

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TITULO

**CALIBRACIÓN DE DOS SENSORES DEL TIPO FDR Y UN SENSOR TDR EN
DISTINTAS CONDICIONES DE SALINIDAD DE SUELO**

**CALIBRATION OF TWO FDR TYPE SENSORS AND ONE TDR TYPE SENSOR
ON DIFFERENT SOIL SALINITY CONDITIONS**

RODRIGO ALEJANDRO CANDIA ANTICH

SANTIAGO – CHILE
2013

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

**Calibración de dos sensores del tipo FDR y un sensor TDR en distintas
condiciones de salinidad de suelo**

Memoria para optar al Título Profesional de:
Ingeniero Agrónomo

Rodrigo Alejandro Candia Antich

	Calificaciones
Profesores Guías	
Cristian Kremer F. Ingeniero Agrónomo, Ph. D.	6,8
Oscar Seguel S. Ingeniero Agrónomoc, Dr.	6,7
Profesor Evaluador	
Julio Haberland A. Ingeniero Agrónomo, Ph. D.	6,2
Cecilia Peppi A. Ingeniero Agrónomo, Ph. D.	6,8

Santiago, Chile
2013

*“No comparto lo que dices, pero defenderé
hasta la muerte tu derecho a decirlo”
Voltaire*

AGRADECIMIENTOS

Dicen que siempre es bueno partir por casa, y no podría dejar de agradecer a toda mi familia, que siempre confió en mí y me apoyo en todo momento. Mi madre con su ternura y comprensión, mi padre con sus siempre sabios consejos de vida y dedicación, y mi hermana que me aterriza y me centra. A fin de cuentas, si estoy donde estoy es gracias a ellos.

Agradecer a mis profesores por la paciencia, la dedicación y las enseñanzas no solo académicas que me entregaron. A Cristian Kremer que siempre estuvo disponible para tenderme una mano cuando lo necesité, que a pesar de todos los intentos fallidos, logramos sacar esto adelante. Oscar Seguel, una gran persona que con su dedicación a la docencia hizo que cosas abstractas tomaran forma y fuesen entendibles. Julio Haberland que con toda su experiencia me entregó conocimientos que me han formado como el profesional que en un futuro (espero no muy lejano) seré.

Mis grandes amigos Felipe Parada y Luis Reyes que hicieron que el paso por la universidad tomara un color distinto, siempre aconsejando cuando lo necesite, retando cuando lo merecía y compartiendo muy buenos momentos siempre que era posible. Muchas gracias por todo el apoyo, las conversaciones, las estupideces y discusiones que tuvimos tantas veces. Gracias a todos los "chicos PAK" que hicieron que este año tuviese de todo, menos descanso.

Claramente todo este trabajo realizado hubiese sido mucho más difícil de no haber sido por el apoyo desinteresado de todos los funcionarios de la facultad que me enseñaron y ayudaron cuando lo necesité, don Huguito, sra. Marisol, Consuelo, Nancy, Pily, don Gabriel, don Leo y toda la gente del taller de mantención. Muchísimas gracias a todos ellos, se me quedan demasiados nombres, pero gracias a todos.

Y finalmente, gracias a toda la gente que estuvo, está y estará en vida, que gracias a todos ellos me han hecho ser lo que soy, y estar donde estoy.

INDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3
Objetivos Específicos	7
MATERIALES Y METODOS	8
Ubicación del estudio	8
Caracterización de los sitios	9
Dispositivos utilizados	10
Contenido de agua	10
Tratamientos y Diseño de experimentos	11
Instalación sensores GS3 y POGO	11
Instalación sensor Diviner 2000	12
Procedimiento	14
Estimación de CE_p	14
Calibración sensores GS3 y POGO	15
Calibración Diviner 2000	16
Análisis estadístico	16
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	18
Características morfológicas de suelo	18
Textura, densidad real y densidad aparente	19
Conductividad eléctrica en extracto de saturación	20
Curva de retención de agua	21
Calibración de sensores	23
Sensor GS3	23
Sensor POGO	31
Sensor Diviner 2000	38
Comparación de sensores	42

CONCLUSIONES..... 44

BIBLIOGRAFIA..... 45

Apéndice 51

RESUMEN

La necesidad de monitorear el estado hídrico del suelo ha llevado al desarrollo de distintas técnicas que estiman el contenido de agua (θ) de éste. Dentro de estas técnicas existen dispositivos que utilizan impulsos electromagnéticos, estimando θ en base a la permisividad dieléctrica del suelo (ϵ_a); sin embargo, existe un efecto de las sales que generan errores en la medición realizada. Esto hace necesario realizar una calibración de los sensores para poder representar de buena manera el estado hídrico en suelos con altos contenidos salinos. Este ensayo fue realizado en tres predios en el Valle de Copiapó, con texturas predominantemente finas y valores de conductividad eléctrica saturada entre 4,4 a 16,5 dS m⁻¹. Se calibraron para estas condiciones 2 sensores del tipo FDR (POGO y Diviner 2000) y 1 del tipo TDR (GS3).

Con las calibraciones de fábrica de estos sensores, el error estándar asociado a la estimación de θ fue de 0,053 m³ m⁻³, 0,086 m³ m⁻³ y 0,070 m³ m⁻³, para los sensores GS3, POGO y Diviner 2000 respectivamente. Luego de la calibración estos errores disminuyeron a 0,033 m³ m⁻³, 0,063 m³ m⁻³ y 0,019 m³ m⁻³.

No fue necesaria la realización de curvas de calibración diferenciadas en rangos de salinidad ni de θ , a excepción del sensor Diviner 2000, en donde se realizó un ajuste para cada profundidad y cada suelo muestreado.

Palabras claves: Sensores de humedad de suelo, contenido de agua del suelo, salinidad de suelo, conductividad eléctrica, permisividad dieléctrica.

ABSTRACT

The need to monitor soil hydric status has promoted the development of different techniques to estimate the soil water content (θ). Among those techniques there are devices that work with electromagnetic pulses to estimate θ based on the soil dielectric permittivity (ϵ_a), however, soil salt content can affect the measurements and cause errors on the soil water estimation. Based on this, it is necessary to calibrate these sensors to determine in a proper way the soil hydric status in soils with high salt content. This trial was developed at the Copiapo Valley in three predominantly fine textured soils with saturated electrical conductivity ranging from 4.4 to 16.5 dS m⁻¹. Under these conditions 2 FDR types sensors (POGO and Diviner 2000) and 1 TDR type (GS3) were calibrated.

Under the original settings the standard error of the θ estimation were 0.053 m³ m⁻³, 0.086 m³ m⁻³ and 0.070 m³ m⁻³ for the GS3, POGO and Diviner respectively. Once the custom calibration was set up the standard error were a 0.033 m³ m⁻³, 0.063 m³ m⁻³ and 0.019 m³ m⁻³.

The calibration grouped according to salinity or θ ranges was not necessary, except for the Diviner 2000 sensor where calibration for each depth and soil tested was necessary.

Keywords: Soil moisture sensors, soil water content, soil salinity, electrical conductivity, dielectric permittivity.

INTRODUCCIÓN

El incremento de los costos asociados a la producción agrícola, junto a la reducción de los recursos hídricos disponibles, son antecedentes que están liderando la búsqueda de alternativas que permitan una mayor eficiencia en el uso del agua. La disponibilidad y uso de información pareciese ser la clave para enfrentar estas temáticas, dentro de éstas, el contenido de agua del suelo (θ) es un parámetro importante para planificar los manejos asociados al campo.

El método estándar de medición de θ es mediante la extracción física de una muestra de suelo (Hignett y Evett, 2008), la cual es pesada, secada en un horno a 105°C durante 24 horas y pesada nuevamente para determinar, por diferencia, la masa de agua, la que se expresa respecto de la masa de la muestra en estado seco (Lunt et al., 2005). Esta medición se utiliza como método de calibración para otras técnicas de determinación del estado hídrico del suelo (Zazueta y Xin, 1994). El problema asociado a esta medición es que el contenido de agua, aun cuando se riegue de manera eficiente, presentará diferencias dentro del campo, ya que tanto las propiedades físicas, químicas, como biológicas pueden variar ampliamente. Por lo tanto, hacer una caracterización del estado hídrico puede tomar demasiado tiempo (Western y Grayson, 1998), junto con ser una técnica destructiva y relativamente cara para realizar monitoreos a gran escala. Además, al no entregar una medida instantánea del contenido de agua del suelo, la utilización de este método para la toma de decisiones de campo, no permite reaccionar en el momento adecuado.

En este contexto, técnicas de estimación indirecta de θ , basadas en la variación del complejo de permisividad dieléctrica del suelo (ϵ_a), particularmente la

constante dieléctrica (K_a) han demostrado ser exitosas como herramienta para establecer programas de riego eficiente (Noborio et al., 1994; Dalton y Van Genuchten, 1986). Dentro de las anteriores destacan dos, “time domain reflectometry” (TDR) y “frequency domain reflectometry” (FDR) (Zúñiga, 2004). Las ventajas de una sobre la otra dependerá, entre otras, de las condiciones de suelo, superficie a monitorear y recursos que se dispongan.

El complejo de permisividad dieléctrica (ϵ_a) es una propiedad eléctrica de un material, y representa la capacidad de polarizarse y formar un campo eléctrico, el cual consta de un componente real y otro imaginario. El componente real, llamado constante dieléctrica (K_a), considera en el suelo las K_a de las tres fases presentes en el medio (agua, aire, minerales del suelo) en donde su valor en agua es 80 veces mayor que en el aire y entre 5 y 20 veces mayor que la fracción mineral del suelo (Bittelli et al., 2008; Bouksila et al., 2008). Así, es posible estimar un contenido de agua en base a la constante dieléctrica medida en el medio, ponderando las constantes de las tres fases presentes en él (suelo, agua y aire). Por otra parte, el complejo también cuenta con una parte imaginaria, la cual representa la absorción o pérdida de energía, ya sean del tipo dieléctricas o por conducción iónica, pérdida que se ve influenciada fuertemente por el nivel de sales presentes en el medio (Dalton y Van Genuchten, 1986; Hilhorst, 2000). Sin embargo, en medios con bajos niveles de conductividad eléctrica (CE), el valor de la parte imaginaria es despreciable y se considera ϵ_a igual al valor de la constante dieléctrica.

En base a lo anterior, la velocidad de desplazamiento de un impulso electromagnético (V_{ie}) que viaja a través del suelo, está relacionada con la proporción en la que se encuentren las tres fases del suelo, ya que a mayor ϵ_a (influenciado por un mayor contenido de agua), existirá una disminución en la V_{ie} , lo que se asocia a una resistencia del medio al movimiento del impulso (Dalton y Van Genuchten, 1986). Adicionalmente, la V_{ie} está influenciada por la temperatura

y la CE que presente el suelo (Hallikainen et al., 1985; Evett et al., 2002), lo cual es un factor a considerar en zonas áridas o de suelos que presenten altos niveles de salinidad.

A pesar que las distintas técnicas (TDR, FDR) difieren en la forma de determinar ε_a (Zazueta y Xin, 1994; McMichael y Lascano, 2003), la gran mayoría estima θ en base al modelo planteado por Topp et al (1980):

$$\theta = 4,3 \times 10^{-6} \varepsilon_a^3 - 5,5 \times 10^{-4} \varepsilon_a^2 + 2,92 \times 10^{-2} \varepsilon_a - 5,3 \times 10^{-2} \quad (1)$$

Sin embargo, para el caso del equipo Diviner 2000, la estimación de θ es en base a las frecuencias registradas por el sensor escaladas en base a la frecuencia medida en agua libre y al aire (al momento de normalizar el equipo) mediante el siguiente modelo:

$$SF = a * \theta^b + c \quad (2)$$

Donde SF corresponde a la frecuencia escalada estimada por el sensor y a, b y c son parámetros de corrección determinados para cada profundidad y perfil en el cual se realice la medición (Sentek, 2011).

