



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias Agrarias
Escuela de Agronomía

Estimación de la curva de retención de agua de un Andisol a través de funciones de pedotransferencia utilizando software RETC

Memoria presentada como parte de los
requisitos para optar al título de
Ingeniero Agrónomo

Nicolás Miguel Yáñez Cerda
VALDIVIA-CHILE
2014

PROFESOR PATROCINANTE:

Dorota Dec B.
Ingeniero Ambiental, Dr. sc. agr.
Instituto Ingeniería Agraria y Suelos

PROFESOR COPATROCINANTE:

José Dörner F.
Ingeniero Agrónomo, Dr. sc. agr.
Institución Ingeniería Agraria y Suelos

PROFESOR INFORMANTE:

Felipe Zúñiga U.
Ingeniero Agrónomo, Ms. sc. Suelo
Instituto Ingeniería Agraria y Suelos

ÍNDICE DE MATERIAS

Capítulo		Página
	RESUMEN	1
	SUMMARY	2
1	INTRODUCCIÓN	3
2	MATERIALES Y MÉTODOS	7
2.1	Material	7
2.1.1	Descripción del suelo	7
2.1.2	Suelo	7
2.1.3	Recolección de muestras	7
2.2	Métodos	7
2.2.1	Análisis de laboratorio	7
2.2.1.1	Determinación de propiedades generales del suelo	8
2.2.1.2	Curva de retención de agua	8
2.2.2	Determinación de parámetros de importancia en el riego	8
2.2.3	Ajuste curva de retención de agua	9
2.2.4	Estimación parámetros de ajuste curva de retención de agua	9
2.2.5	Análisis estadístico	10

3	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	11
3.1	Caracterización general del suelo estudiado	11
3.2	Determinación de la capacidad de almacenamiento de agua a través de análisis de laboratorio	11
3.3	Ajuste de la curva de retención de agua del suelo a través del programa RETC	12
3.4	Evaluación del ajuste de la curva de retención de agua estimada a través de funciones de pedotransferencia	13
3.5	Estimación de la capacidad de almacenamiento de aire y agua del suelo mediante funciones de pedotransferencia	14
4	DISCUSIÓN	17
4.1	Caracterización física del suelo	17
4.2	Efecto del establecimiento de un cultivo de arándano sobre la curva de retención de agua	17
4.3	Ajuste curva de retención de agua mediante modelo de van Genuchten (1980)	19
4.4	Evaluación ajuste de estimación de la curva de retención de agua a través de funciones de pedotransferencia	19
4.5	Mínimo set de datos de funciones de pedotransferencia necesarios para estimar capacidad de aire y poros de agua disponible para las plantas	20
5	CONCLUSIONES	22
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	23

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Niveles de información de funciones pedotransferencia	10
2	Características generales de la serie Llastuco	11
3	Distribución de poros en función de la profundidad del suelo	12
4	Parámetros de van Genuchten de ajuste curva de retención de agua	13
5	Coefficiente correlación de las curvas de retención de agua estimadas por funciones de pedotransferencia	14

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Curva de retención de agua del suelo para las 3 profundidades estudiadas. Se presentan valores promedio para cada tensión \pm 1 error estándar (n=24)	12
2	Curvas de retención de agua de tres profundidades del suelo, ajustadas mediante ecuación de van Genuchten (1980)	13
3	Ajuste de estimación de la curva de retención de agua para las tres profundidades a través de diferentes niveles de FPTs en programa Rosetta	14
4	Estimación de: capacidad de aire y poros de agua disponible para las plantas para las tres profundidades, a través de funciones de pedotransferencia utilizando programa Rosetta	16

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

- USDA: Departamento de agricultura de los Estados Unidos
- TDR: Tensores de humedad (Time Domain Reflectometry)
- FPTs: Funciones de pedotransferencia
- CRA: Curva de retención de agua
- CA: Capacidad de aire
- ADP: Agua disponible para las plantas
- PT: Porosidad total
- RMSE: Raíz media del error cuadrado
- R^2 : Coeficiente de correlación
- Ton: Toneladas
- CC: Capacidad de campo
- PMP: Punto de marchitez permanente
- θ_r : Contenido volumétrico de agua residual
- θ_s : Contenido volumétrico de agua en saturación
- K_s : Conductividad hidráulica en fase saturada
- K_{ns} : Conductividad hidráulica en fase no saturada
- MO: contenido de materia orgánica
- D_a : Densidad aparente
- D_r : Densidad real
- θ_{60} : Contenido volumétrico de agua a 60 hPa de tensión
- θ_{15430} : Contenido volumétrico de agua a 15430 hPa de tensión

RESUMEN

La curva de retención de agua posee una gran importancia en el conocimiento de la capacidad de almacenamiento de agua de la zona no saturada del suelo, infiriendo parámetros como el agua disponible para las plantas el que posee gran utilidad en la determinación de la lámina de riego. La principal dificultad de la obtención de estos parámetros es su determinación bajo condiciones de laboratorio, debido a la gran variabilidad espacial y temporal que tienen las propiedades hidráulicas de los suelos derivados de cenizas volcánicas. El objetivo de este trabajo fue estimar la curva de retención de agua a través de funciones de pedotransferencia (FPTs) obtenidas de un suelo derivado de cenizas volcánicas. Los presentes resultados se obtuvieron de muestras disturbadas y no disturbadas extraídas a 5, 20 y 50 cm de profundidad de un suelo Andisol (Acruoxic Hapludand) bajo un cultivo de arándano. Se determinó la curva de retención de agua, la cual fue ajustada de acuerdo al método propuesto de van Genuchten (1980), materia orgánica, textura, densidad aparente. Estas últimas propiedades, además de capacidad de campo y punto de marchitez permanente fueron utilizadas como funciones de pedotransferencia en la estimación de la capacidad de aire y agua disponible para las plantas a través del programa Rosetta, resultados que fueron analizados estadísticamente a través de (ANOVA) ($p \leq 0,05$) y evaluadas a través del RMSE y coeficiente de regresión. El modelo de van Genuchten se ajustó satisfactoriamente al carácter bimodal de la curva de retención de agua, presentando una menor capacidad de aire y mayor volumen de poros de agua útil en la curva obtenida a 20 cm. La FPTs que presentó la menor RMSE, fue la incluyo el porcentaje textural y la densidad aparente en cambio el mejor coeficiente de regresión la exhibió la FPTs que incluía porcentaje textural, densidad aparente y capacidad de campo. Finalmente, se concluyó que la FPTs que presenta la mejor estimación de la curva de retención de agua del Andisol estudiado es la que suma del porcentaje textural y densidad aparente.

SUMMARY

The water retention curve is of great importance in understanding the storage capacity of the unsaturated zone of the soil, posing great difficulty characterizing volcanic soils laboratory for its high spatial and temporal variability. The aim of this study was to estimate the water retention curve through pedotransfer functions (PTFs) obtained from a soil derived from volcanic ash. The present results were obtained from disturbed and undisturbed samples obtained at 5, 20 and 50 cm soil depth Andisol (Acruoxic Hapludands) under a cranberry crop. The water retention curve was determined, which was adjusted according to the proposed van Genuchten (1980), organic matter, texture, bulk density method. These latter properties in addition to field capacity and wilting point were used as functions of pedotransfer in estimating the capacity of air and pore water available to plants through the Rosetta program, which was statistically analyzed through (ANOVA) single ($p \leq 0.05$) and evaluated through the regression coefficient and RMSE. The van Genuchten model was successfully fitted to the bimodal nature of the water retention curve, presenting a lower air capacity and increased pore volume of available water the curve obtained at 20 cm. The PTFs that had the highest RMSE was the percentage includes textural and bulk density change the best regression coefficient exhibited textural PTFs that included percentage, bulk density and field capacity. Finally, the PTFs with increasing levels of information have a better estimation of the parameters of irrigation, air capacity and water available to plants

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años la agricultura del sur de Chile ha ido evolucionando no sólo en los rubros tradicionales, sino que también en los nuevos productos de la expansión de la fruticultura. Dentro de estos rubros, destaca la producción de arándanos (*Vaccinium Corymbosum*); frutal que exporta 59.695 ton generando U\$S 284.356 FOB (Odepa, 2014). Esta expansión se ha concentrado principalmente desde la Región del Maule hasta la Región de Los Lagos (Hirzel y Rodríguez, 2003), en cuales predominan los suelos derivados de cenizas volcánicas (Andisoles), que constituyen cerca del 60% de los suelos arables en Chile (Besoain, 1985).

