

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

**EFECTO DE LA APLICACIÓN DE ÁCIDO HÚMICO SOBRE LAS
PROPIEDADES FÍSICAS DE UN SUELO CULTIVADO CON TRIGO EN LA
REGIÓN DE LA ARAUCANÍA**

CRISTIÁN IVÁN PARRA VERGARA

Santiago, Chile

2016

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

**EFEECTO DE LA APLICACIÓN DE ÁCIDO HÚMICO SOBRE LAS
PROPIEDADES FÍSICAS DE UN SUELO CULTIVADO CON TRIGO EN LA
REGIÓN DE LA ARAUCANÍA**

**EFFECT OF THE APPLICATION OF HUMIC ACID ON THE PHYSICAL
PROPERTIES OF A SOIL CULTIVATED WITH WHEAT IN THE REGION OF
ARAUCANÍA, CHILE**

CRISTIÁN IVÁN PARRA VERGARA

Santiago, Chile

2016

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

**EFECTO DE LA APLICACIÓN DE ÁCIDO HÚMICO SOBRE LAS
PROPIEDADES FÍSICAS DE UN SUELO CULTIVADO CON TRIGO EN LA
REGIÓN DE LA ARAUCANÍA**

Memoria para optar al título profesional de: Ingeniero Agrónomo.

CRISTIÁN IVÁN PARRA VERGARA

| | Calificaciones |
|--|-----------------------|
| PROFESOR GUÍA | |
| Sr. Oscar Seguel S. Ingeniero Agrónomo, Dr. | 6,9 |
| PROFESORES EVALUADORES | |
| Sr. Cristián Kremer F. Ingeniero Agrónomo, Ph. D. | 7,0 |
| Sr. José Luis Henríquez S. Ingeniero Agrónomo, M.S., Ph. D. | 6,5 |

Santiago, Chile

2016

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| RESUMEN | 1 |
| Palabras clave: | 1 |
| ABSTRACT | 2 |
| Keywords: | 2 |
| INTRODUCCIÓN | 3 |
| Objetivos específicos | 4 |
| MATERIALES Y MÉTODOS | 5 |
| Materiales | 5 |
| Método | 6 |
| Manejo del cultivo | 6 |
| Tratamientos del ensayo..... | 7 |
| Propiedades evaluadas | 8 |
| Análisis estadístico | 9 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 10 |
| Propiedades físicas del suelo | 10 |
| Textura | 10 |
| Densidad real | 10 |
| Densidad aparente | 11 |
| Distribución de tamaño de poros | 12 |
| Estabilidad de agregados..... | 15 |
| Componentes de rendimiento | 17 |
| CONCLUSIONES | 18 |
| BIBLIOGRAFÍA | 19 |
| APÉNDICE 1 | 24 |

RESUMEN

En el presente estudio se evaluó el efecto de un ácido húmico sobre algunas propiedades físicas de un suelo Andic Haplohumult cultivado con trigo en la Región de la Araucanía, IX región de Chile. Los tratamientos aplicados fueron un testigo sin enmienda (T0), aplicación de ácido húmico (T1) y una condición nativa en que no se ha intervenido el suelo en un período de tiempo superior a los 15 años (T2). Se realizaron muestreos a dos profundidades (0-10 y 30-40 cm) con cuatro repeticiones, evaluando algunas propiedades físicas del suelo a un mes de la aplicación de la enmienda y a los 6 meses después de ésta. Además, se midieron componentes de rendimiento relevantes para el cultivo del trigo, con el fin de evaluar si las mejoras estructurales que produce el ácido húmico en el suelo, se traducen en aumentos de la biomasa vegetal y el rendimiento de grano. En cuanto a las propiedades físicas de suelo, la aplicación de ácido húmico tuvo efectos positivos sobre la retención de agua, se produjo un aumento en la porosidad, hubo una disminución de la densidad aparente y se originó mayor estabilidad de macroagregados en profundidad (30-40 cm), alcanzando niveles similares al sitio nativo. También existió una mayor producción de biomasa en el tratamiento con aplicación de la enmienda respecto al control sin ella, acompañado por un aumento en el número de granos por metro cuadrado, sin modificar el peso de los granos, lo que se tradujo finalmente en un aumento sustancial, pero no significativo, en el rendimiento del trigo producto de una mejor condición del suelo.

Palabras clave: Propiedades físicas de suelo, agua aprovechable, porosidad, rendimiento, *Triticum aestivum*.

ABSTRACT

In the present study the effect of humic acid was evaluated on some physical properties of an Andic Haplohumult cultivated with wheat in the Region of Araucanía, IX region of Chile. The treatments were a control without amendment (T0), application of humic acid (T1) and a native condition in which the soil has not been altered for more than fifteen years. Samples were taken at two depths (0-10 and 30-40 cm) with four replications, evaluating some physical properties one month after the amendment application and six months thereafter. In addition, relevant yield components for the wheat were measured in order to assess whether the soil structural improvements produce by humic acid results into increased plant biomass and grain yield. As for the soil physical properties, the application of humic acid had positive effects on water retention, there was an increase in porosity, a decrease in bulk density and an improved stability of macroaggregates in depth (30- 40 cm), reaching levels similar to native site. There was also a higher biomass production in the treatment with application of the amendment regarding the control without it, accompanied by an increase in the number of grains per square meter, without changing the weight of the grains, which resulted in an increased, but not significant, yield of wheat due to better soil condition.

Keywords: Physical soil properties, available water, porosity, yield, *Triticum aestivum*.

INTRODUCCIÓN

El suelo es un sistema abierto, dinámico y constituido por tres fases. La fase sólida está formada por componentes inorgánicos y orgánicos, que dejan un espacio de vacíos (poros, cámaras, galerías, grietas y otros) en el que se hallan las fases líquida y gaseosa. Por su constitución, los suelos son sistemas complejos de enorme trascendencia, ya que soportan la vida, suministrando nutrientes y energía para el crecimiento de las plantas y el desarrollo de los animales (Porta, 2003).

Los componentes orgánicos del suelo, si bien se encuentran en menor proporción respecto a los componentes inorgánicos, juegan un rol fundamental en la estructuración y ordenamiento de las partículas sólidas. Respecto a su composición, los componentes orgánicos pueden dividirse en dos clases de material: el no-húmico (por ejemplo, proteínas, polisacáridos, ácidos nucleicos y pequeñas moléculas de azúcar y aminoácidos) y las sustancias húmicas (Stevenson, 1994).

Las sustancias húmicas son cadenas carbonadas estables que tienen profundos efectos físicos, químicos y biológicos sobre el suelo, especialmente sobre aquellos que presentan condiciones que dificultan la producción de cultivos; por otra parte, pueden tener un efecto estimulante directo en el crecimiento de las plantas (Stevenson, 1994). Además, influyen en la movilidad de compuestos orgánicos no iónicos como pesticidas y contaminantes, removiéndolos de las soluciones acuosas, retienen los nutrientes por sus propiedades de intercambio catiónico y son fuente de N, P y S para las plantas (Havlin et al., 2013). De acuerdo a su solubilidad en el medio acuoso, estas sustancias pueden separarse en Ácidos Fúlvicos (soluble a todos los valores de pH), Huminas (insolubles a todos los valores de pH) y Ácidos Húmicos (solubles en medio alcalino e insolubles a pH menor a 2) (Jano, 2003).