Estos modelos funcionan adecuadamente para gran parte de los suelos de origen mineral (Topp et al., 1980) y valores de conductividad eléctrica de la masa de suelo (CE_b) inferiores a 2 dS m^{-1} . Sin embargo, el comportamiento del modelo en condiciones levemente distintas a las de su calibración original es errático (Topp et al., 1980; Pepin et al., 1995; Seyfrid y Murdock, 2001; Wraith y Or, 2001), debido a un aumento de la constante dieléctrica del medio por las sales disueltas en la solución suelo. Así, se han reportado sobreestimaciones en el valor de θ con valores de conductividad eléctrica del agua en los poros (CE_p) del suelo sobre los 8 dS m^{-1} (Dalton, 1992) y conductividad eléctrica de la masa de suelo (CE_b) sobre 2 dS m^{-1} (Wyseure et al., 1997).

Dado esto, se hace necesario realizar una calibración previa de los instrumentos frente a los distintos rangos de salinidad presentes.

Se ha establecido además que la susceptibilidad de los equipos de monitoreo al contenido salino del suelo, depende de la frecuencia de emisión de la onda en la cual trabajen. Es así como se ha detectado que la fracción imaginaria del complejo de la constante dieléctrica es altamente sensible a la frecuencia a la cual funciona un equipo (Topp et al., 1980) estableciéndose que mientras mayor sea la frecuencia, menor es el efecto del contenido de sales presentes en él (Bouksila et al., 2008).

En las nuevas generaciones de instrumentos existen modelos capaces de medir adicionalmente la CE_b . Este valor representa la salinidad del suelo en base a una ponderación de sus tres fases. Por otro lado, la conductividad eléctrica del agua en los poros (CE_p), a diferencia de CE_b , describe de mejor manera la competencia osmótica a la cual se enfrenta una planta. Dada su utilidad, es que se han desarrollado modelos que estiman CE_p en base a parámetros de suelo y los valores de CE_b y ϵ_a medidos por estos instrumentos (Rhoades et al., 1976; Amente et al., 2000; Hilhorst, 2000). El modelo a utilizar dependerá de la clase textural del suelo, del contenido de agua y sales que éste tenga y del nivel de precisión con la que se desee estimar CE_p , ya que algunos de estos modelos necesitan variables de entrada específicos, los cuales deben ser determinados para el tipo de suelo en el cual se esté midiendo.

Es por esto que el presente estudio pretende contrastar los valores de agua en el suelo medidos con 3 tipos de sensores distintos, a distintos niveles de CE_p , con el fin de lograr modelos que ajusten el valor de contenido de agua según el contenido de sales que presente el suelo.

Objetivos Específicos

- Comparar y corregir los valores de contenido de agua volumétrica obtenidos por los sensores TDR y FDR, con el contenido de agua determinado por la metodología de laboratorio.
- Determinar la precisión en la estimación del valor de contenido de agua de los sensores en función de la conductividad eléctrica del agua de los poros del suelo.

MATERIALES Y METODOS

Ubicación del estudio

El estudio se llevó a cabo durante la temporada 2012 – 2013 en la Provincia de Copiapó, Región de Atacama, en tres sitios cercanos a la Ciudad de Copiapó, los cuales están siendo cultivados con olivos. Estos predios correspondieron a La Castellana (27° 19' latitud sur y 70° 35' longitud oeste), Mallorca (27° 20' latitud sur y 70° 34' longitud oeste) y Vasangel (27° 18' latitud sur y 70° 27' longitud oeste), y fueron escogidos en base a su nivel de salinidad para tener un amplio rango de este parámetro.

El clima de la zona es del tipo desértico marginal bajo, con montos de precipitación anual de 22 mm y ET_p de 1170,3 mm (Uribe et al., 2012), lo que genera condiciones para la acumulación de sales debido a una escasa lixiviación de los solutos aportados al suelo a través del agua de riego.

Los suelos dominantes son Aridisoles, derivados de depósitos del río Copiapó, en posición de terraza remanente, con pendientes no superiores a 3%, con altos contenidos de sales y carbonatos en todo el perfil, con dominios de clases texturales finas, desde franco arcillo limosa a arcillosa (Luzio et al., 2010)

Caracterización de los sitios

Descripción morfológica: se realizó una descripción a través de una calicata por cada sitio, utilizando los criterios propuestos por el United State Department of Agriculture (U.S.D.A.) (Schoeneberger et al., 2002), asociando la descripción a las series descritas por CIREN 2007.

Dentro de las propiedades físicas, se determinó la distribución del tamaño de partículas (Gee y Or, 2002), la densidad aparente por el método del cilindro (Grossman y Reinsch, 2002), la densidad real por picnómetro (Flint y Flint, 2002) y la curva característica con olla y plato de presión (Dane y Hopmans, 2002). Las muestras se obtuvieron de las calicatas ya mencionadas, a profundidades de 30, 50 y 80 cm en los sitios de Mallorquina y La Castellana y 30, 45 y 60 cm en Vasangel, cada uno con 3 repeticiones.

Como propiedades químicas se midió la conductividad eléctrica de los suelos mediante el método de extracto de saturación y determinación por conductivimetría (Sadzawka et al., 2004). Al igual que las propiedades físicas, las muestras se obtuvieron de las calicatas realizadas a las profundidades ya descritas según predio, con 1 repetición por profundidad.

Las profundidades muestreadas correspondieron a la posición en la cual se instalaron los sensores a calibrar. Estos no se instalaron a menor profundidad para evitar realizar las mediciones en zonas donde naturalmente se acumulan las sales por ascenso capilar, generando un alto dinamismo y variabilidad de la CE.

Los análisis de laboratorio se realizaron en los laboratorios de Física de Suelos y Química de Suelos y Aguas de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile.

Dispositivos utilizados

Contenido de agua

Los sensores evaluados correspondieron a modelos ampliamente utilizados en el mercado (Figura 1):

- FDR: Diviner 2000 (Sentek Technologies, Australia) y POGO (Stevens Water Monitoring Systems, USA) (Figura 1a y 1b).
- TDR: GS3 (Decagon Devices, USA) (Figura 1c).

El detalle de las variables medidas o estimadas por estos se detallan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Detalle del tipo de sensor, parámetros medidos y parámetros estimados por los mismos.

Sensor	Tipo de sensor	Tipo de medición	Parám. medidos	Parám. estimados
GS3	TDR	Continua	ϵ_a	θ , CE_b , T°
POGO	FDR	Discreta	ϵ_a	θ , CE_b , T°
Diviner 2000	FDR	Discreta	Capacitancia (C)	θ



Figura 1. Sensores utilizados para la estimación del contenido de agua. (a) Sensor FDR, Diviner 2000; (b) Sensor FDR, POGO; (c) Sensor TDR, GS3.

Tratamientos y Diseño de experimentos

Este estudio comprendió el establecimiento de 2 ensayos en cada campo evaluado. Uno corresponde a la calibración de los sensores GS3 y POGO y el otro a la calibración del sensor Diviner 2000.

Instalación sensores GS3 y POGO

En cada sitio se construyeron 3 zanjas de 0,6 m de ancho, 0,8 m de largo y 0,2 m de profundidad, como se observa en la Figura 2. En cada uno de estos se instalaron, en posición horizontal, a 5 cm de profundidad desde el fondo de la zanja, 9 sensores GS3 por cada sitio en estudio (3 sensores por zanja). En el caso del sensor POGO, dado que entrega datos discretos, en cada tiempo de medición se registraron los valores introduciendo este sensor de manera perpendicular al fondo del pretil, registrando 5 mediciones para cada tiempo de medición, las cuales fueron promediadas. El fin de estas zanjas fue retirar la zona de acumulación de sales debido a ascensos capilares, además de aplicar el agua de riego de cada campo y que esta infiltre de manera homogénea en la zona a medir.

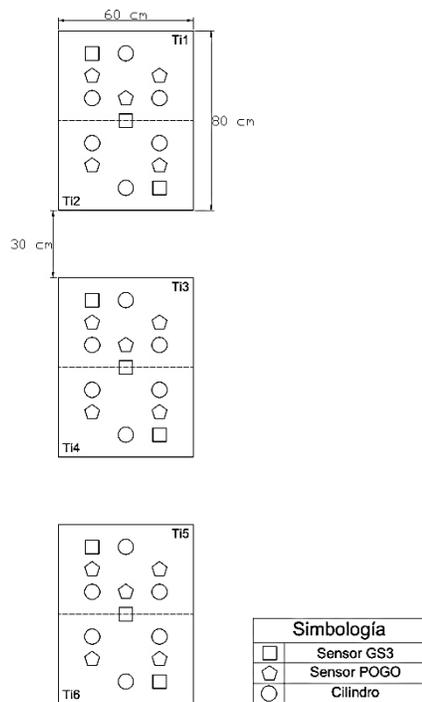


Figura 2. Parcelas de calibración de los sensores GS3 y POGO. (Izquierda) Esquema de las parcelas de calibración de los sensores GS3 y POGO en vista de planta a montar en cada uno de los campos La Castellana, Mallorquina y Vasangel, en donde Ti1 a Ti6 corresponden a los tiempos de muestreo. (Derecha) Parcela de calibración Fundo Vasangel.

Instalación sensor Diviner 2000

Para la calibración del sensor Diviner 2000, se realizó una zanja de iguales dimensiones a las descritas anteriormente, en la cual se instaló un tubo de acceso (PVC) de 0,75 m, perpendicular al fondo de la zanja, para la sonda de medición (Figura 3). Para evitar una posible entrada de agua a los tubos de acceso se utilizaron tapones de polietileno expandido en ambos extremos del tubo. Además,

se realizó un corte en profundidad donde se instalaron, a profundidades de 30, 50 y 80 cm (exceptuando Vasangel), sensores del tipo GS3 distanciados a 10 cm del borde del tubo de acceso con el fin de contrastar los valores de contenido de agua volumétrica estimados por ambos sensores (Figura 3).

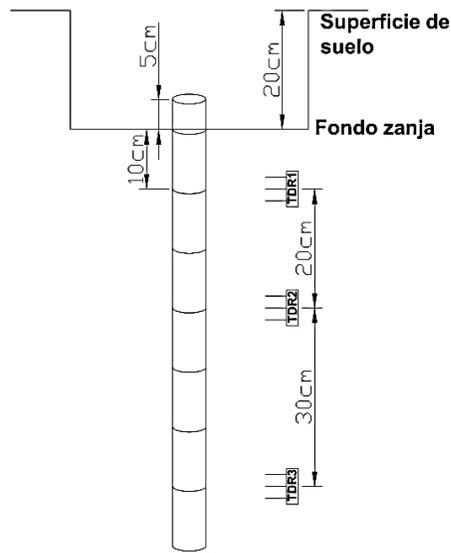


Figura 3. Parcela de calibración sensor Diviner 2000. (Izquierda) Esquema de la parcela de calibración del sensor en profundidad. (Derecha) Parcela de calibración montada en fundo La Castellana.

Procedimiento

Estimación de CE_p

Para la estimación del valor de la conductividad eléctrica del agua de los poros de suelo, se utilizó el modelo lineal planteado por Hilhorst (2000) (Ecuación 3).

$$CE_p = \frac{\varepsilon'_p CE_b}{\varepsilon'_b - \varepsilon'_{CE_b=0}} \quad (3)$$

Donde CE_p corresponde a la conductividad eléctrica del agua de los poros, ε'_p es la permisividad dieléctrica del agua de los poros de suelo (determinada por Ecuación 4); CE_b es el valor medido por los sensores representando el valor de la conductividad eléctrica de la masa de suelo; ε'_b es la permisividad de la masa de suelo; $\varepsilon'_{CE_b=0}$ es el valor de la constante dieléctrica del suelo cuando la conductividad eléctrica de la masa de este es igual a 0, correspondiente al valor de corte en el eje y de la relación entre la permisividad dieléctrica y la conductividad eléctrica de la masa de suelo.

Para la determinación del valor ε'_p se utiliza la siguiente ecuación:

$$\varepsilon'_p = 80,3 - 0,37 * T_s - 20 \quad (4)$$

Donde T_s corresponde a la temperatura de suelo medida por los sensores.