Según Dörner *et al.* (2009a), los Andisoles se caracterizan por tener excelentes propiedades físico-hidráulicas, como p. ej: una alta capacidad de almacenamiento agua (porosidad total de 60-70%, Dörner *et al.*, 2013), pero al mismo tiempo una alta capacidad de conducción de agua en condiciones no saturadas produciendo el secado del suelo de forma rápida (Ellies, 1978; Dörner *et al.*, 2009a). Este secado del suelo produce la necesidad de realizar aplicaciones de riego con mayor frecuencia para cubrir los requerimientos de las plantas con el fin de alcanzar su máximo rendimiento. En este sentido, Retamales y Hancock (2012), señalan que el estrés hídrico generado por un déficit o exceso de agua puede provocar cambios fisiológicos en la planta, los que desencadenan un menor rendimiento y una disminución en la calidad de la fruta. Esto último, es muy importante en un frutal como el arándano el cual no posee pelos radicales, característica que lo hace ser una planta menos eficiente en la absorción de agua (Buzeta, 1997; Hanson y Hancock, 1996) y muy susceptible a la sequía y exceso de humedad (Retamales y Hancock, 2012). Por lo tanto, estas características del suelo y cultivo, hacen necesario que la aplicación de riego sea eficiente desde el punto de vista de sus parámetros, enfocándose en dos parámetros claves: “cuando y cuanto regar”.

Además del rol que el agua tiene en la producción agrícola, este recurso posee un valor ambiental, lo que acentúa su importancia y la necesidad de alcanzar una mayor eficiencia de su uso, más aún, debido a que su disponibilidad es cada vez menor (González-Reyes y Muñoz, 2013). Tomando en cuenta los aspectos mencionados, se hace necesario el desarrollo de un riego sitio-específico, reconociendo que el suelo es

un medio poroso que almacena una cantidad limitada de agua accesible para las plantas (Patil y Rajput, 2009, Dec y Dörner, 2014). Para ello, el análisis de la curva de retención de agua (CRA) es fundamental. Esta curva describe la habilidad del suelo para almacenar agua a diferentes succiones, entregando información necesaria para el cálculo de la lámina de riego y el agua disponible para las plantas, la cual está dada por los valores entre capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) (Hartge y Horn, 2009). Este último parámetro posee un valor fijo de contenido de humedad θ_{15430} hPa en la mayoría de los suelos, en cambio CC presenta un rango entre θ_{60} y θ_{330} hPa dependiendo de las características físicas del suelo, para el caso de los suelos derivados de cenizas volcánicas presenta una CC θ_{60} hPa (López *et al.*, 2013). Este contenido se debe a la compleja porosidad que presentan estos suelos (poros entre e intrapartículas) generando una disminución de la conductividad hidráulica y la percolación del agua alcanzando un equilibrio estático a dicha tensión (Ellies *et al.*, 1997).

La principal dificultad para determinar el agua disponible para las plantas ($\theta_{60} - \theta_{15430}$ hPa), es la obtención de la CRA bajo las condiciones de laboratorio (método directo). Para cubrir grandes extensiones de terreno su determinación es poco viable, debido a la variabilidad espacial y temporal que poseen las propiedades hidráulicas, lo que generaría un gran gasto desde punto de vista económico y de tiempo en la caracterización de un sitio. Esta problemática ha sido documentada por diversos autores en diferentes tipos de suelos, por ejemplo Alvarez-Costa *et al.* (2012) en unalfisol de Estados Unidos, Schaap *et al.* (2001) en suelos subtropicales de Norte América y Europa y Tomasella *et al.* (2000) en suelos de Brasil. Esta misma dificultad fue demostrada por Dec *et al.* (2011) en suelos de origen volcánico del sur de Chile.

Con el fin de remediar este inconveniente se han desarrollado métodos indirectos, los cuales utilizan funciones de pedotransferencia para la estimación de las propiedades hidráulicas del suelo (Rawls *et al.*, 1991; van Genuchten y Leij, 1992; Schaap *et al.*, 2001). Las funciones de pedotransferencia son relaciones empíricas que, a través de modelos (p.ej. regresión lineal, no lineal o redes neuronales), permiten estimar las propiedades hidráulicas del suelo a partir de información básica y fácilmente disponible (Casanova *et al.*, 2003). Esta información básica puede ser: clasificación textural, densidad aparente, contenido de materia orgánica, distribución de tamaño de

partículas (Wösten *et al.*, 1999), información topográfica (Pachepsky *et al.*, 2001; Romano y Palladino, 2002) o propiedades mecánicas (Pachepsky *et al.*, 1998), entre otras.

Según Vereecken *et al.* (2010), la estimación de la CRA a través de las funciones de pedotransferencia se puede obtener principalmente a través de la estimación de uno de sus puntos (p.ej. 10, 30, 330 o 15430 hPa), o bien por la estimación de los parámetros de la ecuación que describen esta curva, como por ejemplo la ecuación descrita por Brooks & Corey (1964) o van Genuchten (1980). En este contexto, autores como Nielsen *et al.* (1983), Tomasella *et al.* (2000), Schaap *et al.* (2001), Dexter (2004) y Vereecken *et al.* (2010) han calificado la ecuación de van Genuchten (1981) como aquella que tiene el mejor desempeño en la estimación de la CRA, lo que ha generado que muchas investigaciones se enfoquen en este modelo.

El modelo de van Genuchten (1980), describe la relación entre presión (h) y contenido de humedad del suelo (θ), considerando los siguientes parámetros: contenido de humedad residual (θ_r), contenido de agua en saturación (θ_s) y tres parámetros empíricos que hacen referencia a los valores de entrada de aire (α) y a la forma de la curva (n ; $n > 1$) y (m ; $m = 1 - 1/n$). Estos parámetros se pueden obtener a través del programa RETC (RETention Curve) el cual posee una base de datos de curvas de retención de agua de diferentes tipos de suelos. Su principal uso es el ajuste a través de modelos analíticos de la CRA medida y la estimación de la conductividad hidráulica en fase no saturada a través de los modelos de Burdine (1953) y Mualem (1976) (van Genuchten *et al.*, 1991).

Según Leij *et al.* (1992), la unión de los modelos de van Genuchten, Brooks & Corey, Burdine y Mualem permiten que RETC sea uno de los mejores programas para predecir los parámetros hidráulicos del suelo. En este mismo sentido Schaap *et al.* (2001), afirman que la combinación más popular en la estimación de la CRA y conductividad hidráulica no saturada es la basada en el modelo de van Genuchten (1980) y Mualem (1976). Estos modelos han sido utilizados en suelos volcánicos para ajustar valores medidos de la CRA y estimar la conductividad hidráulica no saturada (Dörner *et al.*, 2009a), demostrando un buen desempeño del modelo de van Genuchten (1980) en la caracterización de la curva a pesar de la naturaleza bimodal,

característica que se debe a la macro y microagregación de estos suelos que permiten la presencia de poros entre los agregados y dentro de los mismos (Dörner *et al.*, 2010).

Otra característica que ha hecho aún más utilizado este programa es la integración del programa *Rosetta* (Schaap *et al.*, 2001), el cual permite estimar los parámetros de la CRA, conductividad hidráulica saturada (K_s) y la conductividad hidráulica en fase no saturada (K_{ns}) a través de funciones de pedotransferencia (FPTs). El programa *Rosetta* estima la CRA a través de un enfoque jerarquizado de cinco FPTs como información de entrada, dividido en dos modelos: (i) clase textural (H1: basado en la clasificación textural USDA), (ii) continuo de funciones de pedotransferencia basado en análisis de redes neuronales artificiales (H2: porcentaje textural; H3: $D_a + H2$; H4: $\theta_{60} + H3$; H5: $\theta_{15430} + H4$) (Rubio *et al.*, 2008; Schaap *et al.*, 2001).

