenido de materia orgánica (MOS) y la presencia de óxidos e hidróxidos de hierro (Fe) y aluminio (Al) (Fassbender, 1987).

En los suelos de pH ácido predomina la hidrólisis, donde el Al rompe la molécula de agua generando  $\text{H}^+$  mientras que en los suelos de pH alcalino se genera por la disolución de carbonato de Ca y magnesio (Mg), liberando  $\text{OH}^-$ . En los suelos de pH- $\text{H}_2\text{O}$  5,0 a 7,5 predominan los mecanismos relacionados con la protonación y deprotonación de los sitios de intercambio dependientes del pH de las arcillas y de la MOS. Los mecanismos involucrados en la  $CT_{pH}$  se presentan en la Figura 1.



**Figura 1.** Mecanismos involucrados en la capacidad tampón del pH en el suelo ( $CT_{pH}$ ). Adaptado de (Casanova et al., 2006).

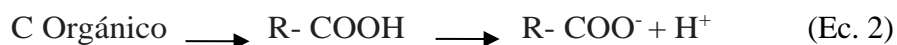
La acidez es normal en suelos localizados en regiones con alta pluviometría, los cuales están sometidos a una continua lixiviación de sales; debido a que el agua disuelve las bases solubles junto al agua que percola a través del perfil del suelo y se pierden por lixiviación en proporciones considerables (Havlin et al., 2017). Junto a esto hay que añadir las que son desplazadas del complejo adsorbente por el hidrógeno ( $H^+$ ), y también las que son captadas por las plantas (Navarro & Navarro, 2003). Los principales procesos se resumen en la Figura 2.



**Figura 2.** Causas que provocan la acidez en los suelos con alta pluviometría según (Navarro & Navarro, 2003).

La lixiviación, es uno de los mayores efectos sobre la formación de ácido en los suelos y corresponde al transporte de agua debajo de la zona de las raíces transportando iones disueltos o solubles (Havlin et al., 2017). Los aniones más solubles son  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{HCO}_3^-$ , mientras que los cationes más solubles son  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{K}^+$ . Dado que se debe mantener la neutralidad eléctrica de la solución del suelo, a medida que los aniones se lixivian, los cationes básicos también se lixivian, por lo tanto, se reduce la saturación de bases (SB) y en consecuencia se acidifica el pH del suelo al comenzar a dominar el  $\text{H}^+$  en el suelo.

La MOS juega un papel importante, ya que a medida que los microorganismos descomponen la MOS se libera  $\text{CO}_2$  que reacciona rápidamente con el  $\text{H}_2\text{O}$  para producir  $\text{H}^+$  y  $\text{HCO}_3^-$ . La descomposición de los residuos orgánicos y la respiración de las raíces aumenta el  $\text{CO}_2$  en la atmósfera del suelo hasta aproximadamente diez veces el  $\text{CO}_2$  atmosférico; por lo tanto, la acidez producida por el  $\text{CO}_2$  como ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) en el suelo es mayor que la producida en la atmósfera. Además, los microorganismos producen ácidos orgánicos mediante la siguiente reacción:



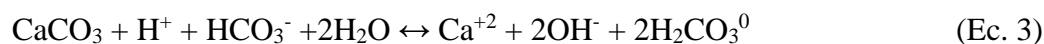
El tipo de residuo vegetal que se incorpora al suelo influye en la cantidad de ácido producido. Por ejemplo, los residuos en un bosque de coníferas producen más ácido que en suelos bajo bosques caducifolios o pastizales (Havlin et al., 2017). Además, la MOS contiene grupos carboxílicos y fenólicos reactivos que se comportan como ácidos débiles, liberando  $\text{H}^+$ . Por su parte, el contenido de MOS del suelo varía según el medio ambiente (clima), y la vegetación, por tanto la contribución de la materia orgánica (MO) que se incorpora a la acidez del suelo es variable (Havlin et al., 2017).

Los requerimientos de los nutrientes dependen de cada cultivo y de acuerdo con la reducción de la concentración de los catiónicos básicos principalmente por la lixiviación se reducirá la SB y aumentará la acidez del suelo. Las plantas alteran el pH del suelo a través de desequilibrios en la absorción de cationes/aniones (Havlin et al., 2017). A medida que las raíces de las plantas absorben los cationes, la neutralidad eléctrica se mantiene mediante la absorción de un anión o la liberación de  $\text{H}^+$  y/o ácidos orgánicos. Cuando las plantas absorben aniones, se produce la absorción de cationes o la liberación de  $\text{OH}^-$  o  $\text{HCO}_3^-$  que ocurre para mantener la neutralidad eléctrica. Cuando el catión supera al anión, se libera un exceso de  $\text{H}^+$  a la rizosfera, mientras que se libera  $\text{OH}^-$  / $\text{HCO}_3^-$  cuando el anión excede la absorción de cationes (Havlin et al., 2017).

### **Disolución y precipitación de carbonatos**

Cuando el  $\text{CaCO}_3$  está presente en los suelos, tiene una influencia dominante sobre muchas propiedades. La mayoría de los suelos calcáreos tienen un pH en el rango de 7,3 a 8,5 y solamente en el caso de suelos sódicos el pH normalmente es superior a 8,5 (Casanova et al., 2006).

Las reacciones tampón del pH en los suelos calcáreos involucran carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ), ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) y agua como se presenta en la Ecuación 3 (Ovalle et al., 2023):



Si se agrega un ácido al suelo, los iones  $\text{H}^+$  reaccionan con los iones  $\text{OH}^-$  y la reacción se desplaza hacia la derecha, disolviendo el  $\text{CaCO}_3$ . Por el contrario, si se agrega una base, la reacción se desplaza hacia la izquierda, precipitando  $\text{CaCO}_3$ . En ambos casos, se produce una resistencia al cambio de pH.

Por otra parte, el Cuadro 1 expresa la cantidad de  $\text{CaCO}_3$  necesaria para aumentar el pH de 0,20 m en 0,1 unidades, en tanto el Cuadro 2 hace referencia a las unidades de pH que pueden ser modificadas con 1 ton  $\text{CaCO}_3$  en distintos grupos de suelos. Y se resume la información disponible sobre resultados de mediciones de la  $CT_{pH}$  en algunos suelos de Chile, presentada por Casanova et al. (2006).

**Cuadro 1.** Capacidad tampón ( $CT_{pH}$ ) de pH de algunos suelos de Chile (Casanova et al., 2006).

Región	Suelos	$CT_{pH}$ CaCO <sub>3</sub> (ton ha <sup>-1</sup> )	Referencias
O'Higgins	Graníticos	0,10 – 0,55	Aldunate (2000); Rodríguez <i>et al.</i> (2001)
	Terrazas marinas	0,15 - 0,40	Aldunate (2000)
Ñuble/Bío Bio	Trumaos	0,24 - 0,71	Mendoza (2000)
	Rojos arcillosos	0,30 - 1,11	Mendoza (2000)
Araucanía	Trumaos	0,50 - 2,28	Campillo y Sadzawka (1993); Rojas (1999)
	Rojos arcillosos	0,33 - 1,48	Campillo y Sadzawka, (1993); Rojas (1999)
	Transicionales	0,44 - 1,27	Campillo y Sadzawka, (1993); Rojas (1999)
	Graníticos	0,15 - 0,45	Rojas (1999)
Araucanía/Los Lagos	Trumaos	0,83 - 1,67	Paredes (1997); Rodríguez (1995)
	Trumaos	0,71 - 1,50	Campillo (1994); Campillo y Sadzawka (1993); Dumont (1994); Suárez (1991)
	Rojos arcillosos	0,67 - 0,83	Suárez (1991)
	Transicionales	0,83 - 1,00	Suárez (1991)
	Ñadis	1,00 - 1,25	Suárez (1991)

**Cuadro 2.** Capacidad tampón de pH de los distintos grupos de suelos, (Casanova et al., 2006).

<b>Grupo de Suelos</b>	<b><math>CT_{pH}</math></b> (pH/ton CaCO <sub>3</sub> /ha)
Trumaos	0,12
Rojos Arcillosos	0,15
Granítico y Metamórficos	0,18
Aluviales del valle central	0,20

### Manejo del pH del suelo

La importancia del pH del suelo es decisiva para el crecimiento de las plantas. Sin embargo, el efecto de la acidez o alcalinidad del suelo no afecta directamente la producción, sino que tiene un efecto indirecto, con excepción de casos extremos de acidez o alcalinidad (Sierra, 1982).

