

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE
HUMEDAD DE SUELO *LOW-COST***

NICOLÁS ANDRÉS LEIVA BÜCHI

Santiago, Chile

2015

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE
HUMEDAD DE SUELO *LOW-COST***

**DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A LOW-COST SYSTEM FOR SOIL
MOISTURE MONITORING**

NICOLÁS ANDRÉS LEIVA BÜCHI

Santiago, Chile

2015

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE
HUMEDAD DE SUELO *LOW-COST***

Memoria para optar al título profesional de:
Ingeniero en Recursos Naturales Renovables

NICOLÁS ANDRÉS LEIVA BÜCHI

PROFESOR GUÍA	Calificaciones
Cristian Mattar Bader Ingeniero en Recursos Naturales Renovables, Dr.	7,0
PROFESORES EVALUADORES	
Alejandro León Stewart Ingeniero Agrónomo, Ph.D.	7,0
Rodrigo Fuster Gómez Ingeniero Agrónomo, M.S., Dr.	6,8

Santiago, Chile

2015

AGRADECIMIENTOS

Parto agradeciendo a mi querida madre Ana, por su apoyo y amor incondicional que me ayudaron siempre en mi camino. A mi querida familia, Tato, Rodrigo, Juan Luis, Marisol y todos los que me han acompañado siempre. A mi polola Sofía, por su gran apoyo y amor durante esta etapa clave de mi vida.

A mis amigos, compañeros e hijos, Fabián y Andrés por apañar y carrear en lo académico cuando era necesario ausentarme por razones de fuerza mayor o viajes transandinos espontáneos. Como también a todos mis amigos que ayudaron a que estos años de mi vida fueran los mejores, por mencionar algunos: Tebi, Andi, Negri y todos los sahuesos, Gori, Manolete y todo OFUB, Jorge y a todos mis compañeros y futuros colegas.

A los miembros del Laboratorio para el Análisis de la Biósfera (LAB) por su excelente disposición y soporte. Agradezco a mi estimado prof. guía Cristian Mattar por su gran disposición durante el desarrollo de esta memoria y su vocación docente. También al proyecto Conicyt - Fondecyt Iniciación 10133359 “Estimating the surface soil moisture at regional scale by using a synergic optical-passive microwave approach and remote sensing data” por hacer posible esta memoria.

Al profesor Oscar Seguel por ayudar con el horno y el secado de muestras de suelo. A Don Vicente Madariaga, agricultor y propietario, por su excelente voluntad y disposición para facilitar la zona de estudio de esta memoria.

Y finalmente, agradezco a las comunidades open source y personas que transmiten sus conocimientos de forma libre y desinteresada para formar una sociedad más justa.

INDICE

1. RESUMEN	1
2. ABSTRACT.....	2
3. INTRODUCCIÓN	3
3.1. OBJETIVOS	8
3.1.1. <i>Objetivo general</i>	8
3.1.2. <i>Objetivos específicos</i>	8
4. MATERIALES Y MÉTODOS	9
4.1. ÁREA DE ESTUDIO.....	9
4.2.1. <i>Hardware</i>	10
4.2.2. <i>Software</i>	11
4.3. MÉTODOS	12
4.3.1. <i>Calibración ex situ</i>	12
4.3.2. <i>Calibración in situ</i>	15
4.3.3. <i>Diseño, construcción e instalación del prototipo</i>	15
4.3.4. <i>Validación in situ</i>	16
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	17
5.1. CALIBRACIÓN <i>EX SITU</i>	17
5.2. CALIBRACIÓN <i>IN SITU</i>	21
5.3. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DEL PROTOTIPO.....	22
5.4. VALIDACIÓN <i>IN SITU</i>	23
5.5. DISCUSIÓN	25
6. CONCLUSIONES	26
7. BIBLIOGRAFÍA	27
8. ANEXOS.....	33

1. RESUMEN

La humedad del suelo es un parámetro clave para diversas aplicaciones ambientales, hidrológicas, meteorológicas y actividades productivas relacionadas con los sistemas silvoagropecuarios. Dentro de los métodos para obtener información de la humedad de suelo, las mediciones in-situ son esenciales para analizar la transferencia de energía en modelos suelo-vegetación-atmósfera y la validación de métodos indirectos para la estimación de esta variable. Por esto, contar con métodos confiables, robustos y sistematizados de mediciones in-situ es requerido para la obtención de modelos ambientales óptimos. La utilización de sensores convencionales para caracterizar zonas extensas en cuanto a la humedad de suelo es costosa y lejos del alcance de los usuarios, por lo que la inclusión de sensores *low-cost* resulta ventajosa. Sin embargo, para asegurar el correcto funcionamiento de estos sensores, se hace necesario un protocolo de calibración en laboratorio. En este trabajo se evalúa el rendimiento de dos sensores *low-cost* VH400 (www.vegetronix.com), basados en la constante dieléctrica del suelo, en comparación a sensores convencionales *time domain reflectometry* (TDR), CS655 y CS650, antes y después de aplicar técnicas de calibración en laboratorio. Para esto, se utilizaron fórmulas de error cuadrático medio (RMSE) para distintas series temporales de mediciones de los sensores en campo, en la comuna de Chimbarongo, Chile, y en un ambiente con condiciones controladas. Los resultados indican que las fórmulas de fábrica para obtener las mediciones del contenido volumétrico del agua de los sensores VH400 presentan valores de RMSE mayores a $0,33 \text{ m}^3/\text{m}^3$ en ambas condiciones y valores entre $0,03$ y $0,04 \text{ m}^3/\text{m}^3$ con las ecuaciones obtenidas durante la calibración. Esta disminución en los valores de RMSE ($0,29 \text{ m}^3/\text{m}^3$) indica que la inclusión de sensores *low-cost* en redes de monitoreo de humedad de suelo conlleva a ventajas relevantes mientras se aplique un trabajo de calibración en laboratorio que asegure el buen funcionamiento de estos sensores.

Palabras Claves: Humedad de suelo, sensores *low-cost*, calibración, validación.

2. ABSTRACT

Soil moisture is a key parameter for several environmental, hydrological, meteorological, agriculture and forestry applications. Among the existing techniques for estimating soil moisture, in-situ measurement techniques are essential for energy transfer analysis through soil-vegetation-atmosphere models and validation of indirect methods for estimating this variable. Thus, having reliable and systematic methods of in-situ measurements it is necessary to obtain optimal environmental models. The use of conventional sensors to characterize soil moisture large areas is expensive and complex, while the application of low-cost sensors brings several benefits to complement existing soil moisture networks. However, to ensure proper operation of these sensors it is necessary to apply a calibration technique in the laboratory. In this work, the performance of two low-cost sensors VH400 (www.vegetronix.com) based on the dielectric constant of the soil, are compared to conventional sensors of time domain reflectometry, CS655 and CS650, before and after apply calibration laboratory techniques. For this matter, mean square error (RMSE) of different time series from VH400 sensors measurements is applied to estimate the performance of these sensors in controlled conditions and in field, Chimbarongo, Chile. The results shows that factory calibration for VH400 measurements have RMSE values greater than $0.33 \text{ m}^3/\text{m}^3$ in both conditions and values between 0.03 and $0.04 \text{ m}^3/\text{m}^3$ from laboratory calibration. This reduction in RMSE values after the calibration protocol ($0.29 \text{ m}^3/\text{m}^3$) indicates that the inclusion of low-cost sensors in soil moisture networks leads to remarkable advantages if laboratory calibration is applied to ensure the proper functioning of these sensors.

Keywords: Soil Moisture, low-cost sensors, calibration, validation.

3. INTRODUCCIÓN

La humedad del suelo es un factor esencial en la biósfera y en la interacción suelo-atmósfera. Esta variable tiene estrecha relación con la evapotranspiración, influye en los procesos de intercambio de calor y de distribución de los flujos de energía en la interface tierra-atmósfera (Wang and Qu, 2009; Louvet *et al.*, 2015). Además, la humedad de suelo incide directamente en la infiltración, afectando el contenido de agua en el suelo y al escurrimiento superficial, generando un aspecto clave para los sistemas productivos agrícolas (Berg y Famiglietti, 2005; de Rosnay *et al.*, 2006; Liu *et al.*, 2008).

La humedad del suelo puede ser medida mediante técnicas *in situ* y estimada por técnicas de percepción remota o a partir del uso de modelos de transferencia suelo-vegetación-atmósfera (Blöschl *et al.*, 2009; Bertoldi *et al.*, 2014; Paulik *et al.*, 2014). Las mediciones *in situ* son esenciales para analizar los procesos de transferencia de agua y energía que ocurren en la interacción suelo-vegetación-atmósfera y de esta manera, poder evaluar su rol en la modelación climática a diferentes escalas espaciales (Jaeger y Seneviratne, 2011, Coopersmith *et al.*, 2015b). Por ello, en las últimas décadas se ha reconocido la relevancia de contar con técnicas de mediciones *in situ* confiables, robustas y automatizadas de la humedad de suelo como un insumo esencial para aplicaciones ambientales, hidrológicas, meteorológicas, climáticas y en sistemas silvoagropecuarios (Ma *et al.*, 2004; Majone *et al.*, 2013; Massari *et al.*, 2014, Kerr *et al.*, 2015; Laiolo *et al.*, 2015).

La técnica standard para medir esta variable *in situ* corresponde al método termogravimétrico (Seneviratne *et al.*, 2010), el cual consiste en secar una muestra de suelo en un horno para luego evaluar su pérdida de peso en el contenido de agua por unidad de masa de suelo. En esta técnica, la cantidad de agua presente en el suelo se expresa de dos formas, en base volumétrica (θ_v) que corresponde a metros cúbicos de agua por metros cúbicos de suelo y en base gravimétrica (θ_g) que corresponde a gramos de agua por gramos de suelo. Ambas expresiones están relacionadas mediante la siguiente ecuación:

$$\theta_v = \theta_g(\rho_b/\rho_w) \quad (1)$$

Donde ρ_b es la densidad aparente del suelo seco y ρ_w la densidad del agua. El método de referencia para la técnica termogravimétrica contempla secar la muestra de suelo a 105°C en un horno durante 10 a 24 horas, dependiendo del tipo de suelo y contenido de humedad, hasta que no haya pérdida significativa de peso en humedad. Luego se estima el contenido de agua en el suelo a través de los gramos perdidos en agua por gramo de suelo (Robinson *et al.*, 2008).

Una segunda técnica corresponde a la dispersión de neutrones mediante una sonda. Este método es rápido y preciso para determinar el contenido de agua en el suelo a profundidades mayores de 0,30. Mediciones a profundidades menores pueden perder su precisión debido a la densidad de las raíces y el efecto de la absorción del agua (Zreda *et al.*, 2008). En esta técnica, se dispersan neutrones en el suelo a partir de una sonda de

aspersión para que colisionen con los núcleos de los átomos de hidrogeno presentes en el agua perdiendo su carga energética y terminando termalizados. Además, las colisiones causan una redirección de los neutrones, mientras más colisiones mayor probabilidad de que los neutrones regresen a la fuente. Finalmente, un conteo de los neutrones termalizados que regresan a un detector durante un período de tiempo determinado entrega una estimación de la cantidad de núcleos de hidrogeno en el suelo, estimando la cantidad de agua en el suelo según una previa calibración (Franz *et al.*, 2012). La relación entre el contenido de agua del suelo y los neutrones termalizados dependen de propiedades del suelo como la textura, densidad aparente, materia orgánica, composición química y profundidad de la medición por lo que las calibraciones de este método son sitio dependientes (Quezada *et al.*, 2010).

