



Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Agronomía -Programa de Magister en Ciencias Agronómicas

**DISPONIBILIDAD DEL AZUFRE DEL SUELO SOBRE LA
ABSORCIÓN DE NITRÓGENO Y LA PRODUCCION DEL CULTIVO
DE BALLICA (*LOLIUM MULTIFLORUM L.*)**

SOIL SULFUR AVAILABILITY OVER THE NITROGEN UPTAKE AND
PRODUCTIVITY OF RYE GRASS (*Lolium multiflorum L.*)

Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias Agronómicas con Mención
en Ciencias del Suelo y Recursos Naturales

ANA MARÍA MARTÍNEZ PÉREZ

CHILLÁN-CHILE

2019

Profesor Guía: Carolin Guillermina Córdova Sáez
Dpto. Suelos y Recursos Naturales, Facultad de Agronomía
Universidad de Concepción.



DISPONIBILIDAD DEL AZUFRE DEL SUELO SOBRE LA
ABSORCIÓN DE NITRÓGENO Y LA PRODUCCION DEL
CULTIVO DE BALLICA (*LOLIUM MULTIFLORUM L.*

Aprobada por:

Carolin Guillermina Córdova Sáez
Ing. Agrónomo, Mg. Cs., Ph.D.

Profesora Guía

Erick Zagal Venegas
Ing. Agrónomo, M.Sc., Ph.D.

Evaluador Interno

Susana Fischer Ganzoni
Ing. Agrónomo, Mg.Sc., Dr.

Evaluadora Interna

Ángela Machuca Herrera
BQ, Mg. Cs., Dr.

Evaluadora Externa

Macarena Gerding González
Ing. Agrónomo, Ph.D.

Directora de Programa



AGRADECIMIENTOS / ACKNOWLEDGMENT

Agradezco a Dios y la Virgen María por guiarme en todo momento.

Al proyecto Fondecyt 11130447 por el apoyo económico.

A Carolin Guillermina Córdova Ph.D, profesora guía de esta investigación, por la orientación y supervisión de la misma, pero sobre todo por la motivación y apoyo profesional y personal brindado durante estos dos años.

A los profesores asesores, Dr. Erick Zagal, Dra. Susana Fischer, y Dra. Ángela Machuca, por su valioso aporte en el desarrollo de este trabajo de tesis.

A los profesores Manuel Zapata y José Cuevas por su aporte en la calibración del equipo utilizado para el riego del cultivo, y al Dr. Mauricio Schoebitz por la ayuda en la medición de biomasa radicular.

Al personal del Laboratorio de servicios de análisis de suelos y al de investigación integrado por Katherine Rebolledo, Sra Gloria Sepúlveda. Gracias a todos por su colaboración en el proceso metodológico de laboratorio. Así mismo a la Sra. Yudith Guillen (Campus los Ángeles).

A la Sra. Claudia Garrido, María Alcivar, Carlos Fuentealba, Iván Urrea, Felipe Noriega y Matías Betancur por ayudar en la recolección de las muestras de suelo y a don Manuel Parra por el traslado del campo hacia los lugares de preparación de muestras e invernaderos.

A la Dra. Inés Figueroa y Dra. Macarena Gerding, por su apoyo incondicional y comprensión como directoras del programa de Magíster.

A Clarita Castro por su cariño y apoyo brindado en todo el período del Magíster.

Al departamento de Ingeniería Agrícola por su colaboración en la obtención del suelo usado en este estudio.

A mi madre, abuela, hermanos y familiares que siempre me apoyaron de forma incondicional y que fue clave para el logro de este objetivo y A sor Nohemí Reta, por su apoyo incondicional en el logro de mis objetivos profesionales y desarrollo personal.

Al Dr. Adolfo Martínez (Director General de la Fundación Hondureña de Investigación Agrícola FHIA, por el apoyo económico y brindarme la licencia laboral para realizar este Programa de Magíster y sobre todo por su confianza depositada en mí.

A mis amigos de Honduras y a los que conocí en Chile, con quienes compartí momentos y experiencias increíbles y enriquecedoras para mi vida personal. De forma especial a Sra Delina Sepúlveda, Claudia Garrido y Yudith Guillen por acogerme en su casa y ayudarme. Al Ing Elec. Manuel Zamorano por su constante apoyo y escucharme en todo momento.

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
Índice de figuras y tablas	Vi
Resumen	Viii
Summary.....	ix
Capítulo 1. Introducción General	1
Hipótesis	6
Objetivo general.....	6
Objetivos específicos	6
Literatura citada.....	7
Capítulo 2. Increasing soil Sulphur availability towards to a sustainable management of nitrogen use.	11
Abstract	12
Introduction	12
Materials and methods	14
Results and discussion.....	16
Conclusion.....	20
Acknowledgements.....	20
References	20
Capítulo 3. Calibración de un sensor de humedad WET-2 en un suelo franco arcilloso disturbado	29
Abstract	30
Resumen	30
Introducción	31
Materiales y métodos	32
Resultados y discusión	33
Agradecimientos	34
Literatura citada	34
Capítulo 4. Conclusiones generales	38

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

		Página
Table 1	Selected chemical soil properties of two cropped soils of restricted nitrogen and sulphur availability	23
Table 2	Equivalent rates of the combined application of sulphur (S) and nitrogen (S) to the soil, to test the effect of S application on plant N recovery in a pot experiment.	23
Table 3	Rates of carbon, nitrogen and sulphur mineralization from two cropped soils of different levels of soil organic matter at different periods within 112 days of soil incubation.	24
Table 4	Soil indicators of nitrogen availability for two cropped soils with different levels of soil organic matter.	24
Table 5	Plant height (<i>Lolium multiflorum</i> L.) evaluated through the cropped season of sixteen weeks under the effect of S (rates of 0 and 30 kg ha ⁻¹) and N (rates of 0 and 100 kg ha ⁻¹) application to the soil in a pot experiment.	25
Tabla 6	Crop yield, N foliage concentration, and root growth parameters after cropping <i>Lolium multiflorum</i> L. in a pot experiment for sixteen weeks under S (rates of 0 and 30 kg ha ⁻¹) and N (rates of 0 and 100 kg ha ⁻¹) application.	26
Tabla 7	Nitrogen recovery efficiency measured in a <i>Lolium multiflorum</i> L. grown in a pot experiment for sixteen weeks under S (rates of 0 and 30 kg ha ⁻¹) and N (rates of 0 and 100 kg ha ⁻¹) application.	26
Tabla 8	Residual soil available nitrogen (N) and sulphur (S) after cropping <i>Lolium multiflorum</i> L. in a pot experiment for sixteen weeks under S and N application	27
Figure 1	Partial (left side, A, C, E) and accumulated (right side, B, D, F) mineralisation of carbon, nitrogen and sulphur from Andisol and Mollisol soils.	28

- Figure 1 . Curvas de calibración de un sensor de humedad WET-2 en suelos Mollisol y Andisol disturbados para un experimento de macetas. ($P \leq 0,05$). 36
- Cuadro 1 . Contenido de agua medido con un sensor WET-2 y con la técnica gravimétrica en un suelo Mollisol y Andisol. 37



DISPONIBILIDAD DEL AZUFRE DEL SUELO SOBRE LA ABSORCIÓN DE NITRÓGENO Y LA PRODUCCIÓN DEL CULTIVO DE BALLICA (*LOLIUM MULTIFLORUM L.*)

SOIL SULFUR AVAILABILITY OVER THE NITROGEN UPTAKE AND PRODUCTIVITY OF RYE GRASS (*Lolium multiflorum L.*)

RESUMEN

El nitrógeno (N) y azufre (S) son elementos esenciales en la producción de cultivos, sin embargo, en las últimas décadas se ha reportado bajos rendimientos que se atribuyen a deficiencias de S en el suelo. El objetivo de este estudio fue determinar el efecto del aumento del suministro de S de un suelo Mollisol sobre la absorción de N, rendimiento y calidad productiva de un cultivo. Para ello, se midió la mineralización de N y S mediante incubación en condiciones controladas durante períodos parciales de 0-7, 7-14, 14-28, 28-56 y 56-112 días en dos suelos Mollisol y Andisol. Se estableció un experimento en macetas en condiciones de invernadero con el suelo Mollisol de bajo contenido de N y S con plantas de ballica anual (*Lolium multiflorum L.*) variedad Winter Star II. En un diseño completamente al azar, con 4 tratamientos (dosis de S y N) y 3 repeticiones (N0S0, N0S30, N100S0, N100S30 kg ha⁻¹). Para programar el riego a manera de satisfacer un criterio del 50% del agua disponible, se calibró un sensor de humedad portátil WET-2. La mineralización de N-NO₃⁻ del Mollisol resultó de 8,47 a 56,58 mg kg⁻¹ en y Andisol de 12,19 a 55,1 mg kg⁻¹. La mineralización de S-SO₄⁻² fue estadísticamente diferente en los primeros 7 y 28 días. Por su parte el rendimiento de materia seca fue de 1,53; 1,66; 4,92 y 6,39 g maceta⁻¹ de los tratamientos N0S0, N0S30, N100S0, N100S30 kg ha⁻¹, respectivamente. Se concluyó que el suministro de N del suelo fue alto después de 14 días de incubación, sin embargo la capacidad de suministro de S fue insuficiente en ambos suelos. La aplicación conjunta de N y S no aumentó la biomasa ni el contenido de proteínas que mide en parte la calidad y la absorción de N, ya que mostró valores similares al tratamiento solo con N.

Palabras clave: Mineralización de N y S; deficiencias de S; sinergismo N y S; calidad productiva.

SUMMARY

Nitrogen (N) and sulfur (S) are essential elements for production of crops, however, in the last decades low yields have been reported that are attributed to S deficiencies in soil. The objective of this study was to determine the effect of increased S supply of a Mollisol soil on the uptake of N, yield and productive quality of a crop. For this, N and S mineralization was measured by incubation under controlled conditions during partial periods of 0-7, 7-14, 14-28, 28-56 and 56-112 days in Mollisol and Andisol soils. An experiment was established in pots under greenhouse conditions with Mollisol soil with low N and S content, with plants of rye grass (*Lolium multiflorum* L.) variety Winter Star II. In a completely randomized design, with four treatments (doses of S and N) and three repetitions (N0S0, N0S30, N100S0, N100S30 kg ha⁻¹). To program the irrigation to satisfy a criterion of 50% of the available water, a WET-2 portable moisture sensor was calibrated. The N-NO₃⁻ mineralization of Mollisol was from 8.47 to 56.58 mg kg⁻¹en and Andisol from 12.19 to 55.1 mg kg⁻¹. The mineralization of S-SO₄⁻² was statistically different in the first 7 and 28 days. The yield of dry matter was 1.53; 1.66; 4.92 and 6.39 g pot⁻¹ of the treatments N0S0, N0S30, N100S0, N100S30 kg ha⁻¹, respectively.

It was concluded that the N supply of the soil was high after 14 days of incubation, however the S supply capacity was insufficient in both soils. The joint application of N and S did not increase the biomass or the protein content that partly measures the quality and the absorption of N, since it showed similar values to the treatment only with N.