Calibración sensores GS3 y POGO

Las zanjas de cada parcela fueron llenadas con el agua utilizada para el riego de cada campo, luego se esperó a que la altura de agua aplicada hubiese infiltrado completamente en el suelo. Una vez cumplida esta condición, se esperó 1 hora para realizar la primera medición (T_{i1}) registrando los valores medidos por los sensores y tomando muestras de suelo para determinación de θ a través de cilindros de volumen conocido (Figura 2). Luego de 12 horas se repitieron las mediciones correspondientes a T_{i2} . El resto de los tiempos de medición varió en los distintos campos en base al tiempo en que el suelo fue disminuyendo su contenido de agua (Cuadro 2). Con estos tiempos de medición se buscaba obtener datos en un amplio rango de θ y, por ende, tener una variación en los niveles de CE_p .

En cada tiempo de medición se tomaron 3 muestras de suelo extraídas con cilindro desde el fondo de las zanjas, para determinación de contenido de agua volumétrico (Hignet y Evett, 2008) y densidad aparente, según esquema de muestro para los tiempos T_i de la Figura 2. En base a los datos obtenidos por el método directo, se realizó la comparación del valor real de contenido de agua del suelo con los datos no procesados de los sensores (ε_a) con el fin de obtener la curva de ajuste que permitió corregir los valores de contenido de agua.

Además, en cada tiempo de medición, se extrajo una muestra de suelo para la determinación de CE por pasta saturada, con el fin de ver la variación del contenido de sales.

Cuadro 2. Fechas de los tiempos de medición en cada uno de los fundos.

Ti	La Castellana	Mallorquina	Vasangel
1	18/Ago/2012	18/Ago/2012	17/Ago/2012
2	18/Ago/2012	18/Ago/2012	17/Ago/2012
3	27/Ago/2012	20/Ago/2012	18/Ago/2012
4	01/Sep/2012	25/Ago/2012	20/Ago/2012
5	11/Sep/2012	30/Ago/2012	23/Ago/2012
6	06/Nov/2012	10/Sep/2012	04/Sep/2012

Calibración Diviner 2000

Para generar el secado en profundidad del suelo este ensayo se montó en la zona de raíces de un huerto de olivos. Para la calibración, se contrastaron los valores no procesados medidos por el Diviner 2000 con los registrados por los sensores GS3, estos últimos ya corregidos por las ecuaciones de calibración. Para esto se graficaron los valores de contenido de agua volumétrico medidos por el Diviner 2000 y los medidos por los sensores GS3, tomando estos últimos como parámetro de ajuste.

Análisis estadístico

Se realizó una regresión entre los valores de contenido volumétrico de agua obtenidos con los sensores y los obtenidos en forma directa, considerando a esos últimos como variable independiente. Se evaluó la pendiente, error estándar de la regresión y el intercepto de las regresiones obtenidas por los distintos sensores utilizados, analizando cómo afectan los distintos contenidos de sales sobre el valor

medido de contenido volumétrico de agua, con el fin de lograr establecer rangos de salinidad en los cuales se ajusten las correcciones obtenidas para cada sensor.

Por otro lado, para el caso de los sensores GS3, se realizaron mediciones en agua libre para comprobar si existen diferencias significativas entre los valores medidos de contenido volumétrico de agua, temperatura, conductividad eléctrica de la masa de suelos (que en este caso solo corresponde a la conductividad eléctrica del agua) y permisividad dieléctrica real entre los sensores GS3. Estos se compararon mediante un análisis de varianza, realizando la prueba de Kruskal Wallis (estadística no paramétrica) debido a que los datos, aún previa transformación, no cumplieron con los supuestos del ANDEVA para pruebas paramétricas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características morfológicas de suelo

Las propiedades morfológicas permitieron concluir que el origen de estos suelos es aluvial, generando perfiles de suelo estratificados, característico de los suelos del valle de Copiapó, en donde predominan las partículas finas, particularmente las de tamaño limo, con estructura débil y una tendencia a estados dispersos (La Castellana y Vasangel), alta presencia de carbonatos dentro de todo el perfil de suelo, con un rango de colores que varía desde 10YR hasta 2,5YR (Apéndice 1).

El suelo del fundo La Castellana pertenece, según CIREN (2007), a la Serie Ramadilla, Fase 3 (RAM-3), en tanto el suelo descrito para los fundos Vasangel y Mallorquina corresponden a series de suelo no descritas por CIREN (2007), por tanto se les designó como series Vasangel (VSG-1) y Mallorquina (MLL-1) respectivamente. Mallorquina podría corresponder a una fase alterada antropológicamente de la Serie Ramadilla, ya que antiguamente la zona donde se llevó a cabo el estudio, estaba destinada a la producción animal, sufriendo con los años importantes cambios por el manejo al que fue sometido. El detalle de las descripciones se presenta en el Apéndice 1.

Textura, densidad real y densidad aparente

Según los resultados que se presentan en el Cuadro 3, se puede observar un contenido de limo en un amplio rango (29,8% a 78%), con una dominancia de esta fracción, lo que genera suelos de clase textural que van desde franca a franco limosa.

Los valores de densidad real (D_r) son altos en comparación al valor de referencia de $2,65 \text{ Mg m}^{-3}$ señalado por Sandoval et al (2012) para suelos de origen mineral con dominancia de cuarzo. También son relativamente homogéneos entre los fundos Mallorquina y Las Castellana ($2,78$ a $2,83 \text{ Mg m}^{-3}$), mientras que Vasangel presenta valores más bajos ($2,74$ a $2,81 \text{ Mg m}^{-3}$), lo que podría indicar alguna relación en cuanto al material de origen en los dos primeros sitios.

Los valores obtenidos de densidad aparente (D_a) son menores a los que se esperarían en base a la clase textural que presentaron los horizontes muestreados. Estos valores pueden estar influenciados por factores de formación asociado a que por características del material parental haya una presencia de sales dispersantes en el perfil de suelo, lo que generaría una disminución en los valores de D_a , o bien que el aporte de este tipo de sales esté determinado por la calidad del agua utilizada para el riego.

Cuadro 3. Propiedades físico-químicas de suelo determinadas para los 3 sitios en estudio.

Propiedad		Mallorquina			La Castellana			Vasangel		
		30	50	80	30	50	80	30	45	60
Profundidad	cm	30	50	80	30	50	80	30	45	60
D_a	Mg m^{-3}	1,07	1,2	1,3	1,15	1,39	1,39	1,28	1,31	1,29
D_r	Mg m^{-3}	2,82	2,81	2,78	2,83	2,83	2,82	2,74	2,73	2,81
Textura										
Arena	%	3,9	3,8	28,9	6	5,8	37,3	5,8	12,3	3,7
Limo	%	51,5	78	67,4	77,9	45,6	29,8	53,6	42,6	72,7
Arcilla	%	44,7	18,2	3,6	16,1	48,6	32,9	40,7	45,1	23,6
Clase textural (USDA)		FL	FL	FAL	FL	F	FA	FL	F	FL

Conductividad eléctrica en extracto de saturación

Los valores de conductividad eléctrica medidos mediante pasta saturada, indican un alto contenido de sales (4,4 a 16,5 dS m⁻¹), en donde los valores más elevados se encuentran en los horizontes superficiales (Figura 4), lo que se produce debido a ascensos de agua capilar hacia la superficie del suelo, que arrastra sales y favorece su depositación y concentración en superficie (Martinez, 1999). Los valores más altos se encontraron en el fundo Mallorquina (15,2 a 16,5 dS m⁻¹), mientras que para el caso de Vasangel (6,58 a 9,71 dS m⁻¹) y La Castellana (4,4 a 7,59 dS m⁻¹) sus contenidos de sales son menores.

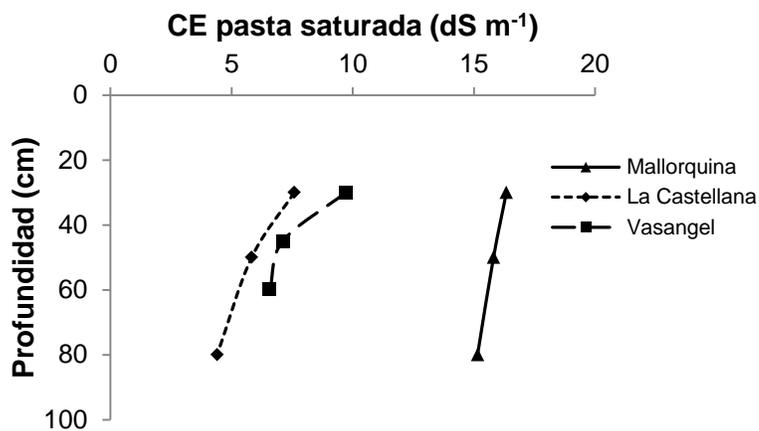


Figura 4. Valores de CE medidas por pasta saturada para los 3 sitios estudiados a 3 profundidades.

Curva de retención de agua

Los resultados de las curvas de retención de agua (Figura 5; Apéndice 2) indican que para el caso del fundo La Castellana, la distribución de poros de drenaje rápido (PDR, definidos hasta tensiones de 60 hPa) es baja, viéndose reflejado además en un grado de no estructura (del tipo masivo, Apéndice 1), lo que claramente repercute tanto en la entrada de agua al perfil como su posterior distribución. Para el resto de los sitios, la proporción de poros de drenaje rápido es mayor. Investigaciones previas señalan un mínimo de 10 a 12% (Richards, 1983) de PDR como condición óptima para la producción frutal, condición que no estaría presente en La Castellana (6,4% promedio entre las 3 profundidades muestreadas).

Es probable que el tipo de cationes presentes en los suelos de Vasangel y Mallorca estén otorgando un mayor nivel de estructuración, a diferencia de la situación encontrada en La Castellana, en donde existía una alta tendencia a grados de no estructura de suelo (grano simple o masivo) característico de suelos con altos niveles de sodio (Soil Survey Staff, 1999).

La humedad aprovechable para los 3 sitios es relativamente homogénea, encontrándose valores entre 0,160 a 0,268 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$.

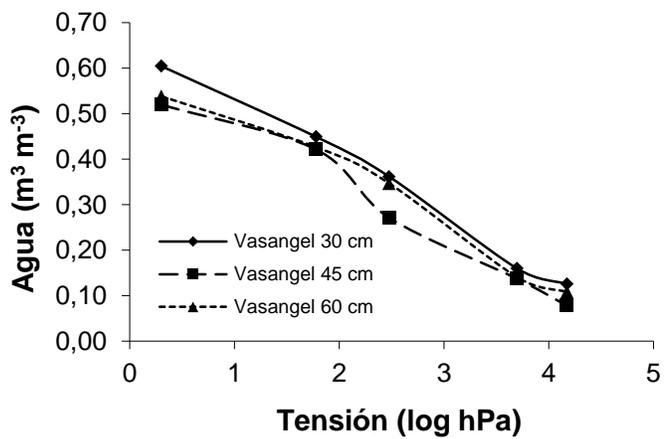
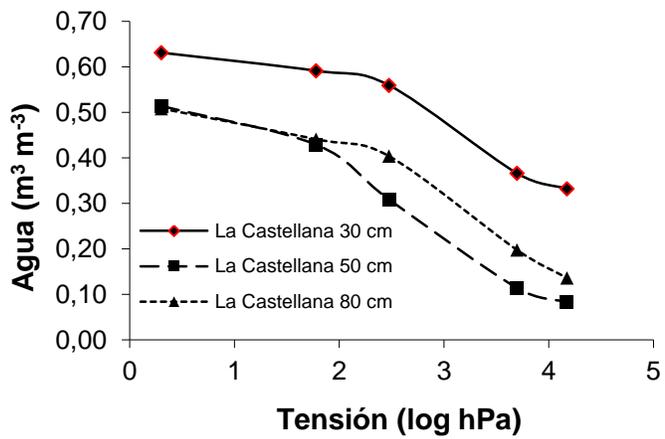
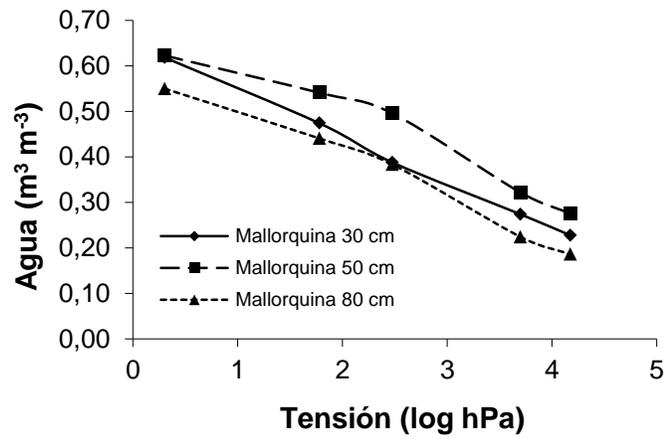


Figura 5. Curva característica de suelos de los fundos Mallorca (arriba), La Castellana (centro) y Vasangel (abajo).