Otro método de medición *in situ* corresponde a las técnicas basadas en la conductividad eléctrica del suelo, las cuales miden la cantidad de sales de un suelo a través de la capacidad que tiene el agua contenida en el suelo para transportar cargas eléctricas. Estas técnicas indican cambios en las propiedades del suelo como proporción de arcilla, salinidad, contenido de agua y contenido orgánico en carbono (Martinez *et al.*, 2008; Robinson *et al.*, 2012; Akramkhanov *et al.*, 2014). Aunque las técnicas de conductividad eléctrica miden directamente la salinidad del suelo, cuando son utilizadas en suelos poco salinos resultan eficaces para estimar indirectamente la humedad del suelo. Métodos como sistemas de inducción electromagnética han sido empleados ampliamente en agricultura de precisión debido a que son poco destructivos, rápidos y económicos (Stadler *et al.*, 2015).

A pesar que la conductividad eléctrica del suelo se ve afectada por múltiples factores y es complicado separar el efecto de un solo factor, se ha demostrado que existe una alta correlación entre la conductividad eléctrica del suelo y la humedad del suelo (Kachanoski *et al.*, 1990; Misra and Padhi 2014).

Varios modelos empíricos han sido desarrollados para describir la conductividad eléctrica del suelo en función a la humedad del suelo. Uno de los modelos más simples, que considera sólo la fase de conducción eléctrica de la solución para suelos saturados y no saturados, corresponde al de Mualem y Friedman (1991):

$$\sigma_a = \sigma_w \theta^{1,5} \left(\frac{\theta}{\theta_{sat}} \right)^{2,5} \quad (2)$$

Donde σ_a es la conductividad eléctrica aparente del suelo, σ_w es la conductividad eléctrica de la solución, θ es la humedad del suelo y θ_{sat} es la cantidad de agua en el suelo saturado.

El agua tiene varias propiedades únicas, una de estas es que contiene un momento dipolar permanente que corresponde al desplazamiento de cargas moleculares positivas y negativas debido a la posición de los átomos de hidrogeno con respecto al átomo de oxígeno. Es por esto que el agua tiene una constante dieléctrica o permitividad relativa de ~80. La permitividad relativa es adimensional y se define por la siguiente ecuación:

$$\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0 \quad (3)$$

Donde ϵ_r es la permitividad relativa, ϵ es la permitividad del material (pF/m) y ϵ_0 es la permitividad del vacío (8.854 pF/m) (Robinson *et al.*, 2008).

Otra posibilidad de medir la humedad de suelo *in situ* es a través de sensores basados en la constante dieléctrica. Estos sensores aprovechan las propiedades electromagnéticas del suelo para medir su contenido de agua debido a la alta permitividad del agua ($\epsilon_r \cong 5$) y el aire ($\epsilon_r \cong 1$) en relación al suelo (Evelt and Parkin, 2005; Kizito *et al.*, 2008).

Los sensores más usados basados en la constante dieléctrica corresponden a *time domain reflectometry* (TDR) y *frequency domain reflectometry* (FDR) (Walker *et al.*, 2004; Robinson *et al.*, 2008; Vereecken *et al.*, 2008; Skierucha *et al.*, 2015; Seneviratne *et al.*, 2010). Los instrumentos TDR utilizan la velocidad de propagación de una señal electromagnética emitida a través de un par de electrodos para determinar la permitividad del material medido (Bogena *et al.*, 2007; Kizito *et al.*, 2008). La técnica *time domain reflectometry* consiste en medir el tiempo de viaje de los pulsos electromagnéticos a través de una línea de transmisión de largo conocido (Cataldo *et al.*, 2014). El tiempo de viaje de los pulsos está relacionado a la permitividad eléctrica del medio o suelo y se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta t = \frac{2L\sqrt{\epsilon_r}}{c} \quad (4)$$

Donde Δt es el tiempo de viaje de un pulso electromagnético, L es la distancia de la línea de transmisión, ϵ_r es la permitividad relativa del suelo y c la velocidad de la luz en el vacío ($2,9979 \times 10^8$ m/s) (Skierucha *et al.*, 2015).

La variación en la humedad de suelo modifica la permitividad relativa del suelo, esto afecta el tiempo de viaje del pulso electromagnético permitiendo estimar el contenido volumétrico del agua en el suelo (m^3/m^3) mediante calibraciones y modelos empíricos. Los distintos métodos de medición *in-situ* de la humedad del suelo se muestran en el Anexo 1.

A pesar de los importantes avances tecnológicos relacionados con las técnicas de medición *in situ*, la humedad de suelo presenta una gran variabilidad espacial ya que está determinada por factores como la humedad relativa, topografía, propiedades del suelo y la cobertura de vegetación (Grayson *et al.*, 1997; Western *et al.*, 2004; Sobrino *et al.*, 2012; Mattar *et al.*, 2012). Debido a esto, la estimación y caracterización de la humedad del suelo en zonas extensas no resulta sencilla, ya que se necesitan redes exhaustivas de monitoreo para lograr una representatividad adecuada (Dorigo *et al.*, 2010; Dorigo *et al.*, 2011; Mattar *et al.*, 2014). La determinación de la humedad de suelo de manera periódica y a escala regional es difícil por medio de estimaciones puntuales, las que son escasas, complejas y costosas (Mallick *et al.*, 2009). Pese a esto, existen esfuerzos en la implementación de redes para medir esta variable a grandes escalas y de forma periódica, tal como *The International Soil Moisture Network* (ISMN) la cual cuenta en la actualidad con 19 redes y más de 500

estaciones distribuidas en América, Europa, Asia, Oceanía y África (Dorigo *et al.*, 2011; Dorigo *et al.*, 2013).

A pesar de los esfuerzos por constituir redes de medición de la humedad del suelo a escala global, estas pueden resultar costosas y lejos del alcance de los usuarios. Debido a esto, es posible desarrollar otras formas para optimizar en costos los métodos existentes mediante la implementación de sensores de bajo costo (*low-cost*). Estos sensores presentan una precisión similar a los sensores convencionales pero requieren una calibración en laboratorio para su correcto funcionamiento (Mittelbach *et al.*, 2011). Una red de sensores *low-cost* podría abarcar mayores áreas (>2.000 ha) mejorando la resolución espacial del contenido de humedad del suelo complementando las redes convencionales. Algunos sensores basados en la constante dieléctrica de los suelos son considerados *low-cost*. La implementación de estos sensores permite la utilización de un mayor número de instrumentos reduciendo el error de muestra asociado a la variabilidad espacial del suelo (Mittelbach *et al.*, 2012). Acorde a esto, existen varias redes que han empleado sondas de capacitancia *low-cost* para caracterizar zonas extensas, un ejemplo corresponde a *Soil Climate Analysis Network* (SCAN) ubicado en Estados Unidos, donde la red opera desde 1991 (Mittelbach *et al.*, 2011; Coopersmith *et al.*, 2015a).

En algunos estudios (Bogena *et al.*, 2007; Kizito *et al.*, 2008; Rosenbaum *et al.*, 2010; Rosenbaum *et al.*, 2011), se han utilizado sensores *low-cost* basados en la constante dieléctrica del suelo, tales como EC-5 y ECH2O-TE de *Decagon Devices*, los cuales funcionan a baja frecuencia (<70 MHz). Algunos experimentos (Campbell *et al.*, 1990; Kelleners *et al.*, 2005; Chen and Or, 2006) han discutido sobre la frecuencia óptima en el uso de instrumentos de constante dieléctrica *low-cost*. La conclusión común fue que utilizar altas frecuencias (>500 MHz) en los instrumentos disminuía la sensibilidad en cambios de la conductividad eléctrica del suelo logrando una medición más precisa.

En otro estudio (Mittelbach *et al.*, 2011) se evalúa la precisión de sensores de sondas de capacitancia *low-cost* 10HS de *Decagon Devices* en comparación a sensores TDR TRIME-EZ y TRIME-IT más métodos termogravimétricos sobre muestras de suelo de dos tipos de textura distintas en Suiza. Se comprobó una alta sensibilidad del sensor *low-cost* 10HS a las condiciones del suelo disminuyendo su precisión a mayores contenidos de agua en el suelo. La calibración obtenida en laboratorio demostró que los sensores entregaban datos confiables sólo si se utilizaban en suelos similares a las condiciones de laboratorio (sitio-dependientes) y a contenidos de humedad de suelo menores a $0,4 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

Otro tipo de sensores *low-cost* diseñados recientemente corresponden a sensores basados en ondas de calor (Jorapur *et al.*, 2015), estos sensores estiman la humedad del suelo bajo la relación de que la máxima temperatura producida por una línea de transmisión de calor a una distancia predeterminada de la fuente tiene una relación inversa con el calor específico volumétrico del suelo. El prototipo del experimento resultó ser un sensor de muy bajo consumo eléctrico (<0,3 W) pero con una precisión limitada en suelos con contenido volumétrico mayor a $0,3 \text{ m}^3/\text{m}^3$ debido al efecto de la saturación del suelo sobre la técnica.

La ventaja de utilizar estos sensores *low-cost* es la posibilidad de construir redes extensas de monitoreo de la humedad de suelo, de esta manera lograr caracterizaciones con mayor resolución en áreas de gran tamaño, utilizando menor presupuesto (<150 USD) en comparación a los sensores convencionales (>400 USD) y obteniendo mayor resolución espacial para aportar a la toma de decisiones (Young *et al.*, 2014). Sin embargo, su precisión puede variar significativamente y por ende es necesario considerar que algunos sensores *low-cost* podrían perder sus condiciones iniciales para medir el contenido de agua en el suelo o introducir errores sistemáticos en la medida (Seneviratne *et al.*, 2010).

La utilización de redes de monitoreo de humedad de suelo en Chile ha obtenido poca atención de los usuarios, las redes existentes son principalmente privadas de uso agrícola o para estudios de eco-hidrología. Dentro de este contexto, existe una red de monitoreo en Chile orientada a la investigación ecológica del país a largo plazo (LTSER) que opera desde el 2005. La red cuenta con sitios de monitoreo en Fray Jorge, Senda Darwin, Omora, los Andes y el Desierto de Atacama (Haberl *et al.*, 2006).

Una de las redes que se ha diseñado recientemente es la red LAB-net, correspondiente a la primera red de Chile para monitorear la humedad de suelo para productos de humedad de suelo y de teledetección (Mattar *et al.*, 2014). Actualmente esta red cuenta con una estación ubicada en Oromo, Región de Los Lagos y está incluida dentro de la *International Soil Moisture Network* (ISMN). Para potenciar esta iniciativa es necesario completar esta red con nuevas tendencias de bajo costo que permitan las ventajas anteriormente descritas.

Como parte de un esfuerzo para complementar esta red, el objetivo de esta memoria es el diseño y evaluación de un sistema de monitoreo de humedad de suelo superficial *low-cost*. Para esto, se configurará el sistema de monitoreo a ser implementado en el área de estudio, posteriormente será calibrado en laboratorio y validado acorde a valores provenientes de estaciones estandarizadas.

3.1. Objetivos

3.1.1. Objetivo general

Diseñar y evaluar un sistema para el monitoreo de la humedad de suelo superficial *low-cost*.

3.1.2. Objetivos específicos

Calibrar sensores de humedad de suelo *low-cost* mediante comparación con sensores convencionales y técnica termogravimétrica en laboratorio.

Configurar y diseñar un sistema de monitoreo de humedad de suelo superficial autosuficiente.

Validar el sistema de monitoreo utilizando datos provenientes de estaciones estandarizadas.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Área de estudio

El área de estudio corresponde a un predio ubicado en la VI región de O'Higgins en la comuna de Chimbarongo ($34^{\circ}43'39.98''\text{S}$ $70^{\circ}58'44.72''\text{O}$). Este predio tiene una superficie aproximada de tres hectáreas de cultivos de frambuesa y utiliza riego por surcos. El clima de esta zona corresponde al tipo mediterráneo, específicamente templado cálido con estación seca prolongada. Las precipitaciones promedio alcanzan los 538 mm/año y existe una alta oscilación térmica en todas las estaciones (30 a 12°C en verano y 15 a 2°C en invierno) (Santamaría-Artigas *et al.*, 2015). Además, este es un sitio de instalación LAB-net (Mattar *et al.*, 2014) donde ya se han desarrollado experiencias previas para el monitoreo del contenido volumétrico y gravimétrico de la humedad del suelo (Olivera-Guerra *et al.*, 2015). El sitio contiene un suelo franco arenoso no salino con una composición de 51,8%, 35,3% y 12,9% para arena, limo y arcilla respectivamente (INIA, 2015).