Key words: Mineralization of N and S; S deficiencies; synergism N and S; productive quality.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN GENERAL

El nitrógeno (N) y azufre (S) son nutrientes esenciales en los sistemas de producción agrícola, y los cultivos dependiendo de la especie y la edad generalmente contienen de 2,5 a 4,0% de N, y de 0,15 a 0,4% de S, aproximadamente una décima parte del N (Brady y Weil, 2008). Estos nutrientes favorecen la formación y el crecimiento de hojas, tallos y raíces, y son imprescindibles en la etapa reproductiva para la formación y desarrollo de las yemas florales. En efecto, la ausencia de estos elementos en los tejidos foliares produce que las plantas no logren completar su ciclo vital, y con ello se cumple uno de los criterios de esencialidad. Respecto a la función directa de estos elementos en el metabolismo vegetal, concepto también asociado a la esencialidad, es conocido que el N es componente integral de todos los aminoácidos que forman las proteínas, enzimas, ácidos nucleicos, y clorofila molécula responsable de la fotosíntesis, mientras que el S es un constituyente de las proteínas y tiene un papel fundamental en la síntesis de los aminoácidos cisteína y metionina, y además participa en la síntesis de clorofila (Marschner, 1995). La deficiencia de estos nutrientes en los cultivos induce sintomatologías específicas como la marchitez en tejidos nuevos en el caso del S y en tejidos maduros en el caso del N, relacionadas a sus funciones metabólicas, que muestran respuesta a la aplicación del elemento a través de la recuperación de la función metabólica (Eaton, 1951). En condiciones de campo, los cultivos generalmente están expuestos a condiciones de baja fertilidad del suelo, y por lo tanto la disponibilidad de estos nutrientes en el suelo es baja. La aplicación de fertilizantes corrige y/o mejora la disponibilidad de nutrientes para la absorción por los cultivos (Sager, 2012).

Por otro lado, la fertilización de cultivos constituye cerca de un 50-60% de los costos de producción agrícola (Velasco, 2008; Espinoza, 2009), donde el nutriente más limitante suele ser el N, ya que los requerimientos de los cultivos son altos. Respecto al uso de fertilizantes, USDA (2009) indica que la tendencia en la aplicación de fertilizantes nitrogenados en Estados Unidos ha aumentado más rápidamente que otros fertilizantes (fosforados y potásicos), debido al desarrollo de variedades con mayor respuesta de rendimiento. En el escenario actual de producción agrícola, se busca responder a la demanda global creciente por alimentos y aumentar la producción de cultivos, donde las deficiencias de N y otros elementos necesitan ser cubiertas para lograr este objetivo. Una vía rápida para alcanzar esta meta, es la aplicación de fertilizantes minerales (Arshad et al., 2010). En particular, Espinoza (2009) afirma que

Chile es un importador neto de fertilizantes, con aproximadamente 1,1 millones de toneladas, de los cuales la urea (fertilizante nitrogenado) corresponde al mayor volumen de importación e indica que el consumo de los fertilizantes nitrogenados incrementó en un 60,8 % entre los años 2007 y 2008, mientras que el consumo de fertilizantes azufrados disminuyó en un 11,4 % en el mismo período.

Los fertilizantes nitrogenados han sido un factor clave para aumentar la producción de alimentos en países en desarrollo y también en muchos industrializados (Grinsven et al., 2014). Sin embargo, las ganancias, pérdidas y transformaciones de N dentro del sistema suelo/planta afectan la disponibilidad para las plantas. En los sistemas agrícolas, el mineral-N esta propenso principalmente a pérdidas por volatilización del amoníaco; desnitrificación (transformaciones en formas gaseosas) y lixiviación (eliminación en agua de drenaje) (Cameron et al., 2013). Esta última pérdida se puede disminuir dividiendo los campos en áreas que responden de manera más uniforme de acuerdo a las características del suelo y el paisaje, y de esta forma se tendrá un mejor uso de fertilizantes nitrogenados (Jaynes et al., 2011), también el riego parcial de la zona de raíces se ha convertido en una de las formas más prometedoras de riego definitivo que alternada con aplicaciones de N aumenta el rendimiento, disminuyen las pérdidas de N y aumenta la eficiencia de su uso (Han et al., 2016). Otra técnica usada para mejorar la eficiencia de uso de nitrógeno es la urea de liberación controlada (Zheng et al., 2016), y también la aplicación en conjunto de N con S, que por sus similitudes a nivel de suelo y cultivo genera una mejor absorción de N por los cultivos (Aguilera et al., 2002).

Respecto a las formas minerales del N y S en el suelo se sabe que son parte de la materia orgánica (MO), ya que usualmente alrededor de un 90-95% se encuentra en formas orgánicas (Brady y Weil, 2008). El hecho de que ambos nutrientes minerales esenciales para el crecimiento de los cultivos están contenidos en la MO, les confiere una función fundamental para la mantención de la sustentabilidad de un agro-ecosistema, y muchas de las técnicas agronómicas aplicadas al suelo influyen directamente sobre el contenido y la dinámica de los componentes de esta MO (Córdova et al., 2014). El componente mayoritario en la MO es el carbono orgánico (CO), el cual es esencial para la actividad biológica del suelo como recurso energético, por lo que está vinculado con la cantidad y disponibilidad de nutrientes del suelo (Martínez et al., 2008). En ausencia de fertilización la mineralización de compuestos orgánicos a formas inorgánicas constituye la principal fuente de suministro a la solución del suelo para ser asimilado por las plantas (Eriksen, 2009). Es así, que toma importancia conocer el aporte natural del suelo de los nutrientes N y S para ajustar los programas de fertilización y

evitar contaminaciones ambientales. También es necesario conocer y entender lo que ocurre con estos elementos en el suelo partiendo de que las formas minerales o inorgánicas del N, absorbibles por las raíces de plantas cultivables, amonio (NH_4^+) y nitrato (NO_3^-), que una vez absorbidos se reducen a formas orgánicas como las proteínas, aminoácidos y ácidos nucleicos como parte del metabolismo vegetal (Boudsocq et al., 2012).

La disminución de este pool soluble a niveles bajos de acuerdo al requerimiento particular de cada cultivo provoca una deficiencia de N. La forma N-NH_4^+ puede sufrir posibles pérdidas debido a la erosión y escorrentía superficial, a la inmovilización llevada a cabo por microorganismos del suelo, la oxidación anaeróbica, la volatilización después de transformarse en amoníaco gaseoso (NH_3); nitrificación por la oxidación microbiana de NH_4^+ a NO_2^- y posteriormente a NO_3^- , y por la fijación mineral en la matriz del suelo, donde el NH_4^+ es retenido por las cargas negativas de las partículas coloidales del suelo (arcillas y humus) (Brady y Weil, 2008).

Por su parte el S del suelo se encuentra en forma orgánica e inorgánica, y desde el punto de vista nutricional de la planta, la forma inorgánica es la más importante, ya que es la que absorben las raíces. Sin embargo, el SO_4^{2-} que es la forma estable de S inorgánico en los suelos aeróbicos, constituye sólo una pequeña parte del S total en los suelos y las plantas no pueden asimilarlo como tal, por lo que a través del proceso de reducción asimiladora del SO_4^{2-} absorbido del suelo, es transportado en las plantas, donde posteriormente es metabolizado al aminoácido cisteína a partir del cual se forma otro importante aminoácido la metionina, proteínas y glutatión (Buchner et al., 2004; Stevenson y Cole 1996). Las formas orgánicas de S comprenden los compuestos unidos al carbono (sulfitos, disulfuros y tioles), y las formas en ésteres sulfatos (enlaces con el oxígeno) (Brady y Weil, 2008), las cuales son mineralizadas por los organismos del suelo y la velocidad a la que ocurre depende de los factores ambientales como humedad, aireación, temperatura y pH (Eriksen, 2009). La mineralización del S tiene la particularidad respecto al N, que puede ser biológica cuando la descomposición de la materia orgánica es realizada por la biomasa microbiana, y bioquímica cuando es realizada por enzimas como la arilsulfatasa que cataliza la hidrólisis de ésteres de sulfatos orgánicos y los mineraliza a SO_4^{2-} (Eriksen, 2009; Tabatabai y Bremner, 1970).

El S a pesar de ser considerado un macronutriente, generalmente no está incluido en los planes de fertilización, dado que en el pasado las deficiencias de este nutriente no habían sido observadas. Sin embargo, mundialmente, en las últimas dos décadas con frecuencia se ha reportado deficiencia de este nutriente (Eriksen, 2010), lo que reduce los rendimientos y afecta la calidad de los productos cosechados (Scherer, 2009; Eriksen, 2009; Arshad et al.,

2010). Las principales causas de disminución de S en el suelo son, (i) el control ambiental de las emisiones de dióxido de azufre en las áreas industriales, (ii) el uso creciente de fertilizantes con bajo contenido de azufre, (iii) el aumento de los rendimientos obtenidos como resultado de otros avances tecnológicos, (iv) el uso decreciente de plaguicidas y fungicidas que contienen S (Eriksen, 2010). En suelos del sur de Chile el S es frecuentemente deficitario mostrando niveles bajos a muy bajos ($\leq 12 \text{ mg S kg}^{-1}$), debido a que no se aplican fertilizantes azufrados y se siembran cultivos forrajeros, de mayor potencial de rendimiento (Alfaro et al., 2006). Además, estudios realizados por Córdova et al. (2017) muestran bajos contenidos de S disponible en algunos suelos del sur de Chile con niveles de $0,06 \text{ mg kg}^{-1}$ en el seco, región centro-sur y $7,16 \text{ mg kg}^{-1}$ en valle Simpson, zona intermedia de la región Patagonia Occidental y moderadamente bajos en la pre-cordillera de Los Andes de $15,12 \text{ mg kg}^{-1}$. En consecuencia, la baja disponibilidad de S disminuye el rendimiento de los cultivos, reduce la absorción de N, influye en la calidad de la producción (proteínas y ácidos grasos) teniendo así, un rol fundamental en la salud humana.

El S tiene un rol protagónico en la producción de cultivos y alimentos (Eriksen, 2009), ya que es un constituyente de los aminoácidos cisteína y metionina (Jezierny et al., 2010), que son esenciales en la alimentación humana por lo que su contenido mejora la calidad nutricional de los cultivos. La baja disponibilidad de S que conduce a una sub-absorción del elemento por el cultivo, limitaría la producción de proteína debido a la escasez de los aminoácidos-azufrados. También tiene un papel fundamental en la síntesis de la coenzima A que tiene participación en la producción de ácidos grasos, forma parte de las vitaminas biotina, tiamina, y también del glutatión, este último necesario en las plantas para defensa contra plagas y enfermedades. Además el S participa en la síntesis de clorofila por lo que es un elemento clave en la fotosíntesis. También forma parte del grupos prostético ferredoxina (Marschner, 1995).