Calibración de sensores

Sensor GS3

A los datos obtenidos para las mediciones realizadas en agua libre por el set de 36 sensores GS3 utilizados para el estudio, previa instalación de estos en los fondos, se les realizó un análisis de varianza, en donde no se encontraron diferencias significativas para todos los parámetros medidos (θ , ε_a , CE_b y T^0) a un nivel de significancia del 5% (p valor $< 0,0001$). Sin embargo, al analizar los supuestos para la realización del ANDEVA (homocedasticidad, independencia y normalidad de los errores) estos no se cumplen, aun realizando las transformaciones de los datos, por lo que se realizó una prueba de Kruskal Wallis (estadística no paramétrica) donde tampoco se encontraron diferencias significativas para todos los parámetros medidos a un nivel de significancia del 5% (p valor $< 0,0001$) (Apéndices 3 y 4).

Una vez realizada la instalación de las parcelas en campo, en cada tiempo de medición (T_i) se registraron los datos de los 9 sensores instalados en cada sitio durante 20 minutos con mediciones puntuales realizadas a intervalos de 2 minutos. Para establecer los valores de θ , ε_a y CE_b para cada T_i , se promediaron los datos obtenidos por los sensores (Apéndice 4). Para la estimación de CE_p en cada T_i , se realizó mediante el modelo de Hillhorst (2000) ya descrito anteriormente (Ecuación 3 y 4).

Los valores de ε_a registrados por los sensores siguen el mismo comportamiento al del contenido volumétrico de agua del suelo (Figura 6) para los 3 sitios en estudio, ya que a medida que el suelo va disminuyendo su contenido hídrico, el valor de ε_a

del medio va disminuyendo debido a que la influencia que tienen los sólidos y el aire en esta propiedad es menor a la del agua.

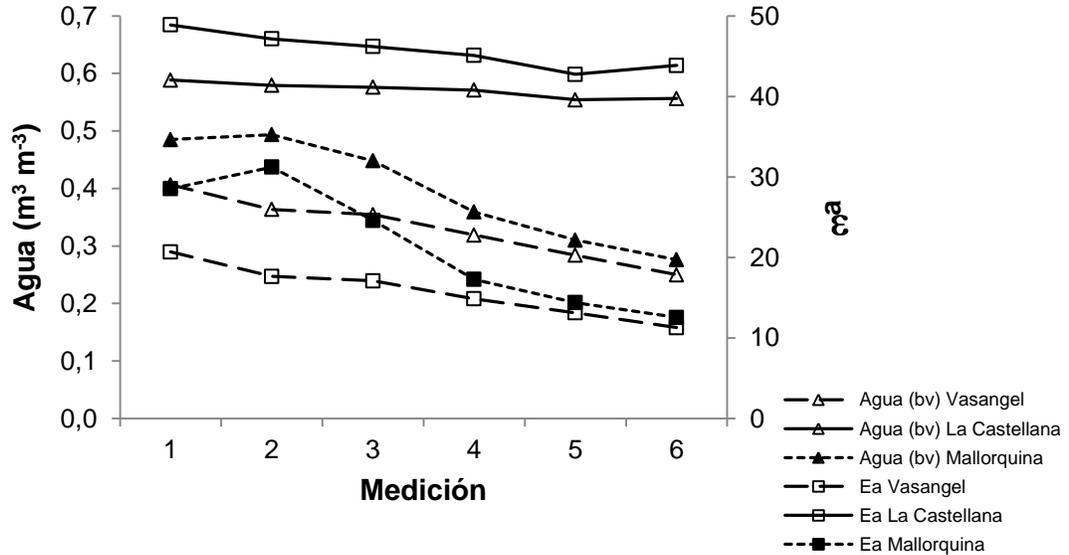


Figura 6. Variación del contenido de agua volumétrico y la permisividad dieléctrica (ϵ_a , adimensional) en los distintos tiempos de secado para cada sitio medidos por los sensores GS3 en cada uno de los tiempos de medición (Cuadro 2).

Debido al alto valor de ϵ_a del agua en comparación con el resto de los componentes del suelo, esta resulta ser una propiedad clave en el desarrollo de las tecnologías de estimación de θ basadas en las propiedades eléctricas de suelo (Topp et al., 1980; Dalton et al., 1984; Persson, 2002).

Asimismo, los valores de conductividad eléctrica de la masa de suelo obtenidos por los sensores GS3 (Figura 7) presentaron un comportamiento similar al contenido de agua estimada. A medida que el suelo se va secando, éste comienza a tener una CE_b cada vez menor, asociado a la posible precipitación de las sales que se encontraban disueltas en la solución (Rhoades et al., 1976). La determinación de los valores de CE_b por estos sensores es mediante la atenuación de la señal emitida, siendo ésta disipada en el suelo en mayor magnitud en la medida que aumenta la cantidad de sales disueltas (Dalton et al., 1984).

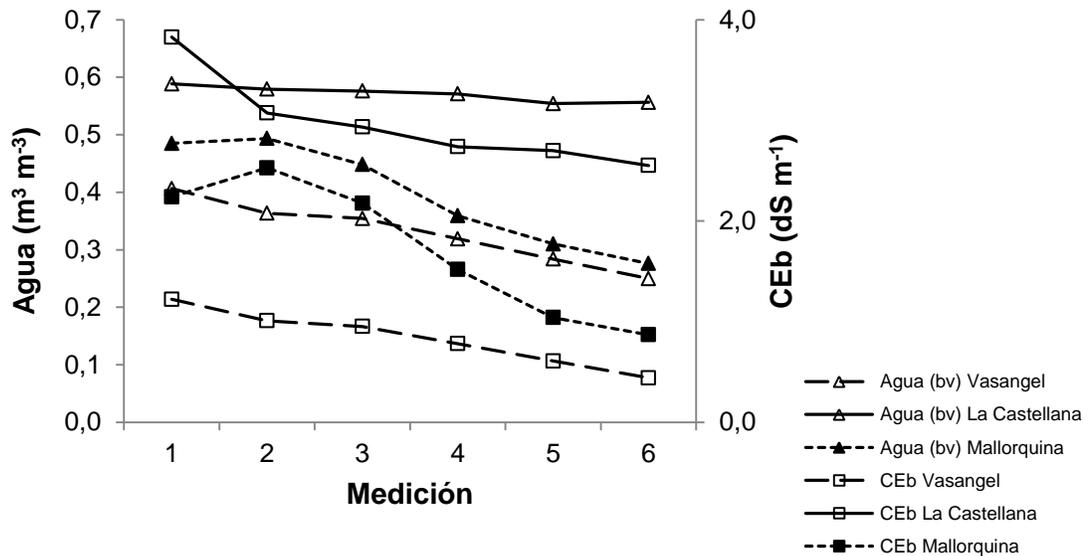


Figura 7. Variación del contenido de agua volumétrico y la conductividad eléctrica de la masa de suelo (CEb) en los distintos tiempos de secado para cada sitio medidos por los sensores GS3 en cada uno de los tiempos de medición (Cuadro 2).

Utilizando la metodología descrita por Hilhorst (2000), se calcularon los datos de $\varepsilon'_{\sigma b} = 0$ en base al intercepto de la relación lineal existente entre la constante dieléctrica del suelo en función a la CE_b , determinados por los sensores para cada campo en particular, obteniéndose los siguientes valores: 5,51 para Mallorca, 24,82 para La Castellana y 8,40 para Vasangel (Figura 8). Sin embargo, el valor obtenido para el suelo del fundo La Castellana se aleja muchísimo a los valores descritos en bibliografía (Hilhorst, 2000; Kargas y Kerkides, 2012), por lo tanto se decidió utilizar el valor de 6 recomendado por el fabricante (Decagon Devices, 2012) ya que de usarse el valor de 24,82 se obtendrían valores de CE_p (19 dS m^{-1}) muy por sobre los valores de CE determinada por pasta saturada. Esto puede deberse posiblemente a propiedades físico-químicas particulares de este suelo, aspectos que escapan a los objetivos de este estudio.

Para poder simplificar y homogeneizar el análisis de los datos de la CE_p , se realizó una normalización de estos valores por el contenido de agua volumétrico (CE_p/Agua) estimado por los sensores al momento de realizar la medición, ya que

los valores de contenido volumétrico de agua de los distintos Ti en los distintos campos no eran similares, generando valores de ε_a distintos, y por ende, una variación en los valores de CE_p .

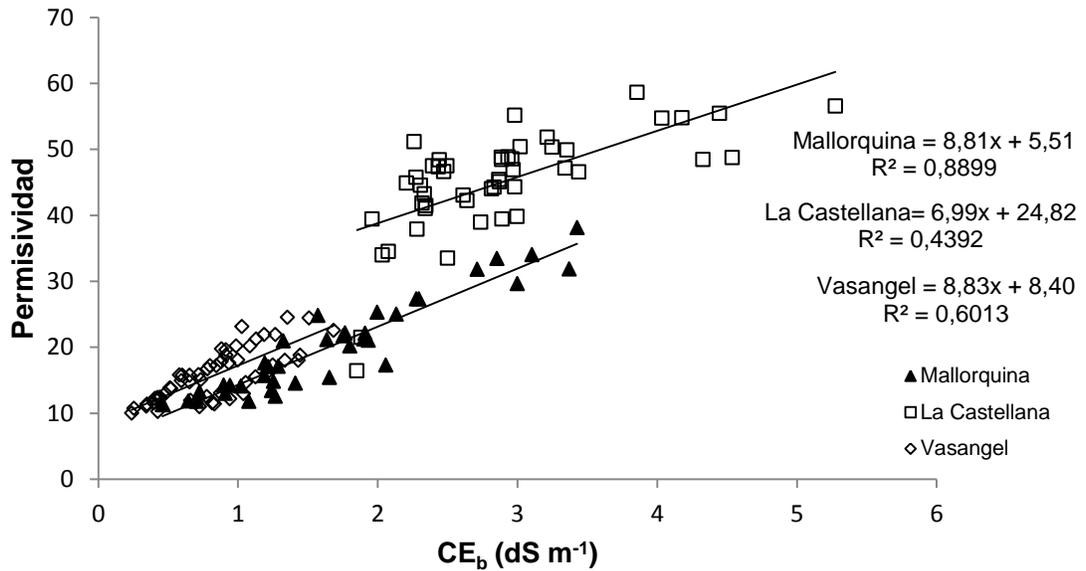


Figura 8. Relación entre la conductividad eléctrica de la masa de suelo (CE_b) y la permisividad (adimensional).

Tal como se deriva de la Figura 9, el comportamiento de CE_p es inverso al de CE_b , dado que al disminuir el agua dentro del perfil de suelo, va generando un aumento en la concentración de sales disueltas, lo que generará que la conductividad eléctrica del agua de los poros vaya en aumento.

Esta relación no ocurre de igual manera en los primeros 4 tiempos de medición del suelo del fundo La Castellana, en donde se ve que, a pesar de existir una disminución en el contenido de agua estimada por los sensores, los valores de CE_p se mantienen relativamente estables, con una leve tendencia a la baja, para luego retomar el comportamiento visto en los otros sitios en estudio.

