



**UNIVERSIDAD DE TALCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA DE AGRONOMÍA**

**EVALUACIÓN DE SUSPENSIÓN CONCENTRADA DE CaO, SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICO-
QUÍMICAS DEL SUELO Y SU EFECTO SOBRE EL CRECIMIENTO DE AVELLANO EUROPEO.**

MEMORIA DE TÍTULO

IGNACIO ALBERTO ERRÁZURIZ MONTANARES

TALCA- CHILE

2020

CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su unidad de procesos técnicos certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Talca, 2021

APROBACIÓN:

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Cesar Acevedo Opazo', written in a cursive style.

Profesor Guía: Ing. M. Sc. AgroTIC y M. Sc. Horticultura Agr. Dr. Cesar Acevedo Opazo

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Paulo César Cañete Salinas', written in a cursive style.

Profesor Informante: Ing. Agr. Dr. Ciencias Agrarias Paulo César Cañete Salinas.

Fecha de presentación de la Defensa de Memoria: 28 de enero, 2021

AGRADECIMIENTOS

Dedicado a mi madre, Ingrid Montanares Peñaloza y a mi padre Juan Carlos Errázuriz, que me han apoyado en cada paso que he querido dar y me demuestran que harían todo por mi. Gracias por la ayuda incondicional, los consejos y el ejemplo que me dan y me motiva a algún día poder ser como ustedes, buenos profesionales pero por sobre todo buenas personas.

A mis hermanos Misael y David Errázuriz que me han visto en todo este proceso y nunca han dejado de animarme, ayudando a distraerme cuando más agobiado me he sentido. Gracias por alegrarse de mis logros y animarme en mis tropiezos. Se que siempre estaremos juntos apoyándonos en cada etapa de la vida.

A mi buen amigo Javier Faúndez quien siempre me ha inspirado a esforzarme por las metas que uno se plantea en la vida, a ser fuerte en momentos difíciles, a levantarse con los tropiezos en la vida y a ser humilde con los logros. A mi amigo Maximiliano Aguilera que siempre estuvo apoyándome y alegrandome en esta etapa universitaria.

A mi novia Vania Constanza Calfunao, quien al llegar a mi vida me ha apoyado en cada instante y me ha permitido restarle importancia a cualquier problema existente. Gracias por amarme, entregarme cariño, por ser una persona digna de admirar por todo lo que se ha esforzado y que no me cabe duda que llegará muy lejos en la vida.

A mi profesor de tesis César Acevedo Opazo y mi profesor co-guía de tesis Paulo Cañete Salinas, quienes siempre me han motivado a querer ser un gran profesional, espero algún día poder ser como ustedes. Desde ya les agradezco por su apoyo en este proceso final, por la confianza puesta en mi y cada palabra de apoyo, felicitación y motivación que me hacen estar inmensamente agradecido de haber realizado mi tesis con este gran equipo de trabajo. Gracias a Vicente Steinmetz, quien también formó parte del equipo de trabajo de mi tesis y gracias a Cristian Espinosa por apoyarme en las instancias finales y por confiar en mis capacidades como futuro profesional.

A todos ellos y a muchos más, les agradezco con humildad y espero lo mejor para ustedes en la vida.

RESUMEN

En Chile, el avellano europeo ha tenido un incremento sostenido en los últimos años, llegando a una superficie de 24.436 hectáreas plantadas al año 2019 y ubicándose como el sexto frutal con mayor superficie a nivel nacional. Existe un importante potencial de crecimiento en el área frutícola nacional, la cual se ha ido desplazando a zonas más australes de nuestro país, utilizando en muchos casos suelos marginales que sufren de cansancio de suelo, debido a malas prácticas agrícolas que limitan fuertemente la producción agrícola, generando además problemas en las propiedades físico-químicas de estos.

En este ensayo, se evaluó una suspensión concentrada de CaO como enmienda calcárea, en suelos arroceros de textura franco y franco arcillosa en la comuna de Retiro, Maule, Chile, con el objetivo de estudiar el efecto que produce su aplicación sobre las características físico-químicas del suelo y como éstas repercuten sobre el comportamiento fisiológico y la condición hídrica del cultivo de avellano europeo var. Tonda di Giffoni. Los dos tipos de suelo evaluados fueron tratados cada 45 días con dosis media y alta (50 L/ha y 100 L/ha, respectivamente) de CaO, más un tratamiento control (sin aplicación), realizando en total 3 aplicaciones (noviembre a febrero) durante el ensayo. Se realizaron análisis de suelo antes de comenzar el ensayo y al finalizar este, para evaluar el efecto del CaO sobre las propiedades físico-químicas del suelo. Asimismo, se realizó análisis foliar y se midió el potencial hídrico xilemático (Ψ_x) además de la conductancia estomática (g_s), con la finalidad de caracterizar el efecto de CaO sobre las principales variables fisiológicas de planta en avellanos de un año de edad, con un marco de plantación de 5x2 metros.

Los resultados mostraron diferencias significativas en las características físico-químicas del suelo, incrementando su pH, lo que generó variaciones significativas en el contenido de macro y micronutrientes, entre ellos disminuyó el contenido de iones metálicos (Mn, Cu y Fe). Si bien no se pudo apreciar diferencias estadísticamente significativas en el estado hídrico y la fisiología de las plantas en suelos tratados y no tratados, se puede concluir que dosis medias y altas de CaO no generaría efectos de toxicidad en plantas de avellano y que sería necesario continuar con estudios en temporadas venideras, con el objetivo de evaluar el efecto de esta enmienda durante el segundo año, permitiendo de esta manera evidenciar de manera más clara su efecto acumulado sobre plantas de avellano europeo.

Palabras clave: Avellano europeo, óxido de calcio, suelos cansados, pH, metales pesados.

ABSTRACT

In Chile, the European hazelnut has had a sustained increase in recent years, reaching an area of 24,436 hectares planted by 2019 and ranking as the sixth fruit tree with the largest area nationwide. There is an important growth potential in the national fruit growing area, which has been moving to more southern areas of our country, using in many cases marginal soil that suffers from fatigued soils, due to poor agricultural practices that severely limit agricultural production, also generating problems in the physical-chemical properties of soil.

In this assay, a concentrated suspension of CaO was evaluated in rice soils of texture loam and clay loam in the commune of Retiro, Maule, Chile, with the aim of studying the effects of its application on the physical-chemical characteristics of the soil and how these affect the physiological behavior and water condition of European hazelnut trees var. Tonda di Giffoni. The two types of soil evaluated were treated every 45 days with medium and high doses (50 L/ha and 100 L/ha, respectively) of CaO, plus a control treatment (without application), making a total of 3 applications (November to February) during the assay. Soil analyzes were performed before starting the trial and at the end of it, to evaluate the effect of CaO on the physical-chemical properties of the soil. Likewise, foliar analysis was performed and the stem water potential (Ψ_x) was measured in addition to stomatal conductance (gs), in order to characterize the effect of CaO on the main physiological variables in one-year-old hazelnuts with a planting frame of 5x2 meters.

The results showed significant differences in the physical-chemical characteristics of the soil, increasing its pH, which generated significant variations in the content of macro and micronutrients, among these the content of metallic ions (Mn, Cu and Fe) decreased. Although no statistically significant differences were observed in the water status and physiology of the plants in treated and untreated soils, it can be concluded that medium and high doses of CaO would not generate toxicity effects in hazelnut plants and that it would be necessary to continue studies in upcoming seasons, with the aim of evaluating the effect of this amendment during the second year, thus making it possible to show more clearly its accumulated effect on European hazelnut plants.

Key words: European hazelnut, calcium oxide, fatigued soils, pH, heavy metals.

ÍNDICE

	Página
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Hipótesis.....	2
1.2. Objetivo general.....	2
1.3. Objetivos específicos.....	2
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Características del avellano europeo:	4
2.1.1 Origen geográfico y distribución de la especie:	4
2.1.2 Producción mundial del avellano:	4
2.1.3 Requerimientos edafoclimáticos del avellano:	5
2.1.4 El avellano europeo en Chile:	5
2.2 Cansancio de suelo:	5
2.3 Propiedades físico-químicas del suelo:	6
2.3.1 Textura:.....	6
2.3.2 Estructura:	6
2.3.3 pH:.....	6
2.3.4 Capacidad de intercambio catiónico (CIC):.....	7
2.3.5 Conductividad eléctrica:.....	7
2.3.6 Metales pesados:.....	7
2.4 Importancia de propiedades físico-químicas en el desarrollo de avellano:	8
2.5 Enmiendas calcáreas:	8
2.5.1 Carbonato de calcio:	8
2.5.2 Dolomita:	9
2.5.3 Hidróxido de calcio:	9
2.5.4 Óxido de calcio:.....	9
2.6 Evaluación del óxido de calcio:.....	9
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	11
3.1 Ubicación del predio:	11
3.2 Descripción del ensayo.....	11
3.3 Mediciones de campo:	12
3.3.1 Mediciones de respuesta fisiológica:.....	12
3.3.2 Mediciones de suelo:	12
3.3.4 Medición de tejido foliar:	13
3.4 Análisis estadístico:.....	13

4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	14
4.1	Análisis de suelo:	14
4.2	Análisis foliar:	19
4.3	Análisis de Componentes Principales (ACP):	22
4.4	Análisis estadístico de fisiología de avellano europeo:	24
5.	CONCLUSIONES	26
6.	BIBLIOGRAFÍA	27

1. INTRODUCCIÓN

El avellano europeo (*Corylus avellana* L.) es un árbol caducifolio con hábito de crecimiento semiarbustivo originario de Mesopotamia, área geográfica actual de Irán, Irak y Turquía. Su fruto es una nuez con propiedades benéficas para la salud humana, que lo hace una especie frutal de gran interés comercial en regiones de clima Mediterráneo, principalmente Estados Unidos y en los últimos años América del Sur (Ellena, 2018). En Chile la producción comercial del avellano europeo se debe a las industrias agroalimentarias del hemisferio norte que se han instalado en nuestro país para satisfacer su demanda interna, transformándose en una alternativa productiva a actividades tradicionales como la ganadería y los cultivos anuales de la zona centro-sur del país (Ellena, 2013). La superficie de avellanos en Chile se ha incrementado en la última década, pasando de 43 hectáreas el año 2000 a 13.103 hectáreas el 2018, duplicando esta superficie para el año 2019, alcanzando las 24.436 hectáreas plantadas. Esto ubica al avellano europeo como el sexto frutal con mayor superficie a nivel nacional y con mayor tasa de crecimiento en los últimos años (ODEPA, 2019).

La producción frutícola aporta el 39,2% del PIB silvoagropecuario y actualmente alcanza las 342.671 hectáreas. Esta es una actividad de gran rentabilidad, debido principalmente a la condición de Chile como país exportador de fruta en contraestación, lo que ha incrementado los precios de venta y ha incentivado el aumento de la superficie productiva para el desarrollo de esta actividad (ODEPA, 2019). Existe un importante potencial de crecimiento de la fruticultura chilena, debido a las variaciones climáticas producidas por el calentamiento global, que ha generado el desplazamiento geográfico de la zona frutícola de nuestro país a latitudes más australes y a la posibilidad de utilizar suelos fatigados o cansados que han disminuido su potencial productivo.

El cansancio de suelo es causado por la intensificación de monocultivos y otras malas prácticas agrícolas utilizadas durante varias décadas (Gomiero, 2019). Esto genera desequilibrios microbiológicos que favorecen el establecimiento de microorganismos fitopatógenos, viéndose modificadas las propiedades físicas del suelo, alterando su estructura (compactación) y también las propiedades químicas, disminuyendo el pH del suelo (acidificación). Esto genera deficiencias de macro y micro nutrientes esenciales para el desarrollo de las plantas y por otro lado, aumenta la disponibilidad de metales pesados en el suelo como manganeso, cobre y hierro, limitando la productividad de los sistemas agrícolas (Martínez *et al.*, 2010).