Varios estudios en cultivos de oleaginosas, leguminosas y cereales han encontrado interacciones sinérgicas entre el N y S. En los cultivos se mide generalmente en términos de respuesta de crecimiento y cambio en la concentración de nutrientes. Al agregar dos nutrientes, se produce mayor rendimiento del cultivo que cuando se agrega solo uno (Fageria, 2006). Debido a ello, la disponibilidad de estos elementos en el suelo puede influir significativamente en el resultado final de un sistema de producción agrícola, ya que muestran fuertes interacciones en sus efectos nutricionales sobre el crecimiento y calidad de los cultivos porque ambos nutrientes forman parte de aminoácidos y proteínas (Arshad et al., 2010). En tanto, que Salvagiotti et al. (2009) encontraron un aumento en la absorción de N con la adición de azufre como respuesta a la aplicación combinada de S (30 kg ha^{-1}) y N (100 kg ha^{-1})

¹), lo que reveló una sinergia entre ambos nutrientes. Esta interacción también se observó en la biomasa y el rendimiento de grano en el cultivo de trigo. La naturaleza de esta interacción reside en la similitud de comportamiento de estos nutrientes en suelo y en la planta a través de la cantidad de procesos fisiológicos comunes en los que intervienen (Aguilera et al, 2002). Otro aspecto importante de similitud del N y S son las formas aniónicas (NO_3^- y SO_4^{2-}) de ambos elementos que son móviles y están sujetas a pérdidas por lixiviación en suelos de climas con intensas precipitaciones (Aguilera et al., 2002).

Respecto al papel que desempeñan el N y S en la síntesis de proteínas estos nutrientes están estrechamente relacionados, ya que la baja disponibilidad de S limita la eficiencia de absorción de N, por lo cual, es necesaria la adición de S para lograr la máxima eficiencia del fertilizante nitrogenado aplicado (Fazili et al., 2008). La relación N/S como respuesta al suministro de S y para lograr un desarrollo normal de los cultivos es de aproximadamente 15:1 a 17:1 en la mayoría de las plantas (Till, 2010; Fazili et al., 2008).

Además del estudio de la interacción de N y S en esta investigación, entre los varios métodos aplicados, se desarrolló la calibración de un sensor de humedad para mantener el contenido de agua ideal en uno de los experimentos realizados utilizando macetas de cultivo. El suministro de riego oportuno con la cantidad deseable se realiza mediante la programación del riego (Kumar et al., 2017). Para ello, se necesita conocer el contenido de humedad del suelo, el cual se puede medir mediante técnicas indirectas como el sensor de humedad WET-2, que requiere de calibración con la técnica gravimétrica estándar. Dado que el principio de medición de esta técnica se basa en los cambios de la constante dieléctrica en el suelo y, la precisión depende de las propiedades físicas, mecánicas y químicas del mismo (Mohsen et al., 2018). Por ello, su uso está sujeto a la calibración para las condiciones particulares de cada sitio, y se presenta un manuscrito enviado a publicación describiendo los resultados de la calibración del sensor WET-2 utilizado en esta investigación.

HIPÓTESIS

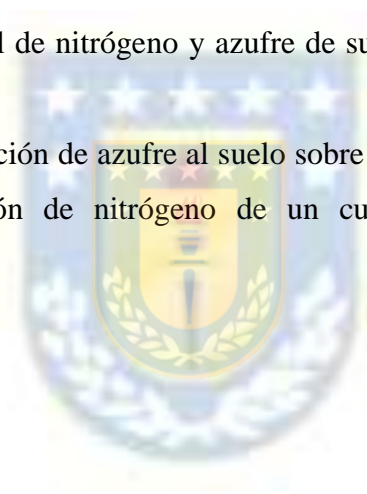
La absorción del N por el cultivo de ballica se incrementa con una disponibilidad adecuada de S. La productividad de sitio en suelos de baja capacidad de suministro de N y S, se beneficia de las aplicaciones al suelo, aumentando el rendimiento, calidad productiva y la eficiencia de absorción de N de los cultivos.

OBJETIVO GENERAL

Determinar el efecto del aumento del suministro de azufre de un suelo Mollisol sobre la absorción de N, rendimiento y calidad productiva de un cultivo de ballica.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1- Estudiar el suministro natural de nitrógeno y azufre de suelos con contenido suficiente de materia orgánica.
- 2- Evaluar el efecto de la aplicación de azufre al suelo sobre el mejoramiento del rendimiento productivo, calidad y absorción de nitrógeno de un cultivo de ballica anual (*Lolium multiflorum* L.).



LITERATURA CITADA

Aguilera, M., Mora, M.L., Borie, G., Periano, P., Zunino, H. 2002. Balance and distribution of sulphur in volcanic ash-derived soils in Chile, *Soil Biology & Biochemistry*. 43, 1355-136.

Alfaro, M., Bernier, R., Iraira, S. 2006. Efecto de fuentes de azufre sobre el rendimiento y calidad de trigo y pradera en dos Andisoles. *Agricultura Técnica*. 66, 283-294.

Arshad, J., Moom, S., Zainul, M. 2010. Sulphur a general overview and interaction with nitrogen. *Australian Journal of Crop Science*. 4 (7), 523-529.

Boudsocq, S., Niboyet, A., Lata, J.C., Raynaud, X., Loeuille, N., Mathieu, J., Blouin, M., Barot, S. 2012. Plant preference for ammonium versus nitrate: A neglected determinant of ecosystem functioning? *The American Naturalist*. 180, 60-69.

Brady, N., Weil, R. 2008. The nature and properties on soil. Roles of sulphur in plants and animals. (14a Ed.). Pearson Prentice Hall. Columbus, Ohio. pp 578.

Bushner, P., Stuver, C.E., Esterman, S., Wirtz, M., Hell, R., Hawkesford, M.J., Kok, L. J. 2004. Regulation of sulfate uptake and expression of sulfate transporter genes in *Brassica oleracea* as affected by atmospheric H₂S and pedospheric sulfate nutrition. *Plant Physiology*. 136, 3396-3408

Cameron, K.C., Di, H.J., Moir, J.L. 2013. Nitrogen losses from the soil/plant system: a review. *Annals of Applied Biology*. 162, 145-173.

Córdova, C., Zagal, E., Hepp, C., Barattini, B. 2014. Aspectos de la materia orgánica en suelos volcánicos del valle simpson y su impacto en la transformación del azufre y del nitrógeno. pp 11-133. En: Hepp, C., Stolpe, N. (Eds.), *Caracterización y propiedades de los suelos de la Patagonia occidental (Aysén)*. Instituto de investigaciones agropecuarias. Boletín INIA-No 298. Coyhaique, Chile

Córdova, C., Hepp, C., Luna, G., Sepúlveda, G., Baratinni, P., Zagal, E., Bonilla, A., Parra, F. 2017. An alternative method to measure available sulphur by ion chromatography in volcanic soils. *Chilean Journal of Agricultural and Animal Science, ex Agro-Ciencia*, 33, 117-123.

Eaton, S.V. 1951. Effects of sulfur deficiency on growth and metabolism of tomato. *Botanical Gazette*. 112 (3), 300-307.

Eriksen, J. 2009. Soil sulfur cycling in temperate agricultural system. In: Donald L. Sparks, Editor(s). *Advances in Agronomy*, Academic Press, USA. 102, 55-89.

Eriksen, J. 2010. Sulphur cycling in agroecosystems. Dr. Scient. Thesis, Aarhus University, Faculty of Agricultural Sciences, Denmark.

Espinoza, J. 2009. Fertilizantes en Chile: Coyuntura y perspectivas. *Mercados agropecuarios*. N° 205. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA), Santiago, Chile.

Fageria, V.D. 2006. Nutrient interactions in crop plants. *Journal of Plant Nutrition*. 24 (8), 1269-1290.

Fazili, I.S., Jamal, A., Ahmad, S., Masoodi, M., Khan, J.S., Abdin, M.Z., 2008. Interactive effect of sulphur and nitrogen on nitrogen accumulation and harvest in oilseed crops differing in nitrogen assimilation potential. *Journal of Plant Nutrition*. 31, 1203-1220.

Grinsven, H., Spiertz, J., Westhoek, H., Bouwan, A. 2014. Nitrogen use and food production in European regions from a global perspective. *Journal and Agricultural Science*. 152, 9-19.

Han, K., Han, X., Curtis, D., Kleinman, P., Wang, D., Wang, L. 2016. Impact of irrigation, nitrogen fertilization, and spatial management on maize. *Agronomy, Soils and Environmental Quality*. 108, 1794-1804

Jaynes, D., Kaspar, T., Colvin, T. 2011. Economically optimal nitrogen rates of corn: management zones delineated from soil and terrain. *Agronomy Journal*. 103, 1026-1035.

Jezierny, D., Mosenthin, R., Bauer, E. 2010. The use of grain legumes as a protein source in pig nutrition: A review. *Animal Feed Science and Technology*. 157, 111-128.

Kumar, R., Singh, P., Upadhyay, A. 2017. Irrigation Scheduling. In: Kumar, R., Singh, P., Upadhyay, A (Eds.), Planning and evaluation of irrigation projects. Academic Press, pp 385-412.

Marschner, H. 1995. Functions of mineral nutrients; macronutrients. pp: 229-312. Mineral Nutrition of Higher Plants. (2^a. Ed.). Academic Press. Germany.

Martínez, E., Fuentes, J.P., Acevedo, E. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal. 8 (3), 10-29.

Mohsen, A., Mohamed, O., Paleologos, E.K., 2018. Dielectric permittivity and moisture content. In J., Hayton (ed.), Fundamentals of geoenvironmental engineering. Elsevier Inc., Cambridge, United States, pp. 581-637

Sager, M. 2012. Levels of sulfur as an essential nutrient element in the soil crop food system in Austria. Agriculture. 2, 1-11.

Salvagiotti, F., Castellarín, J.M., Mirayes, D.J., Pedrol, H.M. 2009. Sulfur fertilization improves nitrogen use efficiency in wheat by increasing nitrogen uptake. Field Crops Research. 113, 170–177.

Scherer, H. 2009. Sulphur in soil. Plant Nutrition and Soil Science, 172: 326–335.

Stevenson, F.J., Cole, M.A. 1996. Cycles of soil (2a. Ed.). John Wiley and Son, Inc. New York. pp. 427.

Till, A.R. 2010. Sulphur and sustainable agriculture. International Fertilizer Industry Association. Paris, France. pp 74.

Tabatabai, M. A., Bremner, J. M. 1970. Arylsulfatase activity of soils. Soil Science Society of American Journal, 34:225-229.

United States Department of Agriculture (USDA). 2009. Fertilizer Use and Markets. [en línea]. Economic Research Service. <<https://www.ers.usda.gov/topics/farm-practices-management/chemical-inputs/fertilizer-use-markets>>. [Consulta: 04 abril 2017].

Velasco, R. 2008. Análisis económico de la producción de canola, lupino y arveja. pp:144-166. En: Urbina, J. (Ed.). Producción de canola, lupino y arveja en la precordillera del Bío-bío y el secano costero de la provincia de Arauco. Instituto de investigación Agropecuaria. Boletín INIA-N° 188. Quilamapu. Chillán.

Zheng, W., Zhang, M., Liu, Z., Zhou, H., Lu, H., Zhang, W., Yan, Y., Li, C., Chen, B. 2016. Combining controlled-release urea and normal urea to improve the nitrogen use efficiency and yield under wheat-maize double cropping system. *Field Crops Research*. 197, 52-62.