Según Patil y Rajput (2009), el programa *Rosetta* tiene como principal característica su fácil utilización y una gran base de datos de variados tipos de suelos (2134 curvas de retención de agua, con 20.574 puntos $\theta(h)$). Esto lo ha llevado a convertirse en el programa más utilizado en la estimación de parámetros de la ecuación de van Genuchten basado en FPTs (Schaap *et al.*, 2001). A pesar de la gran utilidad de las FPTs, Patil y Rajput (2009) describen algunas dificultades de su uso, como la naturaleza empírica de ellas, restringiendo su uso solo a la región desarrollada y señalando que cualquier extrapolación necesita una validación, y por otra parte, que su aplicabilidad está restringida a requerimientos de datos específicos del sitio de estudio. De acuerdo a lo expuesto, el presente estudio tiene como hipótesis: “el mínimo set de datos para inferir una curva de retención de agua en un suelo volcánico a través del programa *Rosetta*, es la suma de funciones de pedotransferencia como textura, densidad aparente y el contenido volumétrico de agua a 60 hPa”. Por lo tanto, el objetivo general de este trabajo es estimar la curva de retención de agua a través de FPTs obtenidas de un suelo derivado de cenizas volcánicas bajo un cultivo de arándano.

En ese contexto, los objetivos específicos son: i) validar la estimación de la curva de retención de agua del suelo en estudio a través de la ecuación de van Genuchten (1980) ii) evaluar estadísticamente el mínimo set de datos requeridos para estimar correctamente la capacidad de almacenamiento de agua (determinada a través de la curva de retención de agua) con el programa *Rosetta*.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Material

2.1.1 Descripción del sitio. El presente estudio se realizó en el “Fundo Rucapichio” perteneciente a la empresa PI-BERRY. El predio está destinado al uso agrícola para la producción de arándanos (*Vaccinium corymbosum*), emplazado a 45 km al norte de la ciudad de Valdivia en la comuna de Máfil (39°38'0"S, 72°57'0"OE), provincia de Valdivia, Región de Los Ríos.

2.1.2 Suelo. El suelo corresponde a un Andisol (conocido localmente como trumao) de la serie Llastuco, el cual pertenece a la familia de los Acrudoxic Hapludands (Soil Survey Staff, 2010) o Andosol Silandi-Acroxico (Salazar *et al.*, 2005). Esta serie se caracteriza por tener una formación sobre tobas con diferentes grados de cementación, mezclada con clastos alterados denominados cancagua lo que genera una profundidad de suelo moderada. Posee una ubicación depresional a una altura entre 30 y 45 m.s.n.m., ocupando una posición de lomajes y terrazas aluviales o remanentes. Presenta una textura que varía de franco limosa en superficie a arcillosa en profundidad (CIREN, 2003).

2.1.3 Recolección de muestras. Se recolectaron muestras disturbada y sin disturbar en dos sectores a tres profundidades (5, 20 y 50 cm). Las primeras se extrajeron con el objetivo de determinar las características descriptivas del suelo (%MO, textura y D_r), mientras que las segundas se obtuvieron con el fin de determinar las características físico-hidráulicas del suelo. Para esta últimas se tomaron cuatro muestras de suelo no disturbadas al azar en cilindros de acero inoxidable de 230 cm³ de volumen (h: 5cm, diámetro: 7cm), sobre 3 hileras del cultivo de arándano, obteniéndose 12 muestras por profundidad para cada sector, sumando un total de 24 muestras por profundidad.

2.2 Metodología

2.2.1 Análisis de Laboratorio. Los análisis se realizaron en el Laboratorio de Física de Suelos Prof. Dr. Achim Ellies Sch. del Instituto de Ingeniería Agraria y Suelos, de la Universidad Austral de Chile.

2.2.1.1 Determinación de propiedades generales del suelo. Se llevaron a cabo análisis para determinar: densidad real (D_r) a partir del método del pesaje sumergido descrito por Sandoval *et al.* (2009), contenido de carbono orgánico (% MO) a través del método descrito por Sadzawka *et al.* (2006), y distribución de tamaño de partículas mediante el método del hidrómetro propuesto por Day (1965). Para todos estos análisis se usaron 3 repeticiones.

2.2.1.2 Curva de retención de agua (CRA). Las muestras no disturbadas fueron saturadas por ascenso capilar hasta asegurar que todos los poros del suelo se encuentren saturados. Esto permite definir el contenido volumétrico de agua en saturación del suelo (θ_s). Una vez saturados los poros, las muestras se drenan a diferentes tensiones 10, 20, 30 y 60 hPa en bandejas de arena; a 150, 330 y 500 hPa mediante ollas de presión. Para cada tensión de agua, las muestras fueron pesadas mediante una balanza electrónica (Precisa, precisión 0,01 g). Durante la determinación de la CRA se midió la deformación vertical del suelo por medio de un profundímetro (Vernier Caliper, precisión 0,01 mm) de acuerdo a lo indicado en Dörner *et al.* (2010).

Por último para determinar el volumen de poros finos ($<2 \mu\text{m}$) se ensamblaron muestras de suelo en cilindros de 20 cm^3 , los que después de ser saturados, fueron drenados a una tensión de 15430 hPa. El contenido de agua fue determinado mediante la diferencia de peso de las muestras por medio de una balanza electrónica.

Finalmente, las muestras fueron secadas en un horno a temperatura $105 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 24 h para determinar su densidad aparente mediante el cálculo descrito por Sandoval *et al.* (2009).

2.2.2 Determinación de parámetros de importancia en el riego

Capacidad de aire (CA, Vol. %) se define como:

$$CA = PT - \theta_{60 \text{ hPa}}$$

Dónde: PT (Vol. %) es la porosidad total y θ_{60} es el contenido volumétrico de agua a una presión de 60 hPa (Hartge y Horn, 2009). Capacidad de aire representa la cantidad de macroporos, los cuales poseen un diámetro $> 50 \mu\text{m}$ (PDR).

Poros de drenaje rápido (PDR, Vol. %) o macroporos saturados con agua (Dec y Dörner, 2014)

$$\text{PDR} = \theta_{0 \text{ hPa}} - \theta_{60 \text{ hPa}}$$

Dónde: $\theta_{0 \text{ hPa}}$ es el contenido volumétrico de agua a 0 hPa de presión.

Agua disponible para las plantas (ADP, Vol. %)

$$\text{ADP} = \theta_{60 \text{ hPa}} - \theta_{15430 \text{ hPa}}$$

Dónde: $\theta_{60 \text{ hPa}}$ y $\theta_{15430 \text{ hPa}}$ es el contenido volumétrico de agua a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP), respectivamente (Hartge y Horn, 2009).

2.2.3 Ajuste curva de retención de agua. Este procedimiento se realizó mediante la estimación de los parámetros que describen la curva de retención de agua (θ_s , θ_r , α , n y m) mediante el programa RETC (RETention Curve) v.6.02. Para ello, los datos medidos fueron ajustados a través del modelo propuesto por van Genuchten (1980) para la curva de retención de agua, seleccionándose adicionalmente el modelo de Mualem (1976) para estimar la conductividad hidráulica no saturada (no presentada en este trabajo).

$$\theta(\psi_m) = \theta_R + \frac{\theta_S - \theta_R}{[1 + (\alpha \cdot \psi_m)^n]^m}; \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad ; n > 1$$

Dónde: θ es el contenido volumétrico de agua, ψ_m es la tensión de agua (hPa), θ_s y θ_r es el contenido de volumétrico en saturación y residual, respectivamente. En tanto α , n y m son parámetros empíricos adimensionales que describen la forma de la curva (van Genuchten, 1980).

2.2.4 Estimación parámetros de ajuste de curva retención de agua. La estimación de los parámetros que describen la CRA a través de funciones de pedotransferencia (FPTs) se realizó a través del programa Rosetta (Schaap *et al.*, 2001), el cual viene integrado en el programa RETC. Se utilizaron 5 niveles de FPTs como información de entrada, como se observa en el Cuadro 1, obteniendo como resultado los parámetros que describen la curva de retención de agua.