Los ácidos húmicos comprenden un conjunto de moléculas orgánicas heterogéneas, reunidas en agregados orgánicos, estabilizadas por enlaces de hidrógeno e interacciones hidrofóbicas (Piccolo, 2002). Los ácidos húmicos pueden promover el crecimiento y desarrollo vegetal de varios cultivos de interés agronómico (Rodda et al., 2006; Zandonadi et al., 2007; Baldotto et al., 2009). Estos efectos se reflejan en el aumento de la tasa de crecimiento de las raíces, incrementos en la biomasa vegetal y cambios en la arquitectura de la raíz (Canellas et al., 2006; Marqués et al., 2008; Baldotto et al., 2009). En el mercado existen productos a base de ácidos húmicos de distinto origen, destacando aquellos derivados del mineral leonardita, por su alta reactividad y estabilidad en su composición (Imbufe et al., 2005).

A nivel de propiedades físicas de suelo, se ha estudiado el efecto del ácido húmico en sistemas productivos frutales, en que la solubilidad de los productos comerciales facilita su aplicación vía riego (Cortés, 2011). En dichos estudios se ha visto un incremento en la retención del agua (Marín, 2011), un aumento en la porosidad gruesa (Fernández, 2013) y

una mayor estabilidad estructural (Aravena, 2014). A nivel de cultivos, se ha visto un aumento en la mineralización de los rastrojos, con el beneficio asociado a las propiedades físicas del suelo (Vidal et al., 2002). Al respecto, la adición de residuos orgánicos al suelo, producto de la mejora en las propiedades físicas, previene la degradación por erosión hídrica (Jordan et al., 2010), lo que, de acuerdo a Marín (2011), debiese verse potenciado por la interacción de un ácido húmico con un residuo de cosecha.

En este sentido, los estudios previos se han realizado en condiciones agroecológicas con precipitaciones menores a los 900 mm anuales. En particular, resulta necesario estudiar si los beneficios asociados a los ácidos húmicos se replican en suelos que por sus características y condición climática se encuentran propensos a ser degradados bajo sistemas de labranza convencional.

Al respecto, la Región de la Araucanía presenta niveles de precipitación mayores a 1.100 mm anuales y al menos un 28% de la superficie total de sus suelos tienen algún grado de erosión (CIREN, 2010), siendo habitualmente cultivados con gramíneas bajo sistemas de labranza convencional en circunstancias que, por su relieve y características, son propensos a degradarse (Luzio et al., 2010). Además, de acuerdo a datos estadísticos regionales entregados por ODEPA (2015), la Región cuenta con una superficie total de 107.869 ha cultivadas con trigo, con un rendimiento promedio regional de 53,2 qqm ha⁻¹ y en donde la agricultura se desarrolla principalmente en condiciones de secano, con sobre un 90% de la superficie cultivada con trigo bajo esta condición.

Los suelos de la Región, derivados de cenizas volcánicas y con altos contenidos de materia orgánica (>8%), presentan condiciones físicas óptimas para la producción agrícola (CIREN, 2002); sin embargo, se ha demostrado ampliamente que sufren procesos de compactación y pérdida de funcionalidad física por efecto del manejo intensivo, siendo la condición óptima la situación que presenta el suelo bajo bosque nativo (Ellies et al., 1995; Dörner et al., 2009). Por este motivo, en el presente trabajo se evaluó el cambio de algunas propiedades físicas de un suelo sometido a labranza tradicional y aplicación de ácido húmico, contrastándolo con la situación sin enmienda y con la condición bajo bosque nativo.

Objetivos específicos

- Cuantificar los cambios temporales y en profundidad de algunas propiedades físicas del suelo, con y sin la aplicación de ácido húmico, en un sistema de labranza tradicional, contrastándolos con el sitio bajo bosque nativo.
- Evaluar el efecto del ácido húmico en el rendimiento de una variedad de trigo con hábito de desarrollo alternativo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

El ensayo se realizó en el Huerto Hijuelas (38°59' Sur; 73°05' Oeste), Comuna de Teodoro Schmidt, Provincia de Cautín, Región de la Araucanía, entre julio del año 2014 y febrero del 2015, sobre un suelo que se cultivó con trigo en una superficie aproximada de 0,90 ha efectivas. Los análisis de laboratorio se realizaron en los Laboratorios de Física de Suelos y de Química de Suelos y Aguas de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile.

El suelo en estudio es de origen volcánico y pertenece a la Serie Correltúe, desarrollado a partir de cenizas volcánicas antiguas depositadas sobre el complejo metamórfico, que se encuentra principalmente en la Cordillera de la Costa, a una altura de 250-300 msnm. Miembro de la Familia fina, mixta, mélica de los Andic Haplohumults, esta Serie de suelo es de textura superficial franco limosa y color pardo oscuro en matices del 10 YR; de textura franco limosa y color rojo oscuro en matices 2.5 YR en profundidad (CIREN, 2002). El suelo posee buena permeabilidad y drenaje, con una pendiente de entre un 5 a un 8%.

De acuerdo a la clasificación Köeppen, la unidad experimental está ubicada en una zona de clima oceánico, con 2 meses secos y cuyo régimen hídrico presenta precipitaciones anuales de 1.188 mm y evapotranspiración acumulada de 587 mm durante el período del cultivo. La temperatura media anual es de 16,9°C, siendo enero el mes más cálido, con máximas promedio cercanas a los 21,8°C, y julio el mes más frío, con mínimas promedio del orden de los 4,7°C (Uribe *et al.*, 2012). Para el período de desarrollo del cultivo, la Figura 1 presenta los montos mensuales de precipitación y evapotranspiración de referencia de acuerdo a los datos entregados por el INIA en su estación meteorológica C. Lollinco, ubicada en la Comuna de Teodoro Schmidt. En ella, puede apreciarse que en el mes de octubre del año 2014, la evapotranspiración de referencia se iguala al aporte de las precipitaciones. Luego, ya desde el mes de noviembre, la evapotranspiración supera con creces los aportes hídricos naturales, pero dada la naturaleza de la agricultura que se practica en el sur del país, generalmente no se aplican riegos.

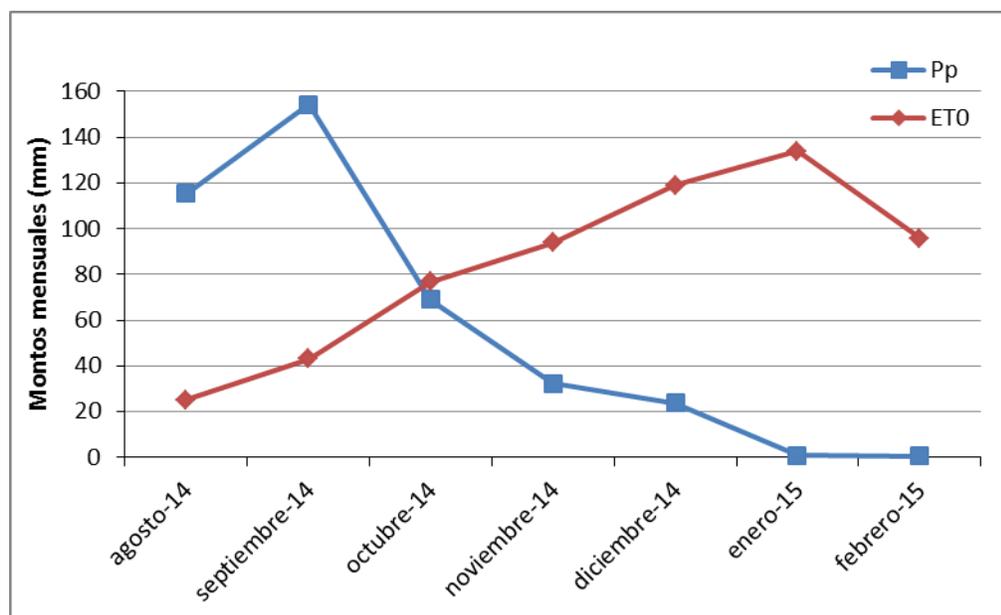


Figura 1. Montos mensuales de precipitación (Pp) y evapotranspiración de referencia (ET0) de la Comuna de Teodoro Schmidt durante el ensayo.