CAPÍTULO 2

INCREASING SOIL SULPHUR AVAILABILITY TOWARDS TO A SUSTAINABLE MANAGEMENT OF NITROGEN USE

C. Córdova^{1*}, A.M. Martínez¹, E. Zagal¹, S. Fischer², A. Machuca³

¹Department of Soils and Natural Resources. Faculty of Agronomy. University of Concepción. Chillán, Chile.

²Department of Plant Science. Faculty of Agronomy. University of Concepción. Chillán, Chile.

³Department of Science and Technology. School of Science and Technology. University of Concepción. Los Ángeles. Chile.

**email: cacordov@udec.cl*



This paper has been sent to the journal: Eurasian Soil Science

Abstract

Nitrogen (N) supply is usually limited in the soil, but soil sulphur (S) deficiencies have been also detected lately, affecting crop production and N uptake. The objective of this study was to assess the crop recovery efficiency of N due to a S application. Two soils with high levels of organic matter were studied, Andisol and Mollisol soils, and N and S mineralization, potentially available N, and urease activity, were measured in order to determine their potential to supply N and S. Differences ($P \leq 0.05$) between soils in microbiological parameters were not found, but soil mineralization kinetic in Andisol showed a small increase over time. Mollisol soil was used to carry out a pot assay applying a rate of 30 kg S ha⁻¹ over a control treatment and an application of 100 kg N ha⁻¹. Biomass dry matter and N concentration was measured after sixteen weeks, and the recovery N efficiency was calculated. An increment of 26 % was registered in the recovery of N from the S application, but this was not significantly different from the control treatment ($P \leq 0.05$). A higher rate of N than the one applied here might show the effect of S, as large residual soil S evidenced a low S plant uptake.

Keywords: *nitrogen recovery efficiency, sulphur mineralisation, nitrogen mineralisation*

INTRODUCTION

Soil sulphur (S) is an essential nutrient for crop growth because it is part of essential amino acids, important not only for plant development [1] but also for animal nutrition [2]. Furthermore, S plays a significant role in plant nutrition through the synthesis of: coenzyme A, biotin, thiamine, and glutathione, chlorophyll, and secondary sulphur compounds, as well as N fixation in leguminous crops [3]. Therefore, crop production benefit from an adequate S supply, which can also improve plant nitrogen (N) metabolism [4] because S catalyses the chlorophyll molecule production, allowing efficiency in photosynthesis process. An adequate plant S nutritional status not only may improve the crop yield [5], but also can increase some quality aspects of the production, such as protein and amino acid contents[4], hordeins composition [6], and gluten content [7], all these globally appreciated under the currently food security scenario [8].

Deficiencies of soil S have been reported in the last decades [9] due to the reduction of S-atmospheric emissions (SO₂), fertilisers have been manufactured using less -or none S units to gain concentration in specific nutrients, and the introduction of improved crop varieties, with

larger requirement of nutrients. As a reference: to achieve a reasonable yield (75-100 qqm ha⁻¹) S-uptake must be around 15 to 25 kg ha⁻¹ [10]. Thus, soil S was reported as a restrictive factor for crop production in many countries in Europe [11] and despite the lack of information regarding crop production in the last years, recent research [12] has highlighted the importance of S in crop nutrition by improving varieties less S demanding. In particular, S fertility in Chile has not been widely investigated, but from early reports Schenkel et al. (1973) [13] informing S as the second more available element in local volcanic soils, to Alfaro et al. (2006) [2006] reporting soil S deficiencies, seems plausible to conclude that in a period of 30 years S has become deficient in volcanic soils of the South of Chile.

Besides the importance of S in crop development, this element can also influence the N uptake due to the essentially of both elements in the protein synthesis [15, 16, 17]. For example, established relationship between N and S as protein content are N/S=40 in cereals and N/S=30 in legumes, therefore crop production benefit from the effect of sulphur, which is usually also linked to nitrogen N [4]. Therefore, an adequate supply of available S in the soil might benefit the N use by the crop. Cycles of S and N in the soil have common characteristics, such as the larger proportion of organic over mineral forms in the soil (around 95% of total S and N is contained in the organic matter), and within these, the anionic available chemical form as sulphate (S) and nitrate (N) [3, 18]. Thus, the natural supply of these nutrients depends on the mineralisation of the soil organic matter, which is particularly relevant for the S supply due to soil deficiency. However, most farmers are not aware of the benefit of S application to the soil to improve crop yield and N use efficiency.

Soils of large organic matter content are desirable for crop production due to their high chemical and physical fertility, such as Andisol and Mollisol soils. However, this does not guaranteed enough supply of plant nutrients from the organic matter through the mineralisation process, and the application of fertilisers is usually needed to match crop requirements. As in the current global scenario, efficiency of N application in the agroecosystems is required due to plant nutrition and environmental concerns; the fundamental of this research recalls the influence of S over N plant metabolism as a way to improve the efficiency of the applied N. Specifically, the objective of this research was to assess the effect of an improved availability of soil S on crop N uptake. This was tested calculating the efficiency of N recovery using a short term growth crop over a soil of low S supply.

MATERIALS AND METHODS

1. Experimental site, soil sampling and conditioning.

The soils under study were located at the experimental research station of the Universidad de Concepción in Chile (36°35'44''S, 72°04'36.25''W). The site has been previously described by Sanchez-Hernandez et al. (2017) [19]. Two soils were sampled, an Andisol and a Mollisol soil (Table 1), at 0-20 cm depth, the arable layer. The Andisol soil was under crop rotation consisting of wheat-maize, whilst over the Mollisol soil an alfalfa pasture was established in the last four years.

The field areas were divided in small plots of 30 m by 30 m using google earth satellite images, and three plots were randomly sampled (n=3). Soil samples were composited within the plots, transported to the lab and sieved at 10 mm for a pot assay and at 2 mm for microbiological soil analyses. The samples were adjusted to 60% of water filled pore saturation (WFPS), using soil bulk and real density data and gravimetric water content. Then, they were storage at 4°C until analysis.

Soil microbiological measurements were first tested in order to contrast the capacity of N and S supply from the soils, and then an N and S application assay was carried out.

2. Microbiological soil indicators.

Soil mineralisation. Carbon (C) and N mineralisation was measured by soil incubation in an enclosed system [20], whilst for S mineralisation an open incubation system was used [21]. Soils were incubated at 22°C for 112 days, but partial evaluations were done at 3, 7, 14, 28, and 56 days, respectively. Field replicates were worked in triplicated in the lab, and a control treatment was used for all measured parameters.

The mineralisation of soil C was measured as CO₂-C produced by microbial respiration, using 25g of soil incubated with a tramp of 10 ml of NaOH (0.01 M), which was replaced at each evaluation period. The excess of NaOH was titrated with a HCl solution (0.1 N) using an autotitrator equipment [22].

Soil N mineralisation was assessed by measuring the NH₄⁺-N content from 7 g of soil extracted with KCl (1 M) at ratio of 1:5 soil: solution and shaken for 1 hour, at each stage of the temporal evaluation. Colourimetric analysis was done after addition of 3 ml NaOH (3 M) and 2 ml of Nessler reactive, by spectrophotometry (490 nm wave-length). Linear regression for calibration was done using 0, 1, 2, 3, 5, and 10 mg l⁻¹ NH₄⁺-N.

The S mineralisation was quantified in a 150 ml CaCl_2 solution (10 mM) applied to a open system, consisting of a Büchner funnel containing 30 g of soil [21]. The sulphate concentration was measured through ion chromatography using 1 ml of the extracting solution.

Potentially available nitrogen. This indicator of the seasonal provision of soil available N for crop growth was determined by measuring the difference between the initial soil ammonium content, and that measured at the end of 7 days soil incubation at 40°C under anaerobic conditions. The soil ammonium content was extracted on 5 g of dry soil and 25 ml KCl (2 M), followed by colorimetric analysis and spectrophotometry, as described above.

Urease activity. A solution of 4 ml of phosphate buffer solution, and urea (6.4%) were added to fresh samples of 1 g of soil, to be shaken and then the system was incubated for 2 hours at 37°C using a temperature controlled water bath. After cooling down, 5 ml of KCl (2 M) solution was added and from the filtered extract 2 ml were combined with EDTA reactive, 2 ml of phenol-nitroprusside, 4 ml of hypochlorite buffer and deionised water up to complete 25 ml. This was incubated at 40°C for 30 minutes, and then the absorbance at 636 nm wavelengths was determined by spectrophotometry, and $\text{NH}_3\text{-N}$ concentration was obtained from calibration using standard solutions of 0, 25, 50, 100 and 150 $\mu\text{g NH}_3\text{-N}$

3. Crop growth assay.

Mollisol soil was selected to establish a pot experiment and measure the effect of S application on plant N recovery. Two levels of N application combined with a rate of S equivalent to 30 kg ha^{-1} were allocated in pots containing 1 kg of soil (Table 1), and applied as NH_4NO_3 , K_2SO_4 , and KCl. Each pot was sown with 1 g of *Lolium multiflorum* L. The soil moisture was kept at 50% of the total water availability, monitored using a calibrated moisture sensor, and weeds were manually removed every week.

The total number of experimental units were $n=36$ (4 treatments, three field replicates, three greenhouse replicates), arranged in a random design. They were kept in a greenhouse for 16 weeks.

Soil available N. The soil nitrate was measured at the beginning and at the end of the crop growth period. Nitrate content was determined by soil extraction using deionised water in a ratio of 1:4 soil:solution, shaken, and the concentration was obtained by ion chromatography.

Soil available S. As soil available N, the available soil sulphate was also measured two times. A solution of $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ (0.01 M) was applied to a dry soil sample, and the mixture was

shaken for 30 minutes. After filtration, an aliquot of 1 ml was used to measure the sulphate concentration by ion chromatography.

Crop growth. The crop height (cm) was weekly registered.

Crop yield. The biomass produced by the crop was harvested at the end of the growth period, and foliage was separated from roots, cleaned and kept in disposable bags. The bags were introduced in an oven at 65°C to register the weight (mg) after 24 hours (constant weight).

Foliage total N. After weighting the foliage dry matter, the samples were milled and sieved at 1 mm to determine over a sample of 0.5 g the N concentration [23]. A composite solution using sulphuric acid, salicylic acid, and hydrogen peroxide, was added to the foliage dry matter and was left over night. Each sample was heat up until digestion, and afterwards the NH_4^+ -N was determined by distillation and titration.

Protein content

It was calculated by means of the standard conversion factor 6.25 from the total N in the tissues.

Nitrogen efficiency recovery. This was calculated as the ratio between the difference of fertilised pots (N100S0, N100S30) and controls (N0S0, N0S30), and the plant available N estimated from initial nitrate content and the applied N.

4. Data analysis. The soil and crop variables from the experimental random design applied were analysed using the F test ($P \leq 0.05$), after tested for normality and homogeneity of variances. The statistical differences between treatments were assessed applied the Tukey test. When data did not show a normal distribution (besides transformations), the Kruskal-Wallis non-parametric analysis was applied instead. The data was analysed using SAS Windows v8 package.