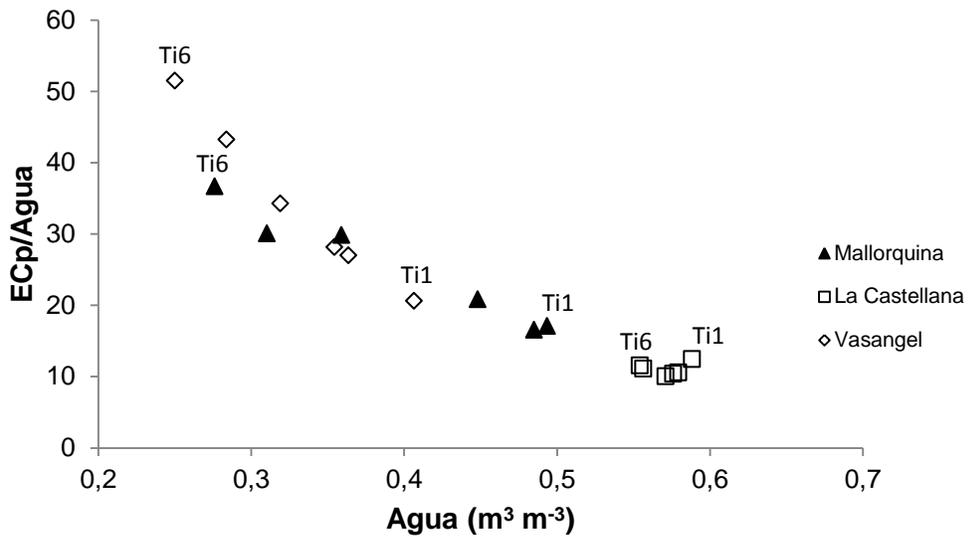


Figura 9. Relación entre el contenido volumétrico de agua con los valores de CEp normalizados por el contenido de agua medidos por los sensores GS3, donde Ti1 indica el inicio de las mediciones y Ti6 el final de éstas.

Esto podría deberse a que la pérdida de agua registrada por los sensores hasta el Ti 4 (01/09/2012) está dada por agua que aún se está moviendo en profundidad (agua que se encuentra distribuida entre los poros de drenaje rápido y lento), provocando un lavado de las sales, lo que implicaría una disminución en el contenido de agua sin generar una concentración de sales disueltas en la solución suelo. Tomando en cuenta la distribución del tamaño de poros del suelo del fundo La Castellana (Figura 5, Apéndice 2) la entrada y el movimiento de agua en el perfil de suelo es más lenta en comparación al resto de los suelos, debido al bajo porcentaje de poros de drenaje; por ende, el tiempo requerido para que el agua del suelo llegue a un equilibrio gravitacional es mayor.

Una vez que el suelo llega a capacidad de campo, comienzan las pérdidas de agua asociadas a la extracción realizada por las plantas o por evaporación, generando un aumento en la concentración de sales disueltas en la solución suelo, retomando el comportamiento encontrado en el resto de los campos (Figura 9).

Diversos estudios indican que la utilización de un modelo polinómico de grado 3, en donde se estime el valor de θ en base a la ε_a , consigue estimaciones más acertadas que otro modelo de ajuste (Jacobsen y Schjonning, 1995; Young et al., 1997; Persson et al., 2001) Con el fin de encontrar los parámetros del modelo de Topp et al., (1980) (Ecuación 1) para la estimación de θ , que expliquen el comportamiento de los sensores GS3 para el rango de CE_p registrados durante el ensayo, se procesaron las muestras para la determinación de contenido volumétrico de agua por secado en estufa, para cada uno de los tiempos de muestreo en los distintos sitios (Apéndice 6). En base a estos valores, junto a los promedios determinados por los sensores TDR, se realizó una regresión a modo tal de encontrar el modelo que explique de mejor manera el valor real del contenido de agua del suelo, corrigiendo los valores entregados por los sensores (Figura 10) en base a valores ajustados de los parámetros del modelo de Topp et al (1980) (Ecuación 1). Considerando el conjunto de datos de los tres suelos bajo estudio, se obtuvo el siguiente modelo:

$$\theta = 1,72 \times 10^{-5} \varepsilon_a^3 - 1,44 \times 10^{-3} \varepsilon_a^2 + 4,45 \times 10^{-2} \varepsilon_a - 1,04 \times 10^{-1} \quad (5)$$

Este modelo es válido para todo el rango de CE_p y θ estimados por los sensores. Sin embargo, esta calibración es específica para los suelos en estudio u otros con características y propiedades físicas similares, debido a que el rango de variación de las texturas de suelo entre los distintos campos estudiados es baja (Cuadro 3), por lo que no se puede garantizar que este modelo sea válido para otro tipo de clase textural.

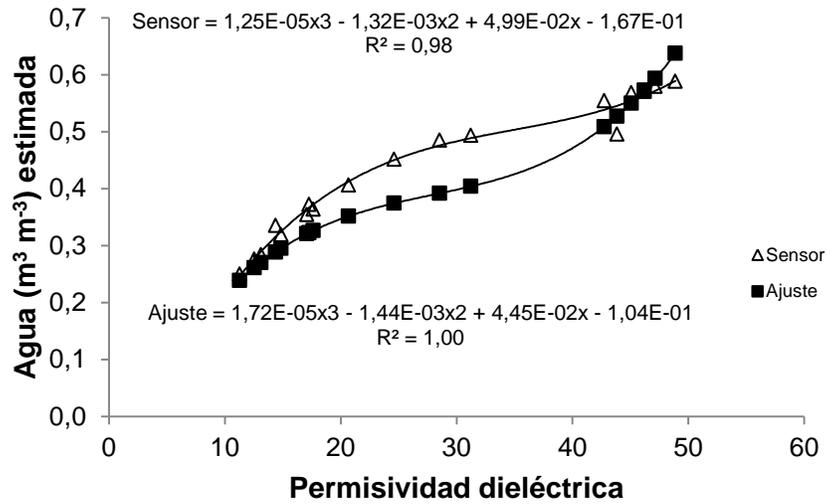


Figura 10. Valores de contenido volumétrico de agua estimadas por los sensores GS3 y ajustados en base al modelo de Topp et al., (1980).

Una vez obtenido el modelo de calibración para estos sensores (Ecuación 5), se procesaron los valores de ϵ_a obteniendo los valores de θ ajustados. Al ver la relación entre los valores estimados por el sensor y los estimados por el modelo ajustado con los valores reales de agua determinados en laboratorio (Figura 11) se obtuvieron regresiones estadísticamente significativas (p -valor $< 0,001$) cuyas pendientes no presentan diferencias. Sin embargo, el intercepto de estas rectas sí presentaron diferencias significativas, por lo que se hace necesario la realización de un ajuste al modelo bajo el cual los sensores GS3 estiman el valor de contenido de agua (Apéndice 7). Una vez ajustados los valores, la diferencia entre los valores reales de agua y los estimados por los sensores en promedio corresponde a $0,033 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, mientras que previo al ajuste, la diferencia entre estos valores correspondía a un $0,053 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

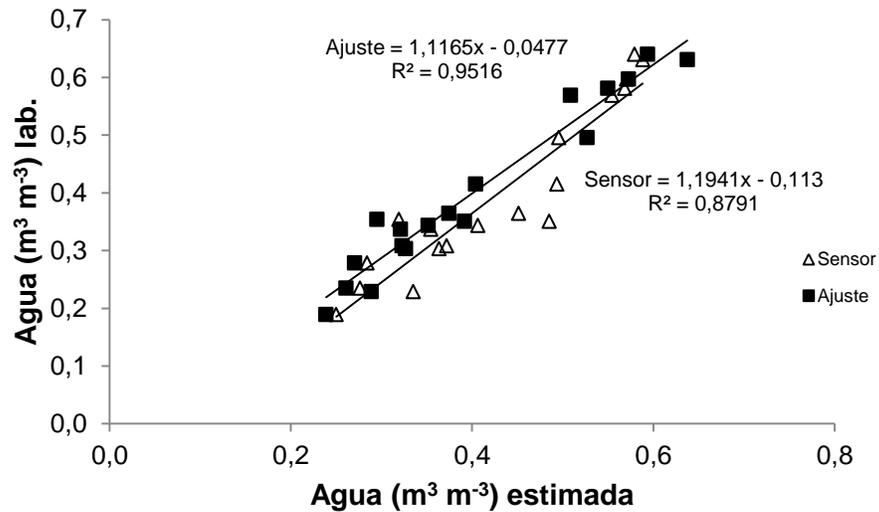


Figura 11. Relación entre los valores de agua ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) estimados, tanto por los sensores GS3 (ajuste de fábrica) como por el modelo ajustado, con el contenido de agua determinado en laboratorio.

Sin embargo, a pesar del error asociado a los datos estimados mediante la calibración de fábrica, y al no existir diferencia entre las pendientes de las regresiones realizadas (Figura 11), el sensor GS3 representa una buena aproximación del valor de θ del suelo dentro de todo el rango estudiado, en donde el error está dado básicamente por una diferencia en el intercepto generado por el efecto del contenido salino, generando que los valores estimados por los sensores previa calibración sobreestiman el valor real de θ .

Esto se condice con los resultados encontrados por diversos estudios (Evelt et al., 2002; Evelt et al., 2006; Chow et al., 2009), en donde, a pesar de haber trabajado con suelos sin presencia de sales, los sensores del tipo TDR se ajustan de mejor manera a un amplio rango de contenido de agua presente en el suelo al comparar con otros tipos de sensores

Sensor POGO

Al igual que los sensores GS3, para este sensor FDR se realizaron las mediciones en las parcelas de calibración para los distintos tiempos de secado T_i (Figura 12). Por cada tiempo de muestreo se registraron 5 mediciones, las cuales fueron promediadas obteniendo un valor representativo para cada T_i .

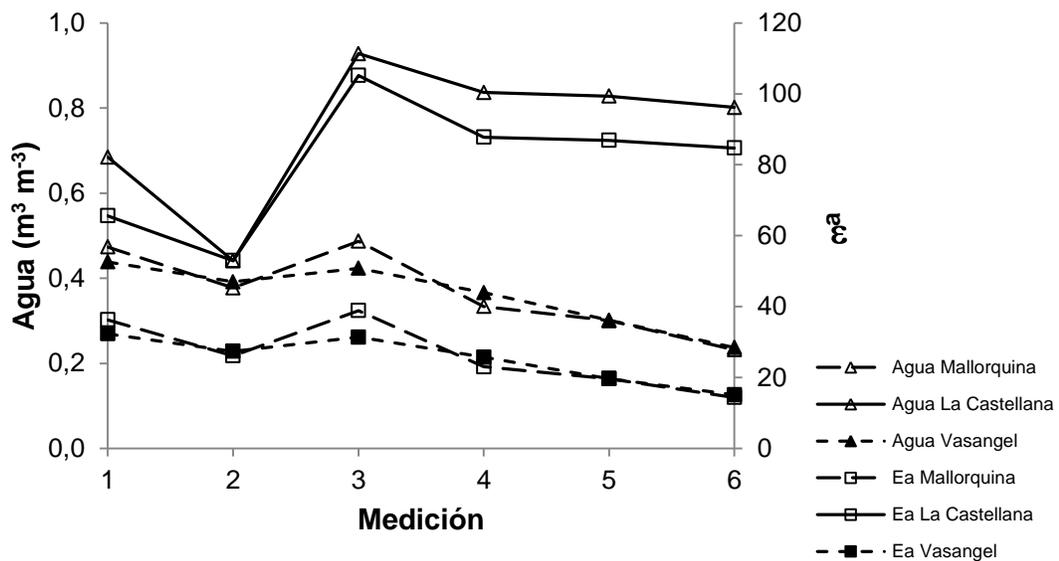


Figura 12. Variación del contenido de agua volumétrico y la permisividad dieléctrica (ϵ_a , adimensional) en los distintos tiempos de secado para cada sitio medidos por el sensor POGO en cada uno de los tiempos de medición (Cuadro 2).

En la Figura 12 se puede ver cómo varía la permisividad dieléctrica a medida que el suelo se va secando. En todos los campos se aprecia un comportamiento similar a lo registrado por los sensores TDR, el comportamiento del valor estimado de θ sigue la misma tendencia al valor medido de ϵ_a . Sin embargo, aun cuando la tendencia de los datos indica un secado del suelo, existen fluctuaciones en el θ que no se relacionan con el comportamiento real del contenido de agua del suelo, tomando como base los valores determinados por medición directa. Para el caso del fundo La Castellana esta fluctuación en el contenido de agua estimada por los

sensores se ve de manera mucho más notoria, ya que en el tiempo de medición 3 existe un alza importante en el valor de permisividad (aproximadamente 50 puntos) que al momento de realizar el ajuste mediante el modelo de corrección (descrito más adelante) disminuye el efecto de esta alza, pudiendo corresponder este comportamiento particular a errores en la medición.