Muchos agricultores se han visto en la necesidad de tener que utilizar suelos cansados para la producción frutícola, debido al mayor beneficio económico que reporta ésta actividad. Sin embargo, para lograr producciones óptimas es necesario corregir estas limitaciones. Un factor limitante a corregir es la acidez del suelo, tanto para cultivos como para frutales, ya que valores bajos de pH en el suelo (menor a 5,5) indican una condición de acidez que limitará drásticamente el desarrollo y la producción de los cultivos (Hirzel, 2016). Para tales casos, se emplean métodos de corrección de acidez basados en la aplicación de enmiendas calcáreas al suelo. Las más utilizadas son la cal calcítica y la cal dolomítica, cuyos efectos se expresan de 30 a 45 días o de 3 a 4 meses posterior a su aplicación al suelo, respectivamente (INIA, 2014). Otro agente encalante es

el óxido de calcio (CaO), conocido como cal viva o quemada, debido a que su elaboración considera la calcinación de la piedra caliza. Se diferencia de las otras fuentes cálcicas por presentar un mayor contenido de calcio en su forma pura (71%) y además una reacción encalante rápida en el suelo (post aplicación). Sin embargo el manejo de este producto es complicado debido al tamaño muy fino de sus partículas (Espinosa y Molina, 1999).

Flocucal es el nombre comercial de una suspensión concentrada de óxido de calcio, que presenta múltiples ventajas en comparación a otras fuentes cálcicas, debido a su formulación química de suspensión concentrada que le permite ser aplicada vía sistema de riego presurizado, gracias al fino tamaño de sus partículas (menores a 2 micras). Estas características hacen de esta formulación una mejor alternativa que otras enmiendas calcáreas utilizadas, como carbonato de calcio y cal dolomítica, cuyas características fisico-químicas presentan limitantes para ser utilizadas en especies frutícolas de interés.

En el presente trabajo de investigación se evaluará el comportamiento fisiológico del avellano europeo en suelos arroceros de la Región del Maule que presentan cansancio de suelo, los cuales han sido tratados con una suspensión concentrada de óxido de calcio.

1.1. Hipótesis

La aplicación de óxido de calcio como enmienda cálcica permitiría incrementar el pH del suelo, y a su vez incrementar la disponibilidad de macro- y micronutrientes, generando una disminución de los metales pesados disponibles en este. Además, no representaría un efecto tóxico para la planta, pudiendo aplicarse directamente a través del sistema de riego.

1.2. Objetivo general

Evaluar el efecto de suspensión concentrada de óxido de calcio sobre las propiedades fisico-químicas en suelos arroceros de textura franco y franco arcillosa de alta acidez sobre la fisiología y condición hídrica de avellano europeo var. Tonda di Giffoni.

1.3. Objetivos específicos

- Evaluar el efecto de aplicaciones con distintas dosis de óxido de calcio sobre el pH y la disponibilidad de metales pesados en el suelo, en un cultivo de avellano europeo.
- Evaluar el efecto de aplicaciones con distintas dosis de óxido de calcio sobre la disponibilidad de macro y micro nutrientes en el suelo en un cultivo de avellano europeo.

- Evaluar el efecto de aplicaciones con distintas dosis de óxido de calcio sobre la respuesta fisiológica e hídrica de la planta en un cultivo de avellano europeo.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Características del avellano europeo:

El avellano europeo (*Corylus avellana* L.), es una especie frutal de hoja caduca perteneciente a la familia Betulaceae. Presenta crecimiento simpodial (arbustivo), su sistema radical es fibroso y de exploración superficial (Lavín y Reyes, 2014). Es una especie monoica con flores macho dispuestas en amentos y flores hembra en glomérulos, ambos tipos de flores crecen en madera de un año. Presentan dicogamia, y son auto-incompatibles determinadas esporofíticamente. La polinización es anemófila y la fecundación puede demorar de 4 a 5 meses en completarse (Germain, 1994). El fruto corresponde a una nuez con pericarpio leñoso, recubierta por un involucro y la semilla es rica en lípidos y otros compuestos benéficos para la salud humana (Ellena, 2013; Ellena, 2018; Holstein *et al.*, 2018). Presenta alternancia productiva que genera rendimientos mayores al promedio un año (año “on”) y rendimientos menores al año siguiente (año “off”) que afecta la producción de avellanas en todo el mundo (Ellena *et al.*, 2018; Frary *et al.*, 2019).

2.1.1 Origen geográfico y distribución de la especie:

Los orígenes de los cultivares más importantes de avellano europeo vienen de la selección de sus poblaciones silvestres que comprenden desde la costa mediterránea del norte de África hasta la península escandinava al norte de Europa y por el Este hasta las montañas del Cáucaso, Irán y Líbano (Bocacci & Botta, 2009). Las plantaciones de avellano europeo con fines productivos están presentes en su región de origen y se han distribuido a América del Norte, América Latina, Oceanía (Ellena, 2018) y Sudáfrica, pero bajo evaluación de su potencial productivo por problemas de polinización (Ascari *et al.*, 2018).

2.1.2 Producción mundial del avellano:

Turquía e Italia son los mayores productores mundiales de avellanas con un 63 y 13% respectivamente. Los mismos países predominan como principales exportadores de avellana sin cáscara con el 66 y 11% del total de avellanas exportadas. Los últimos años Chile se ha destacado entre los países del hemisferio sur con las principales producciones y exportaciones a nivel mundial, con el 3% del total mundial en ambos casos, respectivamente (INC, 2019). Chile posee un rendimiento promedio de 2,6 toneladas por hectárea, siendo superior a otros países productores como Turquía e Italia, los cuales tienen un rendimiento de 1,8 y 1,3 toneladas por hectárea, respectivamente. A nivel mundial, aproximadamente el 80% de las exportaciones de avellana son sin cáscara y el 20% restante con cáscara (Cazanga y Leiva, 2013).

2.1.3 Requerimientos edafoclimáticos del avellano:

El avellano europeo, requiere entre 700 a 1.200 horas frío (inferiores a 7°C) que generalmente se cumplen en localidades con temperaturas medias anuales entre 12 y 16°C. Los amentos requieren 500 horas frío y 700 para yemas vegetativas y mixtas (glomérulos o inflorescencia femenina). El viento excesivo ocasiona problemas en el anclaje de las plantas, por ende, en el desarrollo vegetativo, ante lo cual se deben usar cortinas de viento naturales o artificiales. El suelo debe presentar condiciones apropiadas para lograr rápidos crecimientos durante la fase de formación de la planta. Suelos ideales corresponden a franco-arcilloso o franco-arenoso, con buen drenaje, y sin compactación. Suelos pesados generan condiciones de baja infiltración, falta de oxígeno, muerte de raíces finas y fibrosas, perjudicando la absorción y translocación de nutrientes en la planta, reduciendo el desarrollo vegetativo y productividad (Ellena, 2013; Ellena, 2018).

2.1.4 El avellano europeo en Chile:

Chile cuenta con 24.436 hectáreas de avellano europeo, distribuidas principalmente entre la región del Maule y Los Lagos. La mayor superficie se encuentra en regiones del Maule, Araucanía y Ñuble con 11, 7 y 3 mil hectáreas, respectivamente (ODEPA, 2019). Existe el predominio de dos variedades Barcelona y Tonda di Giffoni. Cerca del 60% de la superficie está plantada con Barcelona, que además es utilizada como polinizante de la segunda variedad más plantada correspondiente a Tonda di Giffoni con cerca del 40% restante de la superficie. Ambas se destacan por alcanzar altos rendimientos productivos en el país con producciones que pueden alcanzar las 4,5 a 5 toneladas por hectárea en años de alta carga frutal (Ellena, 2018; Grau, 2019).

2.2 Cansancio de suelo:

El cansancio de suelo se define como la disminución o agotamiento de los nutrientes considerados como esenciales para las plantas (Volosciuc & Josu, 2014) y es causado por malos manejos realizados por el mismo agricultor durante años consecutivos, tales como monocultivos, rotaciones cortas o con especies erróneas y prácticas de agricultura intensiva como el uso de agroquímicos (Craven, 2006; Gomiero, 2019). Este problema afecta las propiedades físico-químicas de los suelos, generando una disminución del pH y la degradación de la estructura del suelo que propicia su compactación. Estos cambios negativos impactan en la fertilidad del suelo y reducen el desarrollo y producción de la especie agrícola cultivada (Martínez *et al.*, 2010; Gomiero, 2019). Es posible seguir usando estos suelos para actividades agrícolas, pero solo se obtendrán rendimientos aceptables, realizando correcciones de las propiedades físico-químicas mediante la utilización de enmiendas, así como el uso de fertilizantes que permiten aumentar la disponibilidad de nutrientes esenciales y con ello la productividad de los cultivos (Hirzel *et al.*, 2016).

2.3 Propiedades físico-químicas del suelo:

Las propiedades físico-químicas del suelo nos permiten entender muchas de las interacciones a nivel de la rizósfera, y a su vez comprender como estas interacciones repercutirán negativamente en el desarrollo y producción de las plantas si es que se detectan limitaciones (Owen, 1995). Para poder corregirlas, primero hay que identificarlas mediante análisis de suelo, a través de la utilización de las metodologías indicadas por la Comisión Nacional de Acreditación de Análisis de Suelo (Sadzawka *et al.*, 2006), que permitirán conocer los principales parámetros que se mencionan y explican a continuación.

2.3.1 Textura:

La textura corresponde a la proporción de arena, limo y arcilla en el suelo. La arena mide entre 0,05 mm y 2 mm; el limo entre 0,002 mm y 0,05 mm; mientras que la arcilla mide menos de 0,002 mm de diámetro de partículas de suelo (Gisbert *et al.*, 2010; Martin *et al.*, 2018). Suelos con mayor predominancia de arcillas (coloides) son capaces de retener mayor cantidad de agua y nutrientes para las plantas, debido a la carga negativa que presentan estas partículas. Suelos con mayor predominancia de arenas no presentan carga negativa y además poseen un tamaño de poros más grande, por lo tanto, la capacidad de retener agua y nutrientes es baja, mientras que suelos predominantes en limo son carentes de coloides que forman estructura, se compactan y dificulta la aireación y circulación de agua (Gisbert *et al.*, 2010; Mendoza, 2012).

2.3.2 Estructura:

La estructura del suelo corresponde al ordenamiento de las partículas en el perfil de suelo, formando agregados. Esta estructura puede ser granular, en bloques o prismas, entre otros y permiten al suelo aumentar la estabilidad ante la erosión, mantener la porosidad, y el movimiento del agua entre los distintos perfiles de suelo (Maddela *et al.*, 2017).

2.3.3 pH:

El pH o potencial de hidrógeno del suelo, es un parámetro que indica la actividad de los iones H^+ en la solución del suelo y se calcula como el inverso del logaritmo de la actividad de iones de H^+ , expresando el resultado en una escala que va de 0 a 14. Cuando la concentración o actividad de iones H^+ es de 1×10^{-7} moles/litro, el logaritmo del inverso de este número es igual a 7, lo que corresponde a un pH de suelo neutro, valores inferiores indican que la concentración de iones H^+ va incrementando y valores sobre pH 7 indican que la concentración de iones H^+ va disminuyendo en la solución del suelo (Espinosa y Molina, 1999). Cambios en el pH influyen en la disponibilidad de nutrientes en el suelo, las formas iónicas de los elementos, la estabilidad de quelatos, entre otras consecuencias. Un suelo con pH alto puede generar deficiencias de micronutrientes (hierro principalmente), mientras que un suelo con pH bajo puede generar deficiencias de macronutrientes

(bases de intercambio), toxicidad de micronutrientes y daños en el sistema radical de la planta. Un cambio de unidad en la escala de pH implica el aumento o disminución de diez veces la concentración de iones de H⁺. El incremento o disminución generarían muchos de los problemas mencionados anteriormente (Sela, 2020).