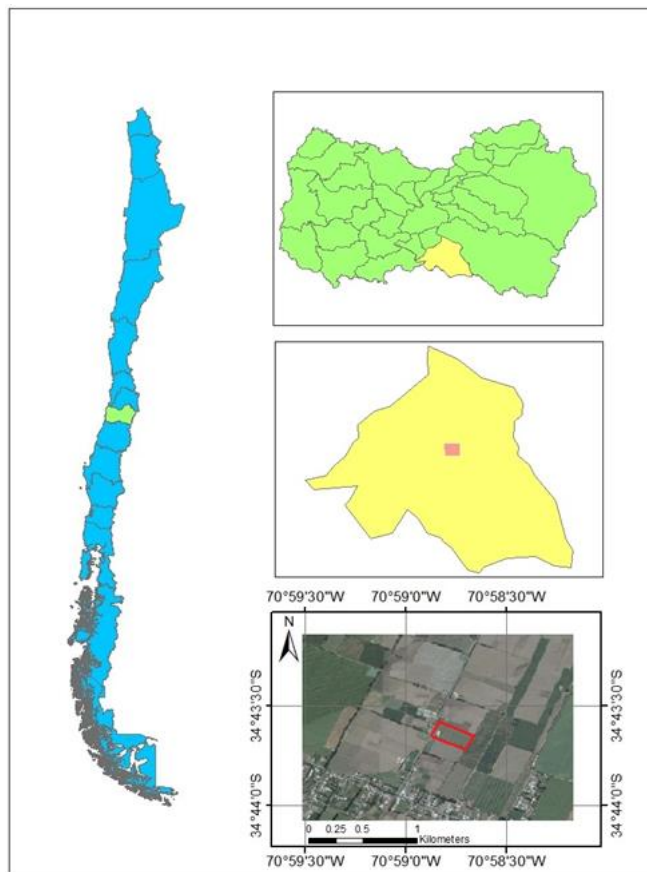


Figura 1. Ubicación del predio.

4.2. Materiales

Los materiales se dividen entre los componentes contenidos por cada sistema elaborado y los utilizados para el protocolo de calibración. En el Anexo 2 se muestran los materiales que contiene cada sistema de monitoreo con sus costos asociados y en el Anexo 3 los materiales empleados en la calibración de los sensores *low-cost*. A continuación se detallan los componentes de cada sistema de monitoreo de humedad de suelo superficial según categoría.

4.2.1. Hardware

En la figura 2 se muestra la interacción de los principales componentes de *hardware* del sistema *low-cost*. Los componentes de *hardware* utilizados son una fuente de poder basada en una batería recargable por placas fotovoltaicas, sensores de humedad de suelo *low-cost* VH400 (www.vegetronix.com), una placa Arduino Uno para controlar y obtener la información de los sensores y un sistema de memoria o almacenamiento de datos.

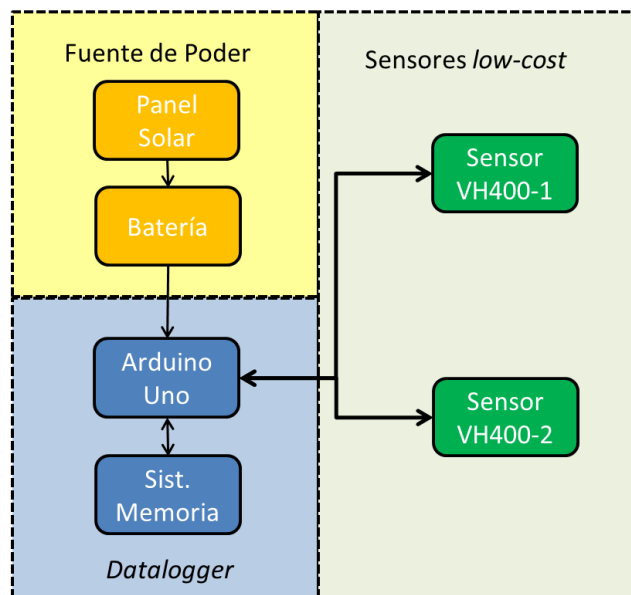


Figura 2. Esquema de componentes de *hardware*.

4.2.1.1. Fuente de poder

Los sistemas deben contar con autonomía energética para realizar las mediciones de forma independiente. Por esto se utilizó un panel fotovoltaico de 5 W policristalino para 12 V nominales, logrando recargar ocho pilas Ni-MH en serie que suman 9.6 V nominales con 2700 mA para alimentar el sistema. Se utilizó un condensador 450 uF de 16 V para atenuar las fluctuaciones de voltaje de la placa durante el día, como también un diodo N4001 para evitar que la intensidad (A) vaya en sentido contrario durante la noche.

4.2.1.2. **Arduino Uno**

Cada sistema *low-cost* contiene una placa Arduino Uno versión R3 con un microcontrolador ATmega328 integrado. A través de este dispositivo se configuran los sensores *low-cost* para obtener las mediciones de humedad de suelo. Asimismo, se comunica con un sistema de almacenamiento para guardar las mediciones obtenidas. Esta placa de desarrollo obtiene los valores de las mediciones del sensor *low-cost* en valores analógicos (*analog value*) que van desde 0 a 1024 y cada valor representa un aproximado de 4,88 mV. Por lo tanto, la placa admite una respuesta del sensor entre 0 a 5 V con una resolución de 4,88 mV.

4.2.1.3. **Sistema de almacenamiento**

Las mediciones obtenidas por Arduino Uno son registradas en una tarjeta micro SD de 8 GB de capacidad. Esto se logra a través de un *Logger Shield* uSD (www.olimex.cl) para guardar cada medición con un registro de hora asociada en UTC (*Universal Time Clock*).

4.2.1.4. **Sensores de humedad de suelo *low-cost***

Se utilizaron sensores de humedad de suelo *low-cost* VH400 (www.vegetronix.com). Estos sensores calculan la constante dieléctrica del suelo mediante técnicas de transmisión lineal. Este modelo de sensor ha sido utilizado en un estudio que evalúa su potencial para monitorear la humedad de la hojarasca y su interacción con la atmósfera en un bosque de hojas caducas (Wilson *et al.*, 2014).

El sensor estima el contenido volumétrico del agua en el suelo según un voltaje entre 0 y 3,3V el cuál será interpretado por el Arduino, cayendo dentro del rango analógico permitido por lo que no requiere un circuito intermedio. Estos sensores necesitarán un voltaje de excitación de entre 3.5 y 10 V con una corriente menor a 7 mA. Luego, la transformación a contenido de agua volumétrico en el suelo se hará conforme a una ecuación de fábrica que convierte voltaje en contenido volumétrico de agua en el suelo (m^3/m^3) (Anexo 4). Posteriormente, en la fase de calibración se obtuvieron nuevas ecuaciones que fueron comparadas con la de fábrica para evaluarlas según análisis de error cuadrático medio.

4.2.2. **Software**

Se utilizó principalmente el *software* Arduino IDE para programar el microcontrolador ATmega328 contenido en la placa para cumplir las siguientes funciones: (1) controlar los sensores VH400 obteniendo las mediciones de humedad de suelo superficial cada 15 minutos promediando las mediciones cada 5 minutos, (2) crear un registro de hora (UTC) por cada medición obtenida según sincronización inicial a través de un PC, (3) guardar las mediciones obtenidas en el sistema de almacenamiento y repetir el proceso. Cada Arduino Uno fue configurado en modo *sleep* para optimizar el consumo del sistema.

4.3. Métodos

4.3.1. Calibración *ex situ*

La calibración *ex situ* consiste en optimizar el funcionamiento de los sensores *low-cost* mediante un análisis de correlación lineal con un sensor convencional y el contenido volumétrico del agua de una muestra determinada. Para esto, se compararon las mediciones de humedad de suelo obtenidas por los dos sensores VH400 y un sensor CS655 (TDR), como también con el contenido volumétrico de agua en el suelo estimado en cada muestra. Las mediciones se realizaron en un depósito plástico con una capacidad de 5000 cm³ en donde se irrigaron distintas cantidades de agua. La masa de los depósitos con suelo fue estimada antes y después de ser irrigados, para estimar su contenido de agua utilizando la técnica termogravimétrica. Los sensores se instalaron a 0,05 m de la superficie de forma horizontal de modo de obtener lecturas a la misma profundidad.

Se utilizó una profundidad de 0,05 m para la calibración debido a que los sensores de humedad de suelo de la estación con la que se realizó la validación (estación LAB-net) se encuentran a esta misma profundidad. Según otras experiencias, que evalúan distintos sensores de humedad de suelo *low-cost* basados en la constante dieléctrica (Sakaki *et al.*, 2008; Mittelbach *et al.*, 2011; Majone *et al.*, 2013), este tipo de calibración es fundamental para su correcto funcionamiento en la estimación de la medida del contenido volumétrico del agua en el suelo.

Se compararon las mediciones obtenidas por los sensores VH400 aplicando las rectas de calibración de fábrica (CAL₀, en adelante) con las obtenidas por el sensor CS655. Luego, se analizó la correlación lineal de las mediciones en valores analógicos de los sensores VH400 y los datos de contenido volumétrico de agua en el suelo del sensor CS655 para crear una nueva recta de calibración (CAL_{TDR}, en adelante). Adicionalmente, se generó otra recta de calibración con la estimación del contenido volumétrico del agua en el suelo a partir del método termogravimétrico aplicado en las muestras (CAL_{VWC}, en adelante). Estas rectas fueron evaluadas con el fin de estimar el mejor resultado al ser comparadas con sensores TDR (CS650 y CS655) durante la validación.

Durante el experimento se aplicaron cinco tratamientos irrigando agua de forma uniforme al depósito: 500 cm³, 1000 cm³, 1500 cm³, 2000 cm³ y 3000 cm³. Además, se obtuvieron mediciones de los sensores en suelo seco como control para analizar su comportamiento en ausencia de humedad. El experimento se realizó de la siguiente manera:

- (1) Se obtuvieron muestras de suelo de la zona de estudio entre la superficie del suelo y 0,10 m de profundidad para realizar la calibración con una muestra de propiedades similares a las que estarán insertas los sistemas de monitoreo de humedad de suelo durante la validación. Las muestras fueron homogeneizadas de forma mecánica utilizando un saco para luego ser secadas en un horno a 105°C durante 24 horas.

(2) Se llenó el depósito plástico con tierra seca de la zona de estudio hasta completar los 5000 cm³ de volumen del depósito. Luego, la muestra se pesó en una balanza digital para conocer su masa en gramos (Figura 3). La precisión de la balanza fue previamente verificada con pesos de 5, 20 y 1000 gr con un error de 1 gr.



(a)



(b)

Figura 3. Pasos 1 y 2 del protocolo de calibración: (a) Secado de muestras de suelo en horno a 105°C durante 24 horas, (b) Pesaje de muestra para tratamiento.

(3) Se introdujeron los dos sensores VH400 y el TDR CS655 equidistantes entre ellos y a una profundidad de 0,05 m de la superficie del suelo para simular el escenario en terreno. Se configuró cada sensor VH400 y el CS655 con un Arduino UNO para obtener una medición cada 30 segundos a través de un Computador y un *software* de comunicación serial Hyperterminal (Figura 4). Cada sensor VH400 fue rotulado con su Arduino Uno respectivo para su posterior implementación *in situ* (VH400-1 y VH400-2).



(a)



(b)

Figura 4. Paso 3 del protocolo de calibración: (a) Sensores de humedad de suelo, TDR CS655 (blanco) y VH400 1-2 (rojo), (b) Configuración de sensores para las mediciones.