No obstante, al comparar los valores de θ sin corregir registrado por el sensor POGO con los de ε_a , ambos presentaron el mismo comportamiento, con el alza al tiempo T3, lo que genera una diferencia con el valor de θ determinado en laboratorio en los dos primeros tiempos de medición. Esta diferencia registrada entre el contenido de agua medido en laboratorio y el estimado por el sensor, puede deberse a las propiedades físico-químicas del suelo, o bien al alto nivel de variación que presentaba este sensor entre cada uno de los puntos registrados para cada tiempo de medición (Apéndice 9). Esto se ve reflejado además en los valores de θ estimados por el sensor en el fundo La Castellana, los cuales son físicamente imposibles al ser mayores a la porosidad de este suelo ($62,59 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$).

La CE_b determinada por el sensor POGO (Figura 13), presenta la misma tendencia que los valores medidos por el sensor GS3, en donde una disminución en el contenido de agua del suelo está asociado a una disminución de la conductividad eléctrica de la masa del suelo, básicamente por el incremento en la concentración de sales disueltas en la solución suelo debido a la disminución del agua presente en los poros, lo que genera una precipitación de las sales, provocando que el componente de la conductividad eléctrica de los sólidos sea mayor, repercutiendo en una disminución de CE_b . En el caso de La Castellana no se aprecia esta disminución en esta propiedad aun cuando las variaciones en θ estimadas por este sensor sean importantes, sin embargo, al analizar la pérdida de agua de este horizonte es baja (Apéndice 6) lo que explicaría el nivel estable registrado en CE_b .

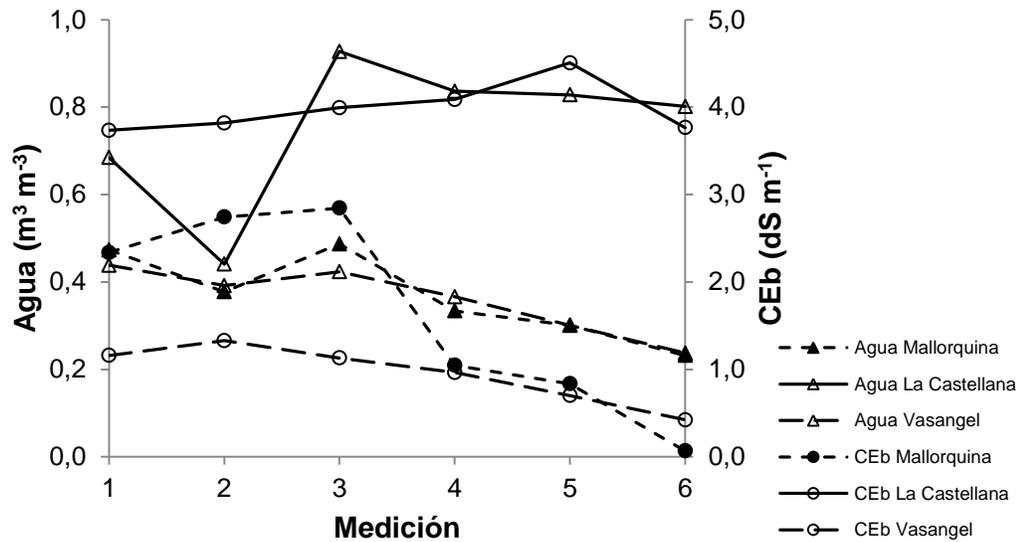


Figura 13. Variación del contenido de agua volumétrico y la conductividad eléctrica de la masa de suelo (CEb) en los distintos tiempos de medición para cada sitio medidos por el sensor POGO en cada uno de los tiempos de medición (Cuadro 2).

Para la estimación de la CE_p se utilizó el modelo de Hilhorst (2000) (Ecuación 2). Se utilizaron los mismos valores de $\epsilon'_{\sigma_b=0}$ que los utilizados para los sensores GS3, ya que al realizar la relación entre ϵ_a y CE_b no se encontró la relación lineal que debiesen tener estas propiedades, obteniendo coeficientes de determinación bajos (Apéndice 8) para los campos de Mallorca y La Castellana. Sin embargo, para el caso de Vasangel, a pesar de conseguir esta relación lineal, el valor del intercepto (10,29) es muy alto para lo visto en literatura (Hilhorst, 2000; Kargas y Kerkides, 2012), entregando además valores de CE_p muy bajos (4,57 a 2,70 $dS m^{-1}$) y que no responden al comportamiento que se esperaría de las sales en el suelo en base al contenido de agua.

Para lograr un mejor análisis comparativo de la CE_p estimada por la Ecuación 3, estos valores fueron normalizados por el contenido de agua ajustado al momento de registrar la medición, graficándose contra el contenido de agua de cada tiempo de medición (Figura 14).

A excepción de las mediciones realizadas en el tiempo Ti2 para los fundos Mallorca y La Castellana, continúa la misma tendencia registrada con los sensores GS3 (Figura 9), en donde a medida que el suelo disminuye su contenido de agua, existe una tendencia a que el valor de CE_p aumente, asociado al aumento en la concentración de sales disueltas en la solución suelo. Destaca que el comportamiento de CE_p en el fundo La Castellana es el mismo que para los otros suelos, aun cuando los valores de θ estimados no están dentro del rango que debiese presentar el suelo.

Probablemente el comportamiento de los valores registrados en el Ti 2 para los fundos Mallorca y La Castellana pueda deberse al alto nivel de dispersión de los datos registrados, donde se pudieron observar coeficientes de variación de hasta 27,44% (Apéndice 9).

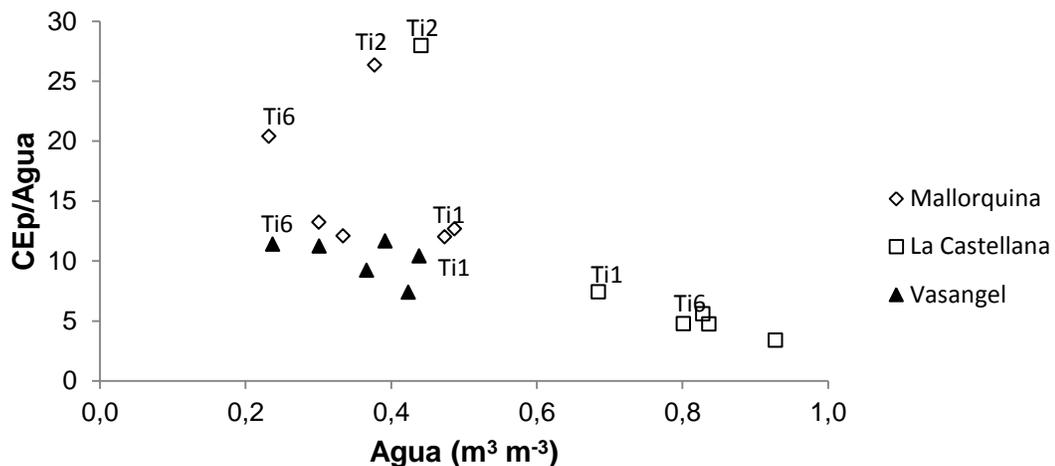


Figura 14. Relación entre el contenido volumétrico de agua con los valores de CE_p normalizados por el contenido de agua medidos por el sensor POGO, donde Ti1 indica el inicio de las mediciones y Ti6 el final de estas.

Dado que no existen grandes diferencias en la distribución del tamaño de partículas, posiblemente la sobreestimación del contenido de agua pueda deberse al efecto que tienen las sales en el valor de ϵ_a , tal como lo indicaron Baumhardt et

al. (2000) en donde, utilizando distintas concentraciones salinas, uno de los sensores FDR estimó valores de θ mayores a la porosidad disponible.

Al igual que lo realizado con los valores obtenidos por los GS3, se llevaron a cabo regresiones con el fin de encontrar el modelo que explique el comportamiento del sensor POGO para el rango de CE_p y los contenidos de agua volumétrico registrados durante el ensayo. Se procesaron las muestras tomadas para la determinación de contenido volumétrico de agua por secado en estufa para cada uno de los tiempos de muestreo en los distintos sitios (Apéndice 6). En base a estos valores, junto a los promedios determinados por el sensor FDR (Figura 15), se obtuvo el siguiente modelo (Ecuación 5) en base al ajuste de los parámetros del modelo de Topp et al. (1980) (Ecuación 1):

$$\theta = -1,06 \times 10^{-6} \varepsilon_a^3 + 1,25 \times 10^{-4} \varepsilon_a^2 + 1,78 \times 10^{-3} \varepsilon_a + 2,09 \times 10^{-1} \quad (6)$$

Este modelo es válido para todo el rango de CE_p estimado por los sensores. Sin embargo, la calibración es específica para los suelos en estudio u otros con características y propiedades físicas similares.

Tal como se mencionó anteriormente, los valores estimados de θ en base a ε_a para el fundo La Castellana, son mayores a la porosidad que presentaba este suelo, lo que podría generar una caída en los valores ajustados de θ para valores de ε_a mayores a 60 (Figura 15). De todas formas este rango de datos no presenta utilidad, ya que los niveles de θ no representan a la realidad.

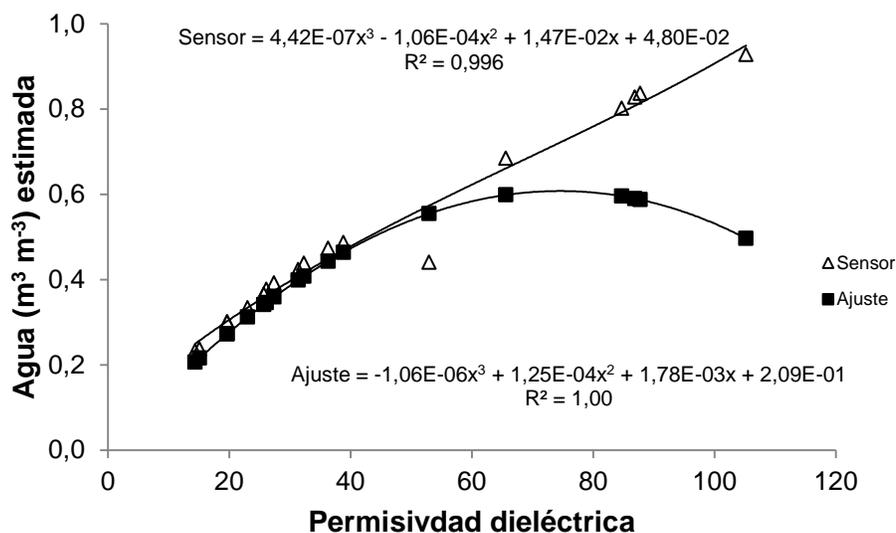


Figura 15. Valores de contenido volumétrico de agua estimadas por el sensor POGO y ajustados en base al modelo obtenido.

Al ver la relación entre los valores estimados por el sensor y los estimados por el modelo ajustado con los valores reales de agua determinados en laboratorio (Figura 16) se obtienen regresiones estadísticamente significativas (p -valor $< 0,001$). Sin embargo, tanto el intercepto como la pendiente de estas rectas presentan diferencias significativas, por lo que se hace necesario la realización de un ajuste al modelo bajo el cual el sensor POGO estima el valor de contenido de agua (Apéndice 10).

Bajo este rango de salinidad, el error estándar asociado a la estimación realizada por el sensor con su calibración de fábrica correspondió a un $0,086 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Sin embargo, al realizar el ajuste sugerido, esta diferencia disminuye a un $0,063 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. No obstante, al dejar fuera del análisis los valores registrados de θ en el fundo La Castellana, debido a los valores mayores a la porosidad, el error que presenta este sensor es de $0,041 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ previa calibración y $0,038 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ con los valores corregidos para los campos de Mallorquina y Vasangel. Aun cuando el nivel de error sea bajo, se justifica estadísticamente la realización de una calibración dado que la regresión de los datos estimados por este sensor para estos campos

presentaron intercepto igual a 0, pero pendiente estadísticamente distinta a 1 (0,62, datos no mostrados).