El sector en investigación posee un historial de rotación trigo-papa en agricultura de secano, en que siempre se ha realizado labranza tradicional con quema del rastrojo del trigo. En forma adyacente, existe un bosque nativo en que predominan especies como el Maqui (*Aristotelia chilensis*), Hualle (*Nothofagus obliqua*), Avellano (*Corylus avellana*) y Zorzamora (*Rubus ulmifolius*). Éste posee un tiempo mayor a 20 años sin intervenciones antrópicas, por lo que se presume corresponde a un bosque del tipo primario. Para efectos del ensayo, se utilizó como enmienda de suelo un ácido húmico (POW Humus, gránulos solubles en agua - WSG 85%), producido por la empresa alemana HuminTech en base al mineral Leonardita, y que es distribuido en Chile por la empresa AM Ecological.

Método

Manejo del cultivo

El suelo fue preparado en los meses de julio y agosto del año 2014. Primeramente, se eliminaron las malezas aplicando una combinación de herbicidas sistémicos, AJAX 50 WP y RANGO 480 SL, en dosis de 10 gr ha⁻¹ y 2 L ha⁻¹ respectivamente para su control. Como unidades experimentales se delimitaron parcelas de 20 m² con la utilización de estacas y se preparó el suelo con una rastra de púas, un arado de discos y nuevamente un rastraje de púas, obteniéndose un buen mullimiento. Posterior al primer rastraje de púas, se aplicó ácido húmico en las parcelas correspondientes al tratamiento T1, diluyendo 30 gramos en 20 litros de agua, esparciéndolo uniformemente por toda unidad experimental con la ayuda

de una bomba de espalda. Con esta aplicación, se obtuvo una dosificación a nivel de campo de 15 kg ha^{-1} .

Para la fertilización del predio, se tomó en el mes de julio una muestra compuesta y se envió a analizar a laboratorio. En base a los resultados, se aplicó una fertilización nitrogenada de urea, parcializándola en tres momentos: 20% siembra, 40% inicio de macolla, 40% fin de macolla, aportando un total de 140 kg N ha^{-1} calculado en base a un rendimiento teórico de 7.500 kg ha^{-1} . Además, se aplicaron 77 kg ha^{-1} de P_2O_5 y 16 kg ha^{-1} de K_2O .

La siembra, realizada el día 15 de agosto del año 2014, se realizó de forma mecanizada, con una dosis de 250 kg ha^{-1} de semilla de trigo (*Triticum aestivum*) no certificada de la variedad Otto Baer. Por último, la cosecha se realizó el día 7 de febrero también de manera mecanizada, con la utilización de una cosechadora John Deere y una tolva para el traslado del trigo y su embolsado.

Tratamientos del ensayo

Los tratamientos establecidos fueron los siguientes:

- T0: Testigo, sin aplicación de ácido húmico.
- T1: Aplicación de ácido húmico en una dosis de 15 kg ha^{-1} .
- T2: Suelo nativo, sin intervención antrópica.

Cada tratamiento contó con 4 repeticiones, definidas cada una por la unidad experimental, que consistió en parcelas de 20 m^2 de superficie, vale decir, de 10 m de largo (en el sentido de la pendiente) por 2 m de ancho, distribuidas en un diseño de bloques completos al azar dada la heterogeneidad entre las unidades experimentales y la homogeneidad dentro de ellas.

Se tomaron muestras de suelo a profundidades de 0-10 cm y 30-40 cm, seleccionadas en función de la densidad de enraizamiento, ya que según Wilson y Valenzuela (1998), en sistemas agroecológicos con abundantes precipitaciones, la mayor densidad del sistema radical del trigo se localiza en los primeros 10 cm de suelo, disminuyendo en forma considerable conforme aumenta la profundidad del mismo. En segundo lugar, cabe destacar que el arado de disco tiene efectividad sobre los primeros 10 cm de suelo, por lo cual, las profundidades seleccionadas permiten inferir sobre el efecto de la preparación del suelo en la incorporación del producto.

El muestreo se realizó en dos fechas (14 de agosto y 2 de enero), aproximadamente uno y seis meses después de la aplicación del ácido húmico, con el fin de contrastar una situación de invierno con aporte de precipitaciones respecto a una situación de verano, en ausencia de éstas. Además, las fechas fueron elegidas para ver el efecto del cultivo sobre el suelo, ya que las mediciones se ajustan al inicio y fin del ciclo en el trigo.

Propiedades evaluadas

Se evaluaron las siguientes propiedades físicas en las muestras de suelo:

- Textura, por el método del hidrómetro de Bouyoucos (Gee y Or, 2002) y densidad real, por el método del picnómetro (Sandoval *et al.*, 2012). Cabe destacar que ambas evaluaciones fueron realizadas sólo en la primera fecha de muestreo, dado que corresponden a propiedades estables en el tiempo.
- Densidad aparente, por el método del cilindro (Sandoval *et al.*, 2012).
- Distribución de tamaño de poros y curva característica mediante cama de arena, olla y platos de presión (Sandoval *et al.*, 2012). Para esto se utilizaron muestras de suelo sin disturbar obtenidas con cilindros de muestreo de 5,9 cm de diámetro y 5 cm de altura. Comenzando con muestras saturadas, se realiza un proceso de desaturación a tensiones de 0,2; 6 y 33 kPa de presión en cama de arena y plato de presión hasta alcanzar el equilibrio mátrico. Para determinar el contenido de agua a tensiones de 300 y 1500 kPa se utilizaron muestras de suelo disturbadas en una olla de presión (Sandoval *et al.*, 2012), convirtiendo el contenido de agua en base a masa (P_w) a contenido volumétrico de agua (P_v) mediante la fórmula $P_v = P_w * D_a$ donde D_a es la densidad aparente determinada anteriormente. Según Sandoval *et al.* (2012), con los datos de la curva de retención de agua, los poros de drenaje rápido (PDR, $>50 \mu m$) se calcularon como la diferencia entre la porosidad total y la porosidad en equilibrio a -6 kPa; los poros de drenaje lento (PDL, 10-50 μm) se calcularon como la diferencia entre el contenido de agua a -6 y -33 kPa, en tanto los poros de agua útil (PAU, 0,2-10 μm) se calcularon como la diferencia entre la retención de agua a -33 y -1500 kPa.
- Estabilidad de los microagregados, la cual se determinó mediante el método de la relación de dispersión (RD), que mide la dispersión de agregados de entre 1 y 2 mm basado en la metodología del hidrómetro de Bouyoucos (Seguel *et al.*, 2003).
- Estabilidad de los macroagregados, la cual se midió mediante la variación del diámetro medio ponderado (VDMP) entre un tamizado en seco y un tamizado en húmedo (Hartge y Horn, 2009). La metodología consiste en pasar la muestra de suelo no disturbada y secada al aire por tamices de tamaños decrecientes (19 - 9,5 - 6,35 - 4,75 - 3,35 y 2 mm). En cada uno de los tamices se determinó la masa de suelo presente después del tamizado. Posteriormente se realizó un tamizaje con los mismos diámetros, pero sumergido en agua, donde se determinó la masa de suelo seco a 105°C presente en cada tamiz. Con las curvas de fracciones acumuladas en seco y saturado se determinó la estabilidad de los agregados mediante el índice VDMP, en que el menor valor denota la mayor estabilidad (Hartge y Horn, 2009). Dado que post preparación de suelo no se encontraron macroagregados naturales, esta prueba solo se realizó en la segunda fecha de medición.