(4) Se aplicó cada tratamiento irrigando el volumen de agua propuesto. Para esto, se utilizó una fuente con orificios distribuidos de forma homogénea para asegurar una irrigación uniforme (Figura 5). Se registraron mediciones de cada tratamiento hasta que la pendiente de los datos se aproximó a cero indicando estabilidad (Ecuación 5). Se promediaron los últimos datos con pendiente cero para obtener un punto a utilizar en la recta de calibración.

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (5)$$

Donde y_2 e y_1 corresponden a distintos valores de los extremos de un trazo según el eje de las ordenadas y x_2 y x_1 según el eje de las abscisas.



Figura 5. Paso 4 del protocolo de calibración: (a) Irrigación según tratamiento, (b) Obtención de mediciones de percolación.

(5) Se retiraron los sensores y se pesó el depósito para obtener el contenido volumétrico del agua contenida en el suelo, sustrayendo el peso inicial. Luego, la tierra del depósito fue removida y al día siguiente se procedió con otro tratamiento.

El experimento de calibración se realizó durante cinco días, cada tratamiento a las 12:00 horas expuestos a cielos despejados y sin cobertura de nubes. Finalmente, se realizó una recta de calibración con los puntos obtenidos de cada tratamiento para aplicar a los sensores *low-cost* en la calibración y validación *in situ*.

4.3.2. Calibración *in situ*

Una vez obtenidas las rectas de calibración para cada sensor VH400, se procedió a realizar pruebas en terreno para evaluar su eficacia mediante un análisis de error cuadrático medio entre una serie de mediciones de los sensores VH400 y un sensor Campbell HS2 (TDR). Estas pruebas fueron realizadas en la zona de estudio como también en otra zona con características edafo-climáticas distintas para evaluar los sensores en un suelo de distintas propiedades, específicamente en pastizales de la comuna de Purranque de la Región de los Lagos. Aplicar la calibración obtenida en distintos suelos contribuye a una validación más robusta de los resultados, lo que se ha evidenciado en otros estudios (Bogena *et al.*, 2007; Mittelbach *et al.*, 2011). Finalmente, se obtuvieron cinco muestras de cinco sectores aleatorios, para cada zona de la calibración *in situ*, promediando hasta diez mediciones por cada sensor.

Para obtener el error cuadrático medio de cada serie se emplearon las siguientes ecuaciones:

$$bias = \frac{\sum \varepsilon_i - \theta_i}{N} \quad (6)$$

Donde ε_i es el dato estimado por el sensor, θ_i el dato observado de humedad del suelo y N es el tamaño de la muestra

$$RMSE = \sqrt{bias^2 + \sigma^2} \quad (7)$$

Donde σ^2 es la desviación estándar al cuadrado de los residuos y $RMSE$ es el error cuadrático medio

4.3.3. Diseño, construcción e instalación del prototipo

Para la estructura de los sistemas *low-cost* se utilizó como contenedor de los componentes una caja estanca de dimensiones 0,15 x 0,15 x 0,10 m. Esta caja fue sellada con silicona a un tubo PVC de 0,07 m de diámetro y 0,50 m de largo. Durante la implementación de los sistemas, 0,20 m quedaron sobre la superficie del suelo y los otros 0,30 m por debajo para estabilizar la estructura, para facilitar la instalación se hizo un corte diagonal en los últimos 0,10 m del tubo PVC. Las conexiones del sensor y la fuente de poder van por el interior del tubo, para proporcionar mejor protección de los cables se utilizará cinta aisladora y rollo PVC. Las conexiones del sensor de humedad salen del interior del tubo a una profundidad de 0,05 m bajo la superficie del suelo donde se instaló el sensor. Los materiales utilizados se muestran en el Anexo 5. Dentro de la caja estanca se instalaron los componentes de hardware exceptuando el panel solar, además se usaron regletas de conexión, adhesivo y tornillos para afirmar las partes. Se utilizó silicona y bolsas de sílice-gel para evitar fallas en el circuito por un aumento en la humedad relativa dentro de la caja estanca. El diseño del circuito del prototipo se presenta en el Anexo 6.

4.3.3.1. Configuración del sistema y consumo

Los sistemas de monitoreo de humedad de suelo superficial *low-cost* se configuraron para ser validados con una estación estandarizada presente en la zona de estudio denominada LAB-net. Por ello, los sensores se instalaron de forma horizontal a 0,05 m de profundidad de la superficie del suelo a modo de comparar su rendimiento con los sensores de humedad de suelo de la estación LAB-net, instalados a la misma profundidad. Para ello, los sensores fueron configurados para entregar datos cada 15 minutos promediando un muestreo instantáneo de 5 minutos y la hora (UTC) de los sistemas se sincronizaron con la de la estación LAB-net mediante un PC para obtener datos correlacionados.

El consumo de cada sistema *low-cost* se calcula a partir de lo requerido para mantener el Arduino UNO, el Logger Shield uSD y dos sensores VH400 encendidos las 24 horas, el consumo de las lecturas se hace despreciable a lo largo del día debido a su baja frecuencia de 5 minutos. Se configuró el Arduino Uno para permanecer en modo sleep o de bajo consumo mientras no realiza actividades para optimizar la energía utilizada. Considerando que en este modo un Arduino UNO opera a 31,6 mA con el voltaje de la batería de 9,6 V, consume 0,303 W y 7,272 W hora. El *Logger Shield* uSD opera a 10 mA y 3,3 V consumiendo 0,033 W y 0,792 W hora y los sensores consumen en conjunto 0,07 W y 1.68 W hora. Por lo tanto, cada sistema de monitoreo tiene un consumo de 9,744 W hora. Tomando en cuenta el escenario con menos horas de luz solar según latitud del sitio de instalación (9,7) y el efecto de la nubosidad, un panel fotovoltaico de 5 W asegura la autonomía del sistema.

4.3.4. Validación *in situ*

Previo a la validación *in situ*, se procedió a realizar una validación en ambiente controlado. Para esto, se instaló el sistema de monitoreo de humedad de suelo del sensor VH400-1 junto al sensor TDR CS655 utilizado en la calibración, a una profundidad de 0,05 m bajo la superficie del suelo y a 0,10 m de separación entre ambos. La zona de implementación corresponde a la misma de la calibración *ex situ*, una superficie de vegetación verde (césped) con irrigación en tiempo controlada. Para realizar esta validación, se compararon los datos del sensor VH400-1 con los del sensor CS655 y se analizó el error cuadrático medio de las dos series temporales (ecuación 7) comparando el rendimiento de las rectas obtenidas en la calibración CAL_{TDR} y CAL_{VWC} . Adicionalmente, se incluyó la ecuación de calibración de fábrica CAL_0 en el análisis de tal manera de identificar variaciones en los resultados derivados de la calibración realizada en este trabajo. Además, la validación en ambiente controlado sirvió para evaluar la confiabilidad del sistema eléctrico que entrega autonomía al sistema de monitoreo, asegurando una eficaz implementación en terreno.

La validación *in situ* se realizó en la zona de estudio con el sistema *low-cost* instalado, en donde se compararon los datos del sensor VH400-2 con un sensor CS650 (TDR) de la estación LAB-net, ambos a una profundidad de 0,05 m bajo el suelo y ubicados a más de dos metros de distancia. Para esto, se realizó el mismo análisis de la validación en ambiente controlado evaluando el rendimiento del sistema *low-cost* en terreno.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Calibración *ex situ*

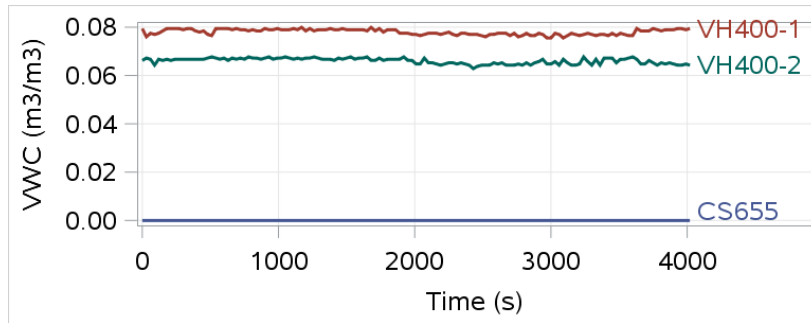
Los resultados de los distintos tratamientos en gráficos de las variaciones del contenido volumétrico de agua en m^3/m^3 obtenido por cada sensor, aplicando la calibración de fábrica para los sensores VH400 se presentan en la figura 6. En el Cuadro 1 se muestran los resultados obtenidos en cada tratamiento y en el Cuadro 2 se muestran los detalles de cada muestra. La menor diferencia del contenido volumétrico de agua entre los tratamientos de 2000 cm^3 y 3000 cm^3 se podría explicar por una saturación del suelo según sus propiedades ya que no retuvo más agua por el aumento de agua irrigada entre los tratamientos.

Cuadro 1. Resultados Calibración *ex situ* entre sensores VH400-1, VH400-2 y CS655 a partir del valor medido del contenido volumétrico de agua en el suelo (VWC).

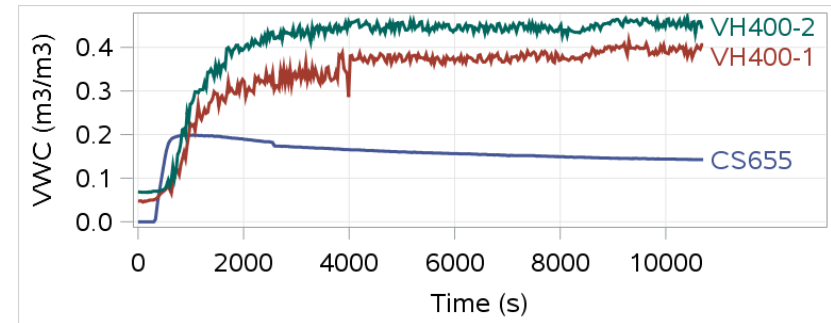
VWC (m^3/m^3)	μ CS655 (m^3/m^3)	μ VH400-1 (m^3/m^3)	μ VH400-2 (m^3/m^3)	μ VH400-1 (Analogue)	μ VH400-2 (Analogue)
0	0	0.0786	0.0660	180	155
0.0860	0.0910	0.3346	0.4040	335	382
0.1770	0.1497	0.4254	0.4220	382	432
0.2700	0.2983	0.4806	0.5540	435	492
0.3290	0.4092	0.5643	0.6299	500	551
0.3530	0.4125	0.5690	0.6428	504	561

Cuadro 2. Detalle contenido muestras de suelo en el experimento de calibración *ex situ* para cada tratamiento.