En los sistemas acuosos, el agua se disocia en iones de H<sup>+</sup> y en iones hidroxilo (OH<sup>-</sup>), según la ecuación:



Donde se cumple la condición que el producto de las actividades química de los iones H<sup>+</sup> e OH<sup>-</sup> es constante (10<sup>-14</sup> μM), de manera que, si una aumenta, la otra disminuye.

$$[H^+][OH^-] = 10^{-14} \quad (\text{Ec. 5})$$

Estrictamente, el pH (potencial del hidrogeno) del suelo se define como el logaritmo (en base 10) negativo de la actividad del H<sup>+</sup> en la solución y es una medida de la acidez activa. La actividad química de un ion puede definirse como la concentración efectiva de ese ion en una solución. En soluciones de suelos que no están afectados por sales, los términos actividad y concentración son prácticamente iguales:

$$pH = \log [H^+] \quad (\text{Ec. 6})$$

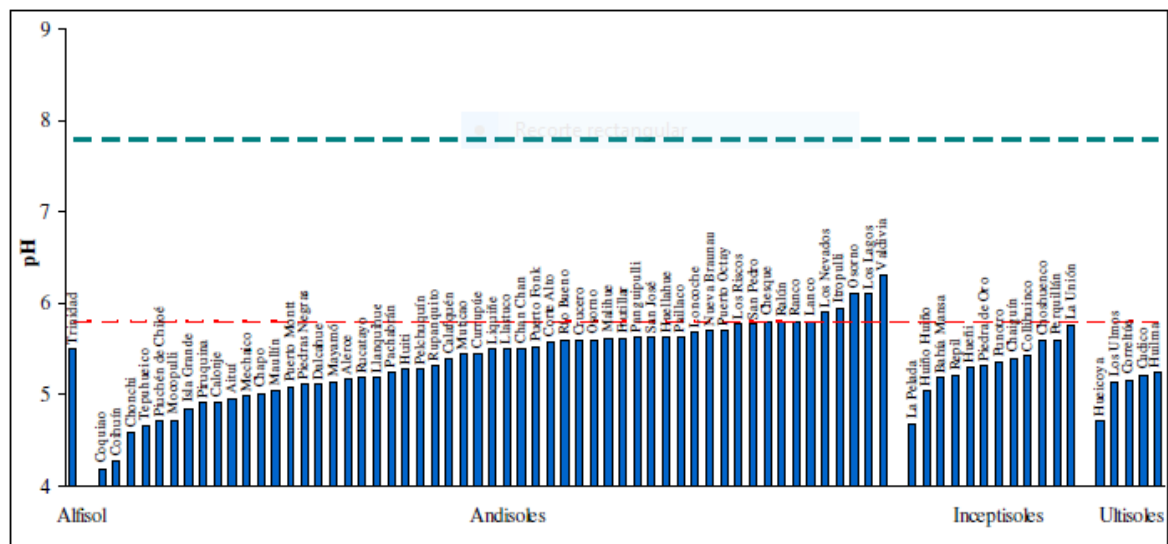
$$pH + pOH = 14$$

En los suelos de la Zona Sur de Chile, el origen de la acidez está dada principalmente por la MOS, hidróxidos de Fe y Al, tipo de arcilla y contenido de CO<sub>2</sub> (Sierra, 1982).

Como antecedente, la zona de estudio presenta problemas asociados a la acidez del suelo que repercutirá en una menor disponibilidad de algunos nutrientes. Del mismo modo, lluvias excesivas promoverán procesos de pérdidas de nutrientes como lo son la lixiviación de cationes, escorrentía y desnitrificación. Por otro lado, debido a la naturaleza de los suelos de esta región (derivados de ceniza volcánica) estos tienden a retener el fósforo (P), por lo cual se recurren a prácticas de sobre fertilización de este elemento para llegar a niveles

productivos.

En la Región de Los Lagos, el porcentaje de suelos con  $\text{pH} < 5,8$  es de aproximadamente un 88% (Figura 3). En esta Región se encuentran suelos pertenecientes a los Ordenes Alfisol, Andisol, Inceptisol y Ultisol, todos de  $\text{pH} < 5,8$ , con excepción de algunos representantes de los Andisoles (Casanova et al., 2006). El manejo habitual de las praderas considera el establecimiento de mezclas forrajeras con una fertilización base, las cuales se degradan en el tiempo por invasión de especies poco palatables, dando paso a procesos de regeneración o recuperación mediante aplicación de fertilizantes en cobertera y resiembras con o sin labranza, impactando las propiedades físicas del suelo que resultan en cambios en las condiciones de aireación que afecta la dinámica de la MOS y la acidificación (Zúñiga et al., 2015).



**Figura 3.** Valores de  $\text{pH-H}_2\text{O}$  de los primeros 0,20 m de las Series y Asociaciones de suelos de la Región de Los Lagos (Sadzawka, 2006a). Los colores de las líneas punteadas, usadas para separar los suelos con  $\text{pH-H}_2\text{O} < 5,8$  que es el límite que fijó el SIRSD (Sistema de Incentivo para la recuperación de Suelos Degradados) del Ministerio de Agricultura Chile para optar a bonificación por encalado. Los suelos con  $\text{pH-H}_2\text{O} > 7,8$  tienen una probabilidad de deficiencias nutritivas alta.

Considerando las diversas posibilidades de manejo sitio específicos dentro de un mismo tipo de suelo, es esperable que la capacidad tampón varíe en función de los manejos de la pradera, por lo que es necesario cuantificar y comprender esta variabilidad, con miras a optimizar el aprovechamiento de los nutrientes del suelo y prevenir toxicidad por  $\text{Al}^{+3}$ .

### Suelos de la zona de estudio

El suelo del sitio en estudio pertenece a la Serie de Suelos Osorno, clasificada como Typic Hapludands (CIEN, 2000), y se caracteriza por ser un suelo profundo, originado a partir de cenizas volcánicas, depositadas sobre planos fluvioglaciares, en posición de terrazas que se

ubicados en la depresión intermedia, a una altura de 90 a 150 msnm. Presenta una clase textural franco limosa y color pardo oscuro y muy oscuro en el matiz 7.5YR en todo el perfil. Son suelos en topografía de lomajes suaves, de permeabilidad moderada y bien drenados.

En Chile, los suelos al sur del paralelo 38°LS están sometidos a una intensa lixiviación debido a que la mayoría poseen alta porosidad, lo que se traduce en una buena infiltración y drenaje rápido, (Casanova et al., 2006). De esta forma se pueden encontrar suelos, como la Serie Osorno (CIREN, 2000) con una saturación de bases de 13% en el horizonte superficial, y de 6% bajo los 36 cm de profundidad.

### **Caracterización Agroclimática de la zona**

Según los datos proporcionados por la estación meteorológica “La Pampa”, la cual pertenece a INIA y se encuentra ubicada en Purranque, la Comuna presenta temperaturas promedio mensuales que varían entre los 5,6 y 16,8°C, siendo el mes más frío julio y el más cálido febrero. En relación con las temperaturas mínimas mensuales, estas varían entre 0,2 y 9,4 °C, mientras que las temperaturas máximas mensuales se encuentran en un rango entre los 9,5 y 29,3°C. Con respecto a las temperaturas promedio mensuales del suelo, estas se encuentran entre los 4,4 y 18,3°C. En relación con las precipitaciones acumuladas anuales estas entre el año 2015 y 2023 variaron entre los 780 y 1.343 mm. Para el año 2022 se acumularon 1034 mm de precipitación, lo que refleja una reducción del 23% con respecto del promedio de los últimos 8 años. El mes más lluvioso corresponde a agosto, con 289 mm y el mes más seco corresponde a enero, con 6,1 mm (INIA, 2023). Todos los datos presentados fueron obtenidos del INIA y correspondieron a los promedios de los datos históricos para el periodo correspondido entre el 2015 y el 2023.

### **Manejos del sistema de producción pecuario**

En cuanto al manejo, actualmente la E.E. Oromo solo se dedica al rubro lechero, contando con praderas con una carga animal de 2,45 UA ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. El Rebaño está compuesto por 2/3 de vacas Holstein Neozelandés y 1/3 de cruce entre Holstein Neozelandés y Jersey. El sistema de lechería está basado exclusivamente en la producción de praderas para uso directo en pastoreo o como forraje conservado en forma de ensilaje. Su sistema de pastoreo corresponde a un sistema de pastoreo rotativo, en el cual se va rotando entre cinco sectores y se deja un sexto sector, el cual está destinado a crianza (Faundez, 1985). Los rendimientos de la pradera en términos de MS rodean entre los 12.000 y 13.000 kg MS ha<sup>-1</sup>.

Respecto a la fertilización, se aplican fertilizantes químicos en 73 ha que corresponden a los potreros de lechería, con una aplicación de una mezcla fertilizante de grado 15-20-18- 2 (CaO)- 3 (Na), con dosis de 342,5 kg ha<sup>-1</sup> anualmente. Así, el aporte anual de cada elemento es de: 51,4 kg N ha<sup>-1</sup>; 68,5 kg P ha<sup>-1</sup>; 61,7 kg K ha<sup>-1</sup>; 6,85 kg CaO ha<sup>-1</sup> y 10,3 kg Na ha<sup>-1</sup>. En conjunto con la aplicación de fertilizantes se realizan riegos con purines de vaca. Además, se realizó un encalado el año 2020 con 1 ton cal ha<sup>-1</sup> correspondiente al producto Cal Agrícola

de Soprocal. En particular el S5 no ha recibido aplicación de fertilizantes o encalado en los últimos 10 años.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Aplicar el método de cálculo de la capacidad tampón de pH del suelo para recomendar un manejo sitio específico de encalado en un suelo de origen volcánico bajo producción de pradera.

### **Objetivos específicos (OE)**

**OE1:** Identificar las propiedades del suelo que tienen mayor relación con la capacidad tampón de pH en los sectores de manejo del sitio en estudio.

**OE2:** Evaluar la efectividad de las dosis de carbonato de calcio (encalado) en el pH, fósforo y en la producción de pradera.