Para la determinación del rendimiento se tomó un metro lineal de cada unidad experimental, superficie que se extrapoló a un metro cuadrado para inferir sobre componentes como la materia seca, el peso de granos, el número de granos/espiga, número de espigas/planta y finalmente la producción por hectárea.

En una primera instancia se extrajo la biomasa aérea, cortándola a ras de superficie; a partir de ella, se separaron las espigas de las plantas y se contabilizaron. Los tallos de trigo, se llevaron a estufa a 60°C de temperatura durante 48 horas con el fin de evaporar todo el contenido de agua mediante calor. Se realizó un pesaje antes y después del secado para obtener los valores de materia fresca aérea y materia seca aérea. Con respecto al peso y número de granos por metro lineal, estos fueron obtenidos desgranando las espigas manualmente, separando las brácteas de las espiguillas y dejando únicamente el grano maduro. Este último fue contabilizado y posteriormente pesado.

Análisis estadístico

El diseño correspondió a bloques completos al azar con tres tratamientos y cuatro repeticiones. La unidad experimental fue una parcela de 20 m², tomando muestras del suelo a dos profundidades (0–10 y 30–40 cm). Los resultados se compararon entre tratamientos mediante un análisis de varianza (ANDEVA) y cuando fue necesario se utilizó la prueba de comparación múltiple de Tukey ($p \leq 0,05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades físicas del suelo

Textura

La textura representa el porcentaje en que se encuentran las partículas sólidas que constituyen el suelo. Se dice que un suelo tiene una buena textura cuando la proporción de los elementos que lo constituyen le dan la posibilidad de ser un soporte capaz de favorecer la fijación del sistema radicular de las plantas y suministrar agua y nutrientes (Porta, 2003).

Al respecto, se determinó que el suelo en estudio corresponde a una clase textural Franco a Franco limosa, lo que coincide con lo indicado por CIREN (2002) para la Serie de suelo Correltúe. En el Apéndice 1 se presenta el detalle de los separados texturales.

Densidad real

La densidad real (D_r) corresponde a la densidad media de la fase sólida o densidad de las partículas. Para un horizonte dado será prácticamente constante a lo largo del tiempo, al ser independiente de la estructura y variar poco la naturaleza de las partículas (Porta, 2003). Por este motivo, esta propiedad se evaluó sólo en la primera fecha de muestreo. Los resultados se detallan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Densidad real del suelo según profundidad y tratamiento.

| Tratamiento | Densidad real (Mg m^{-3}) | |
|-----------------|--------------------------------------|-------|
| | Profundidad (cm) | |
| | 0-10 | 30-40 |
| | Agosto 2014 | |
| Testigo (T0) | 2,60 | 2,75 |
| Ác. Húmico (T1) | 2,59 | 2,71 |
| Nativo (T2) | 2,37 | 2,51 |

Para suelos derivados de ceniza volcánica, Sandoval et al. (2012) reportan un rango de valores de densidad real del orden de los 2,41 a 2,76 Mg m^{-3} . A su vez, Nissen et al. (2005) en un estudio sobre la variación del potencial mátrico en Andisoles del sur del país, obtuvieron valores de densidad real entre los 2,01 y 2,22 Mg m^{-3} . Estas variaciones se deben principalmente a la composición mineralógica del suelo, al material parental del que provienen y al contenido de materia orgánica. Prueba de ello son los resultados obtenidos en el tratamiento de bosque nativo (T2), en que los valores de ambas profundidades son más bajos que en los otros tratamientos, en que prácticamente no hubo variación. La baja densidad real de T2, se explica por el alto contenido de materia orgánica presente en estos

suelos, favorecido por la hojarasca acumulada temporada tras temporada. Lo anterior, se ha demostrado ampliamente por autores como Seguel y Horn (2006) y Ellies *et al.* (2000), quienes en estudios sobre suelos volcánicos demostraron que el contenido de materia orgánica disminuye fuertemente en profundidad y al cambiar el uso desde un bosque nativo a agricultura tradicional, lo que generará una fuerte dependencia de las propiedades físicas con respecto a la materia orgánica.

Densidad aparente

La densidad aparente (D_a) es una propiedad dinámica del suelo, susceptible a la acción antrópica o a las raíces de las plantas cuando penetran en éste (Reynolds *et al.*, 2009). Es definida como la masa por unidad de volumen de suelo y está relacionada directamente con la porosidad total, el espacio disponible en el suelo para el movimiento de gases y agua y el desarrollo de las raíces (Warrick, 2002). El Cuadro 2 presenta los resultados según fecha de muestreo.

Cuadro 2. Densidad aparente del suelo según profundidad y tratamiento para dos fechas de medición.

| Tratamiento | Densidad aparente ($\text{Mg m}^{-3} \pm \text{DE}$) | |
|-----------------|--|----------------------|
| | Profundidad (cm) | |
| | 0-10 | 30-40 |
| | Agosto 2014 | |
| Testigo (T0) | 1,01($\pm 0,06$) b | 0,95($\pm 0,02$) b |
| Ác. Húmico (T1) | 0,88($\pm 0,10$) b | 0,54($\pm 0,03$)a |
| Nativo (T2) | 0,67($\pm 0,03$)a | 0,55($\pm 0,03$)a |
| | Enero 2015 | |
| Testigo (T0) | 0,99($\pm 0,03$) c | 0,92($\pm 0,11$) b |
| Ác. Húmico (T1) | 0,86($\pm 0,04$) b | 0,60($\pm 0,11$)a |
| Nativo (T2) | 0,63($\pm 0,07$)a | 0,59($\pm 0,04$)a |

Letras diferentes en una columna indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos a una misma profundidad de acuerdo con test de Tukey ($p < 0,05$).

A pesar que la D_a depende, entre otros, de la estructura, el contenido de agua, la mineralogía y la clase textural del suelo, existen valores típicos esperables (Sandoval *et al.*, 2012). De acuerdo a lo anterior, para suelos de origen volcánico y utilizando el método del cilindro, se estima un valor de D_a menor a los $0,9 \text{ Mg m}^{-3}$, siendo un rango adecuado, entre los $0,3$ y $0,95 \text{ Mg m}^{-3}$ según lo observado por Casanova *et al.* (2008) y reafirmado por los valores obtenidos en el presente estudio. Una vez más, altos contenidos de materia orgánica inciden sobre la variable en discusión, generando densidades aparentes menores en el tratamiento T2. Al respecto, Fuentes *et al.* (2011) reportan niveles de materia orgánica superficial, en bosques nativos de la zona sur de Chile, que duplican a los niveles encontrados en profundidad; a su vez indican que al cabo de 100 años de actividad agrícola estos niveles disminuyen a menos de la mitad, lo que explica la pérdida de estabilidad estructural, con incrementos de la D_a . Lo anterior explica los valores inferiores de D_a obtenidos en T1 y T2, independiente de la profundidad de muestreo y el momento en que se

realizó. Por otra parte, el descenso de la Da en profundidad es característico de los suelos derivados de ceniza volcánica y depende exclusivamente de la mineralogía y la pedogénesis de estos suelos (CIREN, 2002; Seguel y Horn, 2006).