RESULTS AND DISCUSSION

Soil S and N supply

Andisol and Mollisol soils were contrasted in their chemical properties and the capacity to provide N and S to the soil solution. Soil pH was identical for both soils, but Andisol showed better fertility as the level of organic matter was larger, as well as N and S availability (Table 1). However, these initial values of soil S and N are low, and therefore they seemed to respond to the application of S and N.

The analysis of the mineralisation process allows finding the potential of soils to supply these nutrients. In general, the C mineralised from Andisol and Mollisol did not showed difference ($P \leq 0.05$) up to 56 days of soil incubation, but the Andisol registered a larger value ($P \leq 0.05$) at the end of the evaluation period (112 days) (Figure 1). The C mineralization reached a maximum rate between 14 to 28 days of incubation ($P \leq 0.05$), whilst the Andisol soil did not showed significant differences ($P \leq 0.05$) between its C mineralization temporal rates (Table 3). This might be explained by the larger organic matter content in the Andisol soil (Table 3). The trend of C mineralisation was better matched by the mineralisation of N in Andisol than in Mollisol soil, since the latter showed a quadratic trend instead of the linear one obtained by the Andisol soil (Figure 1), which would represent a more active mineralisation process in the Andisol soil, contrasted with the Mollisol soil where the process reaches a peak and then a depleted activity is observed around day 56th. Nevertheless, for both soils the N mineralisation rate was temporally more dynamic compared to C mineralization, showing the more active period of microbial activity within the first two weeks (Table 3).

The soil S mineralization showed larger release of sulphate at the beginning of the experiment (first 7 days), that then decreased over the observed period (Figure 1). Partial differences in S mineralisation were statistically significant ($P \leq 0.05$) between incubation periods and consequently, the accumulated S mineralised over time showed a consistent difference between soils, where the Andisol soil showed larger potential to release S than the Mollisol soil ($P \leq 0.05$) (Figure 1). The temporal rate of soil S mineralisation showed marked progressive decline during the incubation period (Table 3). In particular, the rate of S mineralisation dropped consistently after 14 days of soil incubation. The pattern of S mineralisation was coincident with that of N mineralisation from the Mollisol soil.

Additionally, the specific parameters regarding the N organic release, such as the activity of urease and the potentially available N (PAN) did not showed statistical difference ($P \leq 0.05$) between Andisol and Mollisol soils (Table 4). The urease activity was greater than another Andisol soil [19] in the same site, possibly due to the historical fertiliser application contrasted with the organic management. In turn, the PAN values registered in this study were within the ranges informed for other soils [24].

Under the light of the results, the soils in this study have not shown statistical differences ($P \leq 0.05$) on the microbiological parameters analysed, but in S mineralisation. Therefore, the Mollisol soil was used to carry out the assay testing the influence of S application on N crop use, because the greater potential that the S deficiency can show a better response to S and consequently N application.

As such, the available N and S in the soil were low (Table 1) reflecting the soil capacity to provide these nutrients through the mineralisation process, and so additional inputs are applied to improve the presence of these nutrients in the soil solution for plant uptake.

Effect of S application on crop development

The crop height over time was measured as a growth index to assess the response of N and S application (Table 5). The combined application of N and S showed the better growth response ($P \leq 0.05$) than a single application of S or N, particularly when the crop was more developed, after day-80, as during the first month the differences between treatments were less evident. Visually, the crop height registered per pot showed correspondence with the intensity of the green colour in the leaves. This would support the hypothesis of the role of S improving photosynthesis in the presence of N. Nevertheless, the results also showed that after an initial growth, the exclusive application of S can improve the crop height, as there is no significant difference observed with N100S0 treatment. However, this pattern was not replicated by the biomass production, as only the application of N showed a significant effect over the dry matter yield ($P \leq 0.05$) (Table 6). This is, the dry matter increment from the control treatment to N100 was 69%, and 5% over from the control treatment with 30 kg S ha⁻¹ to the combined N and S application treatment (Table 6). In turn, the application of S did not show statistical significance ($P \leq 0.05$) when contrasting comparison is made within no N application, and within N100 application, although the registered increments in dry matter production were 8 and 23%, under N restriction and N100 application, respectively (Table 6). The dry matter from the root system evaluated at the end of the assay showed the same trend as the foliage dry matter (Table 6), and it seems that the combination of N and S induced a larger volume of plant roots, but shorter than the control treatment and single nutrient application-treatments (Table 6).

The values of the total N content in the foliage ranged from 1.39% to 2.63%, and as well as the dry matter production, showed only the effect of the N application (Table 6). Thus, contrary to the stated working hypothesis, the rate of 30 kg ha⁻¹ of S did not improve the quality of the crop under the circumstances of this study. However essential amino acids containing S, like methionine and cysteine were not measured here, where S is part of their structure, particularly in the thiol group which is crucial to act at all levels of biochemical systems [25]. Plants are exclusively the only organisms that can take up inorganic S (as sulphate) and reduce it to this thiol group and then into the essential amino acids, therefore human beings are depending on the vegetal consumption in order to incorporate these

essential amino acids into the diet. The measurement of these amino acids might have indicated whether S was taken up by the crop and improved the quality of the production.

The results indicate that the applied N to increase the soluble available N for plant uptake had a greater impact on crop biomass yield, than the S application, perhaps due to the very low initial N availability. The experiment might have benefited from the inclusion of a larger N application rate than the N100 utilised. We acknowledge the low number of treatments combining N and S dose used here in this first approach, but this would have implied a larger experimental assay, more difficult to manage. The treatments selected for this study were thought as an initial research start, using N and S rates that could represent an economy alternative for crop fertilisation, based on recommendation provided by a study in 1997 [10]. However, the suggested rates of S application might have to be revised due to the higher nutrient requirements from improved current crop varieties. Therefore, further research is recommended to be carried out including more rates of N and S, the application of isotope techniques, and the measurement of the foliage area index (missed data in this study), which would explain the lack of consistency between height growth and crop yield production,

Effect of S application on N recovery efficiency

The N content in the produced biomass was used to calculate the recovery efficiency of N at the end of the study period related to the available and added N in the soil (Table 7). Besides the increase of over 25% in the N recovery due to the S application, the values between treatments showed no statistical difference ($P \leq 0.05$). This increase seems to follow that of the dry matter increment from the S rate application of 30 kg ha^{-1} at the N fertilised pots, as the N concentration was almost the same between N100S0 and N100S30 treatments (Table 7). Therefore, an improving in N uptake was not observed from the S application at the rates used here. However, it has been pointed out that the synergy between S and N works better when the soil available N is high [17], and perhaps the N rate applied in this study was under the dose required by the crop and so the S applied did not fill the expected function. This can be supported by the increased residual soil available S, around three times the initial S status (Table 8), whilst residual N was almost twice the initial soil available N. As pointed out above, the analysis of essential S-containing amino acids in the produced biomass could provide a probe of the S fate within the soil-plant system.

CONCLUSION

The studied andisol and mollisol soils showed large organic matter contents, but the N and S availability, as well as their capacity to supply mineral N and S to the soil solution was low. The natural supply from the Mollisol through N and S mineralization was lower than the Andisol. The response to a medium dose of S application in the Mollisol soil did not increase significantly ($P \leq 0.05$) the recovery of N in the tested crop of short term growth. A wider combination of N and S application rates are recommended in order to prove the interaction of S with higher N availability for the crop.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was granted by Conicyt-Fondecyt 11140441, and supported by the Universidad de Concepción (Department of Soil Science and Natural Resources, Program of Magister en Ciencias Agronómicas from Facultad de Agronomía, and the Subdirection of Research and Development-VRID).

REFERENCES

1. S.G Thomas, T.J Hocking, and P.E Bilsborrow, "Effect of sulphur fertilisation on the growth and metabolism of sugar beet grown on soils of differing sulphur status," *Field Crops Research*, **83**, 223-235 (2003).
2. W. H. Allaway, and J. F. Thompson, "Sulfur in the nutrition of plants and animals," *Soil Sci.*, **101**, 240-247 (1966).
3. J. Eriksen, "Soil Sulfur Cycling in Temperate Agricultural Systems," In: Donald L. Sparks, Editor(s), *Advances in Agronomy*, Academic Press, USA, **102**, 55-89 (2009).
4. M. Hawkesford, W. Horst, T. Kichey, H. Lambers, J. Schjoerring, I.S. Møller, and P. White, Chapter 6 – "Functions of Macronutrients," In Marschner's *Mineral Nutrition of Higher Plants* (Third Edition), edited by Petra Marschner, Academic Press, San Diego, pp.135-189, ISBN 9780123849052 (2012).
5. M.A. Raza, L.Y. Feng, A. Manaf, A. Wasaya, M. Ansar, A. Hussain, M.H.B. Khalid, N. Iqbal, Z.J. Xi, Y.K. Chen, J.X. Chen, F. Yang, and W. Yang, "Sulphur application increases seed yield and oil content in sesame seeds under rainfed conditions," *Field Crops Research*, **218**, 51-58 (2018).
6. P. Prystupa, A. Peton, E. Pagano, and F.H. Gutierrez Gutierrez-Boem, "Sulphur fertilization of barley crops improves malt extract and fermentability," *Journal of Cereal Science*, **85**, 228-235 (2019).

7. Z. Tao, X. Chang, D. Wang, Y. Wang, S. Ma, Y. Yang, and G. Zhao, "Effects of sulfur fertilization and short-term high temperature on wheat grain production and wheat flour proteins," *The Crop Journal*, **6** (4), 413-425 (2018).
8. A.Y. Prosekov, and S.A. Ivanova, "Food security: The challenge of the present," *Geoforum*, **91**, 73-77 (2018)
9. H.W. Scherer, "Sulphur in crop production," *European Journal of Agronomy*, **14**, 81-111 (2001).
10. F.J. Zhao, S.P. McGrath, S.E. Salmon, P.R. Shewry, R. Quayle, P.J.A. Withers, E.J. Evans, and J. Monahan, "Optimising sulphur inputs for bread making quality of bread," *Aspects of Applied Biology*, **50**, 199-205 (1997).
11. F.J. Zhao, S.P. McGrath, M.M.A. Blake-Kalff, A. Link, and M. Tucker, "Crop responses to sulphur fertilisation in Europe," *Proceedings N° 504. International Fertiliser Society*, New York, UK, p.27 (2002).
12. Koprivova, and S. Kopriva, "Sulfur metabolism and its manipulation in crops," *Journal of Genetics and Genomics*, **43**, 623-629 (2016).
13. G. Schenkel, P. Baherle, H. Floody, and M. Gajardo, "Exploración de deficiencias nutritivas con suelos en macetas. XVIII. Macronutrientes, provincia de Aisén," *Agricultura Técnica*, **34**, 189-200 (1973).
14. M. Alfaro, M. Bernier, and S. Iraira, "Effect of sulphur source effect on yield and quality of wheat and pasture in two Andisols," *Agricultura Técnica*, **66** (3), 283-294 (2006).
15. M. Aguilera, M.L. Mora, G. Borie, P. Peirano, and H. Zunino, "Balance and distribution of sulphur in volcanic ash-derived soils in Chile," *Soil Biology & Bioch.*, **34** (9), 1355-1361 (2002).
16. J. Arshad, M. Yong-Sun, and Z. Malik, "Sulphur-a general overview and interaction with nitrogen," *Australian Journal of Crop Science*. **4**(7), 523-529 (2010).
17. F. Salvagiotti, J.M. Castellarín, D.J. Millares, and H.M. Pedrol, "Sulfur fertilization improves nitrogen use efficiency in wheat by increasing nitrogen uptake," *Field Crops Research*, **113**, 170-177 (2009).
18. F.J. Stevenson, and M.A. Cole, "Cycles of soil: carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients," (2nd. ed.). John Wiley & Sons. New York, USA (1999).
19. J.C. Sanchez-Hernandez, M. Sandoval, A. Pierart, "Short-term response of soil enzyme activities in a chlorpyrifos-treated mesocosm: Use of enzyme-based indexes," *Ecological Indicators*, **73**, 525-535 (2017).

