



**UNIVERSIDAD DE TALCA  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS  
MAGÍSTER EN HORTOFRUTICULTURA**

**“EVALUACIÓN DE UN NUEVO SENSOR DE HUMEDAD DE SUELO  
INALÁMBRICO DE BAJO COSTO”**

**POR  
CARLA FERNANDA GONZALEZ ORTIZ  
PROFESOR TUTOR: DR. CESAR ACEVEDO OPAZO**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER**

**TALCA-CHILE  
2020**

## CONSTANCIA

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



Talca, 2019

# ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Hipótesis.....	3
1.2. Objetivo general.....	3
1.3. Objetivos específicos.....	3
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. Agricultura de precisión y preservación de los recursos.....	3
2.2. Manejo hídrico del predio agrícola.....	4
2.3. Métodos para medir el contenido de agua en el suelo.....	5
2.3.1. Método gravimétrico.....	5
2.3.2. Tensiómetros.....	6
2.3.3. Reflectometría (TDR).....	6
2.3.4. Sensores capacitivos y FDR.....	7
2.3.5. Georradar.....	8
2.4. Sensor desarrollado para el estudio.....	9
2.4.1. Tarjetas de desarrollo y microcontrolador Arduino.....	10
2.4.2. Redes inalámbricas.....	11
2.5. Tipos de suelo considerados en el estudio.....	12
2.6. Sensor comercial para comparación.....	12
2.7. Aspectos regulatorios.....	13
2.7.1. Propiedad industrial.....	14
2.7.2. Secreto comercial.....	15
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	15

3.1. Descripción general del ensayo .....	15
3.2. Sensor desarrollado para el estudio .....	15
3.2.1. Microcontrolador .....	15
3.2.2. Comunicación inalámbrica .....	16
3.2.3. Comunicación GPRS .....	17
3.2.4. Sensor de humedad de suelo.....	17
3.2.5. Data logger.....	18
3.2.6. Fuente de alimentación .....	18
3.3. Sensor comercial de referencia.....	20
3.4. Muestras de suelo utilizadas en el estudio.....	20
3.5. Evaluación del sensor de humedad de suelo .....	21
3.6. Método gravimétrico .....	22
3.7. Análisis estadístico .....	22
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	23
4.1. Evaluación sensores de bajo costo .....	23
5. CONCLUSIONES .....	27
6. BIBLIOGRAFÍA .....	29

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Tabla de cálculo de contenido volumétrico de agua (VWC) obtenido por gravimetría. ....	22
--	----

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura. 1. Esquema resumen de los principales métodos para medir humedad de suelo: A. Método gravimétrico, B. Tensiómetros, C. Georradar, D. Sensor capacitivo, E. Sonda FDR, F. Sonda TDR.....	9
Figura 2. Esquema de funcionamiento del sensor de humedad de suelo inalámbrico de bajo costo en condiciones de campo. ....	19
Figura 3. A: Prototipo utilizado en el ensayo; B: Sensor de humedad. ....	20
Figura 4. Comparación de las mediciones del sensor de bajo costo, con las del sensor de referencia (izquierda) y con las obtenidas por método gravimétrico (derecha); en tres tipos de suelo: trumao (A), arenoso (B) y arcilloso (C). Se presenta la línea de tendencia polinomial, la ecuación del gráfico y el valor de $R^2$ . Los valores obtenidos por gravimetría corresponden a volumen de agua evaporado. ....	23
Figura 5. Comparación de sensor comercial (líneas azules) y sensores de bajo costo (líneas naranjas) con el contenido de humedad obtenido por gravimetría (eje x), en tres tipos de suelo: trumao (A), arenoso (B) y arcilloso (C). Las casillas de la ecuación de la recta y valores de $r^2$ , se enmarcan con el mismo color de las líneas correspondientes. También se presentan barras de error y líneas de tendencia de cada curva.....	26

## **RESUMEN**

En Chile, en los últimos 20 años se ha observado una menor disponibilidad de agua para riego, debido principalmente a la disminución de las precipitaciones. Con el objetivo de maximizar la eficiencia en el uso del agua, los productores agrícolas han recurrido a la implementación de sistemas de riego tecnificado y a la utilización de herramientas para el control del riego; las cuales pueden determinar tanto el momento como la cantidad de agua a aplicar en sus cultivos. Sin embargo, los equipos disponibles en el mercado para el control del riego poseen un alto costo, lo que constituye un impedimento para su utilización en grandes superficies productivas. Debido a lo anterior, el presente estudio busca validar y evaluar en distintos tipos de suelo, un nuevo sensor de humedad de suelo inalámbrico y de bajo costo. Como resultado de este trabajo, se espera obtener un sensor de humedad de suelo funcional, de alta precisión y con el potencial de formar una red de sensores que permitan almacenar y entregar datos en tiempo real y que sea de fácil interpretación por los usuarios.

## **ABSTRACT**

In Chile, in the last 20 years a lower availability of water for irrigation has been observed, mainly due to the decrease in rainfall. In order to maximize the efficiency in the use of water, agricultural producers have resorted to the implementation of technified irrigation systems and the use of tools for irrigation control; which can determine both the time and the amount of water to apply to their crops. However, the equipment available on the market for irrigation control has a high cost, which constitutes an impediment to its use in large production areas. Due to the above, the present study seeks to validate and evaluate in different types of soil, a new low cost wireless soil moisture sensor. As a result of this work, it is expected to obtain a functional, high-precision soil moisture sensor with the potential to form a network of sensors that allow data to be stored and delivered in real time and which is easy to use by users.

# 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos 20 años se ha observado una menor disponibilidad del recurso hídrico en la zona centro-sur de nuestro país, debido a la disminución de las precipitaciones (3 a 5% por década), alzas en la temperatura (+0,13°C por década); y aumento de la evapotranspiración de los cultivos (Villarreal et al., 2016). A lo anterior se suma la competencia por agua existente entre la agricultura (73% de uso del agua nacional), la minería e industria (21%) y las zonas urbanas (6%) (Santibáñez, 2016). Esta situación ha determinado que los agricultores busquen formas de maximizar la eficiencia en el uso del agua, sin afectar el rendimiento y la calidad de sus cultivos, lo cual se ha conseguido parcialmente, con la utilización de sistemas de riego tecnificado (Ortega et al., 2010).

En el caso particular de los viñedos para vinificación, es habitual la práctica del riego deficitario controlado, donde las plantas son sometidas a niveles de restricción hídrica moderada que permita ahorrar agua y estimular la calidad de las bayas sin comprometer de manera significativa el rendimiento final del cultivo. Para esto, se requiere información precisa del estado hídrico de las plantas y de la evapotranspiración del viñedo, que permitan tomar decisiones acertadas sobre la cantidad de agua a aplicar y en el momento oportuno (Ortega et al., 2010).

Las técnicas más utilizadas y confiables para determinar el estado hídrico en vides son el potencial hídrico de xilema y la conductancia estomática de las hojas (Pou et al., 2014). Sin embargo, estas técnicas sólo son representativas de la planta que se está midiendo y la extrapolación de esta información a varias hectáreas del viñedo no siempre es representativa de la realidad. Esto hace que su aplicabilidad a escala comercial sea limitada. Para solucionar esta problemática se han desarrollado técnicas basadas en proxidetección que permiten obtener estimaciones precisas de potencial hídrico y de conductancia estomática utilizando imágenes termales y espectrales (Möller et al., 2006). Sin embargo, estas estimaciones son altamente dependientes de la calidad del muestreo y de las condiciones ambientales, lo cual dificulta su estandarización (Ochagavía et al., 2011) y procesamiento, el cual se realiza a través de software que requiere personal

capacitado (Pou et al., 2014). Por otro lado, estos equipos son de muy alto costo (ej. una cámara termal tiene un valor aproximado de US\$15.600), lo que limita su aplicación a nivel comercial.

Una técnica que actualmente es empleada para tomar decisiones de riego es el uso de sensores de humedad volumétrica de suelo, los cuales son una herramienta útil debido a que generan información con la que se puede estimar el contenido de agua del suelo y además permiten determinar la pérdida de humedad del suelo en relación al tiempo (Martínez y Ceballos, 2001). Por tanto, permiten obtener una idea de la dinámica de pérdida de agua del suelo, y de esta forma, programar la reposición del agua de forma apropiada.

El equipo más utilizado debido a su alta precisión es el TDR (Time Domain Reflectometry); sin embargo, al igual que las otras técnicas mencionadas es un equipo de alto costo (aproximadamente US\$7.800), que requiere de personal capacitado para su uso e interpretación de la información recolectada.

En resumen, todas las técnicas anteriormente mencionadas requieren de una cantidad importante de recursos, tiempo y personal especializado para su aplicación, lo que hace que su uso sea restringido sólo al ámbito de la investigación o para grandes empresas agrícolas. Debido a esto se hace necesario desarrollar nuevos equipos que sean de bajo costo, que estén a la par con las nuevas tecnologías y que su utilización sea sencilla.