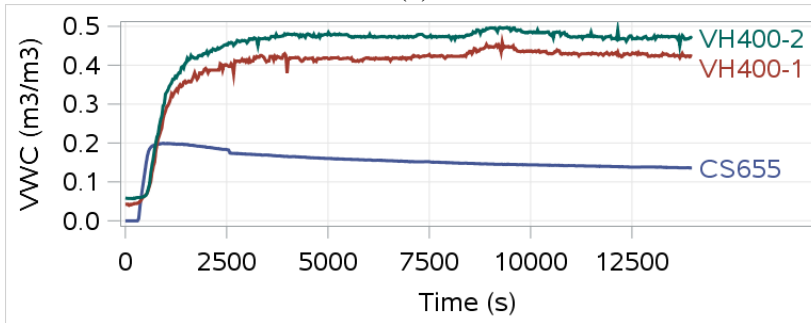
Contenido/Tratamiento	500 cm^3	1000 cm^3	1500 cm^3	2000 cm^3	3000 cm^3
Masa Agua Tratamiento (g)	486	973	1460	1947	2918
Masa Agua Infiltrada (g)	0	0	61	238	1069
Masa Agua Evaporada (g)	76	114	87	108	132
Masa Agua Contenida (g)	410	859	1312	1601	1717
Masa Suelo Inicial (g)	4896	4725	5078	5041	4735
Masa Suelo Final (g)	5306	5584	6390	6642	6452
Vol. Agua Tratamiento (cm^3)	500	1000	1500	2000	3000
Vol. Agua Contenida (cm^3)	421	882	1347	1644	1765
Vol. Suelo (cm^3)	5000	5000	5000	5000	5000
Suelo Final $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	1,02	1,12	1,28	1,33	1,29



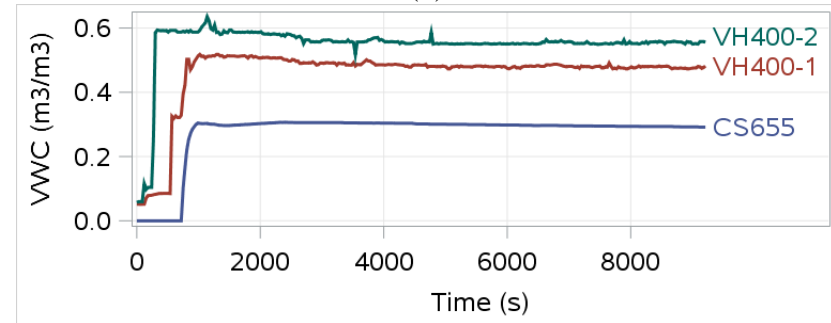
(a)



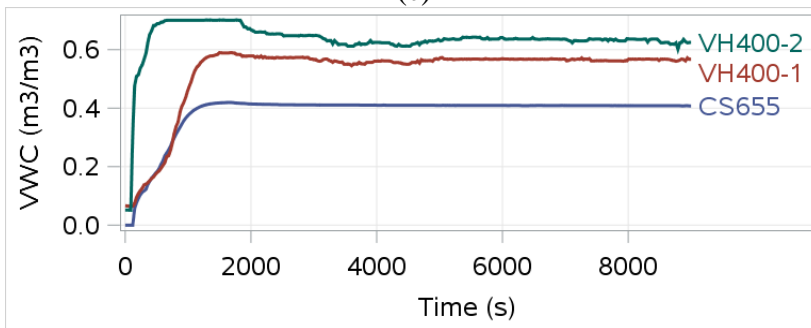
(b)



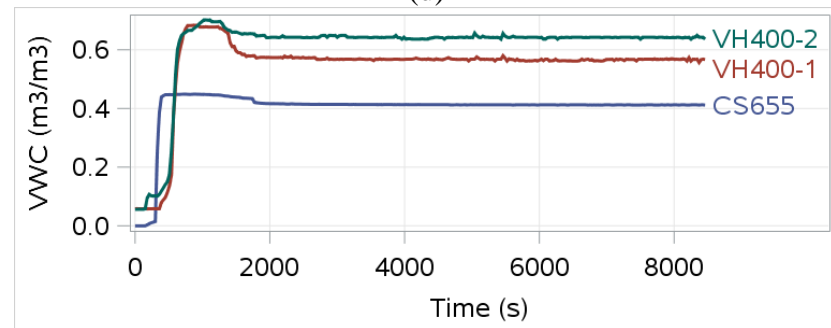
(c)



(d)



(e)

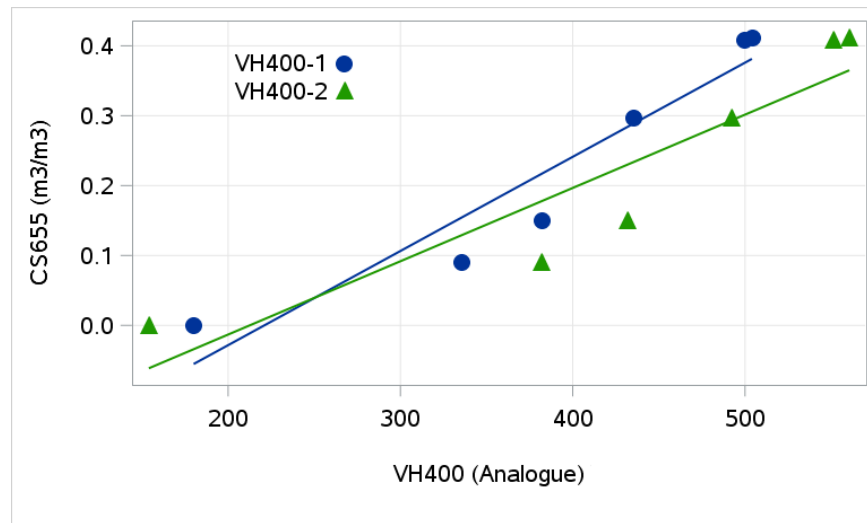


(f)

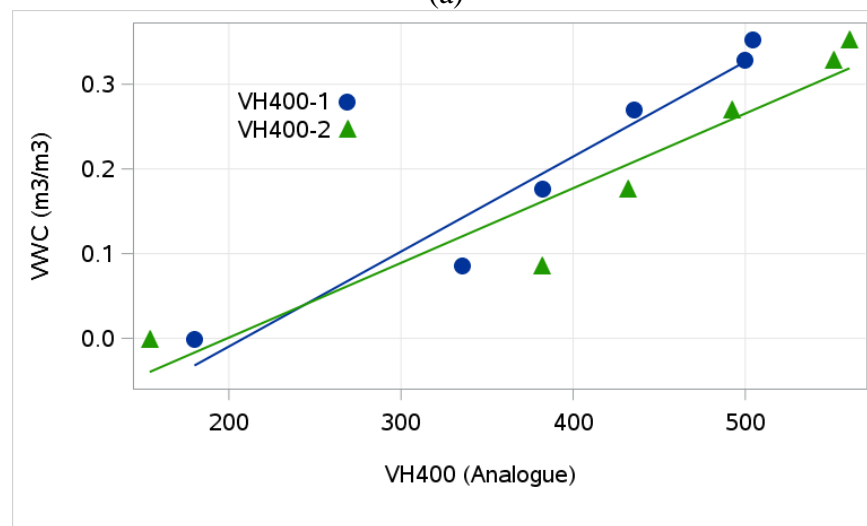
Figura 6. Gráficos de respuesta de sensor CS655 (azul), VH400-1 (rojo) y VH400-2 (verde) del contenido volumétrico del agua en el suelo (VWC) a tratamientos: (a) control (0 cm^3), (b) 500 cm^3 y (c) 1000 cm^3 , (d) 1500 cm^3 , (e) 2000 cm^3 y (f) 3000 cm^3 .

Se observa en el cuadro 1 que al aplicar la ecuación de calibración de los sensores *low-cost* VH400 CAL₀ se evidencian diferencias mayores a $0,25 \text{ m}^3/\text{m}^3$ en relación al sensor CS655 y el contenido volumétrico estimado de la muestra, indicando la importancia que tiene la calibración en laboratorio de este tipo de sensores para su correcto funcionamiento. Además, los dos sensores VH400 tienen una diferencia promedio aproximada de $0,04 \text{ m}^3/\text{m}^3$ entre sus mediciones demostrando una distinta sensibilidad a la humedad contenida en el suelo superficial. Esto indica que las calibraciones de sensores *low-cost* deben aplicarse para cada sensor en particular como se ha hecho en otros estudios (Kizito *et al.*, 2008; Sakaki *et al.*, 2008; Mittelbach *et al.*, 2011; Majone *et al.*, 2013).

Finalmente, se obtuvieron cuatro rectas de calibración, dos para cada sensor, donde se relacionaron los valores analógicos de cada sensor VH400 con el contenido volumétrico del agua en el suelo medido por el sensor CS655 (CAL_{TDR}) y el estimado por el método termogravimétrico aplicado a cada muestra (CAL_{VWC}) (Figura 7).



(a)



(b)

Figura 7. Rectas de calibración obtenidas mediante la comparación de valores analógicos de sensores VH400-1 (círculo), VH400-2 (triángulo) y contenido volumétrico obtenido por (a) CS655 (CAL_{TDR}) y (b) método termogravimétrico (CAL_{VWC}) en cada tratamiento.

En las rectas de calibración obtenidas a partir del protocolo de calibración, se evidencia una diferencia mayor entre el resultado del tratamiento control (0 cm^3) y el tratamiento de 500 cm^3 , indicando que los sensores responden de manera distinta en condiciones de humedad menores a $0,05 \text{ m}^3/\text{m}^3$. En el estudio de Kizito (2008) se muestran resultados similares en que los sensores *low-cost* evaluados demoran más en estabilizarse en condiciones de humedad de suelo menores a $0,05 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Además, se observa una diferencia en las desviaciones estándar entre los resultados de los tratamientos según CAL_0 para VH400-1 ($0,05 \text{ m}^3/\text{m}^3$) y VH400-2 ($0,06 \text{ m}^3/\text{m}^3$) de un $0,01 \text{ m}^3/\text{m}^3$, indicando que el sensor VH400-2 es más sensible a cambios en la humedad de suelo. Esto podría explicarse por los componentes electrónicos de los sensores *low-cost*, que al ser de menor costo tienden a un rendimiento heterogéneo. Diferencias de similar magnitud en la sensibilidad de sensores *low-cost* se obtuvieron en resultados de otras experiencias (Sakaki *et al.*, 2008; Rosenbaum *et al.*, 2010; Majone *et al.*, 2013), en las que se aplicó un protocolo de calibración en laboratorio para cada sensor en particular para atenuar estas diferencias.

Las rectas de calibración obtenidas a partir del protocolo de calibración *ex situ* se muestran en las siguientes ecuaciones:

$$y_{\text{CALTDR}(\text{VH400-1})} = 0.0013x - 0.2978 \quad (8)$$

$$y_{\text{CALTDR}(\text{VH400-2})} = 0.001x - 0.2229 \quad (9)$$

$$y_{\text{CALVWC}(\text{VH400-1})} = 0.0011x - 0.2339 \quad (10)$$

$$y_{\text{CALVWC}(\text{VH400-2})} = 0.0009x - 0.1755 \quad (11)$$

Donde y corresponde al contenido volumétrico del agua en el suelo en m^3/m^3 según cada recta de calibración aplicada a cada sensor (VH400-1 y VH400-2) y x corresponde al valor analógico de la medición de cada sensor VH400.

Se observan valores de R^2 mayores a 0,85 en las rectas CAL_{TDR} (0,91 para VH400-1 y 0,85 para VH400-2) y valores superiores a 0,90 en las rectas CAL_{VWC} (0,95 para VH400-1 y 0,90 para VH400-2). En comparación a otros estudios (Sakaki *et al.*, 2008; Majone *et al.*, 2013), se observan algunas diferencias ya que en estos se obtuvieron valores de R^2 mayores a 0,98. Sin embargo, estas diferencias se podrían explicar por una variedad de factores como que el largo de los sensores VH400 no es el mismo que el del sensor CS655, pudiendo esto afectar en el muestreo de la medida. Además, la utilización de *dataloggers* con amplificación operacional de la señal en dichos estudios mejora la precisión de las mediciones, lo que podría explicar también la diferencia en los valores de R^2 observados en este trabajo.

5.2. Calibración *in situ*

En los cuadros 3 y 4 se muestran los resultados obtenidos en la evaluación en terreno realizada en la zona de estudio y sectores de la comuna de Purranque de la X Región de Los Lagos los cuales consisten en valores de RMSE para las muestras de cada sensor en comparación a las del TDR Campbell HS2 para CAL_{TDR} (Cuadro 3) y CAL_{VWC} (Cuadro 4). Se observa que las muestras obtenidas en la comuna de Purranque obtuvieron valores de RMSE mayores que los de la zona de estudio en Chimbarongo. Esto podría explicarse por la diferencia entre los suelos de Purranque y Chimbarongo en cuanto a sus propiedades físicas. En la zona de la comuna de Purranque, de la Región de Los Lagos, encontramos suelos Ñadis los cuales se caracterizan por tener un alto contenido volumétrico de agua (Casanova *et al.*, 2013). Se ha concluido en el estudio de Mittelbach (2011) que los sensores *low-cost* de humedad de suelo tienden a disminuir su precisión a medida que el contenido volumétrico de agua en el suelo aumenta ($>0,40 \text{ m}^3/\text{m}^3$).