Por otro lado, la Da puede ser utilizada como indicador de la compactación del suelo, pero debe ser necesariamente complementada con otro tipo de mediciones, como la distribución del tamaño de poros, la resistencia a la penetración o la capacidad de flujo de agua o aire, ya que la Da es una propiedad de baja significancia respecto a la funcionalidad física del suelo (Horn y Fleige, 2009).

Distribución de tamaño de poros

El espacio vacío de la matriz del suelo es donde se almacena el agua y aire que absorben e intercambian las raíces de las plantas. Éste se denomina espacio poroso (EP) y expresa la cantidad de vacíos en relación al volumen total del suelo. Para definir la capacidad que tiene el suelo para almacenar agua y aire, se realiza la determinación de la curva de retención de agua o curva pF (Figura 2). A partir de ella es posible derivar la distribución del tamaño de poros (Cuadro 3).

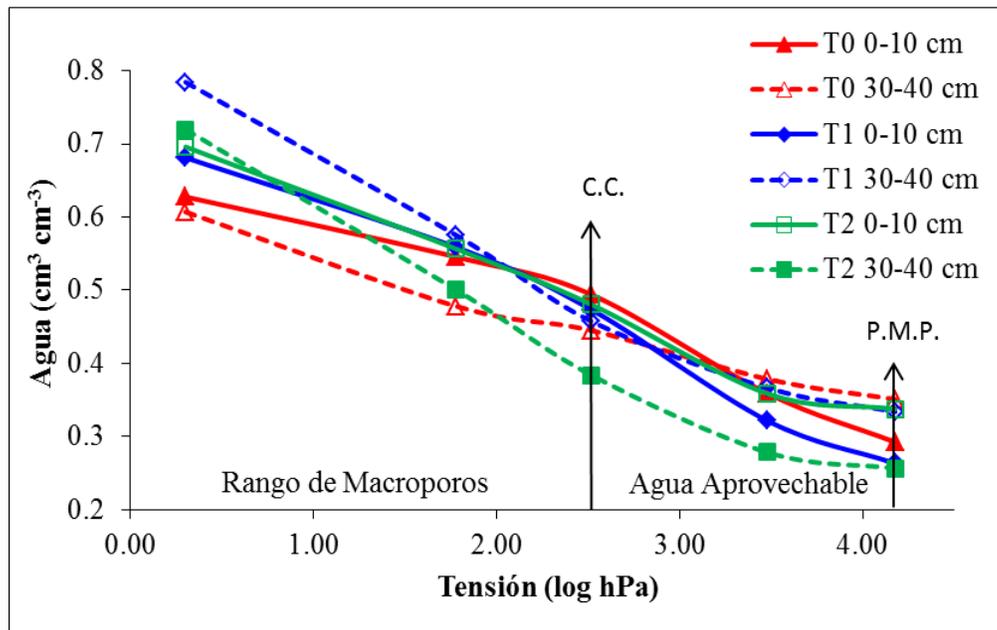


Figura 2. Curva característica del suelo en el mes de agosto. Los valores de tensión fueron transformados a la función logarítmica para expresar la curva pF. C.C. corresponde al valor clásico de capacidad de campo (-33 kPa) y P.M.P. corresponde a la retención de agua en el punto de marchitez permanente (-1500 kPa).

Cuadro 3. Distribución de tamaño de poros según tratamiento y profundidad.

| Porosidad (% ± DE) | | |
|---|---|--------------|
| Tratamiento | Poros de drenaje rápido (PDR, >50 µm) | |
| | Profundidad (cm) | |
| | 0-10 | 30-40 |
| Agosto 2014 | | |
| Testigo (T0) | 8,2(±2,9) | 12,9(±1,4) a |
| Ác. Húmico (T1) | 12,3(±6,6) | 20,9(±0,8) b |
| Nativo (T2) | 13,9(±2,0) | 21,9(±4,6) b |
| Enero 2015 | | |
| Testigo (T0) | 18,6(±2,6) | 23,4(±3,9) |
| Ác. Húmico (T1) | 18,7(±2,8) | 21,7(±3,5) |
| Nativo (T2) | 20,7(±4,4) | 22,8(±6,7) |
| Poros de drenaje lento (PDL, 10-50 µm) | | |
| Agosto 2014 | | |
| Testigo (T0) | 5,2(±0,5) a | 3,3(±0,4) a |
| Ác. Húmico (T1) | 8,5(±0,6) b | 11,8(±2,2) b |
| Nativo (T2) | 7,6(±1,6) b | 11,7(±1,0) b |
| Enero 2015 | | |
| Testigo (T0) | 6,6(±1,2) a | 6,2(±1,6) a |
| Ác. Húmico (T1) | 12,0(±1,1) b | 12,3(±2,5) b |
| Nativo (T2) | 5,9(±1,5) a | 15,5(±1,6) b |
| Poros de agua útil (PAU, 0,2-10 µm) | | |
| Agosto 2014 | | |
| Testigo (T0) | 20,1(±3,3) | 9,4(±1,6) |
| Ác. Húmico (T1) | 21,0(±2,4) | 12,4(±6,2) |
| Nativo (T2) | 14,3(±4,9) | 12,7(±4,0) |
| Enero 2015 | | |
| Testigo (T0) | 16,9(±3,6) | 14,5(±1,8) a |
| Ác. Húmico (T1) | 18,6(±1,9) | 26,0(±3,2) b |
| Nativo (T2) | 12,6(±5,5) | 21,0(±2,0) b |

Letras diferentes en una columna indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos a una misma profundidad de acuerdo con test de Tukey ($p < 0,05$).

De acuerdo a la Figura 2, mientras más inclinadas sean las curvas, mayor es el diferencial en la retención del agua, lo que se interpreta como un mayor volumen de poros en el rango respectivo. Así, el tratamiento T0 es el que presenta las curvas con menor pendiente, lo que denota un bajo desarrollo de poros, en tanto en el tratamiento T1, entre 30 y 40 cm de profundidad acusa una alta porosidad total (intercepto con el eje Y), cercana al 80%. De acuerdo al Cuadro 2, se concluye que en cuanto a los poros de drenaje rápido (PDR), las mediciones de agosto entre 30 y 40 cm de profundidad son las únicas que muestran resultados estadísticamente significativos. En ellas, el tratamiento con aplicación de ácido húmico se igualó al bosque nativo, superando en aproximadamente un 62% al tratamiento testigo, situación que no se presentó en el mes de enero, donde el T0 aumentó su

macroporosidad, posiblemente como consecuencia del crecimiento de raíces en profundidad que vino a revertir el efecto de las cargas mecánicas asociadas a la preparación de suelos (Uslowicz y Lipiec, 2009). Es vital recalcar la importancia de la alta macroporosidad superficial, ya que los PDR están directamente relacionados con la velocidad de infiltración, disminuyendo la erosión en condiciones con pendiente y ausencia de cobertura vegetal (Casanova et al., 2013), condición típica de los sistemas de labranza tradicional del sur de Chile. Además, la macroporosidad favorece la renovación del aire hacia la zona de raíces (Seguel et al., 2013), delineando una adecuada relación agua-aire con miras a un óptimo desarrollo del cultivo.