CUADRO 1. Niveles de información de funciones pedotransferencia

Nivel de información	Información de entrada
H1	Clase textural (USDA)
H2	% textural (SSC)
H3	SSC + densidad aparente (D_a)
H4	SSC + D_a + θ_{60}
H5	SSC + D_a + θ_{60} + θ_{15430}

Como se desprende del Cuadro 1, para estimar los parámetros que definen la CRA mediante las FPTs se utilizaron propiedades del suelo como: densidad aparente (D_a), distribución tamaño de partículas y dos puntos de la curva de retención de agua, θ_{60} y θ_{15430} hPa.

2.2.5 Análisis estadístico. Para el desarrollo del análisis estadístico, se utilizó el programa STATGRAPHICS centurión XV.II. El análisis contempló el desarrollo de análisis de varianza (ANOVA) simple ($p \leq 0,05$); en caso de encontrar diferencias estadísticamente significativas se realizó una separación de medias a *posteriori* por Diferencias Máximas Significativas (Tukey).

El análisis de ajuste de las CRA estimadas se realizó mediante la raíz del error medio cuadrado (RMSE) y el coeficiente de correlación.

3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

3.1 Caracterización general del suelo estudiado.

El suelo en estudio posee una textura franco arcillo-limosa en los primeros 20 cm variando a limoso en profundidad. En general, como se observa en el Cuadro 2, el contenido de limo es mayor a 51,81%, aumentando en profundidad, en cambio el contenido de arcilla y arena disminuyen un 21,38% y 3,78% en relación a los 5 cm.

La densidad aparente aumenta en profundidad, de 0,58 Mg/m³ a 0,63 Mg/m³. En cambio la materia orgánica disminuye un 10,39% en relación a los 16,15% registrados en superficie.

CUADRO 2. Características generales de la serie Llastuco

Profundidad [cm]	Textura			Da [Mg/m ³]	MO [%]
	Arena [%]	Limo [%]	Arcilla [%]		
5	17,86±3,71	51,81±4,05	30,33±1,11	0,58±0,03	16,15±0,63
20	14,08±2,08	61,55±1,03	24,37±1,11	0,58±0,02	12,31±0,19
50	14,50±5,23	76,55±5,21	8,95±0,06	0,63±0,02	5,76±0,00

Arena: 2000-630 μm; Limo: 630-2 μm; Arcilla >2 μm; Da: Densidad aparente; MO: Materia orgánica; se presentan los valores promedios ± 1 error estándar de los parámetros. Textura y MO presentan (n=3) en cambio Da (n=24).

3.2 Determinación de la capacidad de almacenamiento de agua a través de análisis de laboratorio.

La Figura 1 presenta las curvas de retención de agua medidas para las tres profundidades obtenidas del promedio de los dos sectores en estudio (n=24), esto debido que la CRA no presentó diferencias entre ambos sectores.

En general, se aprecia que las tres profundidades presentan una curva de retención de agua con un marcado carácter bimodal con punto de inflexión en pF 1,7; generando dos sigmoideas, una de pF 0 a pF 1,78 (0-60 hPa) y > pF 1,78 (60 - 15430 hPa). Por otro lado, la CRA para 20 cm presenta un mayor volumen de agua en todos los puntos de tensión excepto en PMP en comparación a 5 y 50 cm, las que no presentaron diferencias entre sí.

En relación a la distribución de poros (Cuadro 3), calculado a partir de la curva de retención de agua (Figura 1), 20 cm presentó el menor volumen de CA y PDR con una disminución de 10% de CA en comparación a 5 y 50 cm, y un 12% en relación a 50 cm para PDR. A diferencia de CA, a 20 cm de profundidad se presentó el mayor valor ADP exhibiendo una diferencia mayor al 10% en comparación a las otras profundidades.

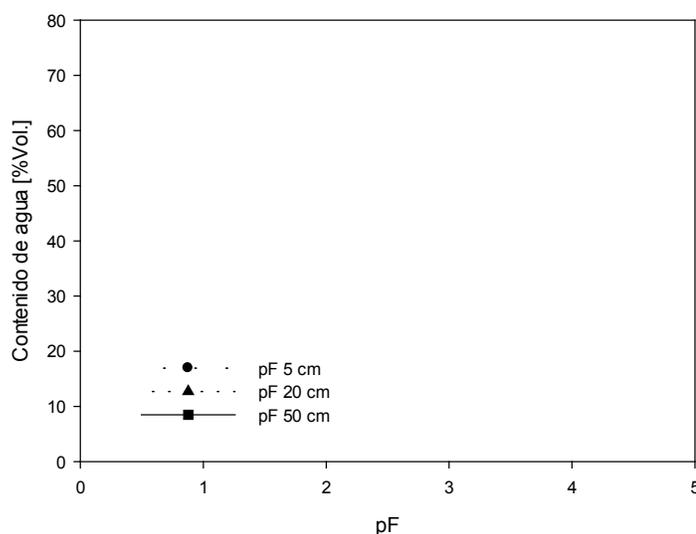


FIGURA 1. Curvas de retención de agua del suelo para las 3 profundidades estudiadas. Se presentan valores promedio para cada tensión ± 1 error estándar (n=24).

CUADRO 3. Distribución de poros en función de la profundidad del suelo.

Profundidad [cm]	PT	CA	PDR	ADP
	----- [% Vol.]-----			
5	76,01 \pm 0,6	24,20 \pm 1,0	13,99 \pm 0,6	41,34 \pm 0,9
20	76,04 \pm 0,8	14,24 \pm 1,1	7,59 \pm 0,8	52,28 \pm 0,9
50	75,25 \pm 0,6	24,24 \pm 0,8	19,65 \pm 0,7	37,97 \pm 0,9

PT: Porosidad total; CA: Capacidad de aire; PDR: Poros de drenaje rápido; ADP: Poros agua disponible para las plantas; valores promedio ± 1 error estándar (n=3).

3.3 Ajuste de la curva de retención de agua del suelo a través del programa RETC.

En la Figura 2, se presenta el ajuste de la CRA medida con respecto a la obtenida a través de los parámetros de la ecuación de van Genuchten (1980) entregados por el

programa RETC. En la Figura se aprecia que el modelo se ajusta apropiadamente a las características hidráulicas del suelo, presentando una buena correlación para las tres profundidades ($R^2 \geq 0,96$, Cuadro 4), donde la CRA de 20 cm obtuvo la mejor correlación. A pesar del buen ajuste logrado, destaca que: i) en las tres profundidades estudiadas el valor de θ_s presentó un 10% menor en comparación al contenido en saturación obtenido en laboratorio y ii) el modelo utilizado no representa exactamente los puntos cercanos a saturación (macroporos) pero mejora su desempeño a partir de los 60 hPa (Cuadro 4).

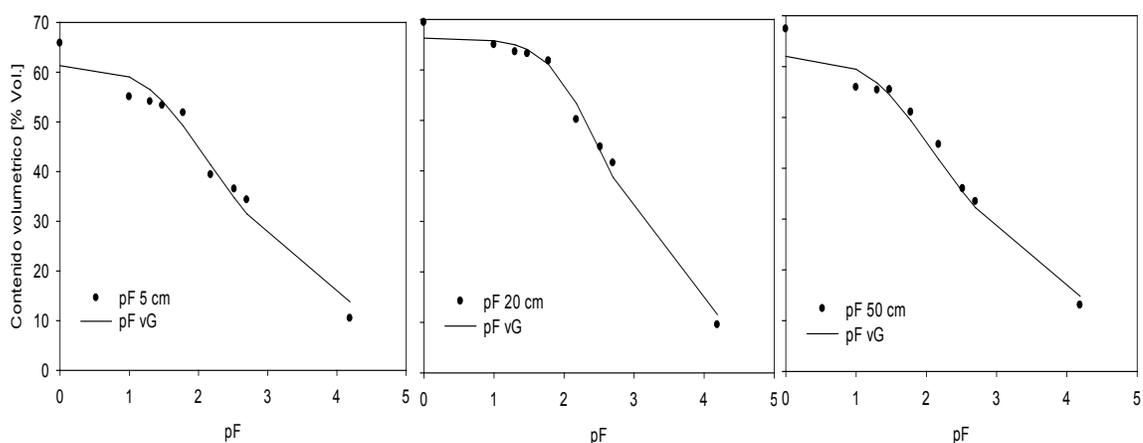


Figura 2. Curvas de retención de agua de tres profundidades del suelo, ajustadas mediante ecuación de van Genuchten (1980).