2.3.4 Capacidad de intercambio catiónico (CIC):

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es un parámetro que indica la cantidad total de cargas negativas disponibles sobre la superficie de los coloides del suelo (arcillas y materia orgánica) que le permiten retener e intercambiar mediante fuerzas electrostáticas, nutrientes catiónicos esenciales para las plantas como el calcio, magnesio y potasio (Pérez *et al.*, 2017; Sela, 2020). Suelos con texturas más gruesas poseen CIC menores comparado con suelos en que predominan las texturas más finas, además el pH influye en la carga superficial de los coloides del suelo, cuando el pH es bajo, la carga negativa de los coloides es neutralizada por los iones H⁺ y la CIC disminuye, pero a medida que el pH va aumentando quedan mayor cantidad de cargas negativas disponibles y la CIC aumenta, incrementando el potencial de fertilidad del suelo (Maddela *et al.*, 2017; Pérez *et al.*, 2017).

2.3.5 Conductividad eléctrica:

Este parámetro se utiliza para estimar el nivel de sales disueltas en el suelo y representa la capacidad que tiene la solución del suelo para conducir la corriente eléctrica, suele expresarse como deciSiemens por metro (ds/m) y las sales que considera pueden ser minerales esenciales para la planta que se producen naturalmente en el suelo, fertilizantes aplicados y otros elementos minerales que incluso podrían ser tóxicos para la planta (Sela, 2020). Suelos con valores de conductividad altos son comunes en regiones áridas y semiáridas debido a que la evaporación del suelo es mayor a la precipitación, impidiendo que las sales presentes en la solución del suelo puedan ser lixiviadas y en su lugar se van acumulando en estratas superiores del suelo (Maddela *et al.*, 2017).

2.3.6 Metales pesados:

Según la definición de Ernst (1996), se conocen como metales pesados a aquellos con una densidad por encima de 4,5 g/cm³ (Casierra-Posada y Poveda, 2005). Varios elementos entran en esta categoría, sin embargo, los que son considerados como esenciales para las plantas son el cobre, hierro, manganeso, molibdeno y zinc (Marschner, 2012). En suelos agrícolas, la presencia de estos metales pesados puede ser por fuentes naturales como el material parental del suelo, así como también, debido a actividades antrópicas, como la aplicación de fertilizantes y plaguicidas (Peris, 2006). Tanto para metales pesados esenciales y no esenciales para las plantas, una cantidad superior al umbral de tolerancia generaría sintomatología característica de toxicidad. Esta, se favorece bajo ciertas condiciones físico-químicas de suelo como la textura del suelo, la salinidad, el porcentaje de materia orgánica y el pH. En suelos ácidos, metales pesados como

hierro y manganeso son liberados a la solución del suelo en cantidades elevadas y además varios nutrientes esenciales para las plantas dejan de estar disponibles (Otte *et al.*, 1992; Sela, 2020).

2.4 Importancia de propiedades físico-químicas en el desarrollo de avellano:

El desarrollo y productividad del avellano se verán afectados en forma negativa cuando existan limitaciones físico-químicas como suelos con baja permeabilidad, con estratas compactadas que generen problemas de infiltración en una profundidad efectiva de 0,9 a 1,0 metro debido a problemas asociados como asfixia de raíces con la posterior muerte de raíces finas y fibrosas (Ellena, 2013). En definitiva, el avellano en condiciones óptimas requiere suelos con profundidad de 0,6 a 1,5 metros, de textura media, buen drenaje y pH de 6 a 7, pero se adapta a suelos más ácidos con pH desde 5,5 (Merlet *et al.*, 2016) y suelos menos ácidos con pH de hasta 7,8 (Grau, 2019).

2.5 Enmiendas calcáreas:

Para incrementar el pH del suelo y con ello reducir su acidez, se debe aumentar la concentración de bases disponibles en el suelo mediante la aplicación de enmiendas calcáreas o en menor medida con fertilizantes cálcicos (Soratto y Crusciol, 2013; Hirzel *et al.*, 2016). Este efecto se logra al dejar en contacto la enmienda calcárea con el agua del suelo que forma iones OH^- que son removidos de la solución del suelo al neutralizar los iones H^+ . Junto con el incremento del pH, destaca el incremento en la disponibilidad de nutrientes y además la capacidad de hacer precipitar el aluminio (Al^{3+}) como $\text{Al}(\text{OH})_3$ así como otros elementos como manganeso y hierro que en suelos ácidos están en exceso, generando efectos tóxicos en las plantas (Espinosa y Molina, 1999). Los principales agentes encalantes utilizados como enmiendas de suelo se detallan a continuación.

2.5.1 Carbonato de calcio:

El carbonato de calcio (CaCO_3) es el material más utilizado para encalar los suelos agrícolas y están formados en base a roca caliza, calcárea o calcita que se muelen y ciernen en mallas de diferente tamaño. Se formula como partículas sólidas pequeñas de alrededor de 250 micrones. Su contenido de calcio en forma pura es de alrededor de un 40% y su modo de acción para neutralizar la acidez es mediante la hidrólisis del ion CO_3^{2-} y formación de iones OH^- (Espinosa y Molina, 1999; Valerio y Molina, 2012; Molina, 2018). Sus desventajas son el tiempo que tarda en ejercer efecto en el suelo, después de 3 a 6 meses debido al tamaño de sus partículas y baja solubilidad, además necesita ser incorporado a estratas inferiores del suelo, puesto que su movilidad es muy baja, usualmente para cultivos se debe incorporar en la capa arable del suelo, correspondiente a los primeros 15-20 centímetros. En otras experiencias con aplicaciones de carbonato de calcio en praderas y en cultivos de cereales en cero labranzas la neutralización de la acidez ocurre en los primeros 5 centímetros de suelo, lo que impediría su aplicación en otras especies con mayor exploración de

raíces. Por otro lado, la duración del encalado depende del tipo de suelo y la pluviometría; luego de tres a cuatro años se pierde el 50% del efecto inicial de este procedimiento (Campillo y Sadzawka, 2018).

2.5.2 Dolomita:

La dolomita ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) o carbonato doble de magnesio, es una alternativa atractiva debido a que la mayoría de los suelos ácidos son deficientes en magnesio (Molina, 2014). Se formula como partículas sólidas pequeñas que miden entre 250 y 150 micrones (Molina, 2018). Contiene en su forma pura un 21,6% de calcio y 13,1% de magnesio. El modo de acción es similar al carbonato de calcio permitiendo la neutralización de la acidez a través de la hidrólisis del ion CO_3^{2-} , al igual que el carbonato. En cuanto al tiempo que tarda en hacer efecto, se demora un tiempo similar al carbonato de calcio (meses), debido a su baja solubilidad (Espinosa y Molina, 1999).

2.5.3 Hidróxido de calcio:

El hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), se conoce como cal apagada o hidratada y se obtiene hidratando óxido de calcio. Se formula como una sustancia polvorienta blanquecina de difícil manejo. En su forma pura posee un contenido de 56% de calcio. Su modo de acción es a través de sus iones OH^- que es una base fuerte que neutralizan los iones H^+ y permite aumentar el pH del suelo. Este tipo de enmienda es de rápida reacción en el suelo (más rápido que carbonato de calcio y dolomita), sin embargo, no es muy utilizado debido a su difícil manejo y costo elevado (Espinosa y Molina, 1999).

2.5.4 Óxido de calcio:

El óxido de calcio, conocido como cal viva o quemada por su fabricación calcinando piedra caliza (CaCO_3), se formula como un polvo blanquecino con un tamaño de partículas de aproximados 20 micrones (Molina, 2018) o incluso descrito por Valerio y Molina (2012) con partículas menores a 2 micrones bajo formulación de suspensión concentrada. En forma pura contiene un 71% de calcio. Reacciona rápidamente al entrar en contacto con el agua de la solución del suelo, generando una reacción exotérmica que libera iones OH^- , agente que neutraliza los iones H^+ y así incrementa el pH del suelo de forma más rápida que el resto de las enmiendas calcáreas. Reacciona en un lapso de pocos días y por el bajo tamaño de partículas posee mayor movilidad en el suelo, generando efecto en profundidad (Espinosa y Molina, 1999; Molina, 2018).

2.6 Evaluación del óxido de calcio:

El carbonato de calcio es el producto más utilizado como enmienda cálcica debido a su menor costo, pero sus efectos son a mediano y largo plazo (Campillo y Sadzawka, 2018). En este sentido el óxido de calcio (CaO) destaca por su efecto a corto plazo (pocos días después de aplicación) que permite un mayor

crecimiento inicial de raíces y rápido establecimiento del cultivo (Hirzel *et al.*, 2016). Al ser una partícula fina, es más soluble porque posee mayor superficie de contacto con el agua del suelo, ventaja comparado con enmiendas de partículas más grande y al ser más solubles mejora su capacidad de reaccionar sobre las propiedades químicas del suelo en el corto plazo (Pinochet *et al.*, 2005; Hirzel *et al.*, 2016). Una experiencia realizada por Valerio y Molina (2012) para incrementar el rendimiento de arroz, expresado como kg de arroz por hectárea, consistió en la aplicación de una enmienda en base a óxido de calcio (56% CaO) con formulación de suspensión concentrada en forma de carbonato de calcio micronizado, con tamaño de partícula menor a 2 micras. Se reportaron diferencias en los tratamientos con aplicaciones de enmienda (8 y 10 L/ha), obteniendo entre un 23 y 40% de incremento en el rendimiento comparado con el testigo, debido principalmente a mejoras en las características físico-químicas del suelo, como aumento en el pH y mayor disponibilidad de elementos esenciales en el suelo. Otra ventaja mencionada por Valerio y Molina (2012), corresponde a la posibilidad de aplicar esta enmienda líquida junto con otros productos fitosanitarios durante prácticas normales de aspersión foliar y además esta enmienda en formulación líquida, presenta un tamaño de partícula que permite ser aplicada a través de sistemas de riego sin ocasionar obturación de los emisores o goteros (Chica, 1999). Estas ventajas permiten considerar al óxido de calcio como alternativa a enmiendas calcáreas tradicionalmente utilizadas en la agricultura.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación del predio:

El ensayo fue realizado durante la temporada 2019-2020 en un huerto comercial de “El Almendro”, ubicado en la comuna de Retiro, Región del Maule, Chile ($35^{\circ} 57' S$; $71^{\circ} 47' O$).



Figura 1. Imagen satelital del huerto de avellano europeo en que se realizó el ensayo.

Esta comuna presenta un clima mediterráneo con temperatura media en el mes más cálido de $29,2^{\circ} C$ y de $12^{\circ} C$ para el mes más frío. Cuenta con un periodo libre de heladas de alrededor de 214 días, que se extiende desde mediados de octubre a mediados de abril. Presenta una pluviometría anual del orden de los 1.125 mm con una concentración del 60% en los meses de invierno (AGRIMED, 2017; SECPLAN, 2017).

El suelo del predio pertenece a la serie Quella (QLA), de textura franco-arcillosa en superficie y arcillosa en profundidad (presencia de arcillas densas), con una estructura prismática gruesa. Es de baja permeabilidad y drenaje pobre a imperfecto. La profundidad efectiva varía entre los 40 y 70 cm, limitada por arcillas densas y presencia de toba volcánica. La topografía es casi plana (pendientes de 0,5 a 3%), en posición baja de plano depositacional (lacustrino) (CIREN, 1997).