## MATERIALES Y MÉTODO

### Área de estudio

El sitio de estudio seleccionado fue la Estación Experimental (E.E.) Oromo de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile. El predio está ubicado en la Región de Los Lagos, en la Provincia de Osorno, Comuna de Purranque. Este predio tiene una superficie de 232 ha divididas en dos sectores: i) “Sector alto” que abarca una superficie de 170 ha (40°53’S, 73°06’30’’O, 150 m.s.n.m.) destinadas a la producción de praderas, que corresponde a un terreno con topografía entre plana y ligeramente plana en donde crecen praderas naturales y mejoradas, siendo el sector productivo principal del predio y; ii) “Sector bajo” que abarca una superficie de 62 ha (40°53’ S, 73°08’ O 135 m.s.n.m) y con dominancia de pendientes planas que se encuentra cercano al río Forrahue; la vegetación que predomina son bosques nativos y vegetación pantanosa asociada a eventos de anegamientos estacionales (Faundez, 1985).

### Métodos

En el sitio de estudio se definieron 6 sectores (S1, S2, S3, S4, S5 y S6) dentro de la E.E. Oromo (Apéndice 1), definidos en base al manejo realizado en el predio y continuando con la misma delimitación definida para un muestreo previo, realizado en febrero del 2022. Dentro de cada sector se recolectaron muestras de suelo mediante barreno a dos profundidades (0-10 cm y 10-20 cm), con 3 repeticiones (a, b y c) por profundidad, por lo que en total se recolectaron 36 muestras de suelo en abril del año 2022, dentro de las actividades del trabajo de graduación de Carbonell (2022). Estas muestras de suelo fueron secadas al aire, tamizadas a 2 mm y almacenadas en frascos plásticos en una bodega. Además, fueron caracterizadas en sus niveles de pH, MOS, N-P-K disponibles y propiedades físicas como textura y densidad aparente dentro de las actividades del proyecto Fondecyt Regular N°1214097.

### Requerimientos de encalado

En este estudio se utilizaron las 36 muestras de suelo recolectadas en abril de 2022 para calcular el requerimiento de encalado y la capacidad tampón del pH. Se utilizó la técnica de incubación con KOH a 60°C por 24 horas. En el caso de requerimiento de encalado, se necesita estimar un volumen de solución de KOH-KCl y la concentración promedio en mol L<sup>-1</sup> de OH<sup>-</sup> de acuerdo al método propuesto por Sadzawka et al. (2006). Estos valores se ingresan a la Ecuación 7 de requerimiento de encalado:

$$\text{Requerimiento de encalado (CaCO}_3 \text{ ton ha}^{-1} \text{ (0,2m))} = a \times M \times 10 \quad (\text{Ec. 7})$$

donde:

$a$ : mL de solución de KOH-KCl

$M$ : concentración promedio en mol L<sup>-1</sup> de OH<sup>-</sup> de la solución KOH-KCl.



**Figura 4.** Sectores (S) del muestreo de suelo en la Estación Experimental Oromo.

Para calcular la capacidad tampón del pH del suelo ( $CT_{pH}$ ) necesaria para determinar la resistencia del suelo al cambio de pH, se realiza una curva de titulación, que relaciona la variable independiente, correspondiente a los diferentes volúmenes de KOH-KCl, con la variable dependiente, equivalente al valor de pH alcanzado con estos volúmenes de KOH-KCl. La  $CT_{pH}$  finalmente será obtenida como la pendiente de la regresión lineal de esta curva (Sadzawka et al., 2006) aplicando la Ecuación 8:

$$CT_{pH}(CaCO_3 \text{ (ton ha}^{-1}\cdot 0,2 \text{ m)}) = M/b1 \quad (\text{Ec. 8})$$

donde:

$M$ : concentración promedio en mol L<sup>-1</sup> de OH<sup>-</sup> de la solución KOH-KCl.

$b1$ : pendiente de la curva de regresión lineal.

### Ensayo de invernadero

Para evaluar la efectividad de las dosis de encalado en el pH del suelo, P disponible (P-Olsen) y en la producción de pradera, se recolectaron muestras de suelo superficial (0-20 cm) desde los sectores S3, S4 y S5 de la E.E Oromo en julio de 2023 (Figura 4). Se utilizó el S5 como sitio de referencia, ya que no ha recibido aplicación de cal y se espera tener un pH más ácido; mientras que los sectores S3 y S4, que son sectores bajo manejo de fertilizantes y cal, se incluyen ambos para tener al menos 2 repeticiones para corroborar los efectos de la cal en este tipo de suelos. Estas muestras de suelo fueron transportadas para establecer el ensayo en macetas en el invernadero perteneciente al Departamento de Ingeniería y Suelos, ubicado en

la Estación Experimental Antumapu de la Facultad de Ciencias Agronómicas, Comuna de La Pintana, Región Metropolitana.

La unidad experimental correspondió a una maceta de plástico con 3 kg de suelo. En cada maceta se sembró una mezcla forrajera equivalente a una dosis de ballica perenne (*Lolium perenne* L.) de 20 kg ha<sup>-1</sup> y trébol blanco (*Trifolium repens* L.) de 3 kg ha<sup>-1</sup> (Apéndice 2). Se evaluaron como tratamientos una dosis de encalado que fue calculada para cada sector utilizando la  $CT_{pH}$  medida previamente, manteniendo para cada sector un control sin aplicación de encalado (Cuadro 3). Cada tratamiento fue establecido con 5 repeticiones. Además, se determinó el pH en agua (relación 1:2,5) inicial y P disponible, según el método propuesto por Sadzawka et al. (2006). Se utilizó como pH objetivo para el buen desarrollo de una pradera mixta un valor de pH = 6,0. Así, la dosis de encalado fue calculada con la Ecuación 9:

$$\text{Corrección acidez suelos} \left( \frac{\text{ton CaCO}_3}{\text{ha}} \right) = \frac{(\text{pH objetivo} - \text{pH inicial})}{CT_{pH}} \quad (\text{Ec. 9})$$

**Cuadro 3.** Tratamientos para evaluar en el ensayo en invernadero.

<b>Tratamiento</b>	<b>Aplicación de encalado</b>
S3-I	Si
S3-II	No
S4-I	Si
S4-II	No
S5-I	Si
S5-II	No

Al establecimiento de la pradera mixta se aplicó una dosis de N-P-K al suelo equivalente a 51,4 kg N ha<sup>-1</sup>, 68,5 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> y 61,65 kg de K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>, para generar las condiciones óptimas de nutrición de estos macroelementos primarios, de manera que la única variable a evaluar fuese la dosis de encalado. Se estableció un riego con agua destilada para evitar el aporte de cationes que pudiesen modificar el pH del suelo, que fue provista por el Laboratorio de Química de Suelos y Aguas. La frecuencia y volumen de riego de las macetas fue estimada de forma semanal, manteniendo un contenido volumétrico de agua del suelo cercano a 20%, el que fue monitoreado con un sensor portátil modelo Teros 11 de la marca Meter Group®.

La mezcla forrajera se mantuvo en producción entre el 22 de diciembre de 2023 y el 18 de marzo de 2024 (3 meses). Posteriormente fue cosechada (corte) y secada en estufa a 70°C para la determinación de la materia seca (MS). Durante el periodo de desarrollo de la pradera se realizaron dos cortes: 31 de enero 2024 (primer corte) y el 18 de marzo 2024 (segundo corte), donde la suma de ambos cortes correspondió a la MS total del periodo de estudio.

Además, al final del ensayo, después del segundo corte de la pradera, se recolectaron muestras de suelo de cada maceta para la determinación del pH-H<sub>2</sub>O del suelo y el P disponible (P-Olsen) de cada maceta.

### **Análisis estadístico**

Se estableció un diseño experimental completamente al azar, con estructura factorial de tratamientos, donde el factor fue el cultivo con dos niveles, con cal y sin cal, establecidos como ensayo en invernadero.

Los datos fueron analizados a través de un ANDEVA, y en caso de encontrarse significancia en las variables, entre sector y tratamiento o en la interacción entre sector y tratamiento o en su defecto los factores actuando de manera independiente, se realizó la prueba de comparación múltiple de Tukey, con un nivel de significancia de 95%.

Para los datos de las propiedades del suelo con mayor relación a la capacidad tampón, se realizó una matriz de correlación, con R de Pearson.

Todos los análisis se llevaron a cabo con el software estadístico InfoStat.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Propiedades del suelo con mayor relación a la capacidad tampón

En el Cuadro 4 se presentan los resultados de los análisis de pH-H<sub>2</sub>O, P disponible y capacidad tampón de pH (CT<sub>pH</sub>) en los tres sectores (S) evaluados en el intervalo de profundidad de 0-20 cm durante la caracterización de los sitios de estudio.

**Cuadro 4.** Valores promedios del pH-H<sub>2</sub>O, fósforo disponible (P-Olsen) y capacidad tampón de pH (CT<sub>pH</sub>) en los tres sectores (S) evaluados en el intervalo de profundidad de 0-20 cm.