Debido a lo anteriormente expuesto, la presente investigación busca validar y evaluar un nuevo sensor de humedad de suelo de bajo costo, inalámbrico y con el potencial de formar una red de monitoreo que permita almacenar y entregar datos en tiempo real y que la información recolectada sea de fácil interpretación por los usuarios, para así tomar decisiones acertadas y oportunas sobre la gestión del riego.

### 1.1. Hipótesis

Es posible determinar con precisión el contenido volumétrico de agua en el suelo utilizando un nuevo sensor de humedad de bajo costo, que permita almacenar y entregar datos en tiempo real y que la información recolectada sea de fácil interpretación.

### 1.2. Objetivo general

Evaluar un nuevo sensor de humedad de suelo de bajo costo, que permita almacenar y entregar datos en tiempo real de manera sencilla.

### 1.3. Objetivos específicos

- Evaluar la funcionalidad del dispositivo en tres tipos de suelo presentes en la Región del Maule.
- Comparar los datos obtenidos de los sensores de bajo costo con mediciones de humedad de un sensor comercial de alta precisión.
- Comparar los datos obtenidos de los sensores de bajo costo con mediciones de humedad obtenidas por gravimetría.

## **2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

### 2.1. Agricultura de precisión y preservación de los recursos

A comienzos de los años 90, a partir del desarrollo de nuevas tecnologías y principios basados en el manejo de la variabilidad espacial existente en un predio agrícola para optimizar la producción, comienza a utilizarse el término “agricultura de precisión” (Chartuni et al., 2007).

Posteriormente, cuando se libera el sistema de posicionamiento global por satélite para uso civil, comienza el desarrollo de equipos para el manejo localizado de las prácticas agrícolas, aumentando así la eficiencia de aplicación de insumos, lo cual redujo el impacto

ambiental y los costos de la producción; por lo que, el concepto de agricultura de precisión tomó un enfoque hacia la optimización en el uso de los insumos agrícolas en función de la variabilidad espacial existente (Chartuni et al., 2007).

Los principios de la agricultura de precisión también tienen relevancia en los sistemas de riego; debido a que la variabilidad espacial en las características físicas y químicas del suelo hace que, al momento de regar, el agua no se distribuya de manera uniforme en el predio. Esta situación, no siempre se considera en los diseños de obras de riego, haciendo que los sistemas sean ineficientes y se desperdicien los recursos; ej. pérdidas de fertilizante, como ocurre con el nitrógeno el cual lixivia y contamina los acuíferos subterráneos (Best y Duke 2001).

Otro motivo por el cual es importante considerar la variabilidad espacial en el riego, es que permite realizar manejos diferenciados para la optimización en la eficiencia de uso del agua. Ya que hoy en día existe una creciente preocupación por parte de los productores respecto a la disponibilidad de este recurso hacia el futuro. Según Santibáñez et al. (2016), con la información climática recopilada en los últimos 100 años (1900-2015) se ha determinado que para el año 2050 en la zona centro-sur de Chile, las precipitaciones tendrán una disminución de 3 a 5% por década y la temperatura un aumento de 0,13°C por década.

## 2.2. Manejo hídrico del predio agrícola

Además del aprovechamiento de los recursos, tanto agua como fertilizante el manejo hídrico que se realiza en un predio agrícola tiene directa relación con la producción del mismo: un exceso de agua produce un mayor crecimiento vegetativo en desmedro de la fructificación y tiende a aumentar la susceptibilidad ante plagas y enfermedades de los cultivos, mientras que la falta de agua produce disminución del crecimiento, aborto floral y menor tamaño de frutos (López, 2016).

Un ejemplo claro de la importancia del manejo hídrico en un predio agrícola es la técnica de riego deficitario controlado, la cual se emplea en frutales, principalmente en vides para aumentar la calidad de las bayas para vinificación: ésta consiste en una estrategia de aporte hídrico inferior a los requerimientos de evapotranspiración del viñedo,

con el objetivo de controlar el crecimiento vegetativo y crear condiciones de microclima en torno a los racimos, como mayor iluminación y menor humedad relativa, además de lograr un tamaño de bayas intermedio que proporcione una adecuada relación cutícula/pulpa, y así lograr vinos con altos contenidos de antocianinas, más cuerpo y expresión incrementada de los aromas característicos de cada cultivar, logrando de esta manera un mayor precio de venta (Gurovich, 1998).

Por lo tanto, la medición del contenido de agua en el suelo es fundamental para realizar una adecuada programación del riego, es decir, saber cuándo regar (frecuencia) y cuánto regar (volumen de reposición) (Gurovich, 1985). Para responder estas interrogantes es necesario saber cuál es la cantidad de agua existente en el suelo, lo cual normalmente se determina de forma gravimétrica, es decir, conociendo la cantidad de masa de agua en una masa de suelo conocida o de forma volumétrica, es decir, conociendo las relaciones agua/suelo en términos de volumen. También es necesario conocer la dinámica con la que fluctúan estas relaciones en el tiempo; esto último depende de la extracción de agua por el cultivo, las condiciones climáticas, el tipo de suelo y contenido de materia orgánica entre otros.

### 2.3. Métodos para medir el contenido de agua en el suelo

Existen diferentes tecnologías e instrumentos que se utilizan para determinar el contenido de humedad del suelo; a continuación, se mencionan las principales metodologías que se han desarrollado para resolver esta problemática.

#### 2.3.1. Método gravimétrico

Es un método de medición directo de la humedad del suelo, donde se extrae una muestra de suelo de volumen conocido, se toma nota de su masa inicial, se seca en estufa a 105°C por 24 a 48 horas, hasta que la masa de suelo permanezca constante. El contenido gravimétrico de agua de la muestra corresponde a la pérdida de masa registrada después del secado, ya que se atribuye al agua presente inicialmente en la muestra (Topp, et al., 2002). Este método se utiliza normalmente para calibrar equipos que usan otros métodos de medición de humedad de suelo (métodos indirectos). Sin embargo, es un método destructivo no apto para efectuar un registro continuo de la humedad de suelo, ya que es

necesario extraer una porción del suelo para su análisis en el laboratorio (OMM, 1994). A pesar de ser considerado el método más preciso para la medición de humedad en el suelo se deben tener ciertas consideraciones para suelos con un alto contenido de materia orgánica ya que en ellos existen compuestos volátiles que se evaporan a 105°C y que también contribuyen a la pérdida de masa y no corresponden a agua; también se debe considerar que en suelos salinos, las sales disueltas contribuyen al volumen de la muestra y por ende a errores al momento de determinar la densidad aparente del mismo (Topp, et al., 2002), por lo que podría no ser el mejor método para determinar el contenido de humedad en ese tipo de suelos.

### 2.3.2. Tensiómetros

El tensiómetro comprende un cono o cápsula porosa (normalmente de cerámica) conectado por medio de un tubo a un manómetro. El agua va penetrando en la cápsula y se establece un equilibrio con la humedad del terreno. Al secarse el suelo, el agua fluye desde la cápsula originando una tensión mayor, mientras que si aumenta la humedad del suelo el agua entra a ésta y disminuye la tensión. Estas variaciones de la tensión son registradas por un manómetro. La utilización de varios tensiómetros, ubicados a distintas profundidades, permite obtener el perfil de humedad del suelo, para lo cual requiere una curva de calibración. Cabe señalar que los datos entregados son aproximados debido a la histéresis entre la rama de humectización y de drenaje de la curva de retención de humedad del suelo. Su utilización está limitada entre 0 y 0,8 bar por lo que, este método no se recomienda para zonas con sequías (OMM, 1994) o cultivos en los que se aplique riego deficitario controlado.

### 2.3.3. Reflectometría (TDR)

La reflectometría o TDR (Time Domain Reflectometry), utiliza la correlación existente entre el tiempo de tránsito de una onda o pulso electromagnético de alta frecuencia, la constante dieléctrica del suelo y el contenido volumétrico de agua (Martínez y Ceballos, 2001). El proceso consiste en insertar guías de transmisión en el suelo las que, emiten un pulso electromagnético el cual es reflejado desde el principio y el final de la línea de transmisión para determinar la velocidad con que se propaga a través del suelo a

lo largo de la línea de transmisión. La constante o permitividad dieléctrica del suelo es la que controla esta velocidad y se utiliza para inferir el contenido de agua debido a su alta correlación (Topp, et al., 2002).

Sus principales ventajas son: alta precisión (+/- 2% o mejor), amplio rango de profundidad (guías de 2 cm hasta 3 m), funciona en un amplio rango de suelos y es automatizable. Sus principales desventajas son su alto costo y la necesidad de personal capacitado para la utilización del software que procesa los datos como contenido volumétrico.