20. J.P. Anderson, Soil respiration. p. 831-871. Number 9. In A.L. Page, R H. Miller and D.R. Keeney (eds.) *Methods of soil analysis, Part 2. Chemical and microbiological properties*. 2nd ed. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA. (1982).
21. D. Maynard, J. Stewart, and J.R. Bettany, "Sulfur and nitrogen mineralization in soils compared using two incubation techniques," *Soil Biology & Biochemistry*, **15**, 251-256 (1983).
22. D.L. Rowell, "Soil Science, methods and applications," New York, United States. pp. 350 (1994).
23. Sadzawka, M.A. Carrasco, R.R. Demanet, H. Flores, R. Grez, M.L. Mora, and A. Neaman, "Métodos de análisis de tejidos vegetales," Serie Actas INIA N°40. INIA La Platina. Santiago, Chile (2007).
24. S.J. Baxter, and M.A. Oliver, "The spatial prediction of soil mineral N and potentially available N using elevation," *Geoderma*, **128** (3-4), 325-339 (2005).
25. M. Wirtz, and M. Droux, "Synthesis of the sulfur amino acids: cysteine and methionine," *Photosynth Research*, **86**, 345- 362 (2005).



Table 1. Selected chemical soil properties of two cropped soils of restricted nitrogen and sulphur availability.

Soil properties	Mollisol		Andisol	
	Value	Level	Value	Level
Soil pH	5.9	Low	5.9	Low
Soil organic matter (%)	3.5	Medium	5.7	Medium
Available phosphorous (mg kg ⁻¹)	28.3	High	18.6	Medium
Available potassium (mg kg ⁻¹)	79.23	Low	411.3	High
Available N-NO ₃ ⁻ (mg kg ⁻¹)	7.5	Low	14.0	Low
Available N-NH ₄ ⁺ (mg kg ⁻¹)	2.8	Low	3.2	Low
Available sulphur (mg kg ⁻¹)	4.0	Low	8.7	Low

Table 2. Equivalent rates of the combined application of sulphur (S) and nitrogen (S) to the soil, to test the effect of S application on plant N recovery in a pot experiment.

Treatments	S application (kg ha ⁻¹)	N application (kg ha ⁻¹)
N0S0	0	0
N0S30	30	0
N100S0	0	100
N100S30	30	100

Table 3. Rates of carbon, nitrogen and sulphur mineralization from two cropped soils of different levels of soil organic matter at different periods within 112 days of soil incubation.

Evaluated period (days)	Carbon mineralisation ($\mu\text{g CO}_2\text{-C g soil}^{-1} \text{ day}^{-1}$)		Nitrogen mineralisation ($\mu\text{g NH}_4^+\text{-N g soil}^{-1} \text{ day}^{-1}$)		Sulphur mineralisation ($\mu\text{g SO}_4^{2-}\text{-S g soil}^{-1} \text{ day}^{-1}$)	
	Andisol	Mollisol	Andisol	Mollisol	Andisol	Mollisol
0-7	4.94 A (2.20)	3.86 B (1.70)	0.47 A (0.14)	0.52 A (0.12)	0.12 A (0.03)	0.07A (0.01)
7-14	4.87 A (1.91)	4.19 B (0.99)	0.51 A (0.09)	0.52 A (0.08)	0.08 AB (0.02)	0.06A (0.02)
14-28	5.98 A (2.53)	6.07 A (1.38)	0.21 B (0.03)	0.20 B (0.05)	0.04 BC (0.01)	0.02B (0.003)
28-56	3.79 A (1.23)	4.08 B (0.61)	0.12 C (0.01)	0.11 B (0.01)	0.01 C (0.004)	0.01B (0.004)
56-112	4.98 A (1.13)	3.88 B (0.87)	0.18 BC (0.01)	0.04 C (0.01)		

Capital letters indicate statistical significance differences ($P \leq 0.05$) between mineralisation rates evaluated within a soil.

Standard deviation values of the variables are shown in brackets.

Table 4. Soil indicators of nitrogen availability for two cropped soils with different levels of soil organic matter.

	Potentially available nitrogen* ($\mu\text{g N-NH}_4^+ \text{ g soil}^{-1}$)	Urease activity* ($\mu\text{g N-NH}_3^+ \text{ g soil}^{-1} \text{ h}^{-1}$)
Andisol	11.38 (4.33)	36.3 (1.66)
Mollisol	15.89 (7.55)	37.79 (3.80)

*No statistical significance ($P \leq 0.05$) for these variables between soils.

Table 5. Plant height (*Lolium multiflorum* L.) evaluated through the cropped season of sixteen weeks under the effect of S (rates of 0 and 30 kg ha⁻¹) and N (rates of 0 and 100 kg ha⁻¹) application to the soil in a pot experiment.

Days after sown	N0S0	N0S30	N100S0	N100S30
16	1.02 B (0.09)	1.16 AB (0.10)	1.14 AB (0.12)	1.29 A (0.02)
22	3.45 B (0.28)	4.02 AB (0.42)	3.67 AB (0.21)	4.32 A (0.26)
30	5.51 B (0.18)	6.07 B (0.29)	6.00 B (0.35)	7.17 A (0.12)
37	6.20 B (0.50)	7.10 AB (0.47)	7.29 AB (0.40)	7.82 A (0.31)
51	7.20 C (0.23)	8.40 B (0.25)	8.32 B (0.28)	9.51 A (0.23)
58	7.50 C (0.269)	9.00 B (0.61)	8.90 BC (0.75)	10.90 A (0.42)
65	8.80 C (0.28)	10.00 BC (0.67)	10.20 B (0.69)	12.60 A (0.19)
71	11.00 B (0.17)	11.80 AB (0.44)	12.10 AB (0.84)	14.00 A (0.20)
80	15.20 B (0.10)	15.90 B (0.40)	15.70 B (0.06)	19.80 A (0.51)
87	17.80 B (0.28)	18.50 B (0.43)	18.20 B (0.42)	21.20 A (0.50)
93	20.70 B (0.36)	20.90 B (0.26)	20.80 B (0.50)	23.70 A (0.36)
99	24.70 B (0.35)	25.10 B (0.51)	25.10 B (0.40)	28.00 A (1.48)
109	27.60 B (0.35)	27.20 B (0.40)	21.20 B (0.15)	30.30 A (1.79)

Capital letters indicate statistical significance differences ($P \leq 0.05$) between soil S and N application treatments at each evaluation during a cropped season.

Table 6. Crop yield, N foliage concentration, and root growth parameters after cropping *Lolium multiflorum* L. in a pot experiment for sixteen weeks under S (rates of 0 and 30 kg ha⁻¹) and N (rates of 0 and 100 kg ha⁻¹) application.

	Biomass		Root system			
	Dry matter (g pot ⁻¹)	N concentration (%)	Dry matter (g pot ⁻¹)	Area (cm ²)	Length (cm)	Volume (cm ³)
N0S0	1.53 B (0.10)	1.57 B (0.36)	2.01 B (0.19)	248.24 AB (21.37)	1867.96 AB (382.40)	12.17 AB (2.37)
N0S30	1.66 B (0.19)	1.39 B (0.28)	2.11 B (0.16)	267.21 A (45.10)	2258.05 A (178.50)	13.05 AB (1.83)
N100S0	4.92 A (1.00)	2.61 A (0.91)	9.99 A (2.43)	251.17 AB (26.63)	2171.10 A (340.10)	10.63 B (1.64)
N100S30	6.39 A (0.94)	2.63 A (0.99)	10.11 A (2.17)	222.13 B (38.52)	1676.90 B (304.10)	13.08 A (2.95)

Capital letters indicate statistical significance differences ($P \leq 0.05$) between crop variables harvested at the end of the cropped season.

Standard deviation values of the variables are shown in brackets.

Table 7. Nitrogen recovery efficiency measured in a *Lolium multiflorum* L. grown in a pot experiment for sixteen weeks under S (rates of 0 and 30 kg ha⁻¹) and N (rates of 0 and 100 kg ha⁻¹) application.

Nitrogen recovery efficiency*	
N100S0	230.5 (114.2)
N100S30	312.0 (114.5)

*No statistical differences were registered between treatments ($P \leq 0.05$).

Table 8. Residual soil available nitrogen (N) and sulphur (S) after cropping *Lolium multiflorum* L. in a pot experiment for sixteen weeks under S and N application.

	Soil available nitrogen (mg NO ₃ ⁻¹ -N kg soil ⁻¹)	Soil available sulphur (mg SO ₄ ⁻² -S kg soil ⁻¹)
Initial soil content	5.28 B (0.30)	4.75 B (1.07)
N0S0	4.38 B (2.49)	2.64 B (0.71)
N0S30	5.33 B (2.95)	7.81 A (0.88)
N100S0	10.62 A (4.19)	2.76 B (0.51)
N100S30	10.79 A (6.80)	6.80 A (0.88)

Capital letters indicate statistical significance differences ($P \leq 0.05$) between soil available S and N during a cropped season. Standard deviation values of the variables are shown in brackets.