Parámetros	Unidad	Sectores		
		S3	S4	S5
pH-H <sub>2</sub> O	-	5,87	5,51	5,45
P-Olsen	mg kg <sup>-1</sup>	10,16	4,32	5,76
CT <sub>pH</sub>	CaCO <sub>3</sub> ton ha <sup>-1</sup>	0,52	0,72	0,87

Los resultados muestran que el suelo de los tres sectores seleccionados presentó valores de pH moderada a fuertemente ácidos. Estos valores son comunes en los suelos de la Región de Los Lagos, debido a las características climáticas, como la precipitación alta, que favorece la lixiviación de cationes básicos como Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> y Na<sup>+</sup> (Bernier y Alfaro, 2006; Luzio *et al.*, 2003). Dicho proceso genera que los iones de H<sup>+</sup> y Al<sup>3+</sup> que contribuyen a la acidez del suelo dominen en la solución suelo. Es importante destacar que existen otros factores que contribuyen a una mayor acidez de estos suelos como son: i) contenido de MOS alta; ii) la actividad biológica alta, que en los suelos puede llevar a la acumulación de ácidos orgánicos procedentes de la descomposición de la MO; iii) fertilización nitrogenada con fuentes amoniacales y, iv) material parental (cenizas y vidrios volcánicos) que presentan variadas condiciones de acidez que afectan el pH de estos suelos (Bernier y Alfaro, 2006).

Por otra parte, los contenidos de P- Olsen inorgánico son medios a bajos. En este sentido, la disponibilidad de P depende de las propiedades químicas como la mineralogía y el pH del suelo (Sadzawka, 2006b). En particular, la mineralogía de los Andisoles se caracteriza principalmente por la dominancia de alofán (Silicato de Al amorfo), los cuales tienen en su superficie formaciones de Al y/o Fe con complejos húmicos, asociación que presenta una alta capacidad de retención de fosfato debido a su mayor superficie (Casanova *et al.*, 2013). A medida que hay una mayor presencia de óxidos de Al y Fe en el suelo, la retención del fosfato aumenta, y sobre el 3% de presencia de estos óxidos la retención del fosfato es cercana al 100% (Casanova *et al.*, 2013).

Los valores de CT<sub>pH</sub> se encuentran dentro del rango de valores previamente presentados en el Cuadro 1, haciendo referencia a la cantidad de CaCO<sub>3</sub> necesaria para aumentar el pH de 0,20 m en 0,1 unidades, entre ellos los suelos trumaos, que corresponden a los suelos de la E.E. Oromo.

### Caracterización de las variables respuesta a la aplicación de cal (encalado)

En el Cuadro 5 se presentan los valores promedios de las variables medidas en el ensayo de macetas, que incluyó el pH-H<sub>2</sub>O, fósforo disponible (P-Olsen) y producción de materia seca (MS) de los 3 sectores evaluados. Es importante recordar que dichos análisis de suelos fueron realizados con muestras recolectas después de la cosecha de la mezcla forrajera en el ensayo.

**Cuadro 5.** Valores promedios del pH-H<sub>2</sub>O, fósforo disponible (P-Olsen) y producción de materia seca (MS) en los tres sectores (S) evaluados con cal (TI) y sin la aplicación de cal (TII) en el ensayo de macetas.

Propiedades	Sectores <sup>1</sup>					
	S3 TI	S3 TII	S4 TI	S4 TII	S5 TI	S5 TII
<b>pH</b>	6,39 ± 0,18	5,68 ± 0,36	6,23 ± 0,12	5,41 ± 0,5	6,32 ± 0,11	5,71 ± 0,12
<b>P-Olsen (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	18,27 ± 8,02	15,15 ± 10,57	7,51 ± 2,52	9,91 ± 1,94	7,47 ± 3,02	12,15 ± 3,74
<b>MS (Kg/ha<sup>-1</sup>)</b>	1432 ± 167,09	1243 ± 85,69	1048 ± 72,80	963 ± 60,80	1189 ± 152,96	1017 ± 91,14

<sup>1</sup> Valores promedio ± D.E.

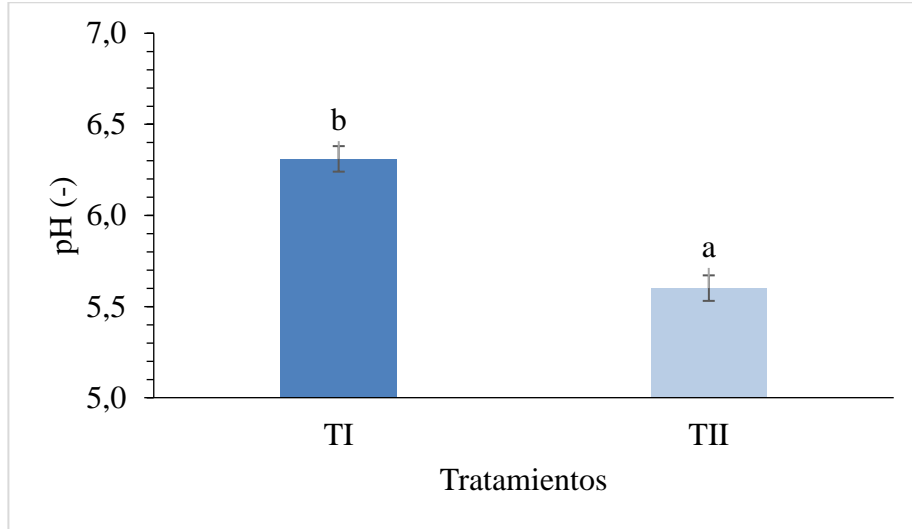
El pH de los suelos varió en un rango desde lo que se considera como fuertemente ácido (5,41) hasta los débilmente ácidos (6,39) (Sadzawka et al., 2006). Se pudo observar que los sectores sin aplicación de cal (TII) tienden a tener un pH más ácido en comparación con los sectores con aplicación de cal dentro de cada grupo.

Por otra parte, el análisis del P-Olsen, como una medida de la disponibilidad en el suelo, mostró una variabilidad en los niveles de P disponible entre los diferentes sectores. Los valores más altos se registraron en S3 TI, con niveles altos, mientras que los valores más bajos están en S4 TI, niveles bajos, donde no hay una tendencia clara entre TI y TII. A diferencia del pH, el P-Olsen presenta mayor significancia en la comparación entre los sectores, no así en los tratamientos.

Respecto a la materia seca total (MS), se identificó una producción mayor en los tratamientos TI comparado con TII, lo que se asoció al efecto combinado de la aplicación de cal.

### Análisis comparativo entre los tratamientos de la variable respuesta (pH)

La respuesta del pH a la aplicación de cal solo mostró diferencias significativas entre los distintos tratamientos, como se muestra en la Figura 5.



**Figura 5.** pH de los suelos, con dos tipos de tratamientos (TI con cal; TII sin cal).

No se encontraron diferencias significativas entre los sectores en cuanto a la modificación del pH. Sin embargo, se registró un efecto significativo entre los tratamientos, esto indica que la aplicación de cal (tratamiento TI) incrementó significativamente el pH, en comparación con el tratamiento sin cal (TII). La aplicación de la cal mostró un efecto alcalinizante en el medio tratado, elevando el pH de aproximadamente desde un valor de 5,6 a 6,3.

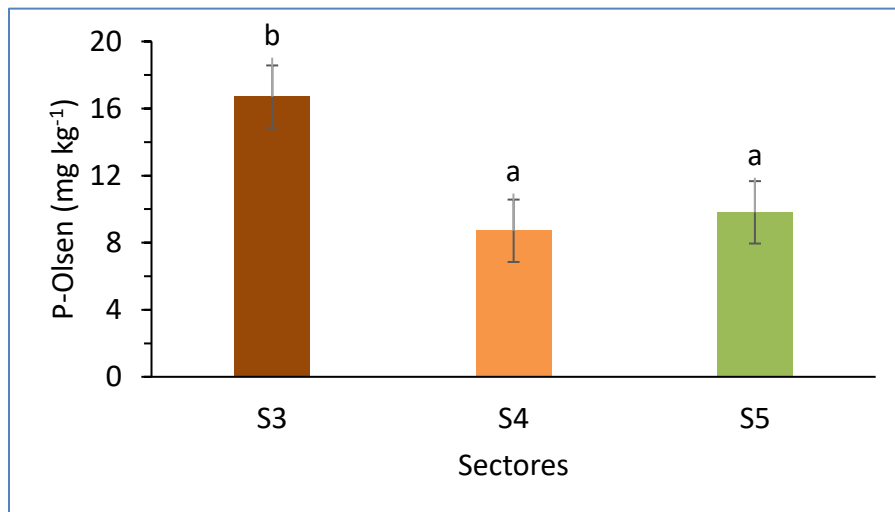
El aumento del pH al aplicar cal se debe a su capacidad para neutralizar ácidos mediante la liberación de iones  $\text{OH}^-$  en el medio (Sadzawka, 2006a)(Ec.3). Uno de los factores relevantes para que la aplicación de cal sea efectiva tiene relación con el contenido de agua en el suelo (Espinosa & Molina, 1999). Así, los óxidos reaccionan inmediatamente con el agua del suelo, transformándose en hidroxilos y neutralizando la acidez a través de su  $\text{OH}^-$  que es una base fuerte, por lo que son más efectivos a corto plazo (Espinosa y Molina, 1999). Las reacciones de encalado comienzan con la neutralización de  $\text{H}^+$  en la solución del suelo, agregando una base (generalmente  $\text{OH}^-$  o  $\text{CO}_3^{2-}$ ) procedente del material encalante (Havlin et al., 2017). La velocidad de esta reacción está directamente relacionada con la velocidad a la que se neutralizan los iones  $\text{H}^+$  en solución. Mientras haya suficiente  $\text{CaCO}_3$  disponible, el  $\text{H}^+$  se convertirá en  $\text{H}_2\text{O}$ . La eliminación continua de  $\text{OH}^-$  hasta la precipitación de  $\text{Al}^{3+}$  como  $\text{Al}(\text{OH})_3$  y sustitución en la CIC por  $\text{Ca}^{2+}$ . De este modo, a medida que aumenta el pH del suelo, también aumenta la SB (Havlin et al., 2017). Así mismo, estas prácticas de encalado benefician a la estructura del suelo en situaciones especiales, donde el  $\text{CaCO}_3$ , específicamente el  $\text{Ca}^{2+}$ , promueve la floculación de las arcillas cuando éstas se encuentran dispersas, causando su agregación (Sadzawka, 2006a).