#### 2.3.4. Sensores capacitivos y FDR

Los dispositivos capacitivos y FDR (Frequency domain reflectometry) están compuestos de un circuito oscilante y un sensor que se entierra en el suelo (Susha et al., 2014). El sensor consiste en dos electrodos que pueden ser líneas paralelas abiertas o cerradas o, pares de anillos metálicos cilíndricos; estos electrodos forman un condensador donde el suelo es el medio dieléctrico. En función del tiempo de carga del condensador se puede determinar contenido de humedad del suelo, ya que este produce cambios en la constante dieléctrica del suelo, los cuales son detectados por el dispositivo a través de cambios en su frecuencia de operación o barrido de frecuencias en el caso del FDR, el cual capta datos en un rango amplio de frecuencias (Susha et al., 2014).

Los sensores de líneas paralelas son aptos para realizar mediciones superficiales y en profundidad, son de bajo costo, portables y de diseño simple; pueden ser conectados mediante cable a un data logger para entregar datos en tiempo real y además formar nodos para crear redes de monitoreo intercomunicadas con varios sensores. Sin embargo, se debe tener en consideración que su inserción directa en el suelo causa pequeñas perturbaciones por lo que se debe tener especial cuidado de que el sensor este en completo contacto con el suelo ya que espacios de aire en contacto con el sensor producen errores en las mediciones de humedad de suelo (Topp, et al., 2002).

Por su parte los sensores compuestos por pares de anillos metálicos cilíndricos son aptos para mediciones hasta en un metro de profundidad incluyendo intervalos en el perfil (ej. distribuidos cada 10 o 20 cm a lo largo del tubo), son automatizables y de menor costo

que un TDR. Este dispositivo requiere de la instalación de una tubería de acceso, la cual normalmente es de PVC y se entierra en el suelo a la profundidad deseada, se limpia de cualquier resto de suelo del interior y se posiciona el sensor dentro de la tubería; el suelo que rodea la tubería se convierte en la zona de influencia del condensador, abarcando alrededor de 10cm desde la tubería y a lo largo de la misma (Topp, et al., 2002). La precisión del dispositivo también depende de que la tubería esté en pleno contacto con el suelo sin discontinuidades o espacios de aire que disturben las mediciones.

#### 2.3.5. Georradar

El GPR (Ground Penetrating Radar), consiste en una técnica de medición geofísica no invasiva utilizada para determinar y mapear las características del subsuelo, siendo uno de sus usos la determinación del contenido de agua en áreas extensas de terreno a modo de estudio preliminar (Huisman, et al., 2003). Consiste en una antena emisora que genera señales de radiofrecuencia las que se irradian y reflejan en diferentes ángulos para luego ser captadas por una antena receptora. Las señales pueden ser captadas directamente a través del aire entre las antenas transmisora y receptora o a través del suelo adyacente a la superficie entre ambas antenas, así como también de forma indirecta después de reflejar objetos o capas que delimitan la superficie del suelo (Topp, et al., 2002).

El contenido de agua en el suelo se estima a partir del análisis de la velocidad de reflexión de las ondas en el medio ya que esta tiene una alta correlación con la constante dieléctrica del mismo. Sin embargo, se deben tener ciertas consideraciones para el análisis ya que se requiere conocer la constante dieléctrica de los diferentes componentes del suelo y así poder diferenciarlos al momento de analizar los datos (Shamir et al., 2016).

La determinación de la frecuencia a utilizar, la complejidad de adquisición y procesamiento de los datos hacen que se requiera personal capacitado para su uso, lo cual ha limitado su aplicabilidad y aceptación (Huisman, et al., 2003).

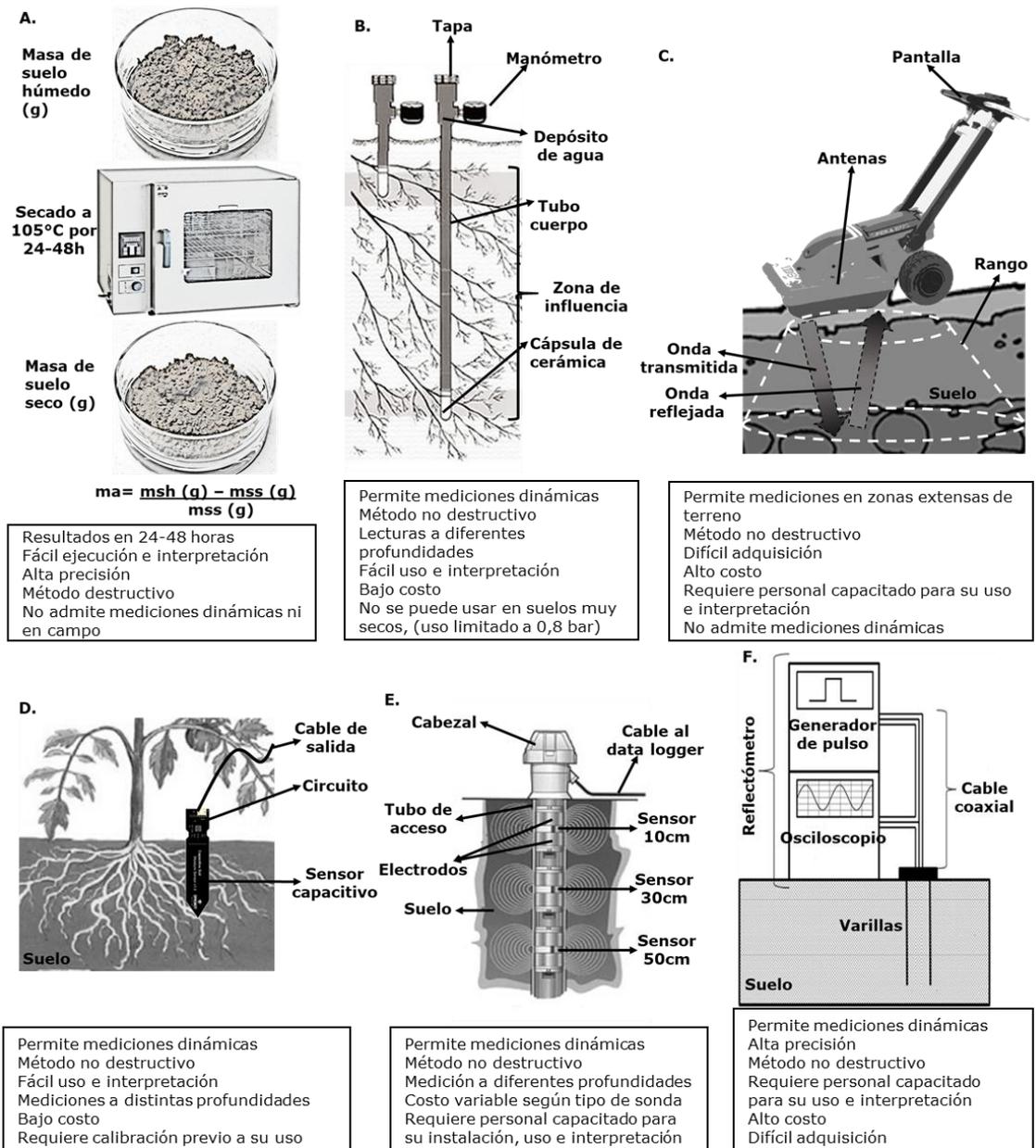


Figura. 1. Esquema resumen de los principales métodos para medir humedad de suelo: A. Método gravimétrico, B. Tensiómetros, C. Georradar, D. Sensor capacitivo, E. Sonda FDR, F. Sonda TDR.

#### 2.4. Sensor desarrollado para el estudio

El dispositivo desarrollado para el presente estudio consiste en un sensor compuesto por una sonda de capacitancia de línea de transmisión cerrada, cuyo circuito está conectado a una placa electrónica compuesta por una tarjeta de desarrollo Arduino,

una batería de litio, un data logger y una entrada de comunicación inalámbrica. Además, se conecta con un panel solar para tener autonomía en condiciones de campo.

Se considera que el dispositivo debe ser de alta precisión y adaptado a las condiciones locales, por lo cual se realizarán pruebas de precisión de las sondas en diferentes tipos de suelo presentes en la región del Maule, para estos efectos se han considerado los principales suelos donde se realizan cultivos agrícolas en la zona y que presenten diferencias texturales o de composición, siendo estos; suelo trumao, franco arenoso y suelo arcilloso.

Las principales ventajas del sensor desarrollado para este estudio radican en que es un dispositivo de bajo costo, de fácil interpretación y uso, con curvas de referencia para las condiciones locales de los suelos y que el sistema será completamente autónomo en condiciones de campo, ya que la conexión a redes inalámbricas, como GPRS, le permitiría comunicarse con el usuario en tiempo real o según se requiera sin necesidad de volver al campo para coleccionar los datos.

#### 2.4.1. Tarjetas de desarrollo y microcontrolador Arduino

Gracias al avance de las tecnologías en los últimos años, el desarrollo independiente de tarjetas electrónicas, software, hardware y accesorios multifuncionales se han hecho más accesibles. Por lo que, cada vez es más factible construir dispositivos de bajo costo. Esta iniciativa ha tomado fuerza en muchos grupos de investigación orientados al desarrollo de nuevas tecnologías para la agricultura, por lo que, múltiples autores diseñan prototipos como sensores de temperatura, humedad ambiental, humedad de suelo, radiación, etc. (Mendoza y Molina, 2010; Faludi, 2010).