3.2 Descripción del ensayo

Para la evaluación de la suspensión concentrada de óxido de calcio, se seleccionaron dos tipos de suelo, el primero corresponde a un suelo franco arcilloso, denominado como avellano sector 1 (AV1), mientras que el segundo corresponde a un suelo franco, denominado avellano sector 2 (AV2). El ensayo fue realizado sobre avellano europeo (*Corylus avellana*) var. Tonda di Giffoni de un año, en marco de plantación de 5x2 metros y

que al momento de implementar este ensayo estaban bajo manejos de formación. Durante el ensayo, a cada sector se le aplicaron 3 tratamientos correspondientes a distintas dosis de CaO, el detalle se observa en el cuadro 1. El ensayo considera un diseño experimental con bloques al azar (en el sentido de la hilera) con tres repeticiones por tratamiento y 2 plantas por repetición (unidad experimental).

Cuadro 1. Resumen de tratamientos para evaluar efecto de CaO en cada sector.

Tratamiento	Dosis	Nº de repeticiones	Unidad experimental
Control (T0)	Sin aplicación	3	2
Dosis baja (T1)	50 L/ha	3	2
Dosis alta (T2)	100 L/ha	3	2

Las dosis por tratamiento se prepararon utilizando contenedores aforados y el modo de aplicación de cada dosis fue mediante el uso de bomba de espalda. Durante el ensayo se realizaron 3 aplicaciones con aproximadamente 45 días entre cada una de ellas, cuyas fechas se aprecian en el cuadro 2.

Cuadro 2. Aplicaciones realizadas de CaO durante el desarrollo del ensayo.

Fecha	Nº de aplicación
26-11-2019	1
15-01-2020	2
27-02-2020	3

3.3 Mediciones de campo:

3.3.1 Mediciones de respuesta fisiológica:

Para caracterizar el efecto de la suspensión de óxido de calcio sobre la fisiología y el normal desarrollo de las plantas, se midió el potencial hídrico xilemático (Ψ_x) y conductancia estomática, (g_s). La medición fue realizada entre las 12 y las 14 PM, cada 15 días. Para esto se evaluaron dos hojas por repetición, una de cada lado de la hilera, ubicadas en el tercio medio superior de la planta. Ψ_x se midió utilizando una cámara de presión Scholander (PMS Instrument Co., modelo 1000, Corvallis, Oregon, EE. UU.; Scholander *et al.*, 1965). Las hojas medidas se cubrieron una hora y media antes con una lámina plástica y encima una de aluminio, sellando la hoja en su totalidad para igualar el potencial hídrico entre la hoja y el tallo o xilema de la planta. Por su parte, la g_s fue medida utilizando un porómetro (PMR-5 PP-System, EE. UU.), en el cual la temperatura y la humedad relativa fueron medidas en condiciones ambientales (Cañete-Salinas *et al.*, 2019).

3.3.2 Mediciones de suelo:

Para evaluar el efecto de CaO, se realizaron análisis de suelo al comienzo y al término del ensayo. Los resultados de estos análisis entregan información sobre las propiedades físicas como % arena, % limo, % arcilla y clase textural. Esta medición es estándar y no debiese sufrir una modificación en relación con los

tratamientos aplicados. Además se evaluaron las propiedades químicas como concentración de nitrógeno (mg/kg), fósforo (mg/kg), potasio (mg/kg), porcentaje de materia orgánica (%), pH, conductividad eléctrica (dS/m), manganeso (mg/kg), zinc (mg/kg), cobre (mg/kg), hierro (mg/kg), boro (mg/kg), suma de bases (K, Ca, Mg, Na, expresado como cmol(+)/kg), CIC (cmol(+)/kg) y aluminio intercambiable (cmol(+)/kg) (Sadzawka *et al.*, 2006).

3.3.4 Medición de tejido foliar:

Se realizó una medición de tejido foliar para cada uno de los tratamientos, en cada uno de los dos sectores del ensayo. Estas mediciones se realizaron en el periodo del pick de crecimiento vegetativo de las plantas de avellano (mediados de enero). La información que se obtiene de esta medición corresponde a % de nitrógeno dumas, % de nitrógeno Kjeldahl, % fósforo, % potasio, % calcio, % magnesio, cantidad de manganeso (ppm), cantidad de zinc (ppm), cantidad de cobre (ppm), cantidad de hierro (ppm) y cantidad de boro (ppm).

3.4 Análisis estadístico:

Los datos obtenidos se analizaron e interpretaron mediante un análisis de varianza (ANDEVA) tradicional y pruebas de múltiples rangos para la separación de medias (tukey <0.05) según los resultados del ANDEVA, estos análisis se realizaron con el software Statgraphics Centurion XVI (versión 16.1.03). En cuanto a la homogeneidad de varianzas se utilizó el test de Levene con $\text{valor}_p \geq 0,05$.

Adicionalmente, se realizó un análisis estadístico con el software XLSTAT (XLSTAT Pearson edition, 2014 5.03) mediante el cual se efectuó un análisis de componentes principales (ACP) con datos que consideraron los promedios de los tratamientos para cada variable fisiológica evaluada.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis de suelo:

El análisis de suelo realizado al final de temporada nos permite observar un incremento en el pH en los dos tipos de suelo evaluados. En AV1, el incremento llegó a valores de 7,19 y 7,34 para T1 y T2 respectivamente (fig. 2), lo que implica un incremento de 0,74 y 0,89 unidades de pH en comparación con el T0. Para AV2, el incremento fue mayor, llegando a valores de 7,51 y 7,53 para T1 y T2 respectivamente, representando un incremento de 1,23 y 1,25 unidades de pH en relación con T0. Esto se explica debido a la liberación de iones OH^- que neutraliza los iones H^+ , mientras que el calcio pasa a tomar lugar en los sitios de intercambio, tal como se observa en la figura 4 (Espinosa y Molina, 1999).

Por su parte, se observa como los metales pesados tienden a disminuir gradualmente a medida que el pH del suelo aumenta (fig. 2). Para el caso del Mn, altos contenidos de este metal pesado se encuentran principalmente en suelos ácidos ($\text{pH} < 5,5$) debido a que aumenta el potencial redox que permite reducir los óxidos en los sitios de intercambio, aumentando la disponibilidad en el suelo como Mn^{+2} que corresponde a la forma química disponible para ser absorbido por las raíces de las plantas. Las aplicaciones de CaO al incrementar el pH del suelo aumentan la adsorción del Mn en las partículas de suelo; además, impiden el aumento del potencial redox y generan un efecto de auto-oxidación del Mn^{+2} sobre otras formas de Mn químicamente no disponibles por las plantas (MnO_2 , Mn_2O_3 , Mn_3O_4 , Mn_2O_7) (Millaleo *et al.*, 2010). En el caso del Fe, es más soluble a pH ácido y condiciones reductoras, en cambio con pH neutro o alcalino (pH entre 7,5 a 8,5) precipitan en formas insolubles para las plantas, esto último nos permite explicar el comportamiento de la disminución del contenido de este metal pesado en los suelos tratados con CaO, debido a que el incremento del pH alcanzado permite estar en valores que hacen precipitar al Fe, disminuyendo su contenido disponible en el suelo (Juárez *et al.*, 2007).

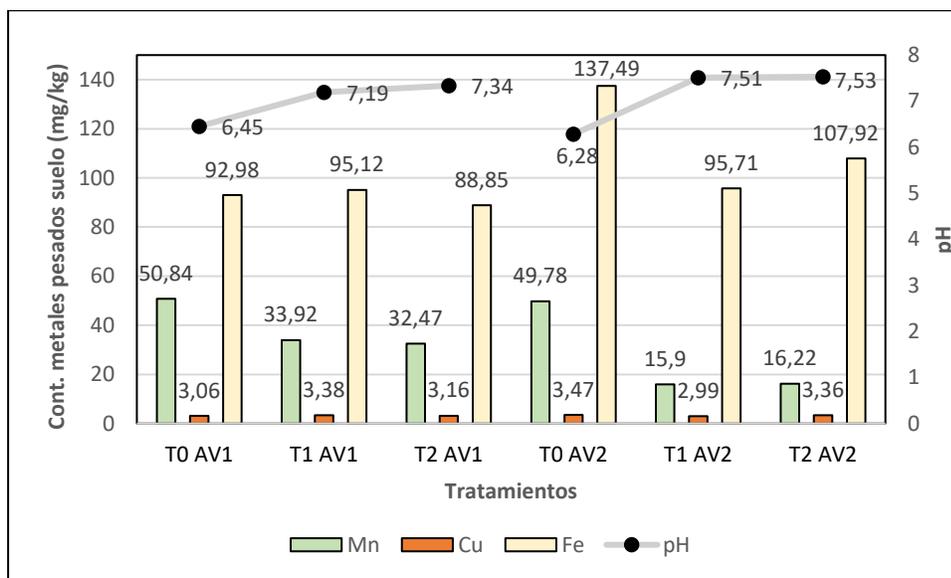


Figura 2. Comportamiento entre pH y el contenido de metales pesados en el suelo (mg/kg), medido posterior a las 3 aplicaciones de CaO durante el ensayo y en distintas dosis (T0 equivalente a 0 L/ha, T1 equivalente a 50 L/ha y T2 equivalente a 100 L/ha) en los dos sectores de estudio correspondientes a suelos de textura franco arcilloso (AV1) y franco (AV2).

El contenido de metales pesados se redujo en AV1 y AV2 con aplicaciones de CaO (fig. 3). El Mn que se presentaba en el orden de los 50 mg/kg ya sea en AV1 y AV2 en el tratamiento control, presentó una disminución del 33% y 36% en T1 y T2 respectivamente para AV1, mientras que en AV2 la disminución fue de un 68% y 67% para T1 y T2 respectivamente, en relación al tratamiento testigo (T0). El cobre que en AV1 y AV2 rondaba los 3 a 3,5 mg/kg, se mantuvo en esos tenores para los tratamientos T1 y T2. El hierro en AV1 disminuyó un 4% en T2 respecto a T0, mientras que en AV2 que se presentaba un valor mayor de hierro, del orden de 137,49 mg/kg disminuyó un 30% y 21% para T1 y T2, respectivamente.

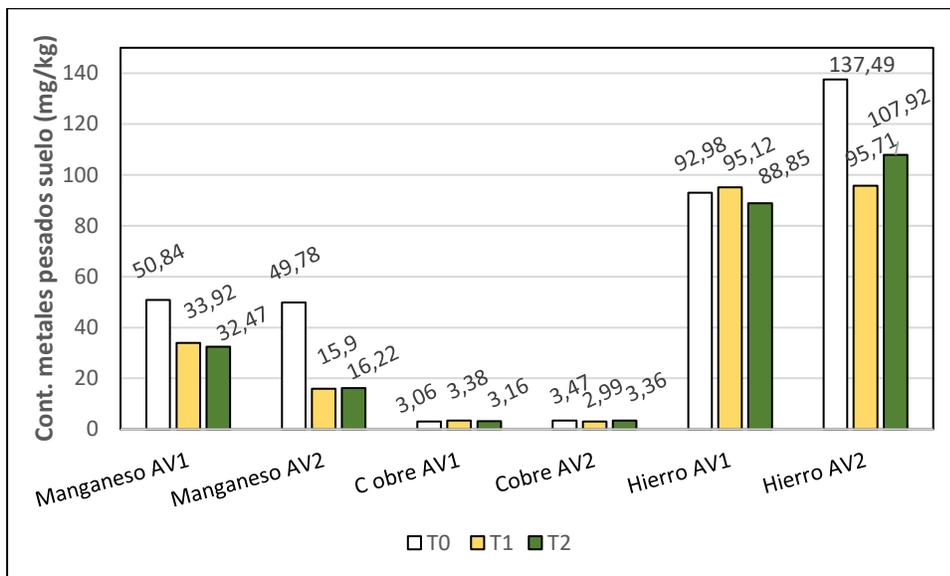


Figura 3. Contenido de metales pesados en el suelo (mg/kg), medido posterior a las 3 aplicaciones de CaO durante el ensayo y en distintas dosis (T0 equivalente a 0 L/ha, T1 equivalente a 50 L/ha y T2 equivalente a 100 L/ha) en los dos sectores de estudio correspondientes a suelos de textura franco arcilloso (AV1) y franco (AV2).