Como resultado de la aplicación de  $\text{CaCO}_3$ , los valores de pH aumentaron significativamente en relación con el control sin aplicación y presentaron un incremento con la dosis de enmienda aplicada. Esto coincide con los resultados encontrados por Suárez y Márquez (1993) y Mora et al. (2002) en suelos de origen volcánicos. La base para seleccionar el punto al cual debe ser neutralizado el suelo puede ser el pH más favorable para el crecimiento de una especie o la inactivación del efecto tóxico del  $\text{Al}^{3+}$  intercambiable (Sadzawka, 2006a).

La adición de cal a los suelos es importante por un triple efecto: i) establecer un pH más apropiado para la mayoría de los cultivos, ii) por los efectos beneficiosos que indirectamente reciben los cultivos en lo que respecta a la absorción y asimilación de diversos elementos esenciales y, iii) por los efectos sobre la disponibilidad del N, P, K y otros elementos esenciales (Navarro y Navarro, 2003).

### Análisis comparativo entre los sectores de la variable respuesta Fósforo (P-Olsen)

El efecto de la aplicación de cal en la disponibilidad de P solo presentó significancia en la comparación entre en los 3 sectores, como se presenta en la Figura 6.



**Figura 6.** Concentración de fósforo disponible (P-Olsen) en suelos de los 3 sectores con la aplicación de cal.

Así, en la disponibilidad de P se encontró una diferencia significativa entre sectores, pero no así entre los tratamientos. Lo anterior, se relaciona con el hecho que, dependiendo de las condiciones sitio específicas y las especies cultivadas, el encalado puede aumentar, disminuir o no tener efecto sobre el P disponible (Le Mare y León, 1989). Así mismo, el rango óptimo de pH del suelo dentro del cual se observa la máxima disponibilidad de P se encuentra entre 6,5 y 7,5, en ese rango se encuentra fundamentalmente la máxima solubilidad de las formas de P inorgánico del suelo (Rojas, 2002).

Además, es importante considerar que una parte importante del P disminuye desde el suelo por la adsorción de las plantas (salida), lo que está asociado a la habilidad de sus raíces para



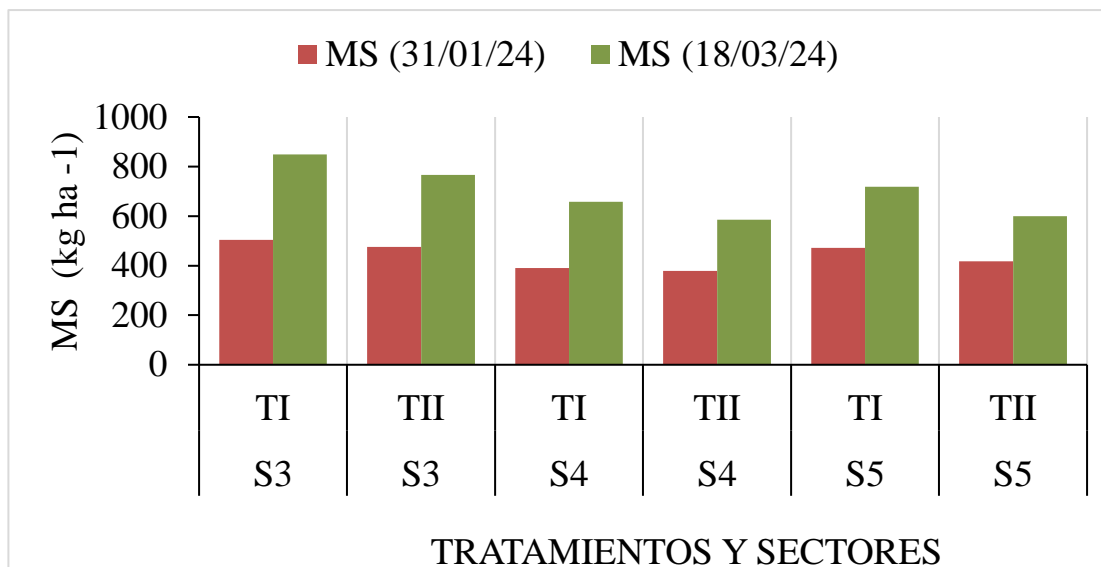
explorar e interceptar el P en un volumen de suelo, lo que depende a su vez de la capacidad fisiológica de absorción de P de cada especie (Matus, 2006). Es importante recordar que el P es uno de los nutrientes más importante para el crecimiento y desarrollo de las plantas, debido a que cumple funciones estructurales en macromoléculas como ácidos nucleicos y también actúa en la transferencia de energía en procesos metabólicos de biosíntesis y degradación (FAO, 2007). El P en solución es la fuente de P que la planta puede absorber fácilmente y se presenta como aniones ortofosfato monovalente ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) y divalente ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ), la mayor presencia de una o de otra especie estará dada por el pH (FAO, 2007).

En particular en este estudio, se identificó que el sector (S3) fue significativamente diferente a los otros sectores, presentando la disponibilidad mayor de P en el suelo; sin embargo, los sectores S4 y S5, no presentaron diferencias significativas entre ellos. Esta variabilidad en los resultados del efecto en el P disponible del suelo está dada por las características del suelo. En suelos ácidos, la retención de P agregado se produce principalmente por reacción con Al, Fe y Mn, que se encuentran ya sea como iones disueltos, como óxidos, como óxidos hidratados que recubren las partículas del suelo o en la superficie de los minerales de carga variable (Sadzawka, 2006b). El conjunto estas reacciones se engloban generalmente en el término fijación de P o, más adecuado, retención de P, ya que el P no se fija permanentemente sino que se va liberando a la solución suelo lentamente en el tiempo (Sadzawka, 2006b).

Por otra parte, en la Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff, 1999), la retención de P en el suelo es un criterio que se incluye dentro de las propiedades ándicas del Orden Andisol. Los Andisoles y otros suelos que contienen cantidades significativas de alófana, imogolita u otros minerales pobremente cristalinos, tienen una alta capacidad de retención de P, pudiendo llegar a retener un 99% del P aplicado como fertilizante (Besoin y Sadzawka, 1999; CIREN 1999a, 1999b, 2003; Sadzawka y Carrasco, 1985; Sadzawka y Bernier, 1986). Las reacciones de fijación de P en los suelos Andisoles, son mucho más enérgicas y estos suelos adsorben apreciables cantidades a través del tiempo (Rojas, 2002). Al respecto, a través de Análisis de Laboratorio en Andisoles chilenos de la Zona Centro Sur y Sur, se han reportado valores de hasta 80 y 90% como "P fijado" del total del P aplicado como fertilizante. En estos suelos, la fijación de P ocurre en la superficie de algunos minerales tales como el alofán, la imogolita y complejos humus-Aluminio, especialmente en el suelo superficial. En general, los iones fosfatos tienen alta afinidad por el Al, Fe y Ca, elementos con que forman precipitados insolubles dependiendo de la acidez del suelo (Rojas, 2002).

### **Rendimiento de materia seca (MS) de la mezcla forrajera**

En la Figura 7 se presentan los resultados de la producción de materia seca (MS) de la mezcla forrajera ballica perenne (*Lolium perenne* L.) y trébol blanco (*Trifolium repens* L.), evaluada en dos cortes durante el ensayo, como respuesta a la aplicación de cal.



**Figura 7.** Producción de materia seca (MS en kg ha<sup>-1</sup>) en el primer (31 de enero 2024) y segundo corte (18 de marzo 2024). (TI con cal; TII sin cal).

Dentro de las especies más importantes utilizadas para la producción lechera del sur de Chile, se encuentra la rotación ballica perenne y trébol blanco. La ballica perenne es una especie perteneciente al grupo de las Gramíneas ocupada como especie forrajera, cuya longevidad establecida sola o como rotación ballica-trébol puede superar los 5 años (Demagnet, 2014).