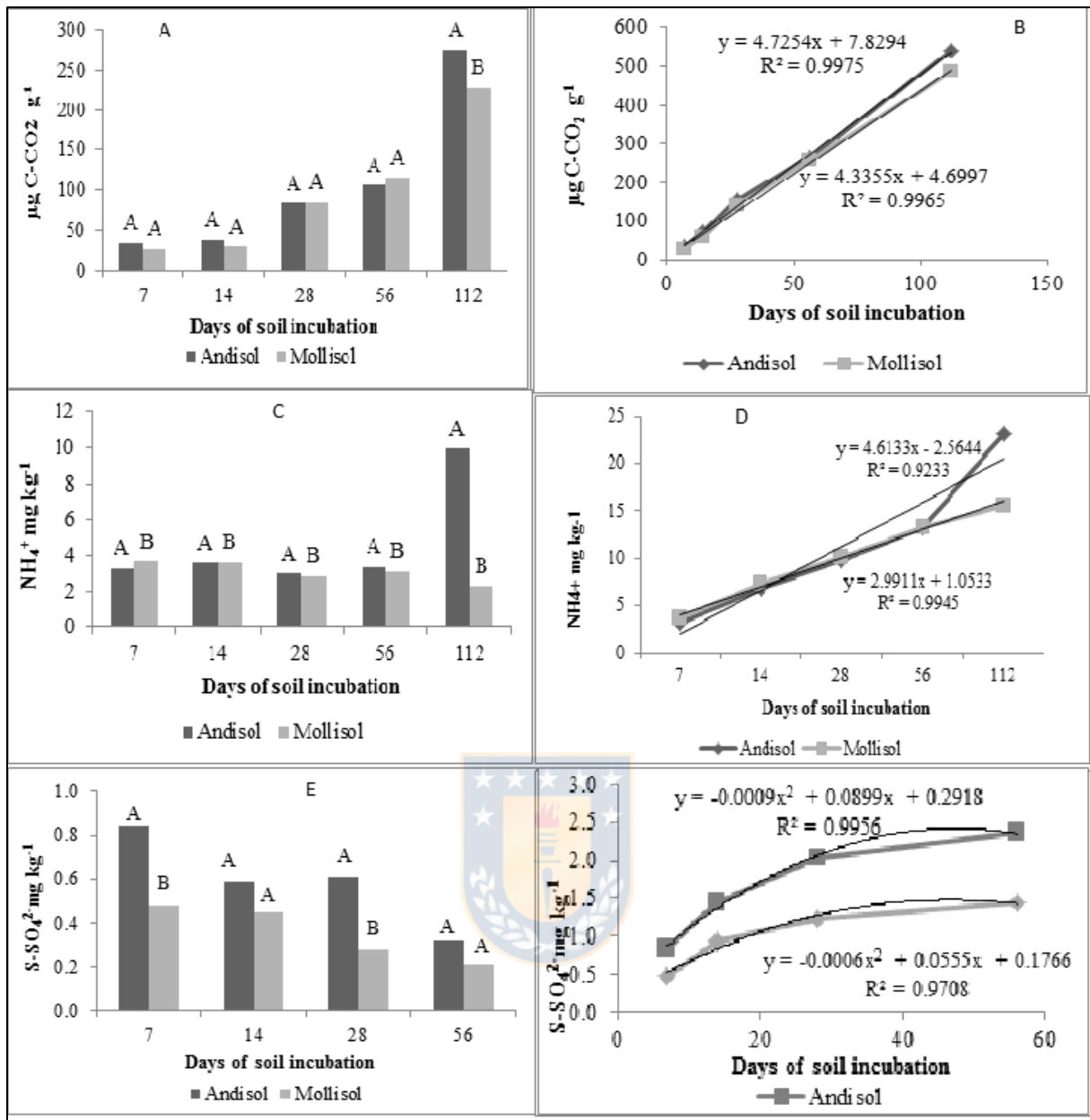


Figure 1. Partial (left side, A, C, E) and accumulated (right side, B, D, F) mineralisation of carbon, nitrogen and sulphur from Andisol and Mollisol soils.

CAPÍTULO 3

CALIBRACION DE UN SENSOR DE HUMEDAD WET-2 EN UN SUELO FRANCO-ARCILLOSO DISTURBADO

MARTÍNEZ, A.^{1*}, ZAPATA, M.², CUEVAS, J.² CÓRDOVA, C.²

¹ Programa de Magíster en Ciencias Agronómicas, Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción, Casilla 537, Chillán, Chile.

² Departamento de Suelos y Recursos Naturales, Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción, Casilla 537, Chillán, Chile. *Autor para correspondencia E-mail: anamarimartinez@udec.cl

CALIBRATION OF A WET-2 MOISTURE SENSOR IN A DISTURBED FRANCO-ARCILLOSO SOIL

Funciones de calibración de un sensor WET-2 en suelos disturbados



Este artículo en calidad de nota corta fue enviado a la revista AGROSUR

Key words: volumetric moisture, dielectric constant of soil, irrigation Scheduling, irrigation criterion

ABSTRACT

The measurement of the soil water content is essential to schedule crop irrigation, and such measurements can be obtained using dielectric sensors, but this is soil-specific and requires calibration. The objective of this study was to establish calibration equations of a frequency domain reflectometry sensor (FDR) for two soils, in order to monitor soil moisture content matching an application of water that maintains 50% of available soil moisture. Disturbed samples from clay loam soils were collected from the field (n=3), at 0-20 cm depth. A pot experiment was set to measure the volumetric soil moisture content ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) using the sensor and the gravimetric technique. Measurements were taken on saturated soil condition (day-1) and subsequent measurements were done after 2, 5 and 6 days. Mollisol soil showed a range between 17 to 35% Θ , and 0.12 to 0.47 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ according to the sensor ($R^2 = 0.95$). Andisol soil showed moisture values between 14 to 35% Θ and 0.25 to 0.56 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ according to the sensor ($R^2 = 0.95$). Therefore, by using the WET-2 sensor, adequate programming and monitoring of crop irrigation is feasible.

RESUMEN

La medición del contenido de agua del suelo es esencial para programar el riego de un cultivo, y se puede llevar a cabo usando sensores dieléctricos, pero éstos requieren calibración en el suelo de interés. El objetivo de este estudio fue establecer ecuaciones de calibración de un sensor de reflectometría de dominio de frecuencia (FDR) en dos suelos (Mollisol y Andisol) disturbados, para programar el riego que satisfaga el 50% del agua disponible (HA). Para ello se trabajó con muestras provenientes de tres repeticiones de campo para cada suelo, tomadas a una profundidad de 0-20 cm. Se midió la humedad volumétrica ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) con el sensor y mediante la técnica gravimétrica, desde saturación hasta punto de marchitez permanente. El suelo Mollisol presentó un rango de 17 a 35% Θ y de 0,12 a 0,47 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ según el sensor ($R^2 = 0,95$), y el Andisol mostró valores de humedad de 14 a 35% Θ y de 0,25 a 0,56 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ($R^2 = 0,97$). Por lo tanto, mediante el uso del sensor WET-2 se puede lograr una adecuada programación y monitoreo del riego.

Palabras clave: humedad volumétrica, constante dieléctrica del suelo, manejo del riego.

INTRODUCCIÓN

La medición del contenido de agua en el suelo es esencial para mejorar el balance hídrico del sistema suelo-cultivo-atmósfera (Nols y Kammerer, 2017), ya que afecta a la evapotranspiración y consecuentemente a la producción de materia seca de cultivos y frutales (Lekshmi et al., 2014). La precisión de estas mediciones mejoran la comprensión de la respuesta del cultivo al estrés hídrico y a la programación de riego (Mwale et al., 2005).

La humedad del suelo puede expresarse en porcentaje (% hbss), ya sea como humedad gravimétrica (w) o volumétrica (Θ). La w se define como la relación entre la masa de agua presente en la muestra de suelo y la masa seca de la misma, mientras que Θ relaciona el volumen de agua presente en el suelo y el volumen total del mismo (Lekshmi et al., 2014), que se obtiene multiplicando w por la densidad aparente (Dap). La técnica estándar para medir la humedad del suelo es el método gravimétrico (Rezaei et al., 2012), que requiere de tiempo en el procedimiento y es destructivo, lo que significa que no se puede usar para mediciones repetitivas en el mismo lugar (Lekshmi et al., 2014). Sin embargo, es indispensable como método de calibración y evaluación (Rudnick et al., 2015). En contraste, las técnicas modernas representan una buena alternativa de uso para el monitoreo de la humedad en el suelo y la programación del riego para los cultivos (Lekshmi et al., 2014). Al respecto, los sensores dieléctricos se han usado ampliamente y su funcionamiento se basa en la detección de los cambios en la constante dieléctrica en el suelo. Las principales técnicas utilizadas por estos sensores son la reflectometría en el dominio del tiempo (TDR) y reflectometría en el dominio de la frecuencia (FDR) o capacitancia (Jeewantini y Lu, 2017), y su ventaja es que constituyen un método no destructivo (Lekshmi et al., 2014). Sin embargo, la precisión depende de las propiedades físicas, mecánicas y químicas del suelo (Mohsen et al., 2018), por ello, su uso está sujeto a la calibración según las condiciones particulares de cada sitio.

Dentro de los sensores FDR, se encuentra el tipo WET-2, que es multiparamétrico, relativamente nuevo y económico (Kargas et al., 2013) por lo que su aplicación requiere ser validada. Por ello, el objetivo de este estudio fue establecer ecuaciones de calibración de un sensor de reflectometría de dominio de frecuencia (FDR) en dos tipos de suelo para un monitoreo adecuado de la humedad cuando se aplica un riego que satisfaga el 50% del agua disponible (HA).

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental y características de los suelos

Los suelos fueron muestreados en la Estación Experimental “El Nogal” de la Universidad de Concepción ((36°35'44,00" S; 72°04'36,25" O), y pertenecen al orden Mollisol y Andisol. El Mollisol es de la serie Mebuca (Fine, mixed,thermic Aquic Palexeroll) es un suelo desarrollado sobre la unidad geomorfológica denominada abanico aluvial de Chillán, moderadamente profundo, con drenaje imperfecto, color pardo rojizo oscuro, bien estructurado, y de capacidad de uso IIW2. El suelo Andisol es de la serie Arrayán (medial, thermic Typic Haploxerands) de origen de cenizas volcánicas, de buena profundidad y con Capacidad de Uso I (ortofoto Chillán 3634-7200 CIREN, 1990).

Características físicas e hídricas de los suelos

La textura (USDA) del suelo Mollisol es de tipo franco arcillosa (30,46% arcilla, 31,02% limo y 38,5% arena). El contenido de humedad (Θ) registrada a capacidad de campo (CC) fue 30,0% y el punto de marchitez permanente (PMP) de 17,0% según el método de la olla a presión (Sandoval et al., 2012), y la densidad aparente (Dap) fue de 1,26 g cm⁻³. El suelo Andisol tiene textura (USDA) franco arcillosa (28,2% arcilla, 29,9% limo, y 42% arena), CC y PMP corresponden a 25%(Θ) y 14%(Θ), y Dap= 0,7 g cm⁻³.

Diseño experimental, procedimiento de la calibración y análisis de datos

Se utilizó macetas con aproximadamente 1 kg de suelo (n=3) provenientes de tres parcelas de 30 x 30 m, muestreadas a una profundidad de 0-20 cm. Las muestras fueron tamizadas a 10 mm. Los parámetros de CC y PMP aproximados fueron determinados en las macetas, combinando saturación de agua y tiempo de percolación (días). Se midió la humedad en la maceta y se dejó drenar por dos días para alcanzar el punto de CC. A medida que el suelo fue drenado se registró el contenido de humedad gravimétrica (% hbss) y también se realizaron lecturas con el sensor WET-2. . Para la determinación de la humedad gravimétrica en base a volumen (Θ) se midió la Dap de los suelos en las macetas por el método del cilindro (Sandoval et al., 2012), para relacionarla con la medición del sensor WET-2 (m³ m⁻³) a través de una curva de calibración.