CUADRO 4. Parámetros de van Genuchten de ajuste curva de retención de agua

Profundidad [cm]	θ_r	θ_s	α [m ³ /m ³]	n	m	R^2 [-]
5	0,0	0,61	0,03	1,24	0,20	0,96
20	0,0	0,66	0,01	1,36	0,27	0,98
50	0,0	0,62	0,03	1,23	0,19	0,97

3.4 Evaluación del ajuste de la curva de retención de agua estimada a través de FPTs

En la Figura 3, se presenta los valores calculados de RMSE para las 3 profundidades de muestreo. Se observa que el RMSE varió entre 0,04040 y 0,1743, donde 20 cm

presentó la mayor diferencia entre las FPTs alcanzando el menor y mayor RMSE. En cambio 5 y 50 cm presentaron valores en el rango de 0,086- 0,107 [cm^3/cm^3].

Otro método para evaluar el ajuste es el coeficiente de correlación (Cuadro 6), donde los coeficientes fluctuaron entre 0,98 y 0,85. Este último valor lo obtuvo el nivel H5 para las tres profundidades, en cambio la mejor correlación se obtuvo la FPT H4 para 5, 20 y 50 cm.

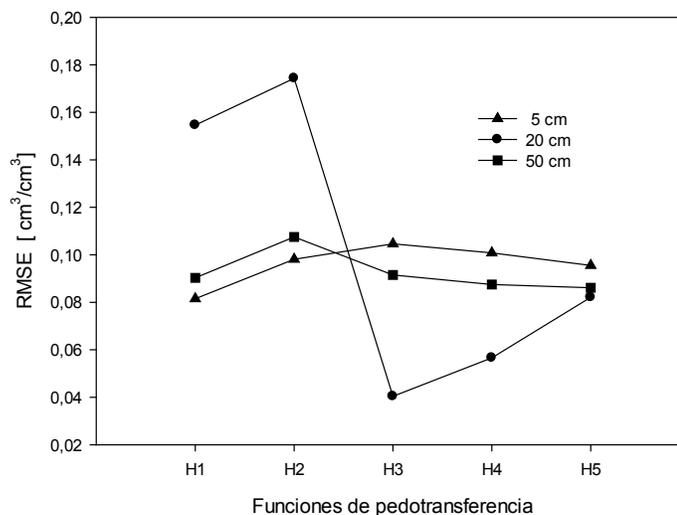


FIGURA 3. Ajuste de estimación de la curva de retención de agua para las tres profundidades a través de diferentes niveles de FPTs en programa Rosetta.

CUADRO 5. Coeficientes de correlación de las curvas de retención de agua estimadas por FPTs.

Profundidad [cm]	Coeficiente correlación				
	H1	H2	H3	H4	H5
5	0,94	0,94	0,95	0,96	0,85
20	0,97	0,97	0,96	0,98	0,85
50	0,95	0,95	0,96	0,97	0,85

3.5 Estimación de la capacidad de almacenamiento de aire y agua del suelo mediante funciones de pedotransferencia.

La Figura 4 presenta la distribución de poros (CA y ADP) para tres profundidades estimadas a través de cuatro niveles de información de FPTs (H2, H3 H4 y H5) en el

programa Rosetta y los valores medidos (VM) por medio de las muestras analizadas en laboratorio. El nivel H1 de FPT (clase textural, basado en la clasificación USDA) no es integrado debido a que solo se obtuvo una repetición de los valores de CA y ADP, siendo requerida como mínimo 3 repeticiones para realizar un análisis estadístico.

Para CA a 20 cm de profundidad (Figura 4), la FPTs H2 presentó un aumento de 22% ($p < 0,05$) en el volumen de macroporos en comparación al valor medido y al resto de los niveles de FPTs. A 5 cm los niveles de FPTs H3, H4 y H5 no presentaron diferencias estadísticas entre ellas, pero si con VM entre 10% y 8% ($p < 0,05$). En 50 cm de profundidad el valor medido de CA no presentó diferencias estadísticas con respecto a todas las FPTs.

Por otro lado, el volumen de agua disponible para las plantas a 5 cm, sólo el nivel H3 no presentó diferencias significativas con respecto ADP obtenido en laboratorio. Para 50 cm, sólo H5 presentó diferencias estadística ($p < 0,05$) en relación al valor medido. Para 20 cm de profundidad los niveles de FPTs H5, H4 y H3 estimaron el volumen de ADP entre 35 y 49%, sin presentar diferencias estadísticamente significativas en relación al valor de agua disponible obtenido en laboratorio.

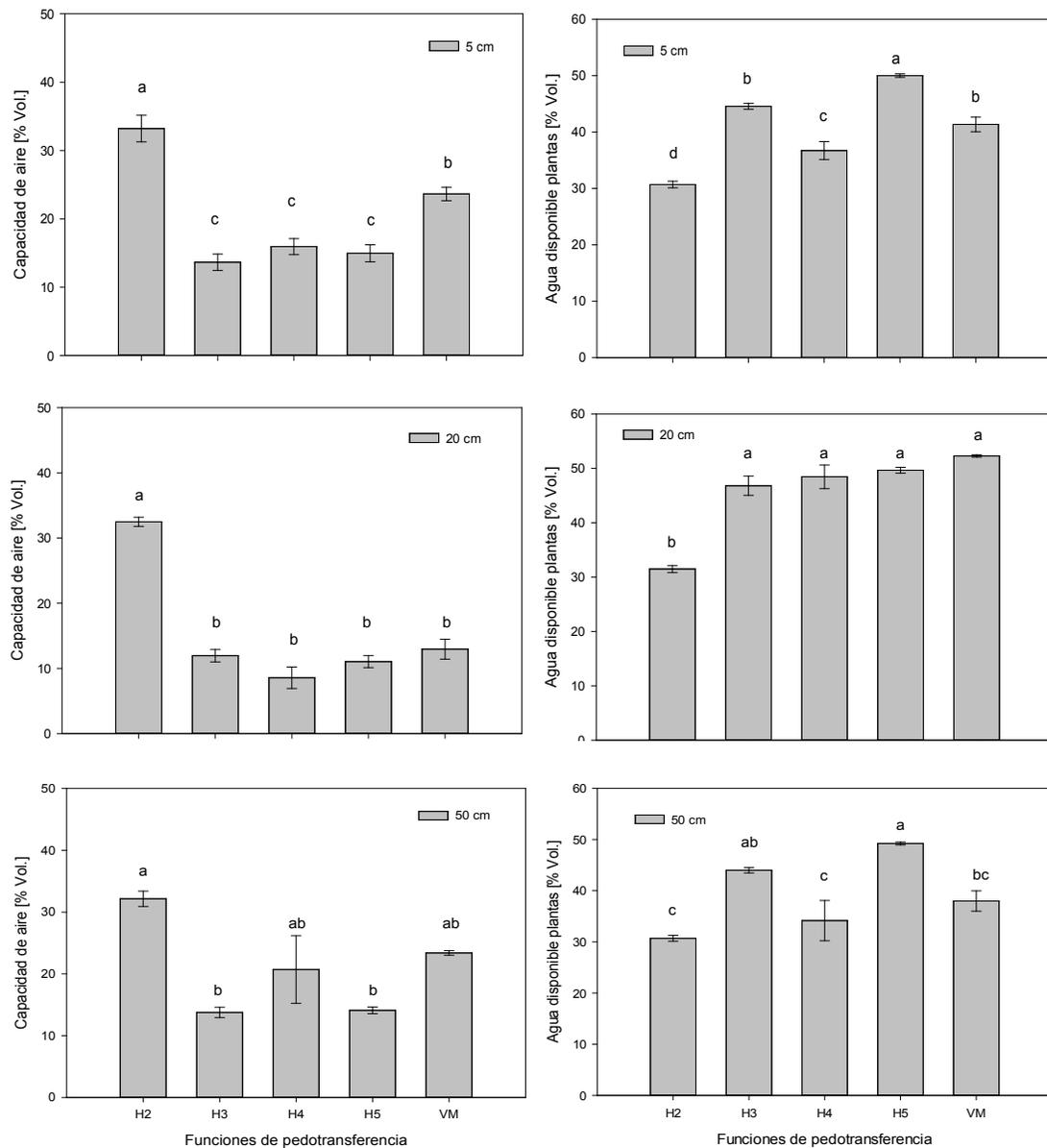


Figura 4. Estimación de: capacidad de aire y poros de agua disponible para las plantas para las tres profundidades, a través de funciones de pedotransferencia utilizando programa Rosetta.