Del ensayo establecido se realizaron dos cortes en los 3 meses de producción, durante la primera cosecha no se registró un aumento significativo entre los diferentes tratamientos. Lo anterior sugiere que la cal no había generado un efecto sobre las propiedades del suelo después de su incorporación. En este sentido, un cambio en el pH del suelo puede ser gradual y los efectos positivos en el crecimiento de las plantas pueden no ser inmediato, ya que las enmiendas son productos de lenta solubilidad, por lo que el tamaño de las partículas es muy importante, ya que mientras más fino es el material, mayor es el contacto que se produce entre las partículas y el suelo (Campillo, 1994). Campillo (1994) señaló que el efecto de la cal requiere de algún tiempo (30 a 60 días) para manifestarse en forma significativa (tiempo de incubación), donde este efecto se circunscribe sólo a la zona del perfil de suelo en donde es aplicado. Este autor agrega que las enmiendas precisan una aplicación y su incorporación al suelo mediante rastraje, con un período de incubación que es variable y depende de la solubilidad de la cal, granulometría, temperatura y contenido de agua del suelo; de esta manera, es posible extender su efecto en la capa arable del suelo (0-20 cm).

En este estudio, la producción de la pradera en las macetas aumentó significativamente después del primer corte de enero en todos los tratamientos, siendo de mayor relevancia los tratamientos con cal (TI), que alcanzaron promedios del total de MS, entre 1.048 a 1.353 kg MS ha<sup>-1</sup>, en dos cortes. Esto se relaciona con el estudio sobre productividad estimada de la pradera, de acuerdo a Leiva et al., (2021), en el período de análisis 2016 a 2018 (Apéndice 3). De tal manera, se espera que la producción alcance al final del año los promedios deseados según Faundez (1985) en términos de MS, que rodean entre los 12.000 y 13.000 kg MS ha<sup>-1</sup>.

Así mismo el aumento en materia fresca (follaje), fue visible durante el monitoreo constante del ensayo (Apéndice 4).

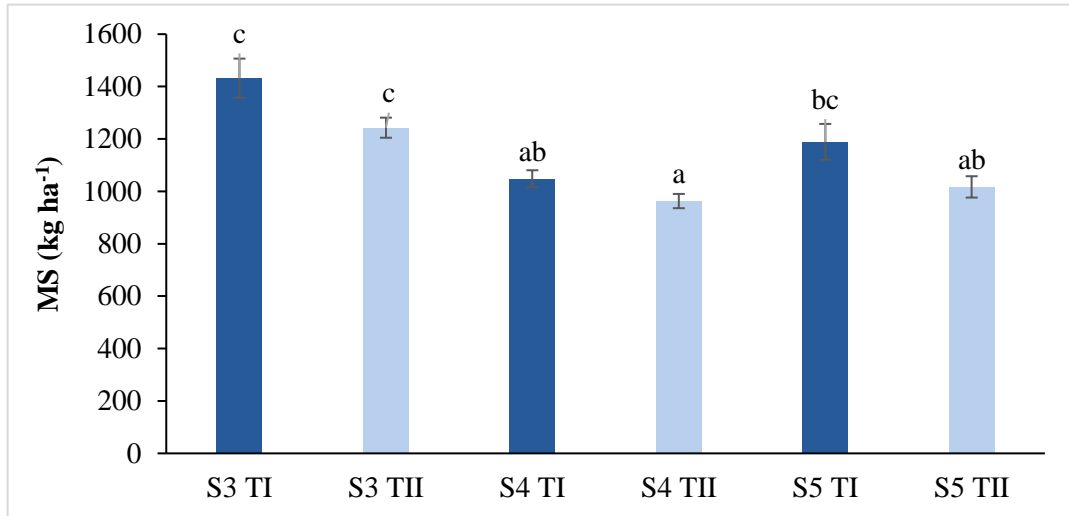
El aumento en la producción de MS también está relacionado tanto al cambio de pH del suelo, como también a la mayor disponibilidad de P, que permitió la absorción de este elemento y los otros nutrientes que fueron incorporados de la misma manera. Por lo tanto, la aplicación de cal (TI) generó un efecto positivo en la producción de MS, ya que, en todos los casos, los tratamientos con cal mostraron una producción mayor comparada con los tratamientos sin cal (TII). Tanto la aplicación de cal como el fertilizante incrementaron la producción de MS de la mezcla forrajera, y este efecto es más notable con el paso del tiempo (enero a marzo). Además, de reflejarse en la producción de MS, la aplicación de cal permitió mantener una composición botánica equilibrada de la gramínea y la leguminosa, que mejoran sustancialmente la calidad de la MS producida (observación visual durante el ensayo).

También la presencia del trébol blanco aportó con N a través del proceso de fijación simbiótica de N atmosférico. Esta fijación del N es realizada mediante la asociación del trébol con bacterias del género *Rhizobium* que fijan el N atmosférico y lo dejan disponible para la planta (Havlin et al., 2017). Por ejemplo, el nivel de N que puede fijar una pastura de trébol en Chile es de  $200 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , mientras que la rotación ballica-trébol puede aportar la misma cantidad de N al suelo, que una pradera solo de ballica fertilizada con  $200 \text{ kg N ha}^{-1}$  (equivalente a  $435 \text{ kg urea ha}^{-1}$ ) (Demanet, 2014).

De esta manera no solo hay una mejora en la calidad nutricional de la pradera, sino que también hay un aumento de los beneficios económicos debido a una disminución de las necesidades de fertilización, siempre y cuando la presencia del trébol supere el 30% en la pradera (Vázquez, 2017).

### **Análisis comparativo entre los sectores y tratamiento de la variable respuesta materia seca (MS)**

Evaluación del rendimiento promedio de materia seca (MS) de la mezcla ballica y trébol blanco, tanto en tratamientos como en sectores, se presenta en la Figura 8, como variable respuesta a la aplicación de cal.



**Figura 8.** Materia seca (kg ha<sup>-1</sup>) de la pradera en los 3 sectores y tratamientos (TI con cal; TII sin cal).

De acuerdo con la producción de MS por sectores y tratamientos, se identificó que el sector (S3) con aplicación de cal presento el promedio de rendimiento más alto. De acuerdo con las otras variables, el pH influyó, ya que fue el sector con promedio más cercano al óptimo para el desarrollo de una pradera; así mismo, los niveles de P inicial disponible también fueron altos, efecto combinado que contribuyó a un buen desarrollo de la pradera.

Este análisis permite inferir que la respuesta al encalado varía dependiendo del sector, ya que en algunos casos mejora significativamente el total de MS, mientras que en otros no tiene un impacto relevante. Tal es el caso del sector S4, que presenta valores más bajos en cuanto a la producción de MS, los valores están entre 963 a 1.048 kg MS ha<sup>-1</sup>, dada a las características de los ecosistemas en que se originaron. La tolerancia de los cultivos a la concentración de Al<sup>3+</sup> puede deberse a la capacidad de reducir su absorción, o bien a la de disminuir su actividad una vez absorbido por las raíces de las plantas (Rodríguez et al., 2001).

La tolerancia al contenido de Al soluble es estimada a través de los valores de pH. El valor de pH bajo al cual el rendimiento del cultivo se ve significativamente disminuido es denominado pH crítico. Sin embargo, en una aplicación de cal se debe alcanzar un valor de pH superior al crítico del cultivo considerado, de tal modo que pasado algunos años sin adición de cal o CaCO<sub>3</sub>, el pH descienda hasta el pH crítico. Así, Rodríguez et al. (2001) definieron el pH por sobre el valor crítico como pH a alcanzar.

Existe una tendencia en cuanto al rendimiento de MS, donde el tratamiento TI es mayor, a pesar de no existir una interacción al analizar el factor tratamiento, dado a que la aplicación de cal en praderas permite mayor disponibilidad de macro y micronutrientes y eficiencia de los fertilizantes. También la aplicación de cal al suelo reduce o neutraliza el nivel de Al<sup>3+</sup> en el suelo y su efecto perjudicial en el desarrollo radicular y, por ende, en la productividad y calidad del forraje (Gacitúa y Lagos, 2020).

Los beneficios del encalado en el suelo no solo permiten neutralizar la acidificación, si no que aumentan la disponibilidad de este macronutriente para las plantas. Así mismo, el

encalado permite aumentar la actividad microbiana que mineraliza la materia orgánica (Bernier y Alfaro 2006), lo que contribuye a que la pradera pueda aumentar el rendimiento y su persistencia, mejorar la composición botánica y la calidad nutritiva.

La aplicación de cal en este estudio mostró un efecto importante en la supervivencia de las especies mejoradas, además del balance hídrico, ya que el riego fue programado. El trébol blanco y la ballica desarrollan más del 90% de sus raíces en los primeros 5 cm del suelo, por lo que una sequía eventual las afectaría notablemente (Bernier et al., 1991).

En el ensayo de invernadero se utilizaron los suelos recolectados de la E.E. Oromo, donde se determinó el pH inicial, pH final, P inicial y P final y las relaciones que se puedan establecer entre estas propiedades se muestran en una matriz de correlación en el Cuadro 6.

**Cuadro 6.** Matriz de correlación de las propiedades químicas del suelo.

	pH Inicial	pH Final	P Inicial	P Final
pH Inicial	-			
pH Final	0,31	-		
P Inicial	0,54	0,46	-	
P Final	0,64	0,45	0,63	-

De acuerdo con los resultados, el  $r = 0,31$ , indica una correlación positiva moderada entre el pH final y el pH inicial. Esto sugiere que, aunque hay una cierta relación, el pH final no es un buen predictor del pH inicial. En términos de capacidad tampón, esto podría implicar que hay factores adicionales que afectan el pH final más allá del pH inicial. Esto hace referencia a que los suelos tienen diferentes capacidades de amortiguación. Un suelo con alta capacidad de amortiguación (generalmente suelos con alto contenido de materia orgánica o arcilla) puede requerir una cantidad mucho mayor de cal para lograr un cambio de pH significativo (Havlin et al., 2017).