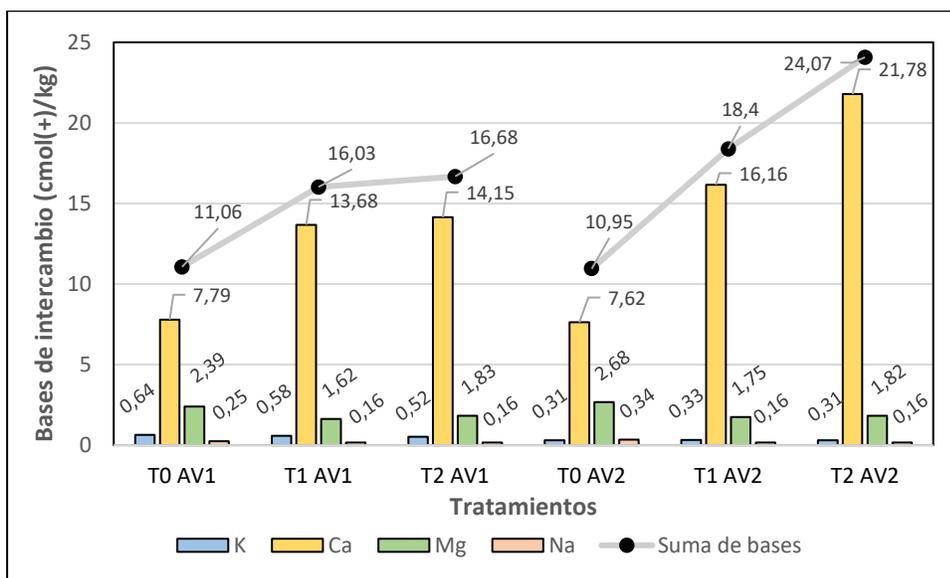


Figura 4. Comportamiento del contenido de bases de intercambio en el suelo (cmol (+)/kg suelo), medido posterior a las 3 aplicaciones de CaO durante el ensayo y en distintas dosis (T0 equivalente a 0 L/ha, T1 equivalente a 50 L/ha y T2 equivalente a 100 L/ha) en los dos sectores de estudio correspondientes a suelos de textura franco arcilloso (AV1) y franco (AV2).

La concentración de bases de intercambio como K, Mg, y Na (fig. 4), tiende a mantenerse o disminuir levemente en AV1 y AV2, no así con Ca, que claramente se genera un incremento en AV1, de un 75,6% y 81,6% en T1 y T2, respectivamente. Un incremento aún mayor se produjo en AV2; 112,1% y 185,8% para T1 y T2, respectivamente.

Para los dos tipos de suelo (AV1 y AV2), el efecto de T1 y T2 fue positivo en cuanto al incremento en la suma de bases (SDB). AV1 sin aplicación de CaO (T0) obtuvo al final de mediciones una SDB de 11,06 cmol (+)/Kg de suelo y el 70,4% de esa SDB corresponde a Ca. Ese mismo tipo de suelo, pero bajo el efecto de T1 y T2 incrementó la SDB en un 44,9% y 50,8% respectivamente y cuya participación del Ca estaría representando el 85,3% y 84,8% de la SDB para T1 y T2, respectivamente. En el caso de AV2, el incremento fue aún mayor, ya que de un total de 10,95 cmol (+)/Kg de la SDB en T0, se incrementó en un 68,0% y 119,8% para T1 y T2, respectivamente, proporción de cambio mayor que la expresada en AV1. El aporte del Ca en la SDB sin la aplicación de CaO fue de un 69,6%, este porcentaje incrementa a 87,8% y a 90,5% para el caso de T1 y T2, respectivamente. Los resultados obtenidos en AV1 y AV2 dejan en claro que el incremento de la SDB es explicado por el incremento de bases intercambiables de Ca.

El comportamiento de los macronutrientes primarios N y P (fig. 5), transcurridas las tres aplicaciones de CaO, tendió a la mantención o incremento de mg/kg, sobre todo en el caso de P en AV2. El K en AV1 disminuyó progresivamente al ir incrementando la dosis aplicada (T1 y T2 respecto a T0). En el caso de AV2, los valores de K se mantuvieron similares en las 3 dosis de CaO.

Dentro de los macronutrientes secundarios (fig. 6), el Ca tuvo un leve incremento (0,5 mg/kg) al pasar de una dosis media (T1) a la dosis alta (T2), lo cual muestra que hay diferencias entre aplicar y no aplicar, pero no así entre aplicar una dosis media a una dosis alta en que no se genera un aumento importante. En cambio, en AV2 se produjo un incremento progresivo acorde al incremento de la dosis de CaO. El Mg por su parte mostró una disminución a mayores dosis de CaO tanto en AV1 como en AV2, contrario a lo mencionado por Hirzel 2014, que describe que el incremento de pH mediante encalado permite incrementar los niveles de Mg. En cuanto a micronutrientes (fig. 7), Zn tuvo una disminución aparente al ir aumentando la dosis de CaO en AV1, no así en AV2 en que hay una disminución importante al pasar de T0 a T1, pero no se aprecia diferencia entre T0 y T2. Similar ocurre con el B que disminuyó su contenido en cuanto a los mg/kg en AV1 y AV2 a distintas dosis de CaO, coincidiendo con Hirzel 2014 que menciona que estas prácticas de encalado permiten reducir la disponibilidad de Zn y B.

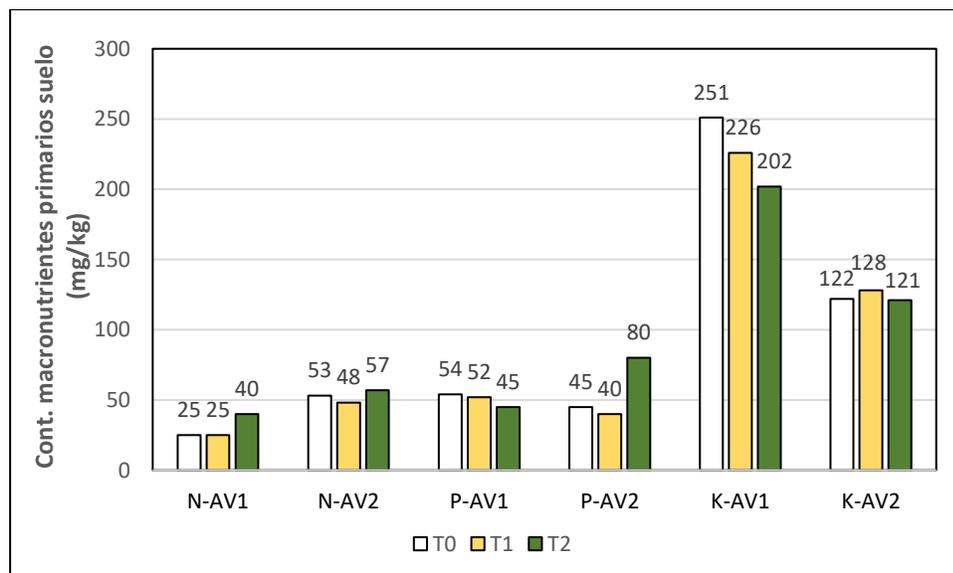


Figura 5. Comportamiento de macronutrientes primarios en el suelo (mg/kg), medido posterior a las 3 aplicaciones de CaO durante el ensayo y en distintas dosis (T0 equivalente a 0 L/ha, T1 equivalente a 50 L/ha y T2 equivalente a 100 L/ha) en los dos sectores de estudio correspondientes a suelos de textura franco arcilloso (AV1) y franco (AV2).

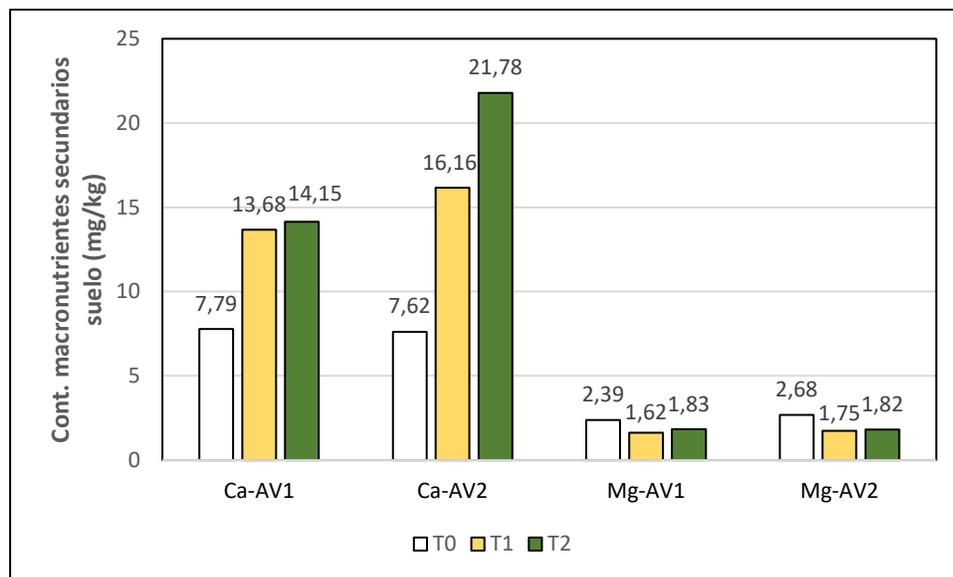


Figura 6. Comportamiento de macronutrientes secundarios (mg/kg), medido posterior a las 3 aplicaciones de CaO durante el ensayo y en distintas dosis (T0 equivalente a 0 L/ha, T1 equivalente a 50 L/ha y T2 equivalente a 100 L/ha) en los dos sectores de estudio correspondientes a suelos de textura franco arcilloso (AV1) y franco (AV2).

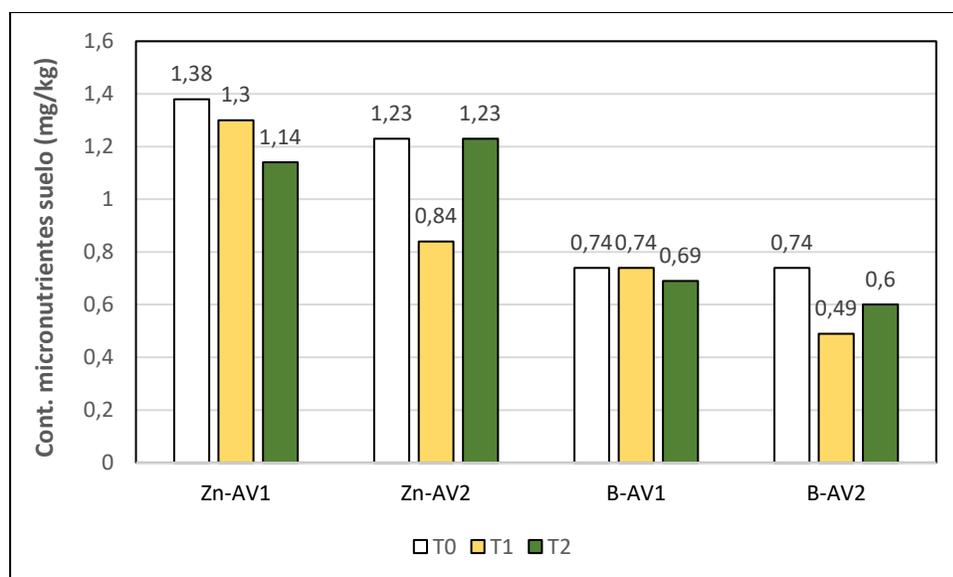


Figura 7. Comportamiento de micronutrientes (mg/kg), medido posterior a las 3 aplicaciones de CaO durante el ensayo y en distintas dosis (T0 equivalente a 0 L/ha, T1 equivalente a 50 L/ha y T2 equivalente a 100 L/ha) en los dos sectores de estudio correspondientes a suelos de textura franco arcilloso (AV1) y franco (AV2).