Funciones de pedotransferencia (Cuadro 3). Cada barra de error está construida utilizando ± 1 desviación estándar del promedio; las letras en minúscula indican diferencia estadísticamente significativa ($p < 0,05$) para el valor medido y estimado para cada profundidad.

4. DISCUSIÓN

4.1 Caracterización física del suelo.

La Serie Llastucopresenta una textura (Cuadro 2), que según el triángulo de clasificación de tamaño de partículas USDA corresponde a un suelo franco arcillo limoso, lo que concuerda con lo descrito por CIREN (2003). Por su parte el contenido de materia orgánica es $> 12\%$ y densidad aparente de $0,58 \text{ [Mg/m}^3\text{]}$ en los primeros 20 cm, encontrándose en un rango similar a lo obtenido por Huygens *et al.* (2005) en un Andisol de la serie Paillaco, y característico para estos suelos $> 10\%$ MO y $Da < 0,9 \text{ [Mg/m}^3\text{]}$. En cuanto al contenido de materia orgánica está estrechamente relacionado a la variación de la Da en profundidad y los cambios en la distribución del tamaño de los poros, como lo observó Dörner *et al.* (2009a), en un Typic Hapludand serie Pelchuquín.

4.2 Efecto del establecimiento de un cultivo de arándano sobre la curva de retención de agua.

La curva de retención de agua presenta un carácter bimodal (Figura 1), característico de suelos de origen volcánico, lo que ha sido observado y discutido para Andisoles en Chile (Dörner *et al.*, 2010), España (Armas-Espinel *et al.*, 2003) y Japón (Miyamoto *et al.*, 2003).

En el primer rango de la curva se observa una menor pendiente en la CRA de 20 cm provocando una reducción en el volumen de macroporos, afectando la CA y PDR (Cuadro 3). Esta alteración de los poros estructurales a 20 cm podría ser influenciada por una conjugación de factores como: textura, estructura y manejo del suelo, principalmente en este caso se debería al manejo antrópico en el establecimiento del cultivo. El arándano para su establecimiento requiere de labores de subsolado, inversión de suelo y preparación de camellones generando la ruptura de agregados, compactación y desconexión de los poros, lo que en cierta medida concuerda con lo observado por Dörner *et al.* (2011), en muestras recolectadas a 20 cm de profundidad en un Andisol bajo un cultivo que había sido expuesto a labranza de suelo. Estos factores antrópicos no necesariamente generan un desmedro de la CA y PDR, un ejemplo es lo que se observa a 50 cm, donde los requerimiento de drenaje del predio a través de un arado del tipo subsolado en profundidad se logra aumentar el volumen de

macroporos a pesar de poseer una textura media que generaría poros de menor diámetro.

A pesar de estas fuertes labores agrícolas necesarias para el establecimiento del cultivo, la CRA de 5 cm presenta un alto volumen de macroporos los que principalmente se deben a los altos contenidos de materia orgánica y contenidos de arcilla sobre $> 15\%$ (Cuadro 2). Ambas propiedades tiene un rol fundamental en la formación de estructura del suelo, la MO como agente cementante de partículas de mayor tamaño y la arcilla, debido a sus propiedades coloidales, favorece la contracción del suelo en la medida que ocurran los ciclos naturales de mojado y secado del suelo (Horn y Smucker, 2005). Este último mecanismo, está asociado a que las partículas finas de alta superficie específica se encuentran recubiertas con una película de agua generando meniscos de alta cohesión al contacto con otras partículas creando una gran atracción que forman grietas, permitiendo de esta forma la agregación del suelo. Si bien esta profundidad presenta mejores características para el desarrollo pedológico exhibe el mismo volumen de CA e incluso un menor volumen de PDR que 50 cm, esta situación se podría deber a una compactación de los poros generada como consecuencia de labores de cosecha y mantención del huerto.

La CA que presenta la CRA de 20 cm de profundidad, en relación a las de 5 y 50 cm, es 10% menor. Sin embargo, las tres profundidades presentan valores que se encuentra sobre el rango crítico ($< 8\%$) de CA del suelo para las plantas, presentado por Horn y Fleige. (2009), en un suelo mineral, e incluso sobre el valor óptimo ($> 14\%$ CA) observado en un Andisol bajo bosque nativo (Dörner *et al.*, 2013). Este último valor demuestra que independiente de las variaciones a consecuencia de las labores agrícolas el suelo presenta las características necesarias para evitar un estrés del sistema radical por hipoxia, al cual el cultivo de arándano es muy sensible (Retamales y Hancock, 2012).

Con respecto ADP, para 20 cm presentó el mayor volumen debido a la redistribución de los poros generado de la ruptura de los poros estructurales del suelo mediante la labranza, situación similar observó Dörner *et al.* (2013). En cambio para 5 y 50 cm, el volumen de ADP se debe principalmente a los altos contenido de textura media y fina la que genera poros de menor diámetro (meso y microporos), porosidad que es independiente del manejo agrícola y que requiere de una mayor tensión para ser drenados.

Finalmente, al igual que lo observado para CA, las tres profundidades presentan valores de ADP sobre el rango óptimo ($> 20\%$ ADP) presentado por Horn y Fleige, (2009).

Estos altos contenidos de ADP (Cuadro 3) se debe al mayor rango que hay entre la CC θ_{60} y PMP θ_{15430} hPa. En este contexto cabe señalar que la definición de la CC presenta la mayor discrepancia entre los diferentes suelos, variando de θ_{60} a θ_{330} , como p. ej: Andisoles de Ecuador (Buytaert *et al.*, 2005) definió CC θ_{330} en cambio Tobonet *al.* (2010) definió CC θ_{100} hPa como el más apropiado para un Andisol de Costa Rica.

Los altos contenido de CA presentados anteriormente confirman que CC θ_{60} es el valor apropiado para estos suelos, determinando una alta CA generando las condiciones necesaria de aire y agua para el cultivo.

4.3 Ajuste curva de retención de agua mediante modelo de van Genuchten (1980).

El modelo de van Genuchten, a pesar de ser unimodal, presenta un buen coeficiente de correlación para estos suelos. Sin embargo, destaca el hecho que no representa exactamente los valores medidos para rangos de tensión cercana a saturación. Esto debido a la fuerte agregación de estos suelos que permite la presencia de poroso en y entre los agregados, lo que usualmente implica la presencia de CRA de carácter bimodal (Dörner *et al.*, 2010). Este mismo defecto observó Durner, (1994) concluyendo que esto se debería a la baja flexibilidad del modelo en este rango de porosidad.

A pesar de esto último destacan los altos valores de R^2 , especialmente para 20 cm con un R^2 : 0,98, similar a lo presentado por Dörner *et al.* (2009a) en un Typic Hapludand serie Pelchuquin. Este buen ajuste, podría deberse a que esta profundidad presenta una menor estructuración lo que asemejaría a suelos unimodales, resultando una mejor estimación del θ_s y α , este último parámetro encontrándose en el rango óptimo para suelos franco arcillo limoso según Leij *et al.* (1992).

Respuesta distinta observó Buytaert *et al.* (2005) en un Histic Andisol de Ecuador, donde presentó valores de ajuste R^2 : $<0,66$ concluyendo que el modelo de van Genuchten no es adecuado para estimar la curva de retención de agua en un Andisol.

4.4 Evaluación del ajuste de estimación de la curva de retención de agua a través de FPTs.

Como se observa en la Figura 3 y Cuadro 5 la FPTs H3 y H4 de 20 cm presenta el mejor ajuste de la CRA (RMSE y R^2). Esto se debe principalmente a que solo en esta profundidad las FPTs logran una buena estimación de θ_s y de los parámetros α y n , estos últimos son los que genera el mayor error entre las estimaciones debido que entregan la forma de la curva: mientras α ajusta la curva en el rango de los macroporos, n ajusta el punto de inflexión y el rango de los poros texturales de la CRA. Para Schapp *et al.* (2001), al contrario a lo mostrado en estos resultados la mejor estimación se obtendría con la suma de todos los niveles de FPTs (H5).