A nivel de propiedades físicas, el suelo debe asegurar el adecuado suministro de aire y agua para los cultivos (Letey, 1985), requiriéndose un mínimo de un 8% de PDR para mantener un adecuado intercambio de gases hacia el sistema radical (Horn y Fleige, 2009). En este sentido, al cabo de un mes de realizada la labranza, el tratamiento testigo (T0) se encontraba con el límite de poros gruesos para manifestar restricciones al cultivo, en tanto el tratamiento con ácido húmico y el sitio nativo presentaban valores adecuados y similares entre sí en toda la profundidad controlada. Sin embargo, al transcurrir la temporada, los ciclos de humectación y secado favorecen la recuperación estructural (Semmel et al., 1990), al punto que el tratamiento T0 incrementó los macroporos y desaparecieron las diferencias entre los tratamientos.

En cuanto a los poros de drenaje lento (PDL), en todas las situaciones la aplicación de ácido húmico mejoró la condición porosa del suelo, equiparándolo a valores similares al bosque nativo y superando en más de un 50% los valores del testigo. Los PDL juegan un rol dual para los requerimientos de las plantas, ya que contribuyen a drenar el exceso de agua del suelo, favoreciendo la aireación hacia el sistema de raíces, pero a una tasa menor que los PDR, por lo que se constituyen en un aporte de agua muy fácilmente disponible para la etapa inicial de evapotranspiración de los cultivos posterior a una lluvia o un riego (Reynolds et al., 2009).

Con respecto a los poros de agua útil (PAU), en todas las circunstancias la aplicación de ácido húmico confirió un leve aumento en esta propiedad, aunque sin diferencias estadísticamente significativas, excepto en la medición de enero entre 30 y 40 cm, en que T1 mostró aproximadamente un 50% mayor contenido de PAU con respecto a T0, igualándose a la situación nativa (T2). Este parámetro da una idea de la capacidad de estanque de agua del suelo, primordial en la agricultura de secano, ya que implica una mayor disponibilidad de agua durante los meses secos de la Región.

Al respecto, considerando los datos de la Figura 1 y la capacidad de almacenamiento de agua aprovechable del suelo, se puede realizar un balance hídrico, el que resulta en un déficit hídrico a partir de finales de noviembre en T0. Para el caso del tratamiento con aplicación de ácido húmico (T1), este estrés se retrasa hasta mediados de diciembre, lo que genera una mejor condición para el cultivo al momento del llenado de granos.

Retomando los resultados de la densidad aparente y apoyados con los datos de porosidad, se observa en T1 una condición con valores que se acercan a la situación del sitio nativo entre 30 y 40 cm, el cual ha desarrollado una pedogénesis natural, sin aplicación de cargas externas, a diferencia de los sitios con cultivos tradicionales. En este sentido, el ácido húmico es efectivo en contribuir a la recuperación de la porosidad del suelo, en tanto el T0 se mantiene en valores de D_a cercanos a 1 Mg m^{-3} , lo que para un suelo de esta naturaleza podría estar acusando un estado de sobre densificación (Ellies et al. 1995, Dörner et al. 2009).

Finalmente, cabe destacar en este punto del escrito, que no se realizaron comparaciones entre las distintas profundidades de suelo dado que no se esperaban cambios tan sustanciales no tan solo en los primeros centímetros de suelo, sino que también, a mayor profundidad.

Estabilidad de agregados

Además de las enmiendas orgánicas, los cultivos tienen gran influencia en la agregación. Las raíces, especialmente las finas, y las sustancias orgánicas liberadas por ellas, contribuyen en la formación de agregados. Además, los agregados del suelo que forman parte de la estructura, son importantes para mantener la porosidad del suelo y proveer estabilidad contra la erosión (Lupwayi et al., 2001). De lo anterior se desprende la idea que la estabilidad de agregados sirve como indicador de la degradación del suelo (Cerdà, 2000). El Cuadro 4 presenta los resultados obtenidos para la prueba de estabilidad de macroagregados, en tanto el Cuadro 5, presenta los resultados de microagregados. En ambos casos, valores menores denotan mayor estabilidad de agregados.

Cuadro 4. Valor del diámetro medio ponderado según tratamiento y profundidad.

| Tratamiento | VDMP (cm ± DE) | |
|------------------------|-------------------|-----------------|
| | Profundidad (cm) | |
| | 0-10 | 30-40 |
| | Enero 2015 | |
| Testigo (T0) | 1,08(±0,69) b | 2,50(±1,18) b |
| Ác. Húmico (T1) | 1,02(±0,31) b | 0,80(±1,23) a b |
| Nativo (T2) | 0,00(±0,01) a | 0,00(±0,00) a |

Letras diferentes en una columna indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos a una misma profundidad de acuerdo con test de Tukey ($p < 0,05$).

De acuerdo a los resultados del Cuadro 4, la estabilidad de macro agregados no presentó diferencias entre la aplicación de ácido húmico y el testigo, aunque en profundidad T1 mostró una tendencia a ser más estable (menor VDMP) que T0. Cabe destacar, que el valor alcanzado por el tratamiento nativo, confiere al suelo una extraordinaria estabilidad de sus agregados y que, a pesar de que no se obtuvieron datos lo suficientemente claros como para establecer diferencias con la aplicación de la enmienda en la estabilidad de macroagregados, los valores obtenidos en este estudio, distan bastante de los valores típicos

mostrados por suelos de la zona centro norte del país. Según Mendoza (2014), en un estudio que incluyó cuatro series de suelo de textura contrastante, el VDMP en suelos de la zona centro del país fluctúa entre 5,79 y 7,93 para suelos arados, y entre 0,7 a 3,73 en suelos sin intervención, valores que fácilmente doblan los obtenidos en este estudio y que reflejan la excelente condición estructural de estos suelos (Fuentes et al., 2011).

Cuadro 5. Relación de dispersión del suelo (RD) según tratamiento y profundidad. Valores menores, denotan mayor estabilidad de agregados.

| Tratamiento | Relación de Dispersión (% ± DE) | |
|------------------------|---------------------------------|------------|
| | Profundidad (cm) | |
| | 0-10 | 30-40 |
| | Agosto 2014 | |
| Testigo (T0) | 15,5(± 1,8) a b | 4,8(±2,7) |
| Ác. Húmico (T1) | 28,4(±14,6) b | 12,1(±9,1) |
| Nativo (T2) | 1,5(± 0,2) a | 6,0(±1,5) |
| | Enero 2015 | |
| Testigo (T0) | 13,0(± 2,8) | 11,2(±1,3) |
| Ác. Húmico (T1) | 16,7(± 1,5) | 16,3(±5,7) |
| Nativo (T2) | 15,3(±12,8) | 17,4(±4,9) |

Letras diferentes en una columna indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos a una misma profundidad de acuerdo con test de Tukey ($p < 0,05$).

Con respecto a los microagregados del suelo, la relación de dispersión muestra diferencias estadísticamente significativas solo en los primeros 10 centímetros en la medición de agosto, en que el tratamiento con ácido húmico denota una menor estabilidad en relación al sitio nativo (mayor RD), aunque las diferencias desaparecieron en profundidad y con el transcurso de la temporada. De acuerdo a Aravena (2014), el ácido húmico tiene la facultad de separar los clústeres de arcillas (microagregados) como parte de su acción para incrementar el agua aprovechable del suelo, lo que en este caso se pudo manifestar como una menor estabilidad según la prueba de laboratorio. Aun así, todos los valores fueron muy estables según Berryman et al. (1982) y dentro de los rangos esperables según Fuentes et al. (2013).

Componentes de rendimiento

El Cuadro 6 presenta los componentes de rendimiento, evaluados en un metro lineal por repetición y llevados a unidad de superficie en función de la distancia entre hileras.