La base para la creación de estos dispositivos son las tarjetas electrónicas y los microcontroladores; existe una gran cantidad de desarrolladores de placas y microcontroladores, entre los que destaca el Arduino; el cual consiste en una tarjeta electrónica que puede coleccionar datos del entorno mediante la conexión con una gran variedad de sensores, las placas se pueden ensamblar a mano o encargarlas preensambladas y el software para su configuración puede ser descargado gratuitamente.

Las principales ventajas que ofrece Arduino son:

- Bajo costo; las placas Arduino son relativamente baratas comparadas con otras plataformas de microcontroladores (placas desde US\$20).
- Multiplataforma: el software de Arduino se ejecuta en todos los sistemas operativos (Windows, Linux, Mac, etc.).
- Entorno de programación simple y claro.
- El software Arduino está publicado como herramientas de código abierto, lo que significa que su uso es libre y gratuito.

Las tarjetas de desarrollo Arduino además de interactuar con dispositivos sensores, fuente de alimentación y conexión USB para computador, tienen la capacidad de conectarse a redes inalámbricas como ondas de radio y GPRS, lo que permite que el dispositivo tenga la capacidad de establecer redes entre dispositivos y de comunicarse con el usuario en tiempo real lo que es una ventaja importante en comparación a los sistemas existentes.

#### 2.4.2. Redes inalámbricas

El término red inalámbrica se utiliza en informática para designar la conexión de nodos sin necesidad de una conexión física (cables), ésta se da por medio de ondas electromagnéticas. La transmisión y la recepción se realizan a través de puertos. Una de sus principales ventajas es que se elimina todo el cable ethernet y conexiones físicas entre nodos (Madrid, 2006).

**Comunicación GPRS:** El servicio general de paquetes vía radio (GPRS por sus siglas en inglés), permite utilizar servicios como Wireless Application Protocol (WAP), servicio de mensajes cortos (SMS), Multimedia Messaging System (MMS) e Internet (Madrid, 2006). Este tipo de comunicación inalámbrica permite al dispositivo comunicarse con el teléfono del usuario vía mensajes de texto y mensaje multimedia.

## 2.5. Tipos de suelo considerados en el estudio

Se considera que el dispositivo debe ser capaz de funcionar en distintos tipos de suelo, por lo cual se estima su evaluación en suelos que presenten diferentes características físicas y de composición. Para lo cual se destinaron los tres tipos de suelo descritos a continuación.

- **Suelo trumao:** los suelos trumaos se ubican en la precordillera desde Santiago hasta Llanquihue, son suelos profundos de origen volcánico y se caracterizan por tener un alto contenido de materia orgánica, generalmente son suelos francos en superficie y franco arenosos a franco arcillosos en profundidad. Presentan una densidad aparente baja a media, una alta porosidad total y una buena capacidad de agua aprovechable (Thiers et al., 2014).
- **Suelo franco arenoso:** Los suelos de texturas franca son suelos cuyas proporciones de arena, limo y arcilla se encuentran en óptima proporción para la actividad agrícola (45, 40 y 15% respetivamente), sin embargo, cuando uno de sus componentes se encuentra ligeramente en una proporción mayor al óptimo, como en este caso arena, se habla de un suelo franco arenoso. Es un suelo de textura suelta debido a su alto contenido de arena, fácil de labrar y de moderada retención de humedad (Gisbert et al., 2010).
- **Suelo arcilloso:** los suelos de textura arcillosa se encuentran ampliamente distribuidos por todas las zonas de uso agrícola del país; son suelos donde predominan las arcillas, cuyo tamaño es de 0,002mm. Son suelos plásticos, difíciles de labrar, caracterizados por presentar microporos los que dificultan el paso del agua y aire por lo que tienen una baja permeabilidad y alta capacidad de retención de agua (Gisbert et al., 2010).

## 2.6. Sensor comercial para comparación

El sensor comercial utilizado consiste en un equipo compuesto con por un data logger de 5 puertos para sondas de medición análogas y digitales, que permite su conexión a un computador a través de un puerto com y cable USB-plug o mediante bluetooth, donde

se programa la hora y frecuencia de las mediciones. Las sondas conectadas no requieren programación ya que viene adaptado para funcionar con varios tipos de sensores.

En este caso será conectado a sondas de humedad de suelo que utilizan la tecnología de capacitancia y TDR para medir la constante dieléctrica y determinar el contenido volumétrico de agua en el suelo.

El equipo comercial utilizado tiene un costo aproximado de US\$1.100 y requiere de software y drivers para su uso, los cuales son de descarga gratuita en la página del proveedor.

### 2.7. Aspectos regulatorios

Las regulaciones atinentes al sensor desarrollado para este estudio son fundamentalmente de protección de la propiedad intelectual. La propiedad intelectual hace referencia a creaciones únicas, que tienen un valor añadido producto del intelecto, ingenio, creatividad y capacidad inventiva del ser humano (Kalanje, 2005).

Según Rogers y Rogers (1998), las innovaciones se relacionan con la comercialización de nuevas ideas, mientras que las invenciones no necesariamente terminan en un producto comercial. Por lo que la invención se considera como una nueva idea o conocimiento con el propósito de resolver un problema específico que puede o no dar lugar a una innovación.

Las innovaciones tecnológicas de base o de fundamento crean un nuevo producto que a su vez produce nuevos mercados y nuevas ramas industriales, por lo que se consideran radicales o rupturistas; mientras que las innovaciones de mejora o incrementales hacen que se pueda mejorar la calidad, facilidad de uso, rendimiento, rentabilidad, mejoramiento de procesos o técnicas de producción, de un producto o tecnología ya existente (Kalanje, 2005).

Tanto las invenciones como las innovaciones tecnológicas pueden ser protegidas mediante la propiedad industrial y el secreto comercial.

### 2.7.1. Propiedad industrial

Es un incentivo a la innovación que permite a los inventores apropiarse y obtener beneficios económicos de sus creaciones; abarca las marcas comerciales, denominaciones de origen (D.O.), indicaciones geográficas (I.G.), patentes de invención, modelos de utilidad, dibujos y diseños industriales, y esquemas de trazado o topografías de circuitos integrados (INAPI, 2017).

- **Patentes:** Una patente consiste en un derecho exclusivo concedido durante un periodo limitado, normalmente de veinte años, sobre una invención, producto o proceso que proporciona una solución a un problema técnico (INAPI, 2017). Para ser protegida por una patente la invención debe tener un uso práctico; presentar un componente de novedad en su ámbito y no ser obvia o deducible. Esta protección consiste en que terceros no pueden obtener beneficios comerciales de la invención sin el permiso del titular de la patente, sin embargo, una vez que esta expira, la invención pasa a ser de dominio público (OMPI, 2010).
- **Modelos de utilidad:** también conocidos como pequeñas patentes o patentes a corto plazo, protegen de igual forma que la patente a una invención que suele ser de menor complejidad técnica o valor creativo; puede tratarse de una nueva forma de un objeto conocido o una nueva distribución o integración de componentes para mejorar su uso práctico. Normalmente el periodo de protección mediante un modelo de utilidad es de diez años (INAPI, 2017).
- **Esquemas de trazados o topografías de circuitos integrados:** Es una protección similar a una patente, cuya duración es de diez años; su objetivo es proteger un diseño original y no de conocimiento ordinario entre los creadores de topografías de circuitos integrados. Este diseño consiste en la forma tridimensional con la que se distribuyen y organizan los elementos que componen un circuito integrado, destinado a ser fabricado (INAPI, 2017).
- **Diseño industrial:** consiste en la protección de las características estéticas de un objeto que pueden ser la forma, superficie, líneas de color, etc. Deben ser originales y no funcionales ya que este tipo de protección no abarca rasgos

técnicos; abarca un periodo de cinco años y puede ser renovable hasta por quince años en la mayoría de los casos (OMPI, 2010).

#### 2.7.2. Secreto comercial

A diferencia de las patentes, donde para su obtención es requisito revelar la información sobre sus invenciones; el secreto comercial consiste en resguardar cuidadosamente toda la información relativa a la invención o idea, para gozar de ventaja respecto a los posibles competidores. También se suele utilizar en la etapa previa a obtener la protección mediante patentes (Kalanje, 2005).

### **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### 3.1. Descripción general del ensayo

El ensayo se llevó a cabo durante la temporada 2018-2019 en dependencias del Centro de Investigación y Transferencia en Riego y Agroclimatología (CITRA) y en el invernadero del Centro de Mejoramiento Genético y Fenómica Vegetal de la Universidad de Talca. Se utilizaron muestras de tres tipos de suelo, presentes en la Región del Maule, que fueron provistas por el Centro Tecnológico de Suelos y Cultivos de la Universidad de Talca.