Los valores de humedad del suelo obtenidos por la metodología estándar y a través del sensor WET-2, fueron analizados mediante una regresión lineal ($P \leq 0,05$) con el programa estadístico SAS Windows 8.0 (Castillo, 2007).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Fig. 1 se presenta la relación entre el contenido de agua volumétrico (Θ) determinado con el método gravimétrico y el medido con el sensor WET-2 ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) para ambos suelos. Se observó una relación lineal con alta precisión ($R^2 = 0,95$ y $R^2 = 0,97$). El suelo Mollisol mostró valores de humedad Θ en el rango de 17 a 35%, y de 0,12 a 0,47 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ según el sensor. La calibración del suelo Andisol (Fig. 2) registró valores de 14 a 35% de humedad Θ y 0,25 a 0,5 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ medidos con el sensor

El agua disponible (HA Θ) del suelo Mollisol fue de 13,0% (CC-PMP) y la humedad Θ correspondiente al criterio de riego del 50% de HA, es de 23,5%, en tanto que en el Andisol la HA fue 11% y la humedad según el criterio de riego es 19,5%, que considera la base del PMP más el 50% de la HA. En el cuadro 1 se muestra la comparación de esta condición, del punto de CC, y PMP obtenidos por las dos técnicas utilizadas. Se observa que para el caso del CC en Mollisol en términos de humedad Θ los valores fueron similares entre la medición del sensor interpolado de la función lineal obtenida de la curva (31%) con respecto al medido en el laboratorio (30%), mientras que el contenido de humedad al PMP fue de 21% según el sensor y de 17% con el método gravimétrico, lo que representa una variación de 4%, la misma situación se presentó en el suelo Andisol (diferencia del 2% y de 4% CC y el PMP, respectivamente. Esto se puede deber a la dificultad que presenta el suelo para alcanzar el nivel simulado de tensión por la olla, bajo las condiciones ambientales del experimento de maceta (Asgarzadeh et al., 2014), ya que en PMP la retención de agua a nivel de partículas de suelo es muy fuerte, y por eso el método de la olla a presión genera la fuerza suficiente para remover esta humedad desde la matriz del suelo y la sonda como no aplica fuerza, mide el agua que está en la matriz, la que al no ser retirada en su totalidad, genera el delta de 4% de humedad).

Las curvas de calibración obtenidas muestran la necesidad de la calibración de los sensores de humedad FDR en cada suelo en particular (Lekshmi et al., 2014), dado que el suelo es un material formado por minerales, aire y agua, y la permitividad o constante dieléctrica se componen de la contribución relativa de cada uno de estos factores (Carpena, 2004). En este estudio, tanto el suelo Mollisol como el Andisol tienen la misma textura, pero difieren en la proporción de partículas finas, así como el contenido de materia orgánica (3,5% Mollisol y 5,7% Andisol), lo que genera la diferencia entre las curvas.

Las curvas de calibración de los suelos estudiados determinaron que las lecturas del sensor WET-2 del suelo Mollisol debían alcanzar los 0,23 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, para asegurar el criterio de riego de 50% del agua disponible. Por su parte, en el suelo Andisol la humedad correspondiente al

criterio de riego debía ser de $0,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, Valores menores a éste implicaron reposición del agua, según lo interpolado de la curva de regresión estimada.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Concepción, campus Chillán, por facilitar el sitio de estudio, y la ayuda en la recolección de las muestras de suelo prestada por los Sres. Carlos Fuentealba, Matías Betancur y la Sra. Claudia Garrido Ruiz.

LITERATURA CITADA

Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M.R., Dexter, A.R., Mahboubi, A.A., Neyshabouri, M.R., 2014. Determination of soil available water for plants: Consistency between laboratory and field measurements. *Geoderma* 226-227, 8-20. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.02.020>.

Carpaena, M.R., 2004. Field Devices For Monitoring Soil Water Content. Agricultural and Biological Engineering Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida.

Castillo, L.E., 2007. Introducción al SAS para Windows. 3th ed. Universidad Autónoma Chapingo, México.

Centro de Investigaciones de Recursos Naturales (CIREN), 1990. Estudio agrológico Itata I: Descripciones de suelos, materiales y símbolos VIII Región. Publicación. N° 89, Santiago, Chile, pp. 269.

Jeewantini, R., Lu, M., 2017. Automated general temperature correction method for dielectric soil moisture sensors. *Journal of Hydrology* 551(4), 203-216. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.05.050.

Kargas, G., Ntoulas, N., Nektarios, P.A., 2013. Moisture content measurements of green roof substrates using two dielectric sensors. *HortTechnology* 23(2), 177-186.

Lekshmi, S.U., Maryam, D.N., Baghini, M.S., 2014. A critical review of soil moisture measurement. *Measurement* 54, 92-105. doi.org/10.1016/j.measurement.2014.04.007 0.

Mohsen, A., Mohamed, O., Paleologos, E.K., 2018. Dielectric permittivity and moisture content. In J., Hayton (ed.), *Fundamentals of geoenvironmental engineering*. Elsevier Inc., Cambridge, United States, pp. 581-637.

Mwale, S.S., Azamali, S.N., Sparkers, D.L., 2005. Can the PR1 capacitance probe replace the neutron probe for routine soil-water measurements? *Soil Use and Management* 21, 340-347. doi:10.1079/SUM2005332.

Nolz, R., Kammerer, G., 2017. Evaluating a sensor setup with respect to near-surface soil water monitoring and determination of in-situ water retention functions. *Journal of Hydrology* 549, 301-212. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.011.

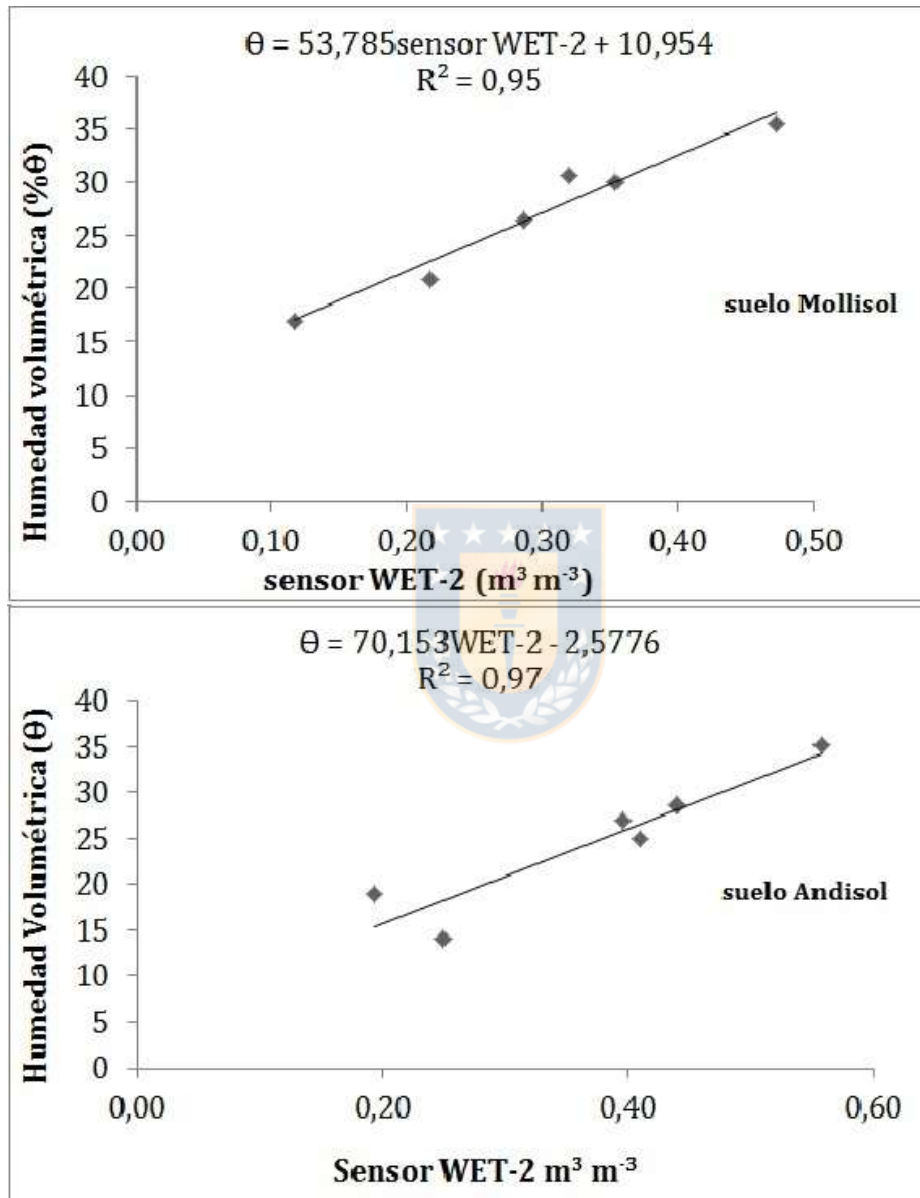
Rezaei, M., Ebrahimi, E., Naseh, S., Mohajerpour, M., 2012. A new 1.4-GHz soil moisture sensor. *Measurement* 45, 1723–1728. doi.org/10.1016/j.measurement.2012.04.014.

Rudnick, D.R., Djaman, K., Irmak, S., 2015. Performance analysis of capacitance and electrical resistance-type soil moisture sensors in a silt loam soil. *American Society of Agricultural and Biological Engineer* 58(3), 649–665. doi: 10.13031/trans.58.10761.

Sandoval, M., Dörner, J., Seguel, O., Cuevas, J., Rivera, D., 2012. Métodos de análisis físicos de suelos. Departamento de Suelos y Recursos Naturales Universidad de Concepción. *Publicación N° 5*, Chillán, Chile, pp. 29-34.

Figura 1. Curvas de calibración de un sensor de humedad WET-2 en suelos Mollisol y Andisol disturbados para un experimento de macetas. ($P \leq 0,05$).

Figure 1. Calibration curves of a WET-2 moisture sensor in disturbed Mollisol and Andisol soils for a pot experiment. ($P \leq 0.05$).



Cuadro 1. Contenido de agua medido con un sensor WET-2 y con la técnica gravimétrica en un suelo Mollisol y Andisol.

Table 1. Water content measured with a WET-2 sensor and with the gravimetric technique in a Mollisol and Andisol soils.

	Contenido de agua según método de medición							
	WET-2				Gravimétrico estándar			
	Mollisol		Andisol		Mollisol		Andisol	
	($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	(%)	($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	(%)	($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	(%)	($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	(%)
CC	0,32	31	0.39	27	0,35	30,0	0,41	25
PMP	0,22	21	0.19	18	0,11	17,0	0,25	14
CR (50%)	0,27	26	0,29	23	0,23	24	0,33	20

CC: capacidad de campo, PMP: punto de marchitez permanente, CR: criterio de riego.



CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES GENERALES

- 1- Los suelos estudiados Andisol y Mollisol mostraron altos contenidos de materia orgánica, pero la disponibilidad de N y S, así como su capacidad para suministrar estos minerales a la solución del suelo fue baja. El suministro natural de Mollisol a través de la mineralización de N y S fue menor que el de Andisol.
- 2- La respuesta a una dosis media de aplicación de S en el suelo de Mollisol no incrementó significativamente ($P < 0.05$) la recuperación de N en el cultivo evaluado en un período de crecimiento a corto plazo. Se recomienda una combinación más amplia de tasas de aplicación de N y S para probar la interacción de S con una mayor disponibilidad de N para el cultivo.
- 3- La respuesta a la aplicación conjunta de N y S en el suelo no aumentó el rendimiento de la biomasa ni mejoró la calidad del cultivo en el contenido de proteínas, dado que mostró resultados similares al tratamiento solo con N.