Cuadro 3. Resultados de las mediciones de calibración *in situ* para CAL_{TDR}

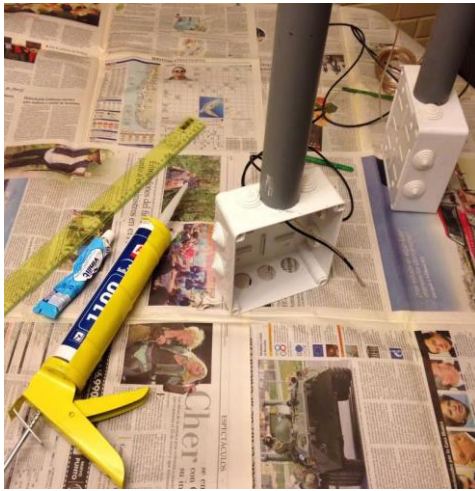
Purranque			Chimbarongo		
HS2 (m ³ /m ³)	VH400-1 (m ³ /m ³)	VH400-2 (m ³ /m ³)	HS2 (m ³ /m ³)	VH400-1 (m ³ /m ³)	VH400-2 (m ³ /m ³)
0.4943	0,4612	0,4624	0,2456	0,2120	0,2320
0.4453	0,4240	0,4379	0,212	0,2010	0,2200
0.4326	0,3916	0,4169	0,1532	0,1760	0,1650
0.4682	0,4432	0,4421	0,1432	0,1640	0,1701
0.475	0,4504	0,4463	0,1467	0,1345	0,1520
BIAS	0,0290	0,0219	BIAS	0,0026	-0,0078
σ^2	0,0007	0,0003	σ^2	0,0005	0,0002
RMSE	0,0559	0,0430	RMSE	0,0242	0,0164

Cuadro 4. Resultados de las mediciones de calibración *in situ* para CAL_{VWC}

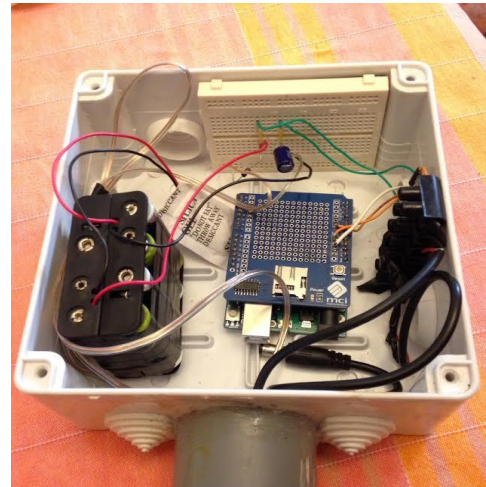
Purranque			Chimbarongo		
HS2 (m ³ /m ³)	VH400-1 (m ³ /m ³)	VH400-2 (m ³ /m ³)	HS2 (m ³ /m ³)	VH400-1 (m ³ /m ³)	VH400-2 (m ³ /m ³)
0.4943	0,4348	0,4494	0,2456	0,1954	0,2100
0.4453	0,4002	0,4268	0,212	0,1857	0,2004
0.4326	0,3701	0,4075	0,1532	0,1638	0,1560
0.4682	0,4180	0,4307	0,1432	0,1533	0,1601
0.475	0,4247	0,4345	0,1467	0,1275	0,1455
BIAS	0,0540	0,0333	BIAS	0,0150	0,0057
σ^2	0,00005	0,0001	σ^2	0,0007	0,0003
RMSE	0,0540	0,0350	RMSE	0,0299	0,0203

5.3. Diseño, construcción e instalación del prototipo

Se construyeron dos prototipos para ser implementados en los dos escenarios de validación. En primer lugar se construyó la estructura de cada prototipo, luego se creó el circuito y se introdujo en el interior de la caja estanca con las partes ya selladas. La instalación del sensor se hizo a 0,05 m de profundidad del suelo y orientado hacia canopia del cultivo de frambuesa, existe una separación de más de dos metros entre el sensor VH400-2 y el sensor CS650 de la estación LAB-net debido a que las condiciones del terreno impedían una instalación más cercana. Tanto el sistema *low-cost* como la estación LAB-net se encuentran instaladas al centro de la hilera de frambuesa. En la Figura 8 se muestran los pasos de construcción e instalación del prototipo.



(a)



(b)



(c)



(d)

Continúa



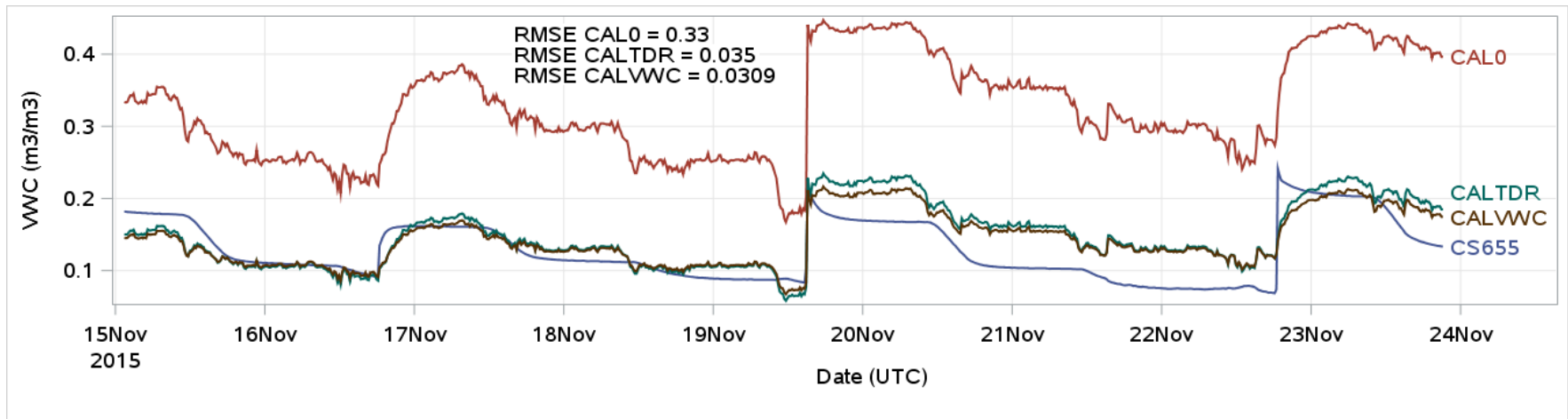
Figura 8. Construcción e instalación del prototipo: (a) Estructura, (b) circuitos, (c) ensamble del prototipo, (d) instalación sensor VH400-2 bajo 0,05 m de la superficie del suelo, (e) sistema *low-cost* instalado (f) sistema *low-cost* y estación LAB-net.

5.4. Validación *in situ*

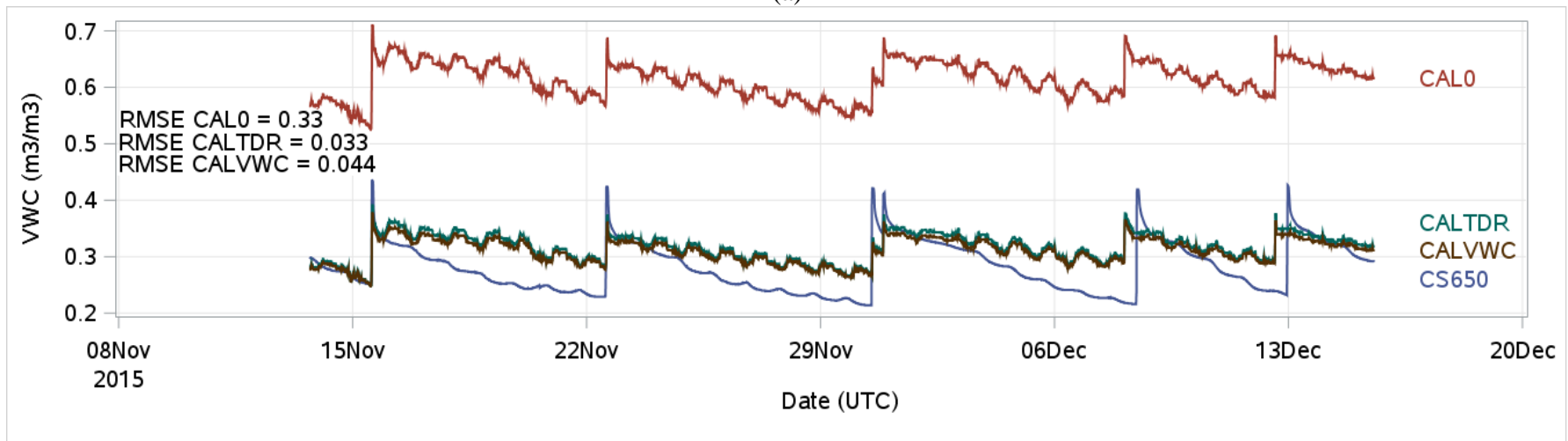
Una vez instalado el módulo, las series temporales obtenidas como resultados de los procesos de validación se observan en la Figura 9, tanto para la validación en ambiente controlado como la validación *in situ*. Para este caso, se realizaron las mediciones para un período de nueve días, comprendidos entre el 15 al 24 de Noviembre del 2015. Las fluctuaciones de humedad de suelo de la serie se deben al riego aplicado al jardín ya que durante el período señalado no hubo precipitaciones.

Para esta validación, se observa un valor de RMSE de a $0,035 \text{ m}^3/\text{m}^3$ para CAL_{TDR} y de $0,0309 \text{ m}^3/\text{m}^3$ para CAL_{VWC} , ambos del sistema de monitoreo de humedad del suelo del sensor VH400-1. La aplicación de CAL_0 obtuvo un valor de RMSE de un $0,33 \text{ m}^3/\text{m}^3$ demostrando que las rectas de calibración obtenidas en esta memoria redujeron el RMSE de la calibración de fábrica en $0,3 \text{ m}^3/\text{m}^3$ aproximadamente.

Durante la serie temporal de mediciones *in situ* se observan máximos de humedad de suelo de aproximadamente $0,45 \text{ m}^3/\text{m}^3$ según la estación LAB-net, los cuales corresponden a riegos por surcos. Luego de cada riego se observa como en las distintas series temporales la magnitud de humedad de suelo disminuye debido a oscilaciones diarias hasta la presencia de otro evento de irrigación. Se observan diferencias en los valores de RMSE para la validación *in situ*, con $0,0330 \text{ m}^3/\text{m}^3$ para CAL_{TDR} y $0,0443 \text{ m}^3/\text{m}^3$ para CAL_{VWC} , la diferencia en el error podría explicarse por una distancia mayor entre el sensor del sistema de monitoreo de humedad del suelo y el sensor CS650 de la estación LAB-net debido a que ya se encontraba instalado, lo que bajo condiciones de suelo distintas (relieve, vegetación) podría afectar el comportamiento del agua posterior al riego. Al igual que en la validación en ambiente controlado, se observa una mejora consistente en cuanto al RMSE que brinda la función CAL_0 con una diferencia aproximada de $0,29 \text{ m}^3/\text{m}^3$, indicando el requerimiento de calibrar los sensores *low-cost* para optimizar su funcionamiento.



(a)



(b)

Figura 9. Gráficos resultados de validación: (a) validación controlada con sensor VH400-1 y (b) validación *in situ* con sensor VH400-2 con CAL₀ (rojo), CAL_{TDR} (verde), CAL_{VWC} (marrón) y CS655-CS650 (azul).