#### 3.2. Sensor desarrollado para el estudio

Como se mencionó anteriormente se desarrolló un prototipo de sensor de humedad de suelo inalámbrico, de bajo costo para la realización del presente estudio. A continuación, se detallan los componentes y sus principales características.

##### 3.2.1. Microcontrolador

El microcontrolador se encarga del procesamiento de toda la información generada por los sensores de humedad de suelo, y se conecta con los dispositivos de almacenamiento y comunicación de datos. El sensor desarrollado se basará en el dispositivo Arduino Nano, el cual es de hardware y software libre (open-source), principalmente creada para el desarrollo de proyectos electrónicos de bajo costo.

- **Versión 1.0 del prototipo:** Arduino Fio; El Arduino Funnel I/O (FIO) es una placa que con microprocesador ATmega328 que opera a 3.3V, tiene conexiones para una batería de polímero de litio e incluye un circuito de carga a través de USB. Tiene un conector integrado para XBee, para permitir la conexión de este componente a través de comunicación inalámbrica. Esta tarjeta permite hacer conexiones en malla entre varios nodos. Puede interactuar con varios sensores a la vez.

Actualmente esta tarjeta se encuentra descontinuada, por lo que se cambió a Arduino Nano la cual cumple con las mismas funciones. Sin embargo, no posee el regulador de carga para batería de litio, ni el conector para XBee integrados, por lo que estos deben instalarse por separado en la placa electrónica.

- **Versión 2.0 del prototipo:** Arduino Nano; esta tarjeta está basada en una placa con un microcontrolador ATmega328, y se ha seleccionado para el proyecto debido a su bajo costo, su tamaño reducido y bajo consumo energético (opera a 5V); además cuenta tanto con entradas analógicas como digitales que sirven para conectar distintos tipos de sensores.

Se conecta al computador a través de un puerto mini-USB y es compatible con la mayoría de los módulos disponibles en el mercado (ej. módulo de carga para una batería de litio); además de permitir la conexión de tarjetas de comunicación como XBee.

### 3.2.2. Comunicación inalámbrica

El dispositivo encargado de realizar las comunicaciones inalámbricas entre sensores será un módulo de comunicación XBee S2B (Digi International), sus principales características se refieren a que es de bajo consumo energético (opera a 3.3V) y trabaja a largas distancias (1,6 Km). El Tipo de comunicación es de ondas de radio en banda 433 MHz (de uso libre).

XBee S2B: Este módulo desarrollado por Digi international, pertenece a la serie 2B tiene una buena potencia de salida y protocolo de datos. Sus módulos permiten crear complejas redes en malla basadas en el firmware de malla. Estos módulos permiten una comunicación muy fiable y simple entre microcontroladores, computadores, sistemas y otros elementos que posean un puerto serial. Soporta redes punto a punto y multi-punto. Su velocidad de transferencia máxima es de 250 Kbps y su alcance comprende 1,6 Km.

### 3.2.3. Comunicación GPRS

Para la comunicación de los sensores con el usuario se utilizará el sistema GPRS (telefónico) que consiste en mensajería de texto donde el dispositivo comunica el estado de humedad de suelo de ese momento, permitiendo obtener datos en tiempo real, además de enviar información a la nube, para su almacenamiento en línea. El dispositivo que realiza esta comunicación es un módulo GPRS Quectel M95 (Quectel Wireless Solutions), sus principales características son una buena velocidad de transferencia de datos y una señal de alta calidad.

Quectel M95: es un módulo GSM/GPRS capaz de operar en cuatro bandas (850/900/1800/1900 MHz), se controla con comandos AT a través del puerto serial del Arduino. Su tamaño es compacto y su consumo de energía es extremadamente bajo (1.3 mA) por lo que es una plataforma rentable y con múltiples funciones que la hacen adecuada para una amplia gama de aplicaciones como seguimiento y medición inteligente, entre otras.

### 3.2.4. Sensor de humedad de suelo

- **Versión 1.0 del prototipo:** El componente que desempeña la función de determinar el contenido de agua en el suelo es un sensor ECH2O EC-5 de METER Group, Inc. USA, el cual se caracteriza por ser económico y de gran precisión. Determina el contenido volumétrico de agua del suelo midiendo la constante dieléctrica del medio. Se comunica con la tarjeta Arduino mediante datos analógicos, utiliza un voltaje de 2.5 a 3.6 volts para su funcionamiento y no supera los 10 milisegundos por cada medición. Consume 10mA de energía, su rango de

medición es de 0 a saturación y su temperatura de operación comprende desde -40 a 60°C.

Debido al incremento en el costo de este modelo de sensores (de 54 a 115 USD), fueron reemplazados por sensores capacitivos modelo SKU: SEN0193 de DF robot.

- **Versión 2.0 del prototipo:** El sensor SKU: SEN0193 de DF robot es un sensor de bajo costo (15 USD) el cual mide la humedad de suelo a través de la constante dieléctrica del suelo, es de tipo capacitivo de líneas paralelas cerradas y está hecho de un material resistente a la corrosión lo cual le da una larga vida útil. Se conecta con Arduino mediante un puerto analógico, utilizando un voltaje de 3.3 a 5.5V y su consumo energético es de 5mA.

#### 3.2.5. Data logger

Corresponde al componente que registra los datos en el tiempo: comprende un reloj de tiempo real RTC y una memoria microSD de 5GB, conectados a la placa electrónica. El data logger almacena los datos que se registran según el tiempo que sea programado.

#### 3.2.6. Fuente de alimentación

La energía del dispositivo será provista por una batería de 2000mA la cual a su vez será alimentada a través de un panel solar de 0,28A, para que el sensor sea completamente autónomo en condiciones de campo.

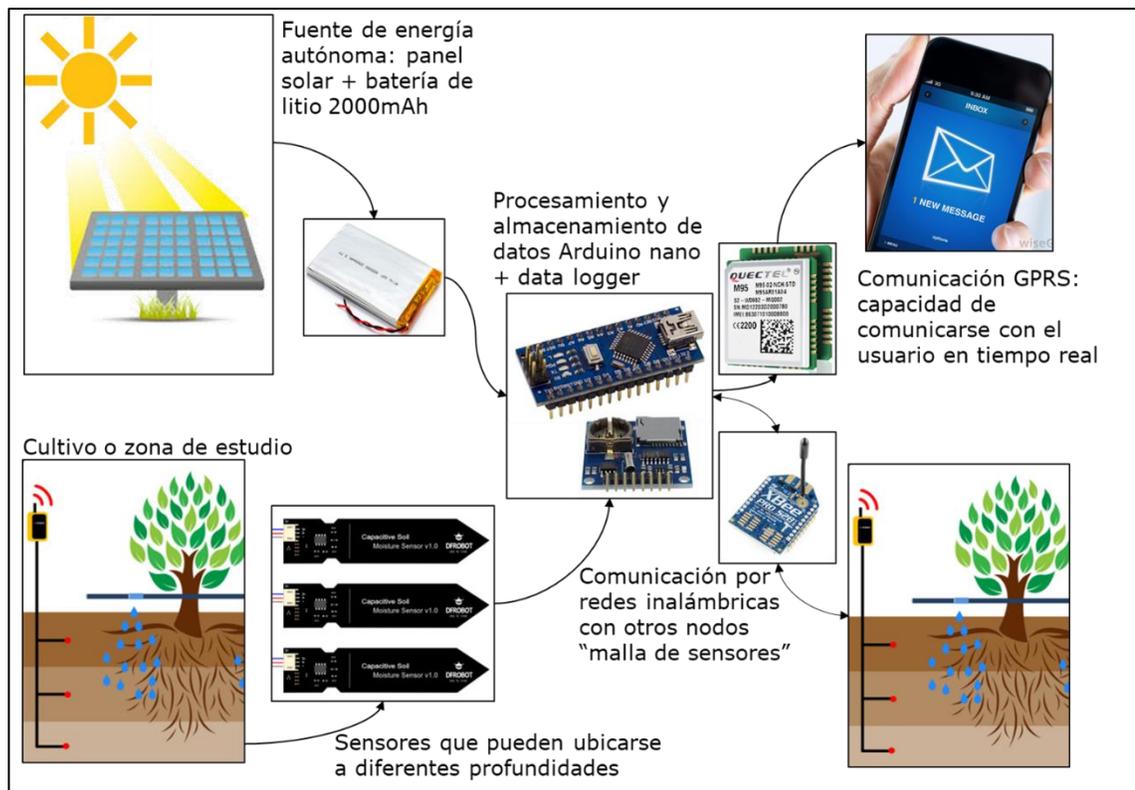


Figura 2. Esquema de funcionamiento del sensor de humedad de suelo inalámbrico de bajo costo en condiciones de campo.

El costo total de elaborar cada sensor es de aproximadamente US\$126 por lo que representa un bajo costo en comparación con los equipos comerciales antes mencionados.