Cuadro 6. Componentes de rendimiento del cultivo de trigo. Donde T0: Testigo; T1: Tratamiento con ácido húmico.

| | Espigas (N°/m²) | N° granos /espiga | Masa Grano (mg) | Rendimiento (qq ha⁻¹) | Materia Seca (g) |
|-----------|---------------------------------------|------------------------------|----------------------------|---|-----------------------------|
| T0 | 683(±124) | 28,6(±3,4) a | 47,2(±2,1) | 92,3(±20,29) | 108,38(±22,1) a |
| T1 | 722(±37) | 34,1(±1,4) b | 46,4(±1,9) | 114,5(± 9,14) | 162,25(±14,5) b |

Letras diferentes en una columna indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos de acuerdo con test de Tukey ($p < 0,05$).

De acuerdo al Cuadro 6, no existieron diferencias estadísticamente significativas en la producción de trigo por efecto de la aplicación de ácido húmico, pero se observa que existe una tendencia a aumentar el rendimiento en un 24% con respecto al testigo, lo que destaca la acción del ácido húmico como una alternativa concreta para alcanzar el potencial productivo de los cultivos. Aun así, los resultados de ambos tratamientos fueron mayores a lo esperado en base al área agroecológica de la Región de la Araucanía, los cuales según ODEPA (2015) alcanzan los 53,2 qq/ha en promedio.

Considerando que el ensayo se realizó con cuatro repeticiones, resulta necesario destacar que en la desviación estándar existe una tendencia sobre el rendimiento, el cual alcanzó valores de 20,29 y 9,14 qq ha⁻¹ respectivamente para el testigo y el tratamiento con enmienda, es decir, este último logra un cultivo mucho más homogéneo, con un coeficiente de variación (CV) de 8%, versus el CV de 22% en el control. La mayor homogeneidad del tratamiento con ácido húmico podría relacionarse a una mayor estabilidad de los rendimientos en el tiempo, tal como plantea Pan et al. (2009), quienes señalan que los manejos del suelo con enmiendas orgánicas producen como efecto secundario una mayor estabilidad temporal, generando menores efectos negativos por eventos climáticos adversos.

En definitiva, la mejor condición física en el tratamiento con ácido húmico, con un equilibrio en las fracciones de agua y aire, generó 50% más de biomasa en T1; a su vez, favoreció la fecundación y el posterior llenado de granos, con 34,1 granos por espiga, versus 28,6 granos por espiga en el testigo. Por último, el peso por grano no se vio afectado por la aplicación de la enmienda, ya que ambos tratamientos registraron un valor similar. Todas estas características explicaron el mayor rendimiento en el tratamiento T1, en cuyo caso una mayor disponibilidad hídrica permite sustentar un mayor número de granos por espiga.

CONCLUSIONES

El uso de una enmienda a base de ácido húmico en un suelo de la zona sur de Chile cultivado con trigo, trajo beneficios directos a las propiedades físicas del suelo, con disminución de la densidad aparente e incrementos tanto de la porosidad gruesa como de la retención de agua aprovechable por el cultivo. Este efecto se vio hasta una profundidad de 40 cm y persistió al cabo de 6 meses de realizada la aplicación.

El mejor balance agua-aire promovido por el ácido húmico favoreció el llenado de granos por espiga, sin afectar el peso del grano, lo que se tradujo en una tendencia a presentar un 24% más de rendimiento respecto al testigo. Además, se generó un cultivo más homogéneo y con menor variabilidad espacial.

BIBLIOGRAFÍA

- Aravena, A. 2014. Evaluación del efecto de manejos de poda y enmiendas al suelo sobre el potencial hídrico de los brotes de olivos (*Olea europaea l.*) sometidos a déficit hídrico absoluto en la Región de Coquimbo. Memoria Ingeniero Agrónomo. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 40 p.
- Baldotto, L.; Baldotto, M.; Giro, V.; Canellas, L.; Olivares, F.; Bressan-Smith, R. 2009, janeiro. Desempenho do abacaxizeiro 'Vitória' em resposta aplicação de ácidos húmicos durante a aclimatação. Em: Revista Brasileira de Ciência do Solo. 33: 979-990.
- Berryman, C., D. Davies, C. Evans, M. Harrod, A. Hughes, R. Skinner *et al.* 1982. Soil Structure and Mechanical Properties (pp. 39-74). In: Techniques for measuring soil physical properties. University of California, Los Angeles. 115 p.
- Canellas, L.; Zandonadi, D.; Olivares, F.; Façanha, A. 2006, julho. Efeitos fisiológicos de substâncias húmicas - o estímulo s H⁺-ATPases. Em: Revista Brasileira de Ciência do Solo. 7: 175-200.
- Casanova, M.; Seguel, O.; Haberland, J. y Kremer, C. 2008, agosto. Propiedades físicas: Indicadores de calidad y salud de suelos. En: Revista Antumapu 6(1-2): 32-34.
- Casanova, M.; Salazar, O.; Seguel, O.; Luzio, W. 2013. The Soils of Chile. Hartemink, A. (Ed.). World Soils Book Series. Springer, Dordrecht. 185 p.
- Cerdà, A. 2000, november. Aggregate stability against water forces under different climates on agriculture land and scrubland in southern Bolivia. In: Soil and Tillage Research 57: 159- 166.
- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales). 2002. Estudio Agrológico IX Región. Descripciones de suelos, materiales y símbolos. Publicación N°122 Chile. 338 p.
- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales). 2010. Determinación de la erosión actual y potencial de los suelos de Chile. Santiago, Chile. 185 p.
- Cortés, A. 2011. Estabilización física de camellones con paltos vía enmiendas orgánicas/cultivo de cobertura, IV Región de Chile. Memoria Ingeniero Agrónomo. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 49 p.
- Dörner J.; D. Dec; X. Peng y R. Horn. 2009. Efecto del cambio de uso en la estabilidad de la estructura y función de los poros de un andisol (typic hapludand) del sur de Chile. En: Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal. 9(3): 190-209.

Ellies, A.; R. Grez y C. Ramírez. 1995. Potencial de humectación y estabilidad estructural de los agregados de suelos sometidos a diferentes manejos. En: *Agricultura Técnica*. 55(3-4): 220-225.

Ellies, A., R. Horn, R. Smith. 2000. Effect of management of a volcanic ash soil on structural properties. En: *International Agrophysics*. 14: 377-384.

Fernández, P. 2013. Cambio en las propiedades físicas de un suelo con camellones tratado con dos fuentes ácidas, V Región de Chile. Memoria Ingeniera Agrónoma. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 36 p.

Fuentes, I.; Seguel, O. y Casanova, M. 2011, julio. Degradación física de suelos de la zona central versus suelos volcánicos del sur de Chile. Simposio nacional de la ciencia del suelo. (Bol. Tec. N°24), Sociedad Chilena de la ciencia del suelo, Universidad de Chile. Santiago, Chile. 173 p.

Fuentes, I.; Seguel, O. y Casanova, M. 2013. Elasto-plastic behaviour of soil aggregates and the soil matrix as a function of physical properties in three soils of Central Chile. pp: 72-88. In: *Catena Verlag*. Soil Degradation, Advances in GeoEcology 42, Chapter I: Soil Strength, Soil Deformation and Soil Regeneration. Reiskirchen, Germany.

Gee, G. W., Or, D. 2002. Particle size analysis. pp: 255-293. In: Dane, J. H. and Topp, G.C. (Eds.) *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods*. Soil Science Society of America. Book Series N° 5. Madison, Wisconsin, USA. 1692 p.