5.5. Discusión

Los resultados obtenidos durante las etapas de calibración y validación indican que adquirir sensores *low-cost* y utilizarlos sin realizar pruebas de laboratorio conlleva a errores significativos en sus mediciones. Como bien se evidencia en otros estudios (Mittelbach *et al.*, 2011; Majone *et al.*, 2013), la calibración en laboratorio resultó clave para optimizar el funcionamiento de los sensores *low-cost*. Sin embargo, estas calibraciones deben ser sitio-dependientes y aplicadas a cada sensor en particular para obtener mejores resultados (Kizito *et al.*, 2008, Qu *et al.*, 2013).

En este trabajo, se demostró durante los experimentos de calibración que las mediciones de los sensores VH400, según CAL_0 , tenían una diferencia aproximada de $0,04 \text{ m}^3/\text{m}^3$ entre ambos. La diferencia de sensibilidad de cada sensor *low-cost* puede introducir errores sistemáticos en la toma de muestras si no se aplica un protocolo de calibración. La diferencia en su sensibilidad y estabilidad podría explicarse en la calidad de los componentes eléctricos que forman los circuitos integrados de estos sensores, que al ser de menor costo, tienden a un rendimiento heterogéneo, en especial en mayores condiciones de humedad ($> 0,40 \text{ m}^3/\text{m}^3$) (Bogena *et al.*, 2007, Mittelbach *et al.*, 2011).

En cuanto a la validación *in situ* de los sistemas, se observan valores de RMSE similares a la experiencia de Mittelbach (2011), en donde se obtuvieron valores de RMSE entre $0,03$ y $0,07 \text{ m}^3/\text{m}^3$ para distintos métodos de calibración para el sensor *low-cost* 10HS de Decagon Devices durante pruebas en distintos tipos de suelo. Por otro lado, valores mayores en los residuos se observan en el experimento de Bogena (2007), en que la aplicación en terreno de los sensores EC-5 y EC-20 demostraron un promedio de diferencias de hasta un $0,06 \text{ m}^3/\text{m}^3$ en comparación al promedio de las diferencias del experimento de un $0,03 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Esto indica que la reducción de los valores de RMSE posterior al protocolo de calibración fue relevante en comparación a los estudios mencionados.

La relevancia que tienen los sensores *low-cost* es principalmente la diferencia de costo en comparación a un sensor convencional. En el caso de los sensores VH400, que tienen un precio de 37.95 USD, presentan una diferencia aproximada de 385 USD en comparación al precio de un sensor convencional TDR. Esa reducción en términos de costos contribuye a expandir las zonas de monitoreo de humedad de suelo mejorando la accesibilidad de los sensores por parte de los usuarios. De esta forma, la implementación de un mayor número de sensores aumenta la resolución espacial de las redes de monitoreo atenuando el efecto de la alta variabilidad espacial de la humedad del suelo para la caracterización de zonas extensas (Mittelbach *et al.*, 2012). Sin embargo, se debe tener en consideración una inclusión de errores de los sensores *low-cost* debido a una disminución en la precisión de las mediciones en comparación a los sensores convencionales.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó un diseño de un sistema de monitoreo de humedad de suelo superficial *low-cost* con sensores de humedad de suelo VH400 (www.vegetronix.com). El diseño del sistema fue calibrado en laboratorio y validado con datos de sensores y estaciones estandarizadas en la zona de estudio, Comuna Chimbarongo, Región de O'Higgins.

Los resultados obtenidos indican que los sensores *low-cost* VH400, que miden el contenido volumétrico del agua en el suelo basados en la constante dieléctrica, presentan diferencias significativas ($>0,25 \text{ m}^3/\text{m}^3$) al utilizar las ecuaciones de calibración de fábrica. Sin embargo, la aplicación de una calibración en laboratorio en conjunto con métodos termogravimétricos y sensores convencionales resultó satisfactoria para obtener una calibración del sensor que disminuyera los valores de RMSE de las mediciones en $0,29 \text{ m}^3/\text{m}^3$ durante los experimentos de validación. Esto generó una disminución de un 88% respecto a las ecuaciones de calibración de fábrica según los valores de RMSE.

Las rectas de calibración obtenidas presentaron valores de RMSE similares en ambos escenarios de validación. Sin embargo, CAL_{TDR} obtuvo valores de RMSE ($0,033 \text{ m}^3/\text{m}^3$) menores que CAL_{VWC} ($0,044 \text{ m}^3/\text{m}^3$) en la validación *in situ*.

Este es el primer trabajo que evalúa el rendimiento real de los sensores VH400 para la obtención de datos de humedad de suelo en comparación a sensores convencionales de reflectometría de dominio de tiempo (TDR), demostrando que la ecuación de calibración de fábrica presentó errores significativos, aunque existe la posibilidad de mejora mediante métodos de calibración. La optimización en el funcionamiento de estos sensores *low-cost* demuestra que la oportunidad de incluir estos sensores para complementar redes de monitoreo de humedad de suelo de zonas extensas ($<2.000 \text{ ha}$) conlleva a grandes ventajas en costos. Sin embargo, es necesario considerar una correcta calibración y validación que podrían mejorar la precisión en las mediciones de los sensores *low-cost* en comparación a los sensores convencionales.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Akramkhanov; A.; D.J. Brus and D.J.J. Walvoort. 2014. Geostatistical monitoring of soil salinity in Uzbekistan by repeated EMI surveys. *Groderma*, 213: 600–607.
- Berg, A. A.; J.S. Famiglietti; M. Rodell; R.H. Reichle; U. Jambor; S.L. Holl and P.R. Houser. 2005. Development of a hydrometeorological forcing data set for global soil moisture estimation. *International Journal of Climatology*, 25: 1697–1714.
- Bertoldi, G.; E. Della Chiesa; C. Notarnicola; L. Pasolli; G. Niedrist and U. Tappeiner. 2014. Estimation of soil moisture patterns in mountain grasslands by means of SAR RADARSAT2 images and hydrological modeling. *J. Hydrol*, 516: 245–257.
- Blöschl, G.; J. Kommaa and S. Hasenauer. 2009. Hydrological downscaling of soil moisture. Final Report to the H-SAF via the Austrian Central Institute for Meteorology and Geodynamics (ZAMG). Vienna 2009.
- Bogena, H.R.; J.A. Huisman; C. Oberdörster and H. Vereecken. 2007. Evaluation of a low-cost soil water content sensor for network applications. *J. Hydrol*, 344: 32–42.
- Campbell, J.E. 1990. Dielectric-properties and influence of conductivity in soils at one to 50 MHz. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54(2): 332–341.
- Casanova, M.; O. Salazar; O. Seguel and W. Luzio. 2013. *The Soils of Chile*. Netherlands: Springer, 185p.
- Cataldo, A.; R. Persico; G. Leucci; E. De Benedetto; G. Cannazza; L. Matera and L. De Giorgi. 2014. Time domain reflectometry, ground penetrating radar and electrical resistivity tomography: A comparative analysis of alternative approaches for leak detection in underground pipes. *NDT&E International*, 62: 14–28.
- Chen, Y. and D. Or. 2006. Geometrical factors and interfacial processes affecting complex dielectric permittivity of partially saturated porous media. *Water Resour. Res*, 42: 1–9.
- Coopersmith E.J.; J.E. Bell and M.H. Cosh. 2015a. Extending the soil moisture data record of the U.S. Climate Reference Network (USCRN) and Soil Climate Analysis Network (SCAN). *Advances in Water Resources*, 79: 80–90.
- Coopersmith, E.J.; J.E. Bell and M.H. Cosh. 2015b. Soil Moisture Model Calibration and Validation: An ARS Watershed on the South Fork Iowa River. *J. Hydrometeor*, 16: 1087–1101.
- Dorigo, W.A.; K. Scipal; R.M. Parinussa; Y.Y. Liu; W. Wagner; R. Jeu and V. Naeimi. 2010. Error characterisation of global active and passive microwave soil moisture datasets. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14: 2605–2616.

Dorigo, W.A.; W. Wagner; R. Hohensinn; S. Hahn; C. Paulik; A. Xaverl; A. Gruber; M. Drusch; S. Mecklenburg; P. van Oevelen; A. Robock and T. Jackson. 2011. The International Soil Moisture Network: a data hosting facility for global in situ soil moisture measurements. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15: 1675–1698.

Dorigo, W.A.; A. Xaver; M. Vreugdenhil; A. Gruber; A. Hegyiová; A. Sanchis-Dufau; D. Zamojski; C. Cordes; W. Wagner and M. Drusch. 2013. Global automated quality control of in-situ soil moisture data from the International Soil Moisture Network. *Vadose Zone Journal*, 12(3): 21.

Evelt, S.R., and G. W. Parkin. 2005. Advances in Soil Water Content Sensing: The Continuing Maturation of Technology and Theory. *Vadose Zone J.*, 4: 986–991.

Franz T.; M. Zreda; T. Ferré; R. Rosolem; C. Zweck; S. Stillman; X. Zeng and W.J. Shuttleworth. 2012. Measurement depth of the cosmic ray soil moisture probe affected by hydrogen from various sources. *Water Resour. Research*, 48(8): 9.

Grayson, R.B.; A.W. Western; F. Chiew and G. Blöschl. 1997. Preferred states in spatial soil moisture patterns: local and non-local controls. *Water Resour. Res.*, 33 (12): 2987–2908.

Haberl, H.; V. Winiwarter; K. Andersson; R. U. Ayres; C. Boone; A. Castillo; G. Cunfer; M. Fischer-Kowalski; W. R. Freudenburg; E. Furman; R. Kaufmann; F. Krausmann; E. Langthaler; H. Lotze-Campen; M. Mirtl; C. L. Redman; A. Reenberg; A. Wardell; B. Warr and H. Zechmeister. 2006. From LTER to LTSE: conceptualizing the socioeconomic dimension of long-term socioecological research. *Ecology and Society*, 11(2): 13.

INIA. 2015. Informe de Análisis de Suelos. Informe N° 15-005. Abril 2015, San Fernando, Chile.

Jaeger, E.B. and S.I. Seneviratne. 2011. Impact of soil moisture-atmosphere coupling on European climate extremes and trends in a regional climate model. *Clim. Dynam.*, 36(9-10): 1919–1939.

Jorapur, N.; S. Vinay; S. Sarik; J.J. Maryam; S. Baghini and G.K. Ananthasuresh. 2015. A low-power, low-cost soil-moisture sensor using dual-probe heat-pulse technique. *Sensors and Actuators*, 233: 108–117.

Kachanoski, R.G.; E. De Jong and I.J. Van Wesenbeck. 1990. Field scale patterns of soil water storage from non-contacting measurements of bulk electrical conductivity. *Can. J. Soil Sci.*, 70: 537–541.

Kelleners, T.J.; D.A. Robinson; P.J. Shouse; J.E. Ayars and T.H. Skaggs. 2005. Frequency dependence of the complex permittivity and its impact on dielectric sensor calibration in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 69: 67–76.

Kerr, Y.; T. Lebel; A. Mialond; E. Mougin; G. Quantina; P. Richaumed and P. de Rosnay. 2015. SMOS soil moisture product evaluation over West-Africa from local to regional scale. *Remote Sensing of Environment*, 156: 383–394.

Kizito, F.; C.S. Camppbell; G.S. Campbell; D.R. Cobos; B.B. Teare; B. Carter and J.W. Hopmans. 2008. Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor. *J. Hydrol.*, 352: 367–378.

Laiolo, P.; S. Gabellani; L. Campo; F. Silvestro; F. Delogu; R. Rudari; L. Pulvirenti; G. Boni; F. Fascetti; N. Pierdicca; R. Crapolicchio; S. Hasenauer and S. Puca. 2015. Impact of different satellite soil moisture products on the predictions of a continuous distributed hydrological model. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 10: 15.

Liu, Z.; X. Shi; E. Warner; Y. Ge; D. Yu; S. Ni and H. Wang. 2008. Relationship between oriental migratory locust plague and soil moisture extracted from MODIS data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 10(1): 84–91.