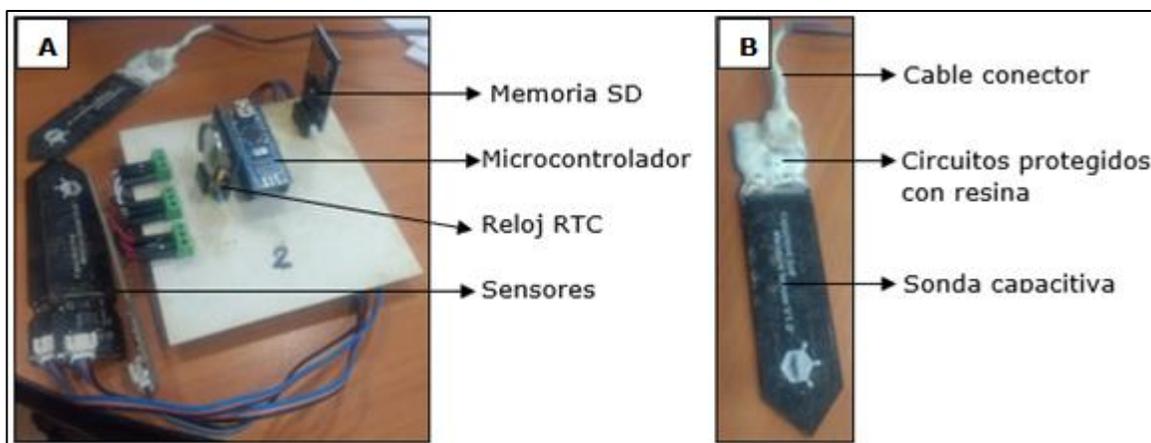


Figura 3. A: Prototipo utilizado en el ensayo; B: Sensor de humedad.

### 3.3. Sensor comercial de referencia

El sensor de referencia se compone de un data logger Em50 (descontinuado, ver ZL6), provisto de dos sondas ECH2O EC-5 conectadas a través de puertos plug. Para su uso fue necesario el software ECH2O Utility, versión 1.84.

El equipo, las sondas y el software pertenecen a METER Group, Inc. USA.

### 3.4. Muestras de suelo utilizadas en el estudio

Las muestras de suelo que se utilizaron corresponden a suelos presentes en las áreas de cultivo de la Región del Maule, de tres texturas y características diferentes siendo estos:

- **Suelo trumao:** andisol-trumao, textura franco-limosa, con un 8,15% de materia orgánica, 36,1% de arena, 52% de limo y 11,9% de arcilla. Densidad aparente de 0,92, capacidad de campo de 33,3% y punto de marchitez permanente al 13,2%.
- **Suelo arenoso:** entisol-aluvial, textura franco-arenosa, con un 0,96% de materia orgánica, 68,1% de arena, 22% de limo y 9,9% de arcilla. Densidad aparente de 1,56, capacidad de campo de 15,1% y punto de marchitez permanente al 6,6%.
- **Suelo arcilloso:** alfisol-arcilloso, textura arcillosa, con un 0,93 de materia orgánica, 36,1% de arena, 17,3% de limo y 46,6% de arcilla. Densidad aparente de 1,42, capacidad de campo de 40,4% y punto de marchitez permanente al 28,1%.

### 3.5. Evaluación del sensor de humedad de suelo

Los ensayos fueron realizados entre los meses de abril a noviembre de 2019, dentro de un invernadero.

Se recolectó una muestra (5Kg aprox.) de cada tipo de suelo, según protocolo de toma de muestras del Centro Tecnológico de Suelos y Cultivos de la Universidad de Talca. Debido a la alta presencia de terrones estos fueron fragmentados hasta pasar por un tamiz de 2mm.

Una vez que se homogeneizó la muestra de suelo se procedió a colocar en dos vasos precipitados de un litro con perforaciones en la base; el suelo se fue colocando en capas de 1cm y mojando con una regadera para obtener una humectación homogénea, hasta llenar 900mL de suelo húmedo, saturado. Se tomó nota de la cantidad de agua utilizada para cada caso, luego se pesó cada muestra y se dejó drenar por 24 horas con el objetivo de quedar a capacidad de campo.

Se procedió a poner los sensores dos sensores capacitivos y uno comercial en cada vaso y se dejó secar al aire, tomando mediciones de peso una vez al día hasta que su masa (en g.) fue constante, donde se estimó que el suelo se encontraba seco y se repitió el ciclo con un tipo de suelo diferente hasta evaluar los tres tipos de suelo.

Al final de cada ciclo se extrajeron los datos de las memorias de los sensores para realizar las comparaciones entre sensores capacitivos y comerciales para cada tipo de suelo.

### 3.6. Método gravimétrico

Con los datos de masa obtenidos para cada vaso de muestra evaluado, se elaboró una tabla para calcular el contenido volumétrico de agua promedio por cada tipo de suelo:

Cuadro 1. Tabla de cálculo de contenido volumétrico de agua (VWC) obtenido por gravimetría.

Volumen (ml)	Masa (g)	$\Delta$ masa acumulada (g)	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> VWC
800	1481,8	0	0,45
800	1466,4	15,4	0,43
790	1439,5	42,3	0,40
790	1396,7	85,1	0,34

VWC se calculó usando la siguiente fórmula:

$$X - (\Delta \text{ masa acumulada (g)}/\text{volumen})$$

Donde X es el valor de saturación obtenido por diferencia de masa de la muestra seca y la masa de la muestra mojada dividido por el volumen inicial.

Con estos datos se realizaron las comparaciones con las lecturas analógicas de los sensores de bajo costo.

### 3.7. Análisis estadístico

Las comparaciones se efectuarán mediante regresiones lineales entre los datos obtenidos por las lecturas analógicas obtenidas por los sensores capacitivos para cada tipo de suelo y los datos recolectados del sensor de referencia y los obtenidos a través de gravimetría.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Evaluación sensores de bajo costo

Durante las primeras evaluaciones, se detectó que los sensores de bajo costo presentaron una alta sensibilidad a la humedad ambiental, por lo que fue necesario proteger los circuitos utilizando resina protectora (MEPUR 72-60). Después de proteger los circuitos, se iniciaron los ciclos de humectación y secado para cada tipo de suelo, en este proceso se realizó la comparación entre las lecturas analógicas de los sensores capacitivos de bajo costo y las lecturas de contenido volumétrico (VWC  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ) del sensor comercial de referencia y las obtenidas por gravimetría (fig. 4).