Los cambios cuantificados en las propiedades físico-químicas del suelo se asocian principalmente al incremento de pH. En el caso de AV1, el efecto implicó un cambio de un suelo moderadamente ácido (pH 6,45) a un suelo neutro bajo dosis media y alta de CaO (T1 y T2 respectivamente), en AV2, el efecto fue aún mayor y se obtuvo un cambio en el pH del suelo que implicó la variación de un suelo moderadamente ácido (T0) a suelos medianamente alcalinos (T1 y T2) (Sierra, 1982).

4.2 Análisis foliar:

Mediante el análisis foliar, podemos apreciar el comportamiento de macro y micronutrientes esenciales en el tejido foliar 45 días después de la primera aplicación de CaO al suelo, observando su efecto en los tratamientos aplicados. En términos generales todos los macro y micronutrientes se encuentran en un nivel porcentual adecuado en el tejido foliar (Olsen, 2001), salvo el nitrógeno el cual se observa en exceso en todos los tratamientos en los dos tipos de suelo. En AV1 el porcentaje de N foliar en T1 y T2 respecto a T0 se incrementó en 0,5 y 0,45 puntos porcentuales, en AV2 el incremento fue de 0,08 y 0,34 puntos porcentuales comparando T1 y T2 con T0 respectivamente. Esto se podría deber a que posteriormente de realizada la primera aplicación de CaO, se generó un incremento en el pH, factor que permite el incremento de nitrógeno mediante su liberación del suelo y de la materia orgánica presente en este (Sierra, 1982; Videla *et al.*, 2005). El P, K y Mg pareciera no verse modificado por un efecto del tratamiento (T0, T1 y T2), apreciándose valores adecuados para cada uno de ellos en AV1 y AV2. Por su parte el Ca se mantiene en niveles adecuados, pero además se incrementa al pasar de T0 a T1 y en menor medida de T0 a T2, comenzando a indicar que la primera aplicación de CaO puede haber ocasionado un efecto de incremento de este catión intercambiable lo que conlleva a un incremento de pH y la mayor solubilidad de otros elementos nutricionales. Al no haberse generado condiciones de estrés hídrico durante el ensayo y a la característica del Ca de ser transportado por flujo de masas del suelo a la planta, es que se explica que los mayores % de Ca a nivel foliar se presenten en los tratamientos T1 y T2, en ambos tipos de suelo (AV1 y AV2), atribuido a un mayor contenido de este elemento en estos suelos para los tratamientos mencionados (Hirzel, 2014).

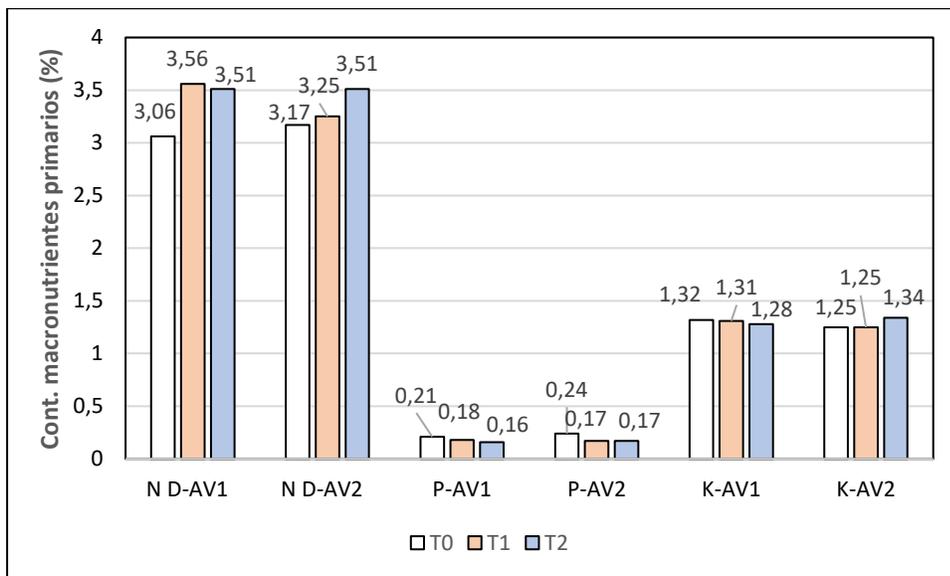


Figura 8. Comportamiento de macronutrientes primarios a nivel foliar (%) en avellano europeo, medido previo a la segunda aplicación de CaO en distintas dosis (T0 equivalente a 0 L/ha, T1 equivalente a 50 L/ha y T2 equivalente a 100 L/ha), en los dos sectores de estudio correspondientes a suelos de textura franco arcilloso (AV1) y franco (AV2).

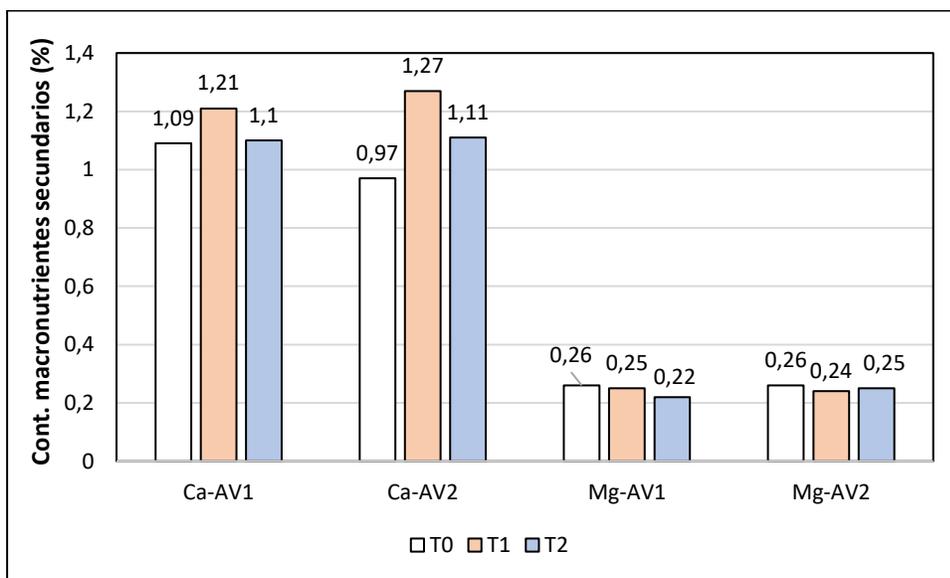


Figura 9. Comportamiento de macronutrientes secundarios a nivel foliar (%) en avellano europeo, medido previo a la segunda aplicación de CaO en distintas dosis (T0 equivalente a 0 L/ha, T1 equivalente a 50 L/ha y T2 equivalente a 100 L/ha), en los dos sectores de estudio correspondientes a suelos de textura franco arcilloso (AV1) y franco (AV2).

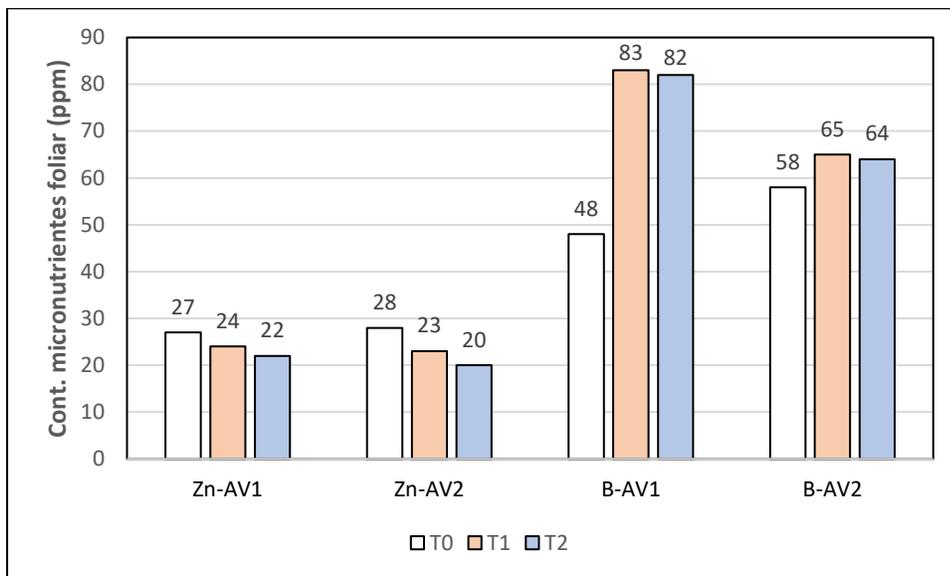


Figura 10. Comportamiento de micronutrientes a nivel foliar (%) en avellano europeo, medido previo a la segunda aplicación de CaO en distintas dosis (T0 equivalente a 0 L/ha, T1 equivalente a 50 L/ha y T2 equivalente a 100 L/ha), en los dos sectores de estudio correspondientes a suelos de textura franco arcilloso (AV1) y franco (AV2).

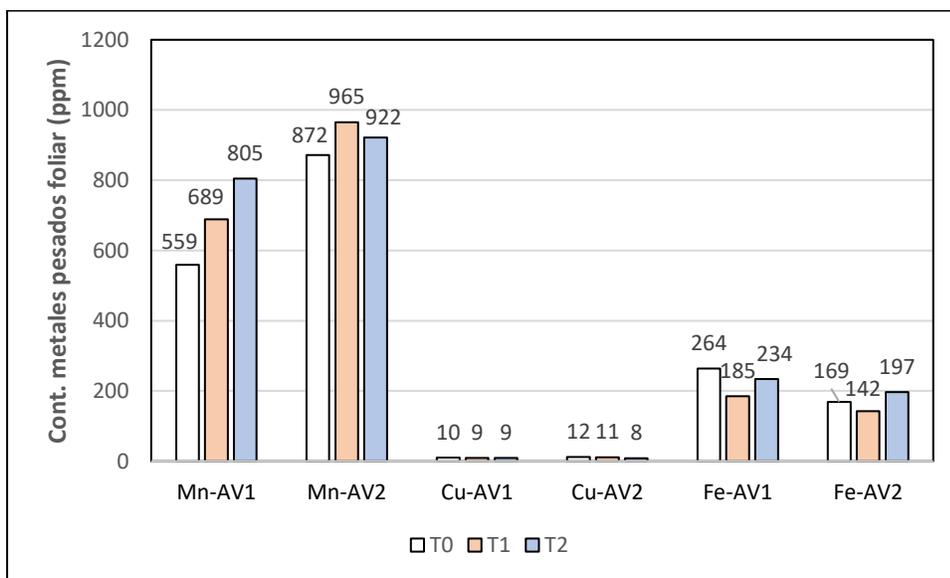


Figura 11. Comportamiento de metales pesados a nivel foliar (%) en avellano europeo, medido previo a la segunda aplicación de CaO en distintas dosis (T0 equivalente a 0 L/ha, T1 equivalente a 50 L/ha y T2 equivalente a 100 L/ha), en los dos sectores de estudio correspondientes a suelos de textura franco arcilloso (AV1) y franco (AV2).