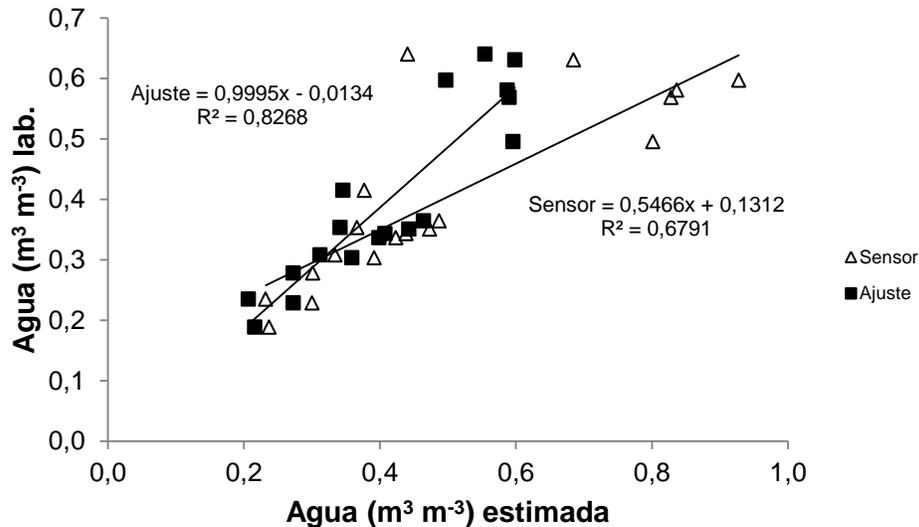


Figura 16. Relación entre los valores de agua (bv) estimados, tanto por el sensor POGO (ajuste de fábrica) como por el modelo ajustado, con el contenido de agua determinado por laboratorio.

Este error puede estar determinado por diversos factores, pudiendo deberse al efecto que tiene el suelo en la interacción entre partículas sólidas y la cantidad y energía de retención del agua sobre la superficie de los sólidos (Seyfried y Murdock, 2001) la cual puede disminuir la constante dieléctrica. Es así como el contenido de arcilla y la mineralogía de esta puede afectar las mediciones realizadas por sensores del tipo FDR (Paltineanu y Starr, 1997). Por otro lado, según Kelleners et al. (2005) la frecuencia de los sensores FDR debería estar por sobre los 500 MHz para poder lograr una estimación adecuada, frecuencia mucho mayor a la cual funciona el sensor POGO (50 MHz).

El ajuste de la Figura 16 cubre totalmente el rango de CE_p y de contenido de agua, ya que al intentar generar rangos en base al nivel de salinidad presente en el suelo para lograr generar curvas de calibración diferenciadas, no existen diferencias significativas en las regresiones.

Sensor Diviner 2000

Para llevar a cabo la calibración del sensor Diviner 2000, se corrigieron los valores obtenidos por los sensores GS3 (en base a la Ecuación 5) para luego contrastarlos con los valores sin procesar obtenidos por el sensor FDR. Para este caso, dado que el obtener muestras de suelo para la determinación del contenido de agua mediante gravimetría implicaba una disturbación del perfil de suelo en donde se tenía instalado el tubo de acceso del Diviner 2000, se consideraron los valores entregados por los sensores GS3 como valor representativo del estado hídrico del suelo.

Para la calibración se utilizaron los valores promedios diarios obtenidos por los sensores GS3 (Figura 17), los cuales estaban programados para registrar datos cada 1 hora durante todo el período de medición. Debido a problemas de los equipos TDR, los valores registrados en las últimas fechas para el fundo Vasangel no son válidos.

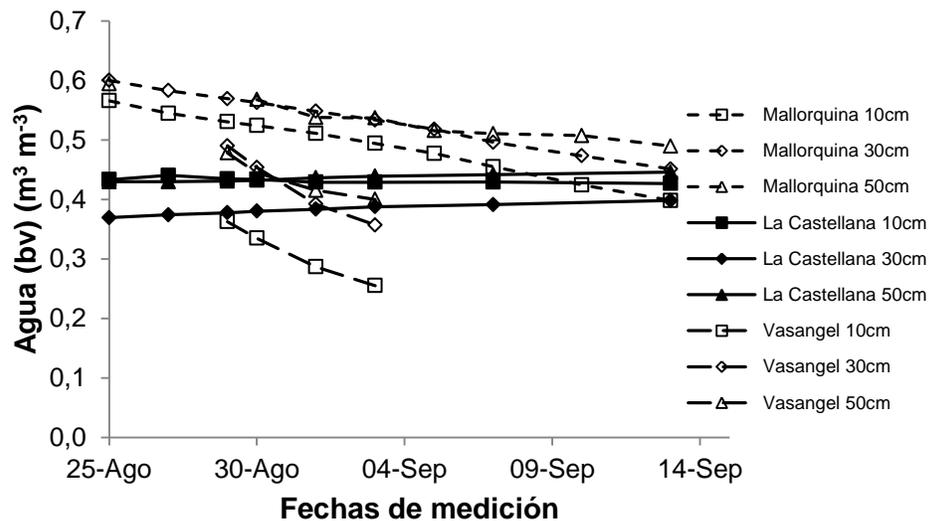


Figura 17. Valores de contenido de agua volumétrico medidos por los sensores GS3 instalados en la parcela de calibración del sensor Diviner 2000.

Los valores sin ajustar obtenidos por el sensor Diviner 2000 (Figura 18, Apéndice 11) presentaron diferencias tanto en la dinámica de secado del suelo como en los valores entre los que osciló su contenido de agua al momento de compararlos con los valores corregidos obtenidos por los sensores GS3 (Figura 17, Apéndice 12). En particular se generaron diferencias en los datos superficiales obtenidos para los fundos de Mallorca y La Castellana, en donde se puede apreciar una subestimación por parte del sensor Diviner 2000 al comparar estos con los obtenidos por los sensores GS3 (Apéndice 11 y 12)), junto con no representar con claridad la pérdida de agua ocurrida en el fondo Mallorca.

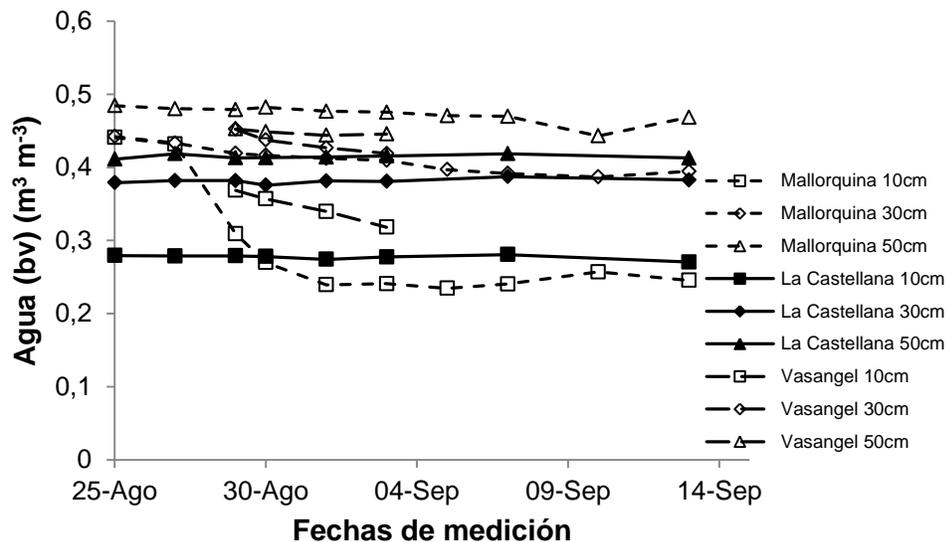


Figura 18. Valores de contenido de agua volumétrica medidos por el Sensor Diviner 2000 en los distintos fundos

Con el fin de buscar los parámetros de calibración (Ecuación 2) que permitan estimar de mejor manera el valor de θ estimados por los sensores, se buscó la solución numérica que ajustó de mejor manera los datos obtenidos por el sensor Diviner 2000 a los valores determinados por los GS3 ya calibrados (Cuadro 4).

Cuadro 4. Parámetros de ajuste por sitio y profundidad utilizados por el sensor Diviner 2000 para la estimación del contenido de agua.

Parámetro	La Castellana			Mallorquina			Vasangel		
	10 cm	30 cm	50 cm	10 cm	30 cm	50 cm	10 cm	30 cm	50 cm
A	54,569	1,122	2,753	1,958	1,192	1,297	0,417	0,783	0,863
B	2,989	0,259	1,078	0,881	0,154	0,164	0,556	0,091	0,045
C	-3,622	0,043	-0,181	-0,215	-0,141	-0,185	0,671	0,225	0,137

El nivel de detalle obtenido en la calibración de este dispositivo está asociado a la frecuencia a la que funciona, ya que pequeñas diferencias en las propiedades del suelo pueden generar una alteración en los valores registrados (Kelleners et al., 2005). Por otra parte, al ser una medición en un pequeño volumen de suelo, este sensor tiene una mayor sensibilidad a variaciones a pequeña escala en el contenido de agua y la densidad aparente de suelo, además de perturbaciones del suelo en la instalación del tubo de acceso (Evet et al., 2006).

En base a estos parámetros (Cuadro 4) se recalcularon los valores de contenido de agua para cada campo y profundidad. Se realizó una regresión a los valores obtenidos por el sensor Diviner 2000 y los ajustados mediante los parámetros calculados (eje x) con los registrados por los sensores GS3 (Figura 19).

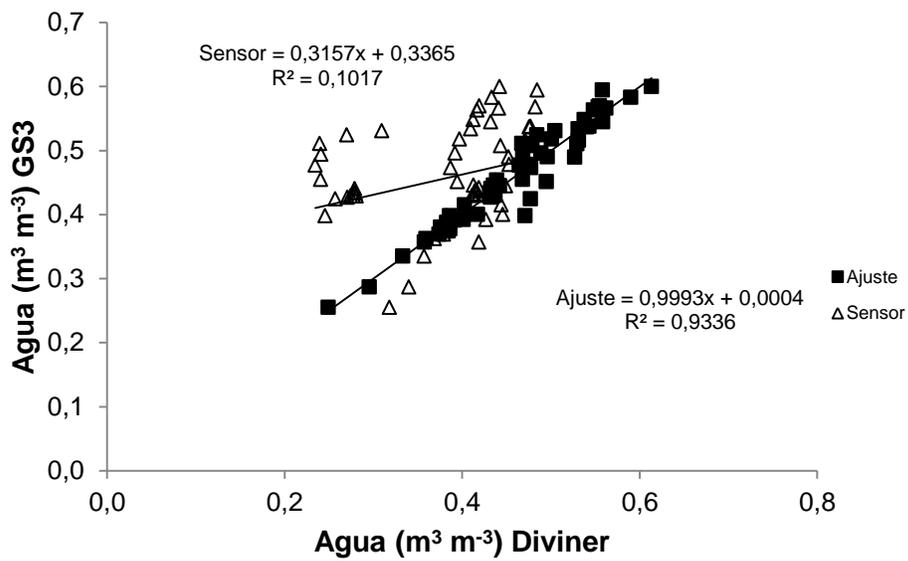


Figura 19. Valores medidos y ajustados de contenido volumétrico de agua del sensor Diviner 2000 contrastados con los valores corregidos medidos por los sensores GS3.

Aun cuando la regresión realizada con los valores obtenidos por el sensor Diviner sin corregir es estadísticamente significativa (p -valor $< 0,05$), sus valores de intercepto y pendiente no representan una condición ideal y se alejan de los valores de contenido de agua real del suelo (Apéndice 13), presentando una pendiente inferior a 1 (0,32) y un intercepto mayor a 0 (0,34), además de un error estandar de $0,070 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ asociado a la estimación de θ .