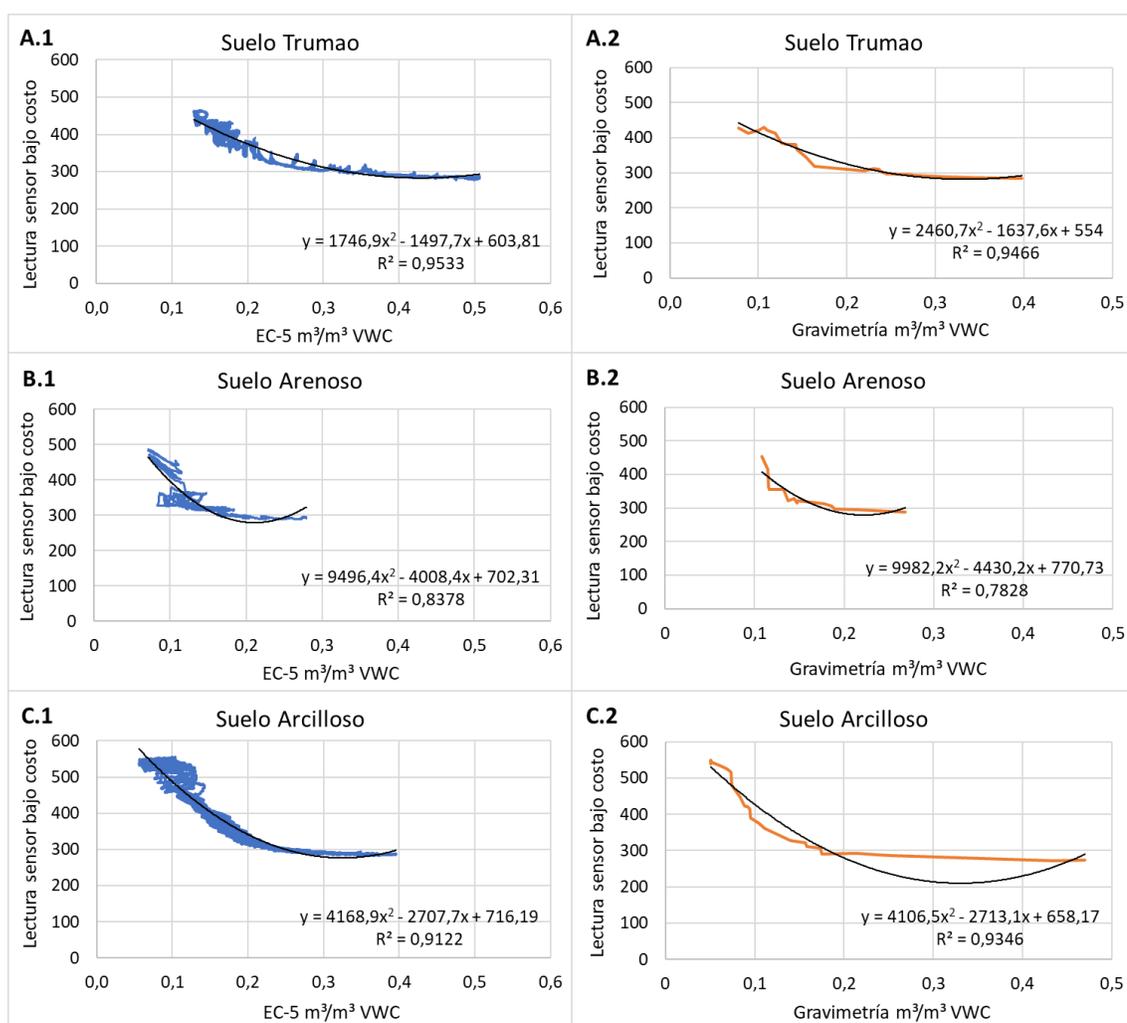


Figura 4. Comparación de las mediciones del sensor de bajo costo, con las del sensor de

referencia (izquierda) y con las obtenidas por método gravimétrico (derecha); en tres tipos de suelo: trumao (A), arenoso (B) y arcilloso (C). Se presenta la línea de tendencia polinomial, la ecuación del gráfico y el valor de  $R^2$ . Los valores obtenidos por gravimetría corresponden a volumen de agua evaporado.

Se puede observar que la relación entre la lectura analógica de los sensores de bajo costo y el contenido volumétrico de agua es inversa, lo cual está dentro de lo esperado, ya que según las indicaciones del fabricante el rango de humedad determinado para estas sondas es el siguiente:

- seco: 430-520
- húmedo: 350-430
- mojado: 260-350

Los sensores de bajo costo en suelo trumao (A), presentaron un  $r^2$  de 0,9533 al compararlo con el sensor de referencia y de 0,9466 al compararlo con el método gravimétrico, lo cual indica que la sensibilidad de estos a las variaciones de humedad en este tipo de suelo es similar a las de ambos métodos. Por lo tanto, el alto contenido de materia orgánica del suelo no parece afectar las mediciones para este tipo de sondas.

En el caso del suelo arenoso (B) los sensores de bajo costo tendieron a ser menos sensibles en detectar los cambios de humedad de suelo, presentando un  $r^2$  de 0,8378 con el sensor de referencia y de 0,7828 con el método gravimétrico; es posible que la sensibilidad de los sensores de bajo costo haya sido afectada por el espacio poroso del tipo de suelo, ya que presenta partículas de mayor tamaño, y por lo tanto mayor porosidad. Y como se describió anteriormente; los espacios de aire en contacto con este tipo de sensor producen perturbaciones en las mediciones de humedad de suelo (Topp, et al., 2002).

Los valores de  $r^2$  en el suelo arcilloso (C), fueron más altos que en el caso del suelo arenoso presentando valores de 0,9122 con el sensor de referencia y de 0,9346 con el método gravimétrico. Este tipo de suelo presenta una baja porosidad y por ende las sondas tendrían un mejor contacto con el suelo, como se puede observar en la figura 3, cuando el suelo estuvo saturado la sensibilidad de la sonda fue menor.

Al observar las curvas se puede ver que los suelos A y C tienen una mayor capacidad de retención de agua, ya que las curvas son mucho más largas que las del suelo B. Al observar estos valores se puede notar que los suelos trumao y arcilloso presentaron valores de saturación más altos que el suelo arenoso. Sin embargo, para contenidos volumétricos de agua (VWC) sobre  $0,3 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , los valores de lectura de los sensores de bajo costo tienden a ser constantes y cercanos a 300, mientras que cuando el suelo tiene un VWC entre  $0,1$  y  $0,3 \text{ m}^3/\text{m}^3$  se observa una mayor sensibilidad de las sondas.

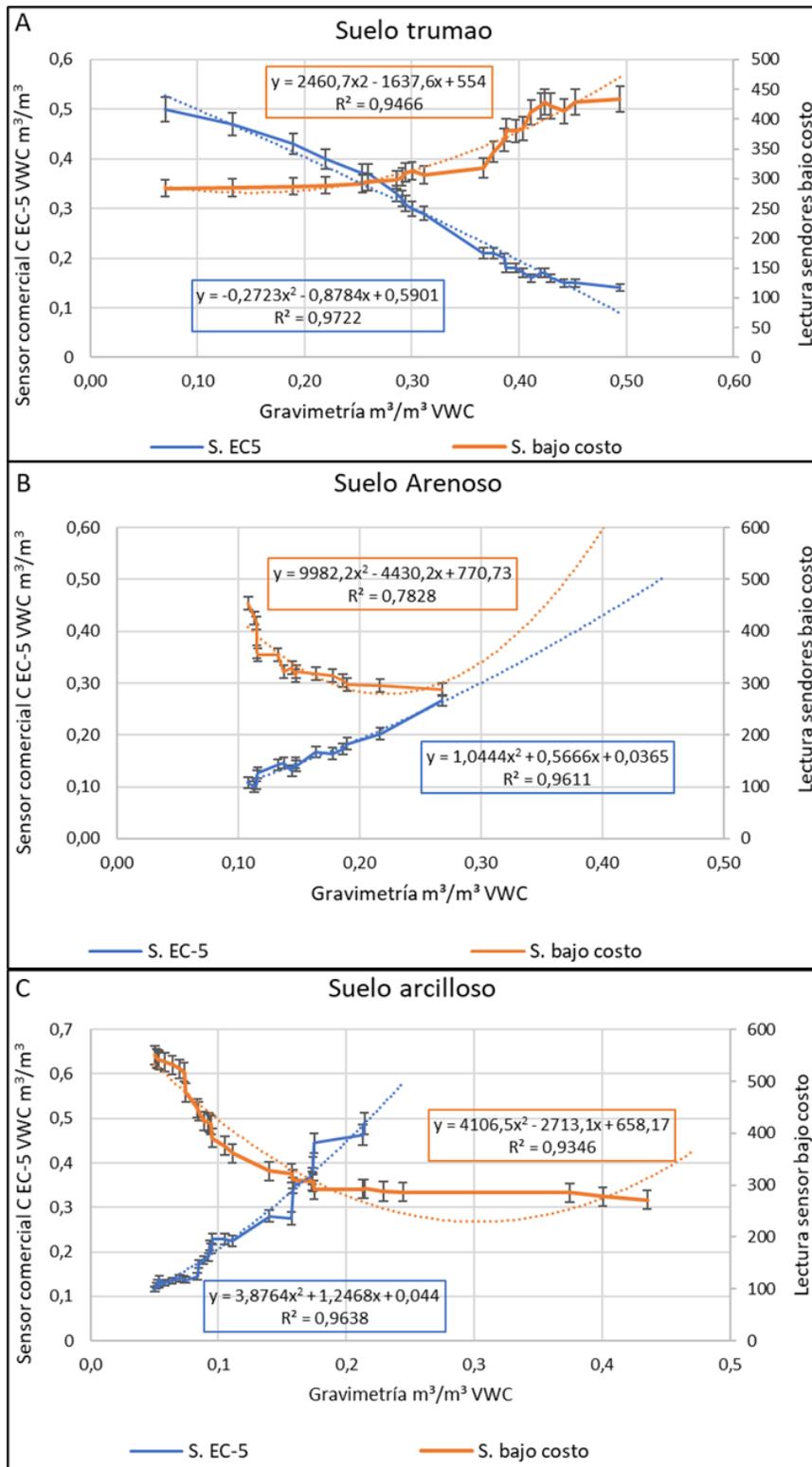


Figura 5. Comparación de sensor comercial (líneas azules) y sensores de bajo costo (líneas naranjas) con el contenido de humedad obtenido por gravimetría (eje x), en tres tipos de

suelo: trumao (A), arenoso (B) y arcilloso (C). Las casillas de la ecuación de la recta y valores de  $r^2$ , se enmarcan con el mismo color de las líneas correspondientes. También se presentan barras de error y líneas de tendencia de cada curva.

Como se puede observar en la fig. 5 el sensor comercial utilizado mostró una precisión entre 96 y 97% respecto a los datos obtenidos por gravimetría, independiente del tipo de suelo. Estos valores concuerdan con las indicaciones del fabricante de  $\pm 0,03 \text{ m}^3/\text{m}^3$  de VWC, para una calibración genérica, utilizada en este estudio. Mientras que el sensor de bajo costo presentó diferencias de precisión según el tipo de suelo; es necesario mencionar que para este sensor no se utilizaron calibraciones, sólo se usaron los datos brutos de las mediciones analógicas. Finalmente, al observar las barras de error, se puede ver que las de los sensores de bajo costo y las del sensor comercial son similares, por lo que, si se realizan calibraciones, ya sea genéricas o específicas para cada tipo de suelo, es muy probable que se pueda mejorar la precisión de los sensores de bajo costo de manera significativa, logrando valores similares a la de los sensores comerciales.