4.3 Análisis de Componentes Principales (ACP):

A modo de analizar la correlación existente entre las variables fisiológicas del avellano y el efecto de la aplicación de distintas dosis de CaO, se presenta en la figura 2 un análisis de componentes principales (ACP). La figura 2 (a) indica que en el suelo franco arcilloso (AV1) tratado con distintas dosis de CaO, el componente F1 representa el 97,62% de la variabilidad total de los datos analizados, mientras que el componente F2 representa el 2,38%, en conjunto ambos componentes (F1 y F2) explican el 100% de la variabilidad total de los datos. Las variables fisiológicas PAR y Ψ_x presentan una relación inversamente proporcional. Es decir, al aumentar la PAR, el Ψ_x disminuye, generando una situación de mayor estrés hídrico. No así para el caso de la g_s con la PAR que presentan una relación lineal directa, pero moderada entre ambas variables. Esto implica que mayores valores en la PAR van a permitir un leve incremento en la g_s siempre que los valores de Ψ_x no supere el umbral que induce el cierre estomático, la condición de estrés hídrico se podría empezar a presentar sobre el umbral de -0,8 MPa (Awada & Josiah, 2007) siendo severo con valores entre -1,5 a -2,0 MPa (Hogg *et al.*, 2000). Para el caso de la figura 2 (C) en el suelo franco (AV2) tratado con distintas dosis de CaO, se puede observar que el componente F1 representa el 99,72% de la variabilidad total de los datos, mientras que el componente F2 representa el 0,28%, representando en conjunto el 100% de la variabilidad total de los datos. El análisis de la relación entre variables es similar al expresado para la figura 2 (a) (AV1).

En la distribución de observaciones para AV1 y AV2, figura 2 (b) y 2 (d) respectivamente, podemos apreciar una tendencia en la distribución de las observaciones que es generado por la fecha de medición, asociadas a las condiciones del día de cada medición, ya sea en AV1 como en AV2, pero no hay una distribución de las observaciones ocasionada por el efecto de las distintas dosis de CaO (T0, T1, T2).

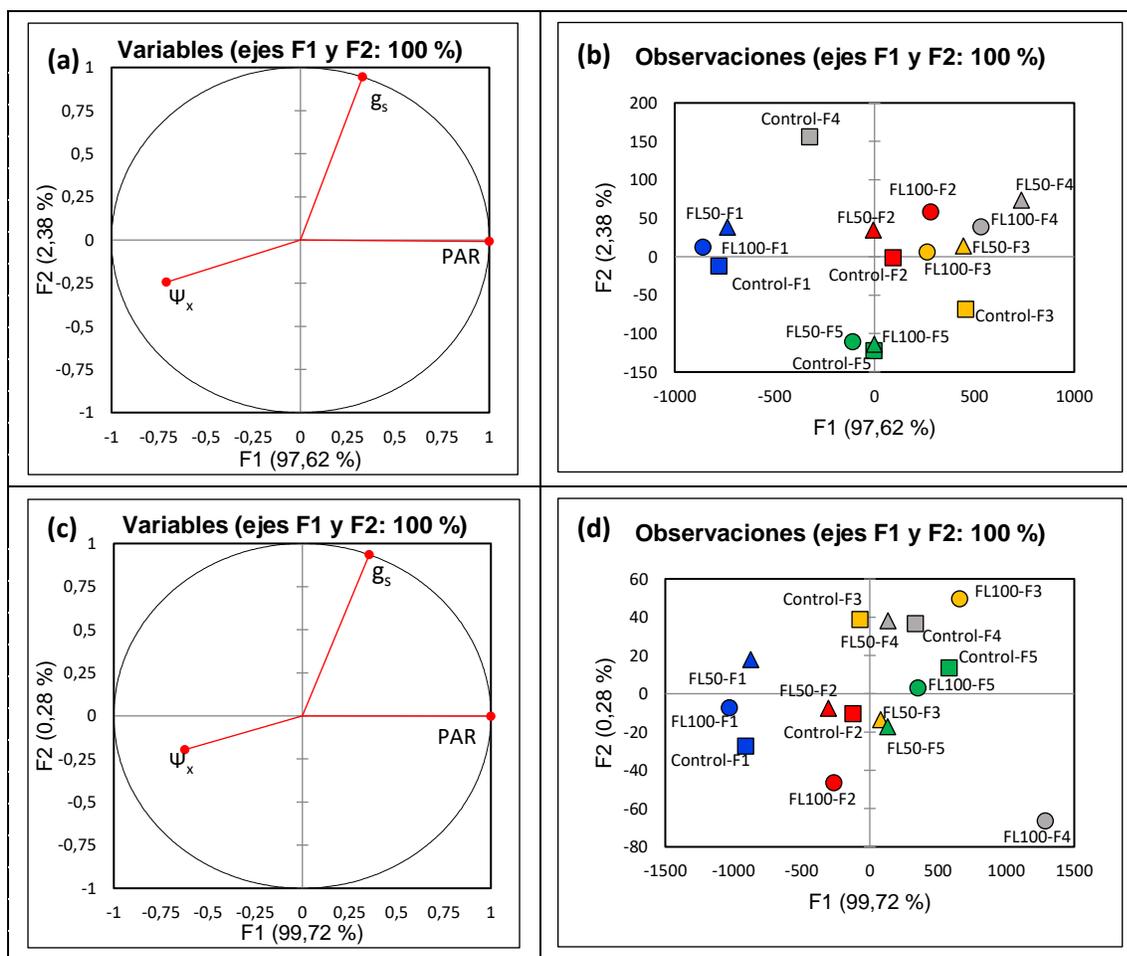


Figura 12. Análisis de Componentes Principales (ACP). Figura a y b, distribución de variables y de observaciones, respectivamente para AV1. Figura c y d, distribución de variables y de observaciones, respectivamente para AV2. Nomenclatura utilizada distribución de variables: g_s : Conductancia estomática ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). PAR: Radiación Fotosintéticamente Activa (nm). Ψ_x : Potencial hídrico (MPa). Nomenclatura utilizada distribución de observaciones: Dosis CaO (control (T0), FL50 (T1) y FL100 (T2)) -Fecha de aplicación (5 fechas de medición durante el ensayo).

4.4 Análisis estadístico de fisiología de avellano europeo:

Cuadro 3. Efecto de la aplicación de 3 dosis de CaO (T0=0 L/ha; T1=50 L/ha y T2=100 L/ha) sobre variables fisiológicas de avellano europeo cultivado en un suelo franco arcilloso (AV1).

Tratamiento	PAR (nm)	HR (%)	Temperatura. (°C)	g _s (mmol m ⁻² s ⁻¹)	Ψ _x (MPa)
Control	1250,10	8,10	12,10	158,30	-0,53
FL50	1363,10	8,00	12,60	191,50	-0,54
FL100	1322,40	7,90	12,40	182,90	-0,55
Valor-P	0,87	0,98	0,94	0,59	0,88
C.V (%)	46,84	28,73	23,02	49,66	17,07

Test HSD (p ≤ 0,05).

Cuadro 4. Efecto de la aplicación de 3 dosis de CaO (T0=0 L/ha; T1=50 L/ha y T2=100 L/ha) sobre variables fisiológicas de avellano europeo cultivado en un suelo franco (AV2).

Tratamiento	PAR (nm)	HR (%)	Temperatura. (°C)	g _s (mmol m ⁻² s ⁻¹)	Ψ _x (MPa)
Control	1401,40	7,40	10,30	185,30	-0,56
FL50	1278,60	7,40	10,40	175,60	-0,55
FL100	1718,30	6,90	10,20	176,40	-0,53
Valor-P	0,33	0,92	0,99	0,87	0,74
C.V (%)	52,21	36,20	20,84	29,48	20,85

Test HSD (p ≤ 0,05).

Las aplicaciones de CaO en distintas dosis (0 L/ha, 50 L/ha y 100 L/ha) sobre la respuesta fisiológica en avellano europeo no presentaron diferencias significativas entre las medias de los tratamientos, tanto en el suelo franco arcilloso (AV1) (cuadro 3), así como en el suelo franco (AV2) (cuadro 4). La ausencia de una diferencia entre el control y los tratamientos es importante para establecer que, a pesar de realizar aplicaciones de dosis altas de CaO, (50 y 100 L/ha), comparado con la experiencia reportada por Valerio y Molina (2012) que utilizaron dosis de 8 y 10 L/ha; no se presentó un efecto de toxicidad en el cultivo que reprimiera la fisiología de las plantas de avellano europeo. Por otra parte, si se quisieran lograr resultados similares con CaCO₃ es posible que si se generen efectos de toxicidad, debido a que al reaccionar el carbonato en el suelo libera iones Ca⁺² y HCO₃⁻ que en exceso genera calcitas secundarias que llegan a inmovilizar al Mg⁺² (Monfort *et al.*, 2015). Por lo tanto, se podría definir al CaO en suspensión concentrada, como una alternativa efectiva comparado con la enmienda tradicionalmente utilizada, el CaCO₃.

Mediante estos resultados, se podría inferir que no hubo una modificación de las propiedades físico-químicas efectuadas por las aplicaciones de CaO (como enmienda calcárea bajo distintas dosis en ambos tipos de suelo). Sin embargo, como vimos en los resultados de análisis de suelo efectuados al final del periodo de ensayo en que pasamos de un suelo moderadamente ácido (pH 6,45) a un suelo neutro bajo dosis media y alta de CaO (T1 y T2 respectivamente), por lo tanto, existe una modificación en la dinámica de los nutrientes en el suelo, principalmente en su solubilidad y disponibilidad de absorción por las raíces de la planta (Hirzel, 2011). No obstante, esta condición más favorable en la fertilidad del suelo no se traduce en una diferencia en la fisiología de avellanos europeos en su primer año post plantación, tratados bajo distintas dosis de CaO, lo cual no descarta que el efecto producido pueda traducirse en diferencias en la próxima temporada, al realizar nuevamente el ensayo.

5. CONCLUSIONES

Las aplicaciones de CaO permitieron modificar las propiedades químicas de ambos tipos de suelos (AV1 y AV2) mediante el incremento del pH, generando una variación en el contenido de macro y micronutrientes. Tal es el caso de los metales pesados Mn, Cu y Fe que fueron disminuyendo a medida que se incrementaba el pH con las dosis medias y altas de CaO, hasta valores que no representan peligros de toxicidad por metales pesados en el cultivo analizado.

Si bien no se pudo apreciar diferencias en la fisiología de plantas de avellano europeo creciendo en suelo con aplicaciones de CaO versus el control (ya sea en AV1 como en AV2), esto nos permite concluir que la suspensión concentrada de CaO no representa peligro de toxicidad para las plantas aun siendo aplicado en altas dosis.

Sería necesario repetir el ensayo una temporada más para poder apreciar diferencias en la fisiología de las plantas de avellano europeo. Esto debido a que ya no serían mediciones en un cultivo recién establecido y las plantas estarían más receptivas a expresar diferencias ya sea por las aplicaciones y modificaciones en la temporada del presente ensayo, así como los cambios que se efectúen en el ensayo con aplicaciones de CaO en una nueva temporada. Por otro lado, se podrían utilizar suelos con un pH inicial más bajo que los utilizados en el ensayo, para que, al obtener un incremento en el pH, se pueda contrastar con una situación en que el tratamiento control tenga las características de un suelo limitante para el cultivo estudiado.