Con respecto al P Inicial ( $r = 0,54$ ), existe una correlación positiva moderada, lo que indica que hay una relación entre el pH inicial del suelo y el nivel inicial de P. La disponibilidad del P está relacionada al pH, ya que, en suelos ácidos ( $\text{pH} < 5,5$ ), el P tiende a formar compuestos insolubles con el  $\text{Fe}^{3+}$  y  $\text{Al}^{3+}$ . Estos metales son más solubles en condiciones ácidas y reaccionan con el P para formar fosfatos de Fe y Al, que son difíciles de absorber por las plantas (Rojas, 2006). Los suelos de origen volcánicos clasificados como Andisoles poseen características particulares, destacando la alta fijación del P, y alta concentración de MO. La fijación de P se derivan de la presencia de minerales no cristalinos en la arcilla (alofán e imogolita) que modelarán su comportamiento y utilización agrícola (Tosso et al., 1985).

La correlación de 0,46 indica una relación positiva moderada entre el contenido inicial de P y el pH final. Esto sugiere que hay una influencia del P inicial en el pH final. Esto indica que la cantidad de P disponible en el suelo no es un valor constante, ya que varía de acuerdo a las condiciones ambientales, que a su vez influyen sobre el suelo y el desarrollo de las plantas (Rojas, 2002).

El valor de  $r = 0,64$  indica una relación más fuerte entre el contenido final de P y el pH inicial. Hay un cambio significativo, dado por las condiciones resultantes de encalado, que dejaron evidencia de una mayor disponibilidad de P.

Finalmente, el valor de  $r = 0,45$  muestra una relación moderada entre el contenido final de P y el pH final, lo que sugiere que, al igual que el caso anterior, el aumento de pH por efecto del encalado podría haber generado un aumento en la disponibilidad de P. El valor de  $r = 0,63$  indica una relación más fuerte entre el contenido final de P y el P inicial, sugiriendo que la absorción de P por la pradera en los distintos tratamientos generó una diferencia consistente en los niveles de P en el tiempo.

## CONCLUSIONES

La aplicación de carbonato de calcio (cal) afectó las propiedades del suelo de manera diferencial en los distintos sectores de la localidad de la Estación Experimental Oromo y tratamientos del estudio en la Región de Los Lagos. La variabilidad observada podría deberse a factores adicionales que también afectan a estos parámetros del suelo, tales como MOS, contenido de  $Al^{3+}$ , entre otros.

La aplicación de cal generó diferencias significativas en el pH del suelo. Esto sugiere que las variaciones en la cantidad o método de aplicación de cal tienen efectos diferenciados en la modificación del pH del suelo.

La variación del P disponible está moderadamente correlacionada con el pH, lo que sugiere que el pH del suelo influye en la disponibilidad de P, indicando un impacto significativo después de la aplicación de la cal, aunque existen otras condiciones de suelo y ambientales que determinan la respuesta final.

Finalmente, con la recomendación de las dosis sitio específicas de cal, calculadas con la  $CT_{pH}$  medida, surtió efecto, ya que aumentó el pH del suelo desde 5,6 hasta 6,3 y mejoró la productividad de la pradera en un 14% en relación con un control sin aplicación de cal.

## LITERATURA CITADA

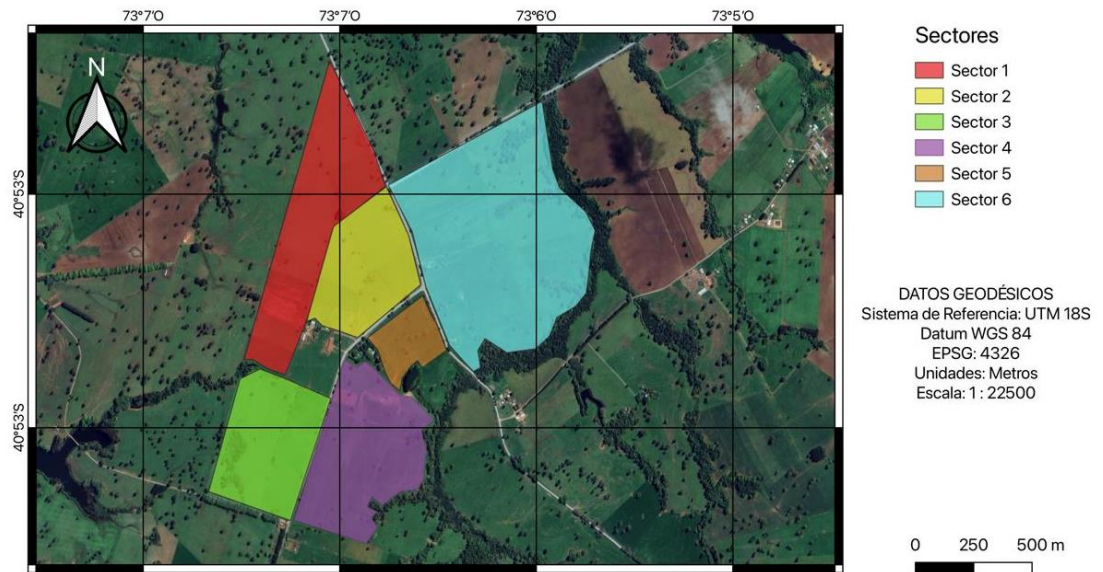
- Aldunate Zuñiga, M. 2000. Evaluación de métodos para determinar requerimiento de encalado en suelos de la Cordillera de la Costa, VI Región de Chile. Tesis Ing. Agrónomo, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias agronómicas, 74 P.
- Bernier V, R. 1960. Fertilización de praderas, I. Suelos de la X Región. INIA.
- Bernier V, R., Teuber K, N., & Meneses C, G. (Noviembre de 1991). Establecimiento de una pradera de ballica perenne y trébol blanco en un suelo rojo arcilloso de la Xa. Región. . INIA, boletín técnico N° 181.
- Bernier V, R., y Alfaro V, M. 2006. Acidez de los suelos y efectos del encalado . Boletín INIA N° 151, 5-47.
- Besoain, E. y Sadzawka, A. 1999. Fenómenos de retención de fósforo en los suelos volcánicos y sus consecuencias. 2.1. Factores dependientes del suelo: ejemplos en Chile. pp: 27-36. In: Besoain M, E.C. Rojas W. y A. Montenegro B. (eds.). Las rocas fosfóricas y sus posibilidades de uso agrícola en Chile. Colección Libros INIA N°2. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Chile.
- Campillo R, R., & Sadzawka R, A. 1993. Problemática de la acidez de los suelos de la IX región II. Manejo del encalado y sus implicancias. Instituto de Investigación Agropecuarias, Serie Carillanca, 38: 9-17.
- Campillo R, R. 1994. Fertilización y uso de enmiendas en alfalfa. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Serie Remehue 53: 103-124.
- Carbonell Rivera, G. 2022. Manejo de la Fertilidad de los suelos bajo pradera para la producción de leche en la estación Experimental Oromo. Proyecto de actividad formativa equivalente a Tesis para optar el grado de Magister en Manejo de Suelo y Aguas. Santiago de Chile, Chile.
- Casanova P, M., Leiva M, C., Luzio L, W., Salazar G, O., Seguel S, O., Vera E, W., . . . Araya S, E. 2006. Avances en el conocimiento de los suelos de Chile (Re-edición 2020). Santiago de Chile, Chile.
- Casanova, M., Seguel, O., Salazar, O., Luzio, W. 2013. The Soils of Chile. Soils of the World Soils Serie. Springer Science Business Media. The Netherlands. 183 p.
- CIREN. 1999a. Estudio agrológico. VIII Región. Tomos 1 y 2. Centro de Información de Recursos Naturales. Publicación 121. 586 p.
- CIREN. 1999b. Estudio agrológico. IX Región. Centro de Información de Recursos Naturales. Publicación 122. 326 p.
- CIREN. 2000. Estudio agrológico, Provincia de Osorno. Publicación Centro de Información de Recursos Naturales, 131 p.
- CIREN. 2003. Estudio agrológico, X Región. Centro de Información de Recursos Naturales, Publicación 123, 412 P.
- Demagnet Filippi, R.. 2014. Manual de Especies Forrajeras. Temuco
- Dumont, J. (s.f.), 1994. Fertilización y uso de enmiendas en el establecimiento de praderas. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Serie Remehue 53: 41-55.
- Espinosa, J., & Molina, E. 1999. Acidez y encalado de los suelos. *International Plant Nutrition Institute, Primera Edición.*
- Faúndez Lorca, R. 1985. Caracterización de los suelos del predio Oromo (X Región). Tesis (licenciado en ciencias agrícolas) Universidad de Chile. Obtenido de <https://bibliotecadigital.uchile.cl/discovery/fulldisplay?docid=alma9910021089497039>