## 5. CONCLUSIONES

Los circuitos de los sensores de bajo costo presentan una alta sensibilidad a la humedad ambiental por lo que es necesario protegerlos; para este fin la resina protectora de circuitos resultó ser adecuada y eficiente y no elevó de manera considerable el costo de elaboración de los equipos, sin embargo, para su uso al aire libre se debe considerar la elaboración de un estuche o carcasa protectora de algún material resistente.

Las sondas mostraron una alta sensibilidad a las variaciones de humedad en los suelos trumao y arcilloso mientras que en suelos porosos como el arenoso, fue menor. Por lo que se recomienda su uso en suelos de baja porosidad.

A pesar de lo anterior los sensores de bajo costo demostraron una alta sensibilidad cuando el contenido volumétrico de agua es inferior a  $0,3 \text{ m}^3/\text{m}^3$  por lo cual son una buena herramienta para detectar cuando un suelo se está secando y por ende pueden constituir una buena herramienta de programación del riego.

Se requiere probar los dispositivos de bajo costo realizando calibraciones tanto genéricas como específicas por tipo de suelo para evaluar como mejoría su precisión.

Por su bajo costo y alto potencial de conectividad, este tipo de sensor resulta ser una buena alternativa para crear una red de sensores que funcionen de forma inalámbrica y autónoma, cubriendo varios puntos de medición de forma simultánea.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

Best, S. C., & Duke, H. R. 2001. Spatial distribution of water and nitrogen application under center pivot sprinklers. In Proc. of Central Plains Irrigation course and exposition. Central Plane Irrigation Association. Kearney, Nebraska, p. 58-65.

Campbell, C.S. 2002. Calibrating ECH2O soil moisture probes. Pullman, WA: Decagon Devices Inc. 3p.

Chartuni, E., de Carvalho Pinto, F. D. A., de Queiroz, D. M., & Ruz, E. 2007. Agricultura de precisión: nuevas herramientas para mejorar la gestión tecnológica en la empresa agropecuaria. Revista Palmas, 28(4):29-34.

Choné, X., Van Leeuwen, C., Dubourdieu, D., & Gaudillère, J. P. 2001. Stem water potential is a sensitive indicator of grapevine water status. Annals of botany, 87(4):477-483.

Faludi, R. 2010. Building wireless sensor networks: with ZigBee, XBee, arduino, and processing. "O'Reilly Media, Inc."

Gisbert Blanquer, J. M., Ibañez Asensio, S., & Moreno Ramón, H. 2010. La textura del suelo.

Graf, R. 1999. Modern Dictionary of Electronics. 7°Ed., 467.

Guerrero, J. A. 2016. Desarrollo de un sistema inalámbrico de adquisición de datos para el estudio espacializado de la fenología de la vid (tesis de pregrado) Universidad de Talca, Curicó, Chile.

Gurovich, L. 1998. Aplicaciones del riego deficitario controlado en la vid, efecto sobre calidad de la uva y del vino. Curso: tópicos de actualización en viticultura y enología. Santiago, Chile, p. 21-23.

Gurovich, L. 1985. Medición del agua en el suelo. En: Fundamento y diseño de sistemas de riego. San José, Costa Rica. Instituto interamericano de cooperación para la agricultura, p. 9.

Huisman, J.A., Hubbard, S.S., Redman, J.D. and Annan, A.P., 2003. Measuring soil water content with ground penetrating radar: A review. Vadose zone journal, 2(4):476-491.

Instituto nacional de propiedad industrial, INAPI, 2017. Glosario. Disponible en línea, consulta 12 de marzo de 2019 en: [<https://www.inapi.cl>]

Kalanje, C., 2005. El papel de la propiedad intelectual en la innovación y el desarrollo de nuevos productos. OMPI, Organización Mundial de la Propiedad Intelectual. Disponible en internet, consulta 12 de marzo de 2019 en: [[http://www.wipo.int/sme/es/documents/ip\\_innovation\\_development.Htm](http://www.wipo.int/sme/es/documents/ip_innovation_development.Htm)].

Lorenzini, M. S. G. & Arcos, S. V. 2007. Correlación de determinación de humedad de suelos por medio de secado en horno y en microondas. *Revista de la Construcción*, 6(1):28-34.

Madrid Molina, J. M. 2006. Seguridad en redes inalámbricas 802.11. *Revista Sistemas y telemática*, 3(1):13-28.

Martínez Fernández, J., & Ceballos, A. 2001. Diseño y validación de una sonda TDR para la medición de la humedad del suelo. (JJ López, M. Quemada, M. Eds.) *Temas de Investigación de Zona no Saturada*. Universidad Pública de Navarra. Pamplona, p.37-43.

Mendoza Quitiaquez, M. A., & Molina Yaguana, V. E. 2010. Análisis, diseño e implementación de un prototipo de monitoreo y control de humedad en la bodega ubicada en la ciudadela La Argelia, mediante el uso de tecnología Zigbee (Bachelor's thesis).

Möller, M., Alchanatis, V., Cohen, Y., Meron, M., Tsipris, J., Naor, A., Ostrovsky V., Sprintsin M. & Cohen, S. 2006. Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine. *Journal of experimental botany*, 58(4):827-838.

López-Olivari, R. 2016. Manejo y uso eficiente del agua de riego intrapredial para el sur de Chile: conceptos y consideraciones básicas en métodos y programación de riego para optimizar el recurso hídrico. Capítulo 4: Manejo y programación de riego, p. 94-156.

Ochagavía, H., Grant, O. M., Baluja, J., Diago, M. P., & Tardáguila, J. 2011. Exploring zenithal and lateral thermography for the assessment of vineyard water status. In 17th International GiESCO Symposium Proceedings, Asti-Alba, Italy, p. 201-204.

Organización mundial de la propiedad intelectual, OMPI. 2010. ¿qué es la propiedad intelectual? OMPI, Organización Mundial de la Propiedad Intelectual. Boletín 450(S), 23p.

Organización meteorológica mundial, OMM. 1994. Guía de prácticas hidrológicas: Adquisición y proceso de datos, análisis, predicción y otras aplicaciones. Capítulo 15: Medición de la humedad de suelo. Quinta edición. OMM, 168:195-206.

Ortega-Farias, S., Poblete-Echeverría, C., & Brisson, N. 2010. Parameterization of a two-layer model for estimating vineyard evapotranspiration using meteorological measurements. *Agricultural and forest meteorology*, 150(2):276-286.

Pou, A., Diago, M. P., Medrano, H., Baluja, J., & Tardaguila, J. 2014. Validation of thermal indices for water status identification in grapevine. *Agricultural water management*, 134:60-72.

Rogers, M. and Rogers, M., 1998. The definition and measurement of innovation. p. 5.

Rowlandson, T. L., Berg, A. A., Bullock, P. R., Ojo, E. R., McNairn, H., Wiseman, G., & Cosh, M. H. 2013. Evaluation of several calibration procedures for a portable soil moisture sensor. *Journal of hydrology*, 498:335-344.

Santibáñez Quezada F. 2016. El cambio climático y los recursos hídricos de Chile: la transición hacia la gestión del agua en los nuevos escenarios climáticos de Chile. Oficina de estudios y políticas agrarias, ministerio de agricultura, Gobierno de Chile, p. 16-39.

Santibáñez Quezada F., Santibáñez Varnero P., & González P. 2016. Elaboración de una base digital del clima comunal de Chile: línea base (1980-2010) y proyección al año 2050. Ministerio del medio ambiente, Gobierno de Chile. 39-43

Shamir, O., Goldshleger, N., Basson, U. and Reshef, M., 2016. Mapping spatial moisture content of unsaturated agricultural soils with ground-penetrating radar. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 41:1279-1285

Susha-Lekshmi, S.U., Singh, D.N. and Baghini, M.S., 2014. A critical review of soil moisture measurement. *Measurement*, 54:92-105.

Thiers, O., Reyes J., Gerding V., Schlatter J.E. 2014. Suelos en ecosistemas forestales. En: Donoso C., González M.E., Lara A. eds. *Ecología forestal. Bases para el manejo sustentable y conservación de los bosques nativos de Chile*. Valdivia, Chile. Ediciones UACH. p. 133-178.

Topp, G.C., Ferre, P.A. and Dane, J.H., 2002. Methods for measurement of soil water content. *Methods of soil analysis. Part, 4*, p.422-475.

Villarroel Jiménez C., Bustos Gaete M.A., Vásquez Yáñez R. 2016. Resumen climático Chile 2016. Dirección general de aeronáutica civil (DGAC), Dirección meteorológica de Chile.