De esa manera poder concluir que las aplicaciones de enmienda calcárea de CaO como suspensión concentrada permite modificar favorablemente las propiedades físico-químicas de ambos tipos de suelo, traduciéndose en mejores condiciones para el cultivo expresadas en la fisiología.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Ascari, L., Guastella, D., Sigwebela, M., Engelbrecht, G., Stubbs, O., Hills, D., De Gregorio, T., and Siniscalco, C. 2018. Artificial pollination on hazelnut in South Africa: preliminary data and perspective. *Acta Horti*, 1226: 141-148.
- Awada, T., and Josiah, S. 2007. Physiological responses of four hazelnut hybrids to water availability in Nebraska. *Great Plains Research*, 17: 193-202.
- Boccacci, P., and Botta, R. 2009. Investigating the origin of hazelnut (*Corylus avellana* L.) cultivars using chloroplast microsatellites. *Genet Resour Crop Evol*, 56:851-859.
- Campillo, R., y Sadzawka, A. 2018. Curso de capacitación para operadores y futuros operadores del Sistema de Incentivos para la Sustentabilidad Agroambiental (SIRSD-S) de la Región de Los Ríos. Boletín INIA N° 361. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Osorno, Chile. 110 p. Recuperado en: < <http://biblioteca.inia.cl/medios/biblioteca/boletines/NR40859.pdf> > Consultado el 10 de julio de 2020.
- Cañete-Salinas, P., Zamudio, F., Yañez, M., Gyenge, J., Valdés, H., Espinosa, C., Jara-Rojas, F., Venegas, J., Retamal, L., and Acevedo-Opazo, C. 2019. Responses in growth and physiological traits in two *Populus x canadensis* clones ('I-214' and 'I-488') submitted to different irrigation frequencies in central Chile. *Forest Ecology and Management*, 449 (2019) 117455.
- Casierra-Posada, F., y Poveda, J. 2005. La toxicidad por exceso de Mn y Zn disminuye la producción de materia seca, los pigmentos foliares y la calidad del fruto en fresa (*Fragaria sp.* Cv. Camarosa). *Agronomía Colombiana*, 23(2): 283-289.
- Cazanga, R., y Leiva, C. 2013. Antecedentes técnicos y económicos para la producción de Avellano Europeo en la Región del Maule. Publicación CIREN N° 171. Centro de Información de Recursos Naturales. Santiago, Chile. 44 p. Recuperado en: < <http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/1955/PC171113.pdf?sequence=1&isAllowed=y> > Consultado el: 24 de junio de 2020.
- Centro de Agricultura y Medioambiente (AGRIMED). 2017. Atlas agroclimático de Chile. Tomo III: Regiones de Valparaíso, Metropolitana, O´higgins y del Maule. Santiago, Chile.

- Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). 1997. Descripción de suelos materiales y símbolos: Estudio Agrológico VII Región. Publicación CIREN N° 117. Santiago, Chile.
- Chica, R. 1999. Uso de aguas residuales depuradas en sistemas de riego por goteo. Tesis doctoral para optar al grado de Doctor Ingeniero Agrónomo. Córdoba, Argentina, Departamento de Agronomía, Universidad de Córdoba. 202 p.
- Craven, A, O. 2006. Page 11 in: Soil Exhaustion as a Factor in the Agricultural History of Virginia and Maryland. Edited by Sprout, J. and Smith, M. University of South Carolina, Columbia, USA. 212 p.
- Ellena, M. 2013. Avellano europeo: Establecimiento y formación de la estructura productiva. Boletín INIA N° 274, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Chile, 202 p.
- Ellena, M. 2018. El avellano europeo en Chile: Una década de recopilación e investigación. Colección de libros INIA N° 36. Instituto de investigaciones agropecuarias. Temuco, Chile. 428 p.
- Ellena, M., González, A., Sandoval, P., and Marchant, F. 2018. Advantages of high density hazelnut orchards in south Chile. Acta Hortic. 1226.
- Espinosa, J., y Molina, E. 1999. Acidez y encalado de los suelos. International Plant Nutrition Institute. 5 p.
- Frary, A., Öztürk, S., Balik, H., Kayalak, S., Kizilci, G., Doganlar, S., and Frary, A. 2019. Association mapping of agro-morphological traits in European hazelnuts (*Corylus avellane*). Euphytica (2019), 215:21.
- Germain, E. 1994. The reproduction on hazelnut (*Corylus avellana* L.): A review. International Society for Horticultural Science 351.
- Gisbert, J, M., Ibáñez, S., y Moreno, H. 2010. La textura de un suelo. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España. 5 p. Recuperado en: < <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/7775/Textura.pdf> > Consultado el 5 de julio de 2020.
- Gomiero, T. 2019. Page 33 in: Saving Food: Production, Supply Chain, Food Waste and Food Consumption. Edited by Galanakis, C. Chania, Greece 426 p.

- Grau, P. 2019. Implementación y avance de los avellanos en Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Chillán, Chile. 87 p. Recuperado en: < http://fruittrade.cl/convencion/assets/grau_sala2.pdf > Consultado el: 25 de junio de 2020.

- Hirzel, J. 2014. Diagnóstico nutricional y principios de fertilización en frutales y vides. Segunda edición. Colección Libros INIA-31. Chillán, Chile. 322 p.

- Hirzel, J., Toloza, S., y Novoa, F. 2016. Evolución a corto plazo de las propiedades químicas en dos suelos de la zona centro sur de Chile fertilizados con diferentes fuentes de calcio. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences*, 32(3): 217-227.

- Hogg, E., Saugier, B., Pontailier, J., Black, T., Chen, W., Hurdle, P., and Wu, A. 2000. Responses of trembling aspen and hazelnut to vapor pressure deficit in a boreal deciduous forest. *Tree Physiology*, 20: 725-734.

- Holstein, N., Tamer, S., and Weigend, M. 2018. The nutty world of hazel names – a critical taxonomic checklist of the genus *Corylus* (Betulaceae). *European Journal of Taxonomy*, 409: 1-45.

- International Nut & Dried Fruits. 2018. Statistical yearbook Reus, España. 76 p. Recuperado en: < https://www.nutfruit.org/files/tech/1553521370_INC_Statistical_Yearbook_2018.pdf > Consultado el: 24 de junio de 2020.

- Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). 2014. Corrección de suelos acidificados mediante enmiendas calcáreas en la Región de la Araucanía.

- Lavín, A., y Reyes, M. 2014. Frutales de nuez: Cinco alternativas no tradicionales para el secano interior del Maule. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Chillán, Chile. 21-24 p.

- Maddela, N, R., Narasimha, G., and Vengatampalli, R. 2017. Page 5 in: *Soil Enzymes: Influence of sugar industry effluents on soil enzyme activities*. First edition. SpringerBriefs in Environmental Science. Wisbaden, Germany. 24 p.

- Marschner, P. 2012. *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. Third Edition. Elsevier. California, USA. 649 p.

- Martin, M, A., Pachepsky, Y., García-Gutiérrez, C., and Reyes, M, E. 2018. On soil textural classifications and soil texture-based estimations. *Solid Earth Discussions*, 9: 159-165.

- Martínez, M., Lacasa, A., y Tello, J. 2010. Ecología de la microbiota fúngica de los invernaderos de pimiento y su interés agronómico. Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino, España. 44 p.

- Mendoza, R. 2012. Efecto de la materia orgánica, arcilla y pH en la CIC de los suelos del sur-oeste del distrito El Mantaro, Jauja. Memoria para optar al título de Ingeniero Agrónomo. Jauja, Perú, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional del Centro del Perú. 59 p.

- Merlet, H., Navarro, A., y Rosales, C. 2016. Manual técnico productivo y económico avellano europeo. Publicación CIREN N° 187. Centro de Información de Recursos Naturales. Santiago, Chile. 58 p. Recuperado en: < <http://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/123456789/26081> > Consultado el: 09 de julio de 2020.

- Molina, E. 2014. Acidez de suelo y uso de enmiendas. Nota técnica #1-2014. Centro de Investigaciones Agronómicas, Facultad de Ciencias Agroalimentarias. Universidad de Costa Rica. Costa Rica. 7 p. Recuperado en: < http://www.cia.ucr.ac.cr/pdf/Nota%20t%C3%A9cnica%201-2014_Acidez%20de%20suelos%20y%20uso%20de%20enmiendas.pdf > Consultado el 10 de julio de 2020.

- Monfort, I., García, L., and Grande, M. 2015. Impact of calcium associated to calcareous amendments on ectomycorrhizae in forest: A review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 15: 217-231.

- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). 2019. La fruticultura en Chile: Tendencias productivas y su expresión territorial, Gobierno de Chile. 2 p.

- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). 2020. Estadísticas de frutales, superficie plantada nacional, regional, número de huertos e infraestructura frutícola. Recuperado en: < <https://www.odepa.gob.cl/estadisticas-del-sector/estadisticas-productivas> > Consultado el: 10 de junio de 2020.

- Otte, M, L., Haarsma, M, S., Broekman, R, A., and Rozema, J. 1992. Relation between heavy metal concentrations in salt marsh plants and soil. *Environmental Pollution*, 82: 13-22.

- Owen, E, J. 1995. Características físico-químicas del suelo y su incidencia en la absorción de nutrimentos con énfasis en el cultivo de la palma de aceite. *Revista Palmas*, 16: 31-39.

- Pérez, A., Galvis, A., Bugarín, R., Hernández, T, M., Vázquez, M, A., y Rodríguez, A. 2017. Capacidad de intercambio catiónico: descripción del método de la tiourea de plata (AgTU +n)*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8: 171-177.

- Peris, M. 2006. Estudio de metales pesados en suelos bajo cultivos hortícolas de la provincia de Castellón. Memoria para optar al grado de Doctora en Biología. Valencia, España, Departamento de CIDE, Universitat de Valencia. 436 p.

- Pinochet, D., Ramírez, F., y Suárez, D. 2005. Evaluación de la calidad agrícola de cuatro enmiendas calcáreas en un suelo ácido derivado de cenizas volcánicas. *Agro Sur*, 39(1): 29-35.

- Sadzawka, A., Carrasco, M., Grez, R., Mora, M., Flores, H., y Neaman, A. 2006. Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile. Revisión 2006. Serie Actas INIA N° 34. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, CRI La Platina, Santiago, Chile. 164 p.

- Secretaría Comunal de Planificación (SECPLAN). 2017. Plan de desarrollo comunal 2017-2020. Ilustre Municipalidad de Retiro. Recuperado en: < <https://www.retiro.cl/ta/bpta/municipal/pladeco%202017-2020/PLADECO.pdf> > Consultado el: 16 de agosto de 2020.

- Sela, G. 2020. Fertilización y riego, teoría y mejores prácticas. Edición 2020. Cropaia. 254 p.

- Sholander, P, F., Hammel, H, T., Bradstreet, E, D., and Hemmingsen, E, A. 1965. Sap pressure in sacular plants. *Science*, 148: 339-346.

- Sierra, C. 1982. La acidez y alcalinidad de los suelos (pH). Boletín Técnico N° 49. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Osorno, Chile.

- Soratto, R., & Crusciol, C. 2013. Effects of superficial liming and silicate application on soil fertility and crop yield under rotation. *Geoderma*, 195-196: 234-242.

- Valerio, J, M., y Molina, E. 2012. Evaluación de una fuente de enmienda líquida en el rendimiento del arroz en un ultisol de la zona norte de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 36(1): 89-96.

- Volosciuc, L., and Josu, V. 2014. Page 433 in: Soils as world heritage. Edited by Dent, D. Springer. Norfolk, United Kingdom. 489 p.