4.5 Mínimo set de datos de FPTs necesarios para estimar capacidad de aire y poros de agua disponible para las plantas.

Para 5 cm, la estimación de la capacidad de aire las FPTs no presentó un buen desempeño siendo sobreestimado y subestimado el valor medido, esto influenciado principalmente por los altos contenidos de materia orgánica que posee esta profundidad (Cuadro 2), creando cambios físicos en el suelo como la estructuración que tienen directa relación en el aumento de la porosidad. Estos contenidos de MO pueden generar una fuente de error en la estimación debido principalmente a los bajos contenidos que poseen los suelos pertenecientes a la base de datos del programa Rosetta debido a su origen mineral (Europa y Norte América), presentando contenidos de materia orgánica menores al suelo en estudio.

A pesar de lo mencionado en 5 cm al igual que en las otras profundidades los valores de FPTs H3, H4 y H5 no presentaron diferencias estadísticas, demostrando que la integración de CC y PMP no generaría una mejor estimación de CA, siendo necesario solo como nivel de información el porcentaje textural y la densidad aparente (H3). Para la estimación de ADP al igual que CA solo requeriría la FPT H3, coincidiendo con lo demostrado en el Figura 3 donde está FPT obtuvo el menor error en la estimación de la CRA. Distinta respuesta observó por Patil y Rajput (2009), donde la mejor estimación de la CRA se obtuvo con la suma de CC como FPT.

Esta diferencia podría deberse principalmente a la utilización como PTF CC a θ_{60} hPa

Si bien para ambos parámetros CA y ADP se obtuvieron estimaciones que presentaron igualdad estadísticamente significativa con respecto al valor medido, ADP presentó menores diferencias en la estimación del valor de laboratorio, demostrando que las FPTs presentan un mejor desempeño en la estimación de la humedad aprovechable para las plantas, generando un método confiable para la planificación del riego en el suelo estudiado. Similar a lo observado por Patil y Rajput (2009), donde la utilización FPTs y el programa Rosetta obtuvieron una buena estimación de CC y PMP.

Si bien existe una variada gama de instrumentos que miden la humedad del suelo o el ADP y son utilizados en la actualidad para planificar el riego (TDR, tensiómetros, bloques de resistencia, etc.) todos se caracterizan por tener un alto costo y requieren de calibración previa aumentando su dificultad en la estimación y en su utilización. Esto último ha generado que el método de estimación de ADP basado en la textura del suelo determinada a través del tacto o de valores de CC y PMP obtenidos de literatura, sean aún la forma más común de estimar la humedad aprovechable para las plantas. Los principales inconvenientes que presentan estas metodologías, en el caso de la estimación mediante el tacto, requiere de un entrenamiento del agricultor para adquirir habilidades en la interpretación del resultado, siendo un método simple pero muy subjetivo, aumentando la dificultad y errores en la estimación. Por otro lado la estimación de parámetros de riego basados en datos de literatura son principalmente valores obtenidos de investigaciones de suelos de otro tipo y de otros países por lo que no engloban las características edáficas, físicas y pedológicas del lugar, presentando una baja eficiencia en la estimación de los parámetros requeridos, generando un exceso o déficit de agua aplicada.

Es por esto que las FPTs adquieren una gran importancia y relevancia ya que a pesar de no ser una medición directa se demostró que estiman de buena manera el ADP generando la posibilidad de un riego sitio-específico aumentando la eficiencia del uso del agua en el riego y una agricultura más sustentable, al disminuir la presión sobre los recursos naturales.

5. CONCLUSIONES

- El Andisol en estudio presenta una alta capacidad de almacenamiento de agua (>65 %Vol.) en las tres profundidades, observando diferencias en la distribución de poros generado por labores agrícolas de establecimiento y de mantención del cultivo de arándano. A pesar de estos cambios los valores de capacidad de aire y volumen de poros de agua disponible para las plantas no se redujeron del rango óptimo para el cultivo.
- El modelo de van Genuchten (1980) logra un buen ajuste ($R^2: \geq 0,95$) de los parámetros que describen la curva de retención de agua validando su utilización en la serie Llastuco a pesar del carácter bimodal que presentan los suelos derivados de cenizas volcánicas.
- La curva de retención de agua estimada a través del porcentaje textural y la densidad aparente como nivel de información en la generación de funciones de pedotransferencia utilizada en el programa Rosetta fue la que presentó el menor RMSE ($0,04 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) en la estimación de la curva de retención de agua.
- De la estimación de la curva de retención de agua a través del programa Rosetta se puede concluir que el mínimo nivel de información necesario para estimar la capacidad de aire y el volumen de poros de agua disponible para las plantas es a través de la función de pedotransferencia que adiciona el porcentaje textural y densidad aparente, rechazando la hipótesis de esta investigación.
- Las funciones de pedotransferencia presentaron un mejor desempeño en la estimación del agua disponible para las plantas, demostrando que su utilización es una buena opción para estimar parámetros riego (capacidad de campo y punto de marchitez permanente) exhibiendo ser una buena herramienta en la planificación y uso del agua en el riego de forma más eficiente en comparación a otros métodos utilizados actualmente.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVAREZ-ACOSTA, C., LASCANO, R. y STROOSNIJDER, L. 2012. Test of the Rosetta pedotransfer function for saturated Hydraulic conductivity. *Open Journal of Soil Science*, (2):203-212 p.
- ARMAS-ESPINEL, S., HERNANDEZ-MORENO, J., MUÑOZ-CARPENA, R. y REGALADO, C. 2003. Physical properties of “sorriba” – cultivated volcanic soils from Tenerife in relation to andic diagnostic parameters. *Geoderma* 117, 297–311 p.
- BESOAIN, E., SEPULVEDA, G., 1985. Minerales secundarios. In: Tosso (Eds.), *Suelos Volcánicos de Chile*. INIA, Santiago, Chile. 153–214 p.
- BEAR, J. 1972. *Dynamics of fluid in porous media*. New York. Elsevier. 764p.
- BONILLA, C. 2001. Estimación del contenido de humedad del suelo mediante el empleo de funciones de pedotransferencia. *Agricultura Técnica*. 61(3): 326-338 p.
- BUYTAERT, W., WYSEURE, G., DE BIEVRE, B. y DECKERS, J. 2005. The effect of land-use changes on the hydrological behavior of Histic Andosols in south Ecuador. *Hydrological Processes*. 19: 3985-3997 p.
- BUZETA, A. 1997. *Berries para 2000* [cranberry americano (*Vaccinium macroparpo*); arandano o blueberry (*Vaccinium corymbosum*); lingonberry o cranberry europeo (*Vaccinium vita-idaea*); sanddorn (*Hippophaerhamnoides*)]. Fundacion Chile. 135 p.
- CASONOVA, M., SEGUEL, O., JOEL, A., MESSING, I., LUZIO, W. y VERA, W. Funciones de pedotransferencia para conductividad hidráulica en laderas de secano. 2003. *Revista Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*. 3 (2): 42-48 p.
- CHILE, CENTRO DE INFORMACIÓN DE RECURSOS NATURALES (CIREN). 2003. *Descripciones de suelos, materiales y símbolos. Estudio Agrológico Xª región Tomo I*. Santiago, Chile. 199 p.
- DAMIANO, F. y TABOADA, M. 2000. Predicción del agua disponible usando funciones de pedotransferencia en suelos agrícolas de la región pampeana. *Ciencia del Suelo* 18 (2): 77-88 p.
- DEC, D., DÖRNER, J. y BALOCHI, O. 2011. Temporal and spatial variability of