- 36&context=L&vid=56UDC\_INST:56UDC\_INST&lang=es&search\_scope=MyInst\_and\_CI&adaptor=Local%20Search%20Engine&tab=Everything&query=creator,exact,Fau%CC%81ndez%20Lorca,%20Ricar.
- Fassbender, H. 1987. Química de los suelos con énfasis en suelos de América Latina. 420 p. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), San José, Costa Rica.
- FAO. 2007. Utilización de las rocas fosfóricas para una agricultura sostenible. Vol. 13. Roma.
- Gacitúa, E., & Lagos, J. 2020. Consideraciones para el encalado de praderas. *INIA*
- Havlin, J., Tisdale, S., Nelson, W., & Beaton, J. 2017. Soil Fertility and Fertilizers, An Introduction to Nutrient Management. *Eighth Edition*, 51-119.
- INIA. (2023). Agrometeorología. Recuperado el 21 de Junio de 2023, de <https://agrometeorologia.cl/>
- Le Mare, P., & León, L. (Marzo de 1989). The effects of lime on adsorption and desorption of phosphate in five Colombian soils. *European Journal of Soil Science*, 59-69.
- Leiva Madrid, C., Gajardo Escobar, G., Piña Moraga, L., Schmidt Gómez, C., & Barrientos Kompatzki, G. 2021. Guía productiva de praderas en las provincias de Osorno y Llanquihue. *CIREN*.
- Luzio, W., Sadzawka, A., Besoain, E., y Lara, P. (Ene-Jun 2003) Influencia de materiales volcánicos en la génesis de suelos rojos arcillosos [en línea]. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*. 3(1): 37-62. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14001/58134> (Consultado: 3 junio 2024).
- Matus, F. 2006. Fertilidad de suelos y nutrición de cultivos: desarrollo de la experiencia en Chile. pp: 207-263. *In: Avances en el conocimiento de los suelos de Chile*. (Re-edición, 2020). Luzio, W. y Casanova, M. (Eds.). Santiago, Chile.
- Mendoza, L. 2000. Evaluación de enmiendas calcáreas en suelos con exceso de aluminio. Tesis Ingeniero Agrónomo, Universidad de Concepción (Chile) Facultad de Agronomía.
- Mora, ML, Cartes, P., Demanet, R., & Cornforth, I.S. 2002. Efectos de la cal y el yeso en el crecimiento y la composición de la pastura en un Andisol ácido en Chile, Sudamérica. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 33 (13-14): 2069-2081. <https://doi.org/10.1081/CSS-120005749>.
- Navarro Blaya, S., & Navarro Garcia, G. 2003. Química agrícola, El Suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. *Gines Navarro, segunda edición*. Obtenido de [www.mundiprensa.com](http://www.mundiprensa.com)
- Ovalle, R., Seguel, O., Pfeiffer, M. 2023. Génesis y ocurrencia de carbonatos en los suelos. *Agro Sur* 51(1): 1-17.
- Paredes B, C. 1997. Evaluación de métodos de laboratorio para estimar la necesidad de encalado de suelos ácidos del sur de Chile. Tesis Magister, Pontificia Universidad Católica de Chile, Facultad de Agronomía, 80 P.
- Porta, J., López-Acevedo, M. y Roquero C. 1999. Edafología para la agricultura y el medio ambiente, 2ª Edición. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España, 849 p.
- Rodríguez S, J. 1995. Manual de fertilización. Colección en Agricultura, Facultad de Agronomía, Pontificia Universidad Católica de Chile, 362 P.
- Rodríguez, J., Pinochet, D., & Matus, F. (2001). Fertilización de cultivos. LOM Ediciones. Santiago, Chile.
- Rojas, C. 1999. (ed) Evaluación y seguimiento del impacto de PRSD, Novena Región. MINAGRI, 105 P.

- Rojas W, C. 2002. Disponibilidad del Fósforo y su corrección. *INIA*. doi:<https://hdl.handle.net/20.500.14001/8765>
- Rojas W., Carlos (Ene 2006) Interpretación de la disponibilidad de fosforo en los suelos de Chile [en línea]. Temuco: Serie Actas - Instituto de Investigaciones Agropecuarias. no. 38. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14001/8534> (Consultado: 13 junio 2024).
- Ruiz N, I. 1996. Praderas para Chile. INIA, segunda edición.
- Ruz J, E., & Campillo R, R. (2005). Fertilización de praderas. 230.
- Sadzawka, A. y Carrasco A. 1985. Fósforo. pp: 373-405. In: Tosso T.J. (ed.). Suelos volcánicos de Chile. Talleres Gráficos INIA, Santiago, Chile.
- Sadzawka, A. y Bernier R. 1986. Efecto de la fertilización fosfatada sobre un suelo con carga variable, bajo pradera en pastoreo. *Agricultura Técnica (Chile)*, 46(3): 341-348.
- Sadzawka R, A., Carrasco R, M., Grez Z, R., Mora G, M., Flores P, H., & Neaman, A. (Junio de 2006). Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, 164P.
- Sadzawka, A. 2006a. Propiedades físico-químicas de los suelos. I: Reacción (pH), acidez y alcalinidad. pp: 89- 133. In: Avances en el conocimiento de los suelos de Chile. (Re-edición, 2020). Luzio, W. y Casanova, M. (Eds.). Santiago, Chile.
- Sadzawka, A. 2006b. Propiedades físico-químicas de los suelos II: Adsorción e Intercambio iónico. pp: 134-168. In: Avances en el conocimiento de los suelos de Chile. (Re-edición, 2020). Luzio, W. y Casanova, M. (Eds.). Santiago, Chile.
- Sierra B., C. (Enero de 1982). La acidez y la alcalinidad de los suelos (pH). (L. Goico M, R. Bernier V, M. González Y, J. Rojas, & P. Sabelle R, Edits.)
- Soil Survey Staff. 1999. Soil taxonomy. *2nd Edition. United States Department of Agriculture, National Resources Conservation Service, Agricultural Handbook N°436*. U.S Gov. Printing Office, Washington, D.C., USA. 869 p.
- Suarez F, D. 1991. Diagnóstico de las necesidades de encalado. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Serie Remehue 53: 77-94.
- Suárez F., Domingo y Márquez M., María Cristina (Oct-Dic 1992). Necesidades de encalado [en línea]. *Agricultura Técnica*. 52(4): 388-393. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14001/26874>.
- Tosso, J., E. Bensoain, F. Borie, A. Carrasco, M. Escudey, G. Galindo, A. Kuhne, A. Mella, H. Moreno, L. Peña, A. Sedzawka, G. Sepúlveda, J. Varela, y H. Zunino. 1985. Suelos volcanicos de Chile. Vol. 9. Santiago.
- Vasquez Figueroa, C. 2017. Caracterización fenotípica de una población de trébol blanco (*Trifolium repens* L.) para tolerancia a frío. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias Agronómicas con Mención en Producción y Protección Vegetal, Universidad de Concepción, 1- 54.
- Zúñiga, F., Ivelic-Sáez, J., López, I., Huygens, D., Dörner, J. 2015. Temporal dynamics of the physical quality of an Andisol under a grazing system subjected to different pasture improvement strategies. *Soil & Tillage Research* 145: 233-241.

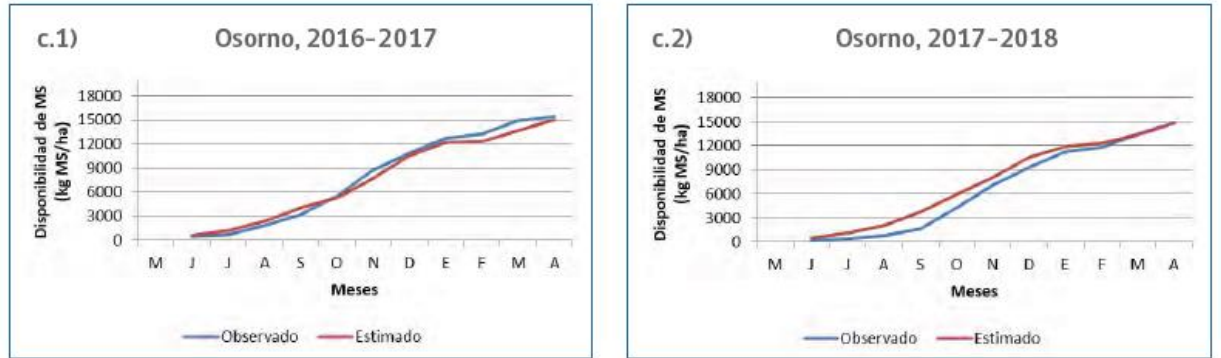
## APENDICES



**Apéndice 1.** Sectores (S) del muestreo de suelo en la Estación Experimental Oromo.



**Apéndice 2.** Establecimiento de ensayo en invernadero, mezcla de ballica perenne (*Lolium perenne* L.) y trébol blanco (*Trifolium repens* L.), en la Facultad de agronomía, Universidad de Chile, La Pintana.



**Apéndice 3.** Curvas de validación del modelo de Jouven en base a información observada y estimada para las temporadas 2016-2017 y 2017-2018, en la Comuna de Osorno (Leiva et al., 2021).



**Apéndice 4.** Desarrollo y crecimiento de la mezcla de ballica perenne (*Lolium perenne* L.) y trébol blanco (*Trifolium repens* L.), con dos tratamiento, con cal y sin cal, en el ensayo de macetas, en el invernadero de la Facultad de agronomía, Universidad de Chile, La Pintana.