Hartge, K.; Horn, R. 2009. *Die physikalische Untersuchung von Böden*. E. 4 Auflage. Stuttgart, Germany. 179 p.

Havlin, J. L.; Beaton, J. D.; Tisdale, S. L.; Nelson, W. L. 2013. *Soil fertility and fertilizers. An introduction to nutrient management*. Prentice Hall. New Jersey, USA. 528 p.

Horn, R.; Fleige, H. 2009, march. Risk assessment of subsoil compaction for arable soils in Northwest Germany at farm scale. In: *Soil and Tillage Research* 102: 201-208

Imbufe, A.; Patti, A.; Borrow, D.; Surapaneni, A.; Jackson, W.; Milner, A. 2005, april. Effects of potassium humate on aggregate stability of two soils from Victoria, Australia. In: *Geoderma* 125 (3-4): 321-330.

Jano, P. 2003, january. Separation methods in the chemistry of humic substances. In: *Journal of Chromatography A*: 983 (1-2): 1-18.

Jordan, A.; Zavala, L.; Gil, J. 2010, april. Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain. In: *Catena* 81 (1): 77-85.

- Letey, J. 1985. Relationship between soil physical properties and crop production. In: *Advances in Soil Science* 1: 277-294.
- Lupwayi, N.; Arshad, M.; Rice, W.; Clayton, G. 2001, march. Bacterial diversity in water-stable aggregates of soil under conventional and zero tillage management. *Applied Soil Ecology*. 16 (3): 251-261.
- Luzio W., Casanova M., Seguel O. 2010. Suelos de Chile. Luzio W. (Editor). Universidad de Chile. 346 p.
- Marín, E. 2011. Estabilización de camellones con cultivo de mandarina (*Citrus reticulata*) mediante el uso de dos fuentes de materia orgánica, IV Región de Chile. Memoria Ingeniero Agrónomo. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 34 p.
- Marqués, J.; Canellas, L.; Silva, L.; Olivares, F. 2008, julho. Promoção de enraizamento de microtoletes de cana-de-açúcar pelo uso conjunto de substâncias húmicas e bactérias diazotróficas endofíticas. *Em: Revista Brasileira de Ciência do Solo* 32: 1121-1128.
- Mendoza, C. 2014. Validación de tres índices de deterioro estructural en base a las propiedades mecánicas del suelo. Memoria Ingeniero Agrónomo. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 38p.
- Nissen, J.; Quiroz, C.; Seguel, O.; Mac Donald, R.; Ellies, A. 2005, junio. Variación del potencial mátrico durante el movimiento de agua en Andisoles. En: *Agrosur* 33 (1): 36-47.
- ODEPA (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias), Chile. 2015. Cultivos anuales: superficie, producción y rendimientos. [en línea]. Santiago, Chile. Recuperado en: <http://www.odepa.cl/wp-content/uploads/2014/08/cultivosAnualesHistorico2.xls>
- Pan, G.; Zhou, P.; Li, Z.; Pete, S.; Li, L.; Qiu, D, *et al.* 2009, june. Combined inorganic/organic fertilization enhances N efficiency and increases rice productivity through organic carbon accumulation in a rice paddy from the Tai Lake region, China. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment* 131 (3-4): 274-280.
- Piccolo, A. 2002. The supramolecular structure of humic substances: A novel understanding of húmus chemistry and implications in soil science. In: *Advances in Agronomy* 75: 57-134.
- Porta, J. 2003. Morfología y descripción de suelos. pp: 37-59. En: *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*. Tercera Edición. España. 929 p.
- Reynolds, W.; Drury, C.; Tan, C.; Fox, C; Yang, X. 2009, september. Use of indicators and pore volume-function characteristics for quantify soil physical quality. In: *Geoderma* 152 (3-4): 252-263.

Rodda, M.; Canellas, L.; Façanha, A.; Zandonadi, D.; Almeida, D.; Guerra, J. *et al.* 2006, Julho. Estímulo no crescimento e na hidrólise de ATP em raízes de alface tratadas com humatos de vermicomposto. I - efeito da concentração. Em: *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 30 (4): 649-656.

Sandoval, M.; J. Dörner; O. Seguel; J. Cuevas y D. Rivera. 2012. Métodos de análisis físicos de suelos. Chile: Departamento de Suelos y Recursos Naturales, Universidad de Concepción. Publicación N° 5. 80 p.

Seguel, O., V. García de Cortázar y M. Casanova. 2003, julio. Variación en el tiempo de las propiedades físicas de un suelo con adición de enmiendas orgánicas. En: *Agricultura Técnica (Chile)* 63(3): 287-297.

Seguel, O.; Baginsky, C.; Contreras, A.; Covarrubias, J.; Poblete, L. 2013. Physical properties of a fine textured haplocambid after three years of organic matter amendments management. In: *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 13(3): 690-705.

Seguel, O.; Horn, R. 2006, april. Structure properties and pore dynamics in aggregate beds due to wetting-drying cycles. In: *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 169: 221-232.

Semmel, H., Horn, R., Dexter, A., Schulze, E. 1990, june. The dynamics of soil aggregate formation and the effect on soil physical properties. In: *Soil Technology* 3 (2): 113-129.

Stevenson, F. 1994. Humus chemistry: genesis, composition, reactions, 2ª edición, John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, EUA. 496 p.

Uribe, J.; Cabrera, R.; De la Fuente, A.; Paneque, M. 2012. Atlas Bioclimático de Chile. Santiago, Chile. 229 p.

Usowicz, B.; Lipiec, J. 2009, september. Spatial distribution of soil penetration resistance as affected by soil compactation: the fractal approach. In: *Ecological Complexity* 6 (3): 263-271.

Vidal, I.; Etchevers, J.; Fischer, A. 2002, enero. Dinámica del nitrógeno bajo diferentes rotaciones, sistemas de labranza y manejo de residuos en el cultivo. En: *Agricultura Técnica (Chile)* 62 (1): 121-132.

Warrick, A. 2002. Soil physics companion. CRC Press LLC, 2000 New Corporate Blvd., Boca Raton, FL 33431. 403 p.

Wilson, M.; Valenzuela, O. 1998. Evaluación del sistema radical del cultivo de trigo mediante dos métodos de medición. En: *Revista Científica Agropecuaria* 2: 29-35.

Zandonadi, D.; Canellas, L.; Façanha, A. 2007, may. Indolacetic and humic acids induce lateral root development through a concerted plasmalemma and tonoplast H⁺ pumps

activation. In: *Planta* 225 (6): 1583-1595.

APÉNDICE 1

Datos de la textura de suelo obtenidos con muestras disturbadas en tres tratamientos a dos profundidades distintas. Se presentan los porcentajes de arcilla (A), arena (a) y limo (l) de cada muestra de suelo. En base a lo anterior y utilizando el triángulo textural, se obtuvo la clasificación USDA, la que fue destacada con negrita para cada caso.

| Tratamiento | Textura (%) | |
|------------------------|---|---|
| | Profundidad | |
| | 0-10 cm | 30-40 cm |
| Testigo (T0) | A: 25,2 l: 44,3 a: 30,4 Franco | A: 3,7 l: 62,7 a: 33,6 Franco limosa |
| Ác. Húmico (T1) | A: 15,4 l: 51,3 a: 33,3 Franco limosa | A: 6,6 l: 45,7 a: 47,7 Franco |
| Nativo (T2) | A: 9,6 l: 50,0 a: 40,3 Franco-Franco limosa | A: 3,8 l: 42,5 a: 53,6 Franco arenosa |