- structure dependent properties of a volcanic ash soil under pasture in southern Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research*. 71 (2); 293-303 p.
- DEC, D. y DÖRNER, J. Spatial variability of the hydraulic properties of a drip irrigated Andisol under blueberries. 2014. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal* (Aceptada).
- DEXTER, A.R. 2004. Soil physical quality Part I. Teory, effects of soils texture, density, and organic matter and effects on root growth. *Geoderma*, 120:201-214 p.
- DÖRNER, J., DEC, D., XINHUA, P. y HORN, R. 2009a. Efecto del cambio de uso en la estabilidad de la estructura y la función de los poros de un Andisol (Typic Hapludand) del Sur de Chile. *Revista Ciencia del Suelo y Nutrición* 9 (3): 190-209 p.
- DÖRNER, J., DEC, D., PENG, X. y HORN, R. 2010. Effect of land use change on the dynamic behaviour of structural properties of an Andisol in southern Chile under saturated and unsaturated hydraulic conditions. *Geoderma* 159: 189-197 p.
- DÖRNER, J., DEC. D., ZUÑIGA, F., SANDOVAL, P. y HORN, R. 2011. Effect of land use change on Andosol's pore functions and their functional resilience after mechanical and Hydraulic stresses. *Soil and Tillage Research* 115-116: 71-79 p.
- DÖRNER, J., DEC, D., ZUÑIGA, F., HORN, R., LOPEZ, I., LEIVA, C. y CUEVAS, J. 2013b. Soil changes in the physical quality of an andosol under different management intensities in southern Chile. In Krümmelbein, J., Horn, R., Pagliai, M., (Eds.), *Soil Degradation. Advances in GeoEcology* 42, Catena Verlag GMBH Reiskirchen, Germany, pp. 262-281 p.
- DURNER, W. 1994. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resources Research*. 30 (2); 211-223 p.
- ELLIES, A., GREZ, R. y RAMIREZ, C. 1997. La conductividad hidráulica en fase saturada como herramienta para el diagnostico de la estructura del suelo. *Agro Sur* 25 (1): 51-56 p.
- GONZALEZ-REYES, A. y MUÑOZ, A. 2013. Cambios en la precipitación de la ciudad de Valdivia (Chile) durante los últimos 150 años. *Revista Bosque (Valdivia)* 34 (2). 200-213 p.
- HANSON, E. y HANCOCK, J. 1996. Managing the nutrition of Highbush Blueberries.

- Michigan State University Extension, March. 8 p.
- HARTGE, R. y HORN, R. 2009. Die physikalische Untersuchung von Böden. Praxis Messmethoden Auswertung. 4. vollst. Überarbeitete Auflage. Schweizerbart Vorlage, Stuttgart, 178 p.
- HIRZEL, J. y RODRÍGUEZ, N. 2003. Necesidades nutricionales y fertilización del cultivo de arándano en etapa productiva. Informativo agropecuario bioleche – INIA Quilamapu. 3 p.
- HORN, R.; SMUCKER, A. 2005. Structure formation and its consequences for gas and water transport in unsaturated arable and forest soils. Soil and Tillage Research 82: 5-14 p.
- HORN, R. y FLEIGE, H. 2009. Risk assessment of subsoil compaction for arable soils in northwest Germany at farm scale. Soil and Tillage Research. 102. 201-208 p.
- HUYGENS, D., BOECKX, P., VAN CLEEMPUT, O., OYARZUN, C. y GODOY, R., 2005. Aggregate and soil organic carbons dynamics in South Chilean Andisols. Biogeosciences 2: 159–174 p.
- LEIJ, F., VAN GENUCHTEN, M. y RUSSELL, W. 1992. RETC: computer program for analyzing soil water retention and hydraulic conductivity data. USDA-ARS: 263-272 p.
- LOPEZ, I., KEMP, P., DÖRNER, J., DESCALZI, C., BALOCCHI, O. y GARCIA, S. 2013. Competitive strategies and growth of neighboring *Bromus valdivianus* Phil. and *Lolium perenne* L. Plants under water restriction. Journal of Agronomy and Crops Science.
- MIYAMOTO, T., ANNAKA, T y CHIKUSHI, J. 2003. Soil aggregate structure effects on dielectric permittivity of Andisol measured by time domain reflectometry. Vadose Zone Journal. 2: 90-97 p.
- NIELSEN, D.R., REICHARDT, K. y WIERENGA, P. 1983. Characterization of field measured soil water properties. In isotope and radiation techniques in soil physics and irrigation studies. IAEA. p. 55-78.
- OFICINA DE ESTUDIOS Y POLITICAS AGRARIAS (Odepa). 2014. Boletín frutícola, avance Abril 2014.
- PATIL, N. y RAJPUT, G. 2009. Evaluation of water retention functions and computer program “Rosetta” in predicting soil water characteristics of seasonally

- impounded shrink-swell soils. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* © ASCE.135 (3).286-294 p.
- PACHEPSKY, Y.A., RAWLS, W.J., GIMENEZ, D. y WATT, J. P. C. 1998. Use of soil penetration resistance and group method of data handling to improve soil water retention estimates. *Soil and Tillage Research*. 49: 117-128 p.
- PACHEPSKY, Y.A., TIMLIN, D. y RAWLS, W.J. 2001. Soil water retention as related to topographic variables. *Soil Science Society of American Journal*. 65: 460-462 p.
- RASOULZADEH, A. 2011. Estimating Hydraulic conductivity using pedotransfer functions. *Hydraulic Conductivity – Issues, Determination and Application*. 145-166 p.
- RAWLS, W.J., GISH, T.J. y BRAKENSIEK, D.L. 1991. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics In: Stewart, B.A. (ed). *Advances in Soil Science*. Springer, New York.
- RETAMALES, J. y HANCOCK, J. 2012. *Blueberries, Crop production science in horticulture*. Series; (21). 323 p. ISBN 978-1-84593-826-0.
- ROMANO, N. y PALLADINO. M. 2002. Prediction of soil water retention using soil physical data and terrain attributes. *Journal of hydrology*. 265: 56-75 p.
- RUBIO, C. M., LLORENS, P. y GALLART. F. 2008. Uncertainty and efficiency of pedotransfer functions for estimating water retention characteristics of soils. *European Journal of Soil Science*. 59: 339-347 p.
- SADZAWKA, A., CARRASCO, M., GREZ, R., MORA, M., FLORES, H. y NEAMAN, A. 2006. *Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile*. Centro de investigación Regional La Platina. Serie actas INIA. 34 (1). Santiago, Chile. 165p.
- SALAZAR, O., CASANOVA, M y LUZIO, W. 2005. Correlación entre worldreference base y soil taxonomy para los suelos de la X región de Los Lagos de Chile. *Revista Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*. 35-45 p.
- SANDOVAL, P. 2009. *Curva de retención de humedad, de contracción y permeabilidad de aire en función de distintas densidades aparentes de un suelo rojo arcilloso*. Tesis Ciencias Agrarias. Valdivia. Universidad Austral de Chile.
- SOIL SURVEY STAFF. 2010. *Keys to Soil Taxonomy*, 11th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.

- SCHAAP, M., LEIJ, F. y VAN GENUCHTEN, M. 2001. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*. 251: 163-176 p.
- SCHAAP, M, LEIJ, F. y VAN GENUCHTEN M. 1998. Neural network analysis for hierarchical prediction of soil water retention and saturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*. 62: 847-855 p.
- TOBON, C., BRUIJNZEEL, L. A., FRUMAU, A. y CALVO-ALVARADO, J. C. 2010. Changes in soil physical properties after conversión of tropical montane cloud forest to pasture in northern Costa Rica. *Tropical Montane Cloud Forests: Science for Conservation and Management*. 502-515 p.
- TOMASELLA, J., HODNETT, M., y ROSSATO, L. 2000. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. *Soil Science Society of America Journal*. 64: 327-338 p.
- WÖSTEN, J.H.M., LILLY, A., NEMES, A. Y LE BAS, C. 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma*. 90: 169-185 p.
- VAN GENUCHTEN, M.TH. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American Journal* 44:892-898 p.
- VAN GENUCHTEN, M.TH., LEIJ, F.J., YATES, S.R. 1991 The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils.
- VEREECKEN, H., WEYNANTS, M., JAVAUX, M., PACHEPSKY, Y., SCHAAP, M.G., VAN GENUCHTEN, M.TH. 2010. Using pedotransfer functions to estimate the van Genuchten-Mualem soil hydraulic properties: a review. 2010. *Vadose Zone Journal* 9: 795-820 p.