Louvet, S.; T. Pellarina; A. al Bitard; B. Cappelaere; S. Gallea; M. Grippaf; C. Gruhier; Y. Kerr; T. Lebel; A. Mialon; E. Mougin; G. Quantin; P. Richaume and P. de Rosnay. 2015. SMOS soil moisture product evaluation over West-Africa from local to regional scale. *Remote Sensing of Enviroment*, 156: 383–394.

Ma, K.; B. Fu; S. Liu; B. Guan; G. Liu; Y. Lü and M. Anand. 2004. Multiple-Scale soil moisture distribution and its implications for ecosystem restoration in an arid river valley, China. *Land Degrad. Develop*, 14: 75–85.

Majone B.; F. Viani F; E. Filippi; A. Bellin; A. Massa; G. Toller; F. Robol and M. Salucci. 2013. Wireless Sensor Network deployment for monitoring soil moisture dynamics at the field scale. *Procedia Enviromental Sciences*, 19: 426–435.

Mallick, K.; B. Bhattacharya and N.K. Patel. 2009. Estimating volumetric surface moisture content for cropped soils using a soil wetness index based on surface temperature and NDVI. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(8): 1327–1342.

Martinez, G.; K. Vanderlinden; R. Ordóñez and J.L. Muriel. 2008. Can apparent electrical conductivity improve the spatial characterization of soil organic carbon?. *Vadose Zone J.*, 8 (3): 586–593.

Massari C.; L. Brocca; T. Moramarco; Y. Trambly and J.F. Lescot. 2014. Potential of soil moisture observations in flood modelling: Estimating initial conditions and correcting rainfall. *Advances in Water Resources*, 74: 44–53.

Mattar C.; A. Santamaría-Artigas; C. Durán-Alarcón; L. Olivera-Guerra and R. Fuster. 2014. LAB-net the First Chilean soil moisture network for Remote Sensing Applications. *Proc. IV Recent Advances in Quantitative Remote Sensing (RAQRS)*, 22 – 26 Septiembre, Valencia, España.

- Mattar, C.; J.P. Wigneron; J.A. Sobrino; N. Novello; J.C. Calvet; C. Albergel; P. Richaume; A. Mialon; D. Guyon; J.C. Jiménez-Muñoz and Y. Kerr. 2012. A combined optical-microwave method to retrieve soil moisture over vegetated areas, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(5): 1404–1413.
- Misra, R.K. and J. Padhi. 2014. Assessing field-scale soil water distribution with electromagnetic induction method. *Jour. Of Hydrol*, 516: 200–09.
- Mittelbach, H.; F. Casini; I. Lehner; A. Teuling and S.I. Seneviratne. 2011. Soil moisture monitoring for climate research: Evaluation of a low-cost sensor in the framework of the Swiss Soil Moisture Experiment (SwissSMEX) campaign. *J. Geophys. Res.*, 116: 11.
- Mittelbach, H.; I. Lehner and S.I. Seneviratne. 2012. Comparison of four soil moisture sensor types under field conditions in Switzerland. *J. Hydrol*, 430-431: 39–49.
- Mualem, Y. and S.P. Friedman. 1991. Theoretical prediction of electrical-conductivity in saturated and unsaturated Soil. *Water Resour. Res.*, 27: 2771–277.
- Olivera-Guerra, L.E.; O. Merlin; C. Mattar; C. Durán-Alarcón; A. Santamaría-Artigas; V. Stefan. 2015. Combining meteorological and lysimeter data to evaluate energy and water fluxes over a row crop for remote sensing applications. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 26 – 31 July 2015, Milan, Italy.
- Paulik C.; W. Dorigo; W. Wagner and R. Kidd R. 2014. Validation of the ASCAT Soil Water Index using in situ data from the International Soil Moisture Network. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 30: 1–8..
- Qu, W.; H.R. Bogaen; J.A. Huisman and H. Vereecken. 2013. Calibration of a novel low-cost soil water content sensor based on a inrg oscillator. *Vadose Zone J. Special Section: Soil water sensors and measurement technologies*, 10.
- Quezada, C.; M. Sandoval, M. and A. Nario. 2010. Calibration of neutron probe in a haploxerands soil. *Agro Sur*, 38(3): 212–221.
- Robinson, D.A.; C.S. Campbell; J.W. Hopmans; B.K. Hornbuckle; S.B. Jones; R. Knight; F. Ogden; J. Selker and O. Wendroth. 2008. Soil moisture measurements for ecological and hydrological watershed scale observatories: a review. *Vadose Zone J.*, 7: 358–389.
- Rosenbaum, U.; J.A. Huisman; A. Weuthen; H. Vereecken and H.R. Bogaen. 2010. Sensor-to-Sensor variability of the ECH2O EC-5, TE, and 5TE sensors in dielectric liquids. *Vadose Zone J.*, 9: 181–186.
- Rosenbaum, U.; J.A. Huisman; J. Vrba; H. Vereecken and H.R. Bogaen. 2011. Correction of temperature and electrical conductivity effects on dielectric permittivity measurements with ECH2O Sensors. *Vadose Zone J.*, 10: 582–593.
- de Rosnay, P.; J.C. Calvet; Y. Kerr Y; J.P. Wigneron; F. Lemaître; M.J. Escorihuela; J.M. Sabater; K. Saleg; J. Barrié; G. Bouhours; L. Coret; G. Cherel; G. Dedieu; R. Durbe; N.

- Fritz; F. Froissard; J. Hoedjes; A. Kruszewski; F. Lavenu; D. Suquia and P. Waldteufel. 2006. SMOSREX: A long term field campaign experiment for soil moisture and land surface processes remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 102: 377–389.
- Sakaki, T.; A. Limsuwat; K. Smits and T. Illangasekare. 2008. Empirical two-point α -mixing model for calibrating the ECH2O EC-5 soil moisture sensors in sands. *Water Resources Research*, 44: 1–8.
- Santamaría-Artigas, A; C. Mattar; J.P. Wigneron; L. Olivera-Guerra and C. Durán-Alarcón. 2015. Calibration and evaluation of an optical-passive microwave approach to estimate soil moisture over several land cover types. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 26 – 31 July 2015, Milan, Italy.
- Seneviratne, S.I.; T. Corti; E.L. Davin; M. Hirschi; E.B. Jaeger; I. Lehner; B. Orlowsky and A.J. Teuling. 2010. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Reviews*, 99: 125–161.
- Skierucha, W.; A. Wilczek and O. Alokina. 2008. Calibration of a TDR probe for low soil water content measurements. *Sensors and Actuators*, 147: 544–552.
- Sobrino, J. A.; B. Franch; C. Mattar and J.C. Jiménez-Muñoz. 2012. A method to estimate soil moisture from Airborne Hyperspectral Scanner (AHS) and aster data: application to sen2flex and sen3exp campaigns. *Remote Sensing of Environment*, 17: 415–428.
- Stadler, A.; S. Rudolph; M. Kupisch; M. Langensiepen; F. van der Kruk; F. Ewert. 2015. Quantifying the effects of soil variability on crop growth using apparent soil electrical conductivity measurements. *Europ. J. Agronomy.*, 64: 8–20.
- Vereecken, H.; J.A. Huisman; H. Bogaen; J. Vanderborght; J.A. Vrugt and J.W. Hopmans. 2008. On the value of soil moisture measurements in vadose zone hydrology: a review. *Water Resour. Res.*, 44: W00D06.
- Walker J.P.; G. Willgoose and J. Kalma. 2004. In situ measurements of soil moisture: a comparison of techniques. *J. Hydrol.*, 293: 85–99.
- Wang, L. and J. Qu. 2009. Satellite remote sensing applications for surface soil moisture monitoring: A review. *Frontiers of Earth Science in China*, 3(2): 237–247.
- Western, A.W.; S.L. Zhou; R.B. Grayson; T.A. McMahon; G. Blöschl and D.J. Wilson. 2004. Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes. *J. Hydrol.*, 286: 113–134.
- Wilson, T.B.; J. Kochendorfer; T.P. Meters; M. Heuer; K. Sloop and J. Miller. 2014. Leaf litter water content and soil surface CO₂ fluxes in a deciduous forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 192-193: 42–50.

Young, D.; L. Chapman; C. Muller; X. Cai and S. Grimmond. 2014. A Low-Cost Wireless Temperature Sensor: Evaluation for Use in Environmental Monitoring Applications. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 31: 938–944.

Zreda M.; D. Desilets; T. Ferré and R. Scott. 2008. Measuring soil moisture content non-invasively at intermediate spatial scale using cosmic-ray neutrons. *Geophysical Research Letters*. 35, L21402. Screen, J.A. and I. Simmonds. 2010. The central role of diminishing of the Arctic. *J. Veg. Sci.*, 5: 765–776.

8. ANEXOS

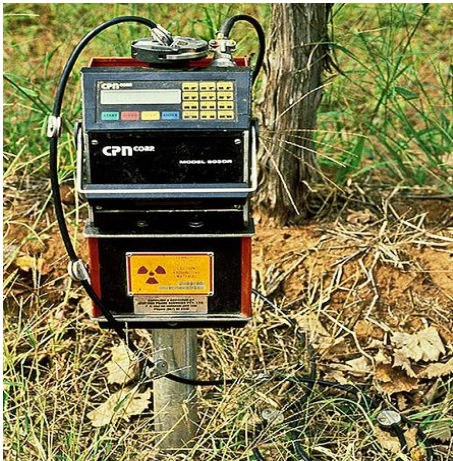
Anexo 1. Instrumentos utilizados para medir la humedad del suelo superficial: (a) TDR, (b) FDR, (c) Sonda de aspersion de neutrones, (d) Sonda de inducción electromagnética.



(a)



(b)



(c)



(d)

Anexo 2. Materiales empleados para la elaboración de los sistemas de monitoreo de humedad de suelo superficial.

Componente	Cantidad por sistema	Cantidad Total	Costo por sistema IVA incl.
Arduino Uno - R3	1	2	\$16.987
VH400 Soil Moisture Sensor Probes	1	2	\$24.136
Arduino Logger Shield (uSD + RTC)	1	2	\$16.645
Tarjeta Micro SD 8GB	1	2	\$5.990
Panel fotovoltaico 5W policristalino para 12V	1	2	\$10.000
Pilas recargables Ni-MH 1,2V (2700mAh)	8	16	\$16.800
Condensador Electrolítico 450uF 16V	1	2	\$1.159
1N4001 diodo	1	2	\$549
Total			\$92.266

Anexo 3. Materiales empleados para la calibración *ex situ* e *in situ* de los sensores *low-cost* VH400.

Componente	Cantidad
VH400 Soil Moisture Sensor Probes	2
CS655 Soil Water Content Reflectometer	1
CSHS2 Soil Water Content Reflectometer	1
Arduino Uno - R3	3
PC	1

Anexo 4. Ecuación de calibración de voltaje nominal a contenido volumétrico del agua (m^3/m^3) para sondas VH400 según fabricante.

Rango de Voltaje	Rango de Valor Analógico para Arduino	Ecuación
0 a 1.1V	0 a 225	$VCW = 10 * V - 1$
1.1V a 1.3V	226 a 266	$VCW = 25 * V - 17.5$
1.3V a 1.82V	267 a 373	$VCW = 48.08 * V - 47.5$
1.82V a 2.2V	374 a 451	$VCW = 26.32 * V - 7.89$

Anexo 5. Materiales utilizados en la estructura del prototipo.

Cantidad	Componente
2	Caja E.G. B - 15 con Tapa y Empaquetadura 150 x 150 x 100 mm
1	Silicona sanisil 300 cm^3 Blanco.
1	Rollo PVC 16 mm x 10 m
1	Soldadura 17 gramos Lápiz gris.
1	Adhesivo PVC en pomo 60 cm^3 .

Anexo 6. Diseño del circuito del prototipo.