Al analizar los valores ajustados para cada campo y profundidad se obtiene una regresión estadísticamente significativa (p -valor $< 0,001$) cuyo intercepto y pendiente cumplen con las condiciones necesarias para que los valores ajustados puedan representar el contenido de agua presente en el suelo. Una vez realizada la corrección, el nivel de error disminuyó a $0,019 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Comparación de sensores

Entre los sensores estudiados (Figura 20a), el que logra estimar de manera más precisa el valor de θ para los 3 fondos utilizando su calibración de fábrica es el sensor GS3 (error estándar $0,053 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Por el contrario, el desempeño del sensor POGO fue el que presentó el mayor error en esta medición (error estándar $0,086 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) para los 3 campos, sin embargo logró un buen nivel de estimación para los fondos Mallorquina y Vasangel (error estándar $0,041 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) mientras que en el fundo La Castellana entregó valores de θ físicamente imposibles (mayores al nivel de porosidad de este suelo). Por otro lado, el sensor Diviner 2000 se encontraba en una situación intermedia, a pesar de la amplia variabilidad encontrada en los distintos suelos y profundidades.

Una vez realizadas los ajustes, todos los sensores lograron un mayor nivel de precisión en la estimación de θ . Bajo esta condición, el sensor que logró el mejor ajuste fue el sensor Diviner 2000 (error estándar $0,019 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), con el inconveniente de tener que determinar parámetros de ajuste para cada profundidad, y en cada tipo suelo estudiado. El sensor POGO fue el que obtuvo el peor ajuste (error estándar de $0,063 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) aun cuando se determine una calibración sin incluir los datos obtenidos en el fundo La Castellana (error estándar $0,038 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). En el caso del sensor GS3, este se encontró en una condición intermedia (error estándar $0,033 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Para los sensores POGO y GS3 no fue necesario la realización de calibraciones independientes por rangos de salinidad, contenido de agua ni suelo estudiado. Mientras que para el caso del sensor Diviner 2000, no se logro generar rangos de calibración en base a la salinidad o el contenido de agua, sino que fue necesaria una calibración independiente para cada profundidad y suelo muestreado.

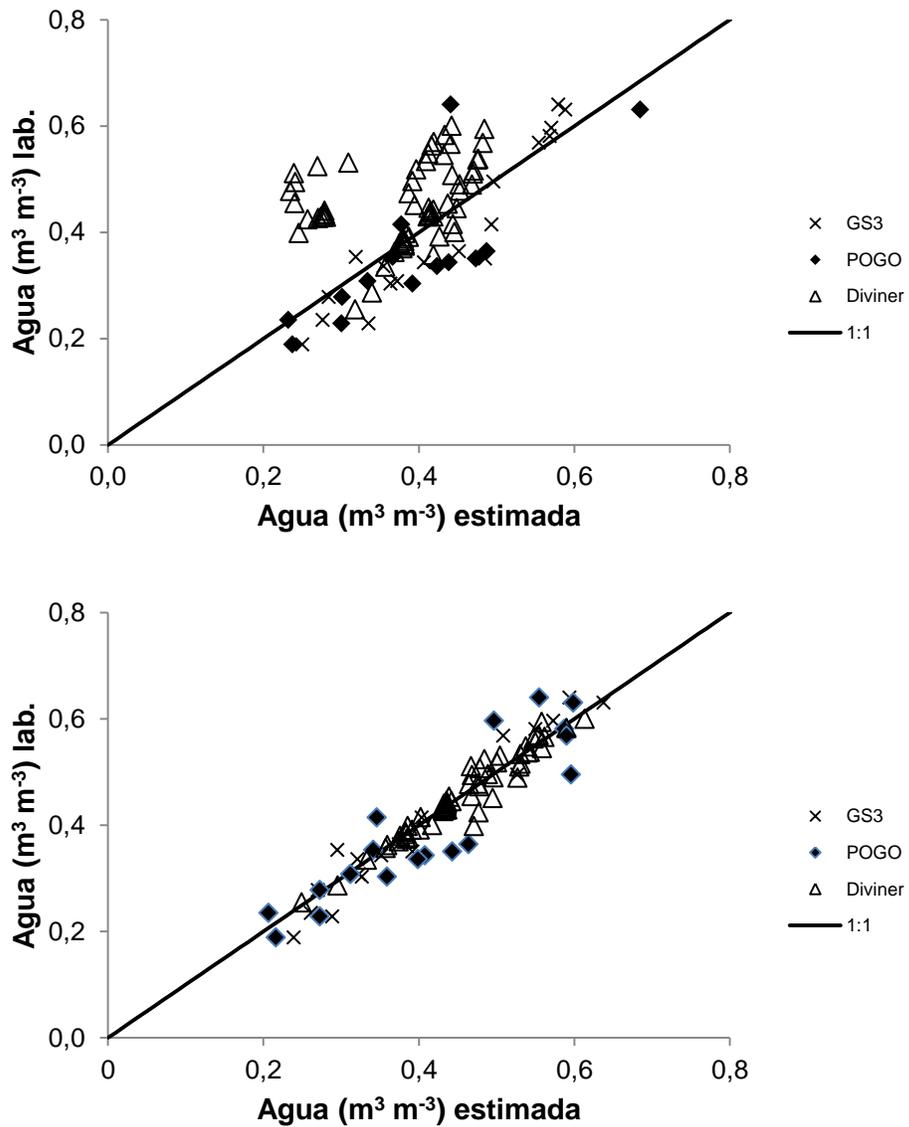


Figura 20. Relación entre los valores estimados por los sensores estudiados y el contenido de agua determinado por medición directa. Estimación de θ con los ajustes de fábrica (arriba). Estimación de θ con los ajustes determinados en terreno (abajo).

CONCLUSIONES

- Al comparar los tres sensores en estudio con la calibración de fábrica, el sensor GS3 logra representar de mejor manera el valor de θ en los tres sitios en estudio, mientras que los sensores POGO y Diviner 2000 presentaron un mayor error en su estimación. Una vez calibrados, los tres sensores lograron estimaciones de θ con un bajo nivel de error.
- El sensor POGO en el fundo La Castellana registro valores de θ mayores al nivel de la porosidad de suelo.
- El sensor Diviner 2000 debe necesariamente ser calibrado para cada profundidad y en cada uno de los suelos estudiados.
- Dentro de las condiciones medidas en este estudio, no se justificó la realización de curvas de calibración en base a rangos de salinidad ni contenido de agua para los tres sensores.

BIBLIOGRAFIA

- Amente, G., M. Baker. and C. Reece. 2000. Estimation of soil electrical conductivity from bulk soil electrical conductivity in sandy soil. *Soil Science Society of America Journal* 64: 1931–1939.
- Baumhardt, R. L., R. J. Lascano and S. R. Evett. 2000. Soil material, temperature, and salinity effects on calibration of multisensory capacitance probes. *Soil Science Society of America Journal* 64: 1940-1946.
- Bittelli, M., F. Salvatorelli and P. Rossi. 2008. Correction of TDR-based soil water content measurements in conductive soils. *Geoderma* 143: 133–142.
- Bouksila, F., M. Persson, R. Berndtsson and A. Bahri. 2008. Soil water content and salinity determination using different dielectric methods in saline gypsiferous soil. *Hydrological Sciences Journal* 53 (1): 253-265.
- CIREN. 2007. Estudio agrológico, Valle del Copiapó y Valle del Huasco, III Región. Descripciones de Suelos, Materiales y Símbolos. Centro de Información de Recursos Naturales. Santiago. 128p. (Publicación CIREN N° 135).
- Chow, L., Z. Xing, H.W. Rees, F. Meng, J. Monteith and L. Stevens. 2009. Field performance of nine soil water content sensors on a sandy loam soil in New Brunswick, Maritime region, Canada. *Sensors* 9: 9394-9413.
- Dalton, F., W. Herkelrath, D. Rawlins, and J. Rhoades. 1984. Time-domain reflectometry: Simultaneous measurements of soil water content and electrical conductivity with a single probe. *Science* 224: 989-990.

Dalton, F. and T. Van Genuchten. 1986. The time-domain reflectometry method for measuring soil water content and salinity. *Geoderma* 38: 237-250.

Dalton, F. 1992. Development of time-domain reflectometry for measuring soil-water content and bulk electrical conductivity. pp: 143-167. *In: Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bringing Theory into Practice*. Special Publication n° 30 (eds G.C. Topp, W.D. Reynolds & R.E. Green). Soil Science Society of America, Madison, WI.

Dane, J., and J. Hopmans. 2002. Pressure plate extractor. pp: 688-689. *In: Dane, J. and C. Topp (Ed). Methods of soil analysis: Part 4 physical methods*. Soil Science Society of America, Madison, WI, USA. 1692p.

Decagon Devices. 2012. GS3: Water content, EC and temperature sensor. Operator's manual, version 1. 25p.

Evelt, S., B. Ruthardt, S. Kottkamp, T. Howell, A. Schneider and J. Tolk. 2002. Accuracy and precision of soil water measurements by neutron, capacitance and TDR methods. Pp: 1-8. *In: 17th World Congress of Soil Science*. Bangkok, Thailand. August 14 - 21, 2002. Bangkok, Thailand.

Evelt, R., J. A. Tolk and T. A. Howell. 2006. Soil profile water content determination: sensor accuracy, axial response, calibration, temperature dependence and precision. *Vadose Zone Journal* 5: 894-907.

Flint, A. and L. Flint. 2002. Particle density. pp: 229-254. *In: Dane, J. and C. Topp (Ed). Methods of soil analysis: Part 4 physical methods*. Soil Science Society of America, Madison, WI, USA. 1692p.

Gee, G. W. and D. Or 2002. Particle-Size Analysis. pp: 255-293. *In: Dane, J. and C. Topp (Ed). Methods of soil analysis: Part 4 physical methods*. Soil Science Society of America, Madison, WI, USA. 1692p.

Grossman, R. B. and T. S. Reinsch. 2002. Bulk density and linear extensibility. pp. 201-228. *In*: Dane, J. and C. Topp (Ed). Methods of soil analysis: Part 4 physical methods. Soil Science Society of America, Madison, WI, USA. 1692p.

Hallikainen, M., F. Ulaby, M. Dobson, M. El-Rayes and L. Wu. 1985. Microwave dielectric behavior of wet soil-part 1: Empirical models and experimental observations. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 23 (1): 25-34.

Hignett, C. and S. Evett. 2008. Direct and surrogate measures of soil water content. Chapter 1. *In*: International Atomic Energy Agency (Ed.) Field estimation of soil water content: A practical guide to methods, instrumentation and sensor technology. IAEA. Vienna, Austria. 129p.

Hilhorst, M. 2000. A pore water conductivity sensor. *Soil Science Society of America Journal* 64: 1922-1925.

Jacobsen, O.H. and Schjonning, P. 1995. Comparison of TDR calibration functions for soil water determination. pp: 25-32. *In* L.W. Petersen and Jacobsen, O.H. (Ed.) Proceedings of the symposium: time-domain reflectometry applications in soil science. Research Center Foulum, Denmark, 16 September, 1994. SP report 11 (3) Danish Institute of Plant and Soil Science, Lyngby, Denmark.

Kargas, G. and P. Kerkides. 2012. Comparison of two models in predicting pore water electrical conductivity in different porous media. *Geoderma* 189-190: 563-573.

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 Science Society of America Journal* 69: 67-76.

Lunt, I., S. Hubbard and Y. Rubin. 2005. Soil moisture content estimation using ground-penetrating radar reflection data. *Journal of Hydrology* 307: 254-269.

- Luzio, W., M. Casanova y O. Seguel. 2010. Suelos de la zona desértica. *En: Luzio (Ed.). Suelos de Chile.* 39-80.
- Martinez, J. 1999. Irrigation with saline water: benefits and environmental impact. *Agricultural Water Management* 40:183-194.
- McMichael, B. and R. Lascano. 2003. Laboratory evaluation of a commercial dielectric soil water sensor. *Vadose Zone Journal* 2: 650-654.
- Noborio, K., K.J. McInnes and J.L. Heilman. 1994. Field measurements of soil electrical conductivity and water content by time-domain reflectometry. *Computers and Electronics in Agriculture* 11: 131-142.
- Paltineanu, I. C. and J. L. Starr. 1997. Real-time soil water dynamics using multisensory capacitance probes: laboratory calibration. *Soil Science Society of America Journal* 61: 1576-1585.
- Pepin, S., N. J. Livingston and W. R. Hook. 1995. Temperature dependent measurement errors in time domain reflectometry determinations of soil water. *Soil Science Society of America Journal* 59: 38-43.
- Persson, M., R. Berndtsson and B. Sivakumar. 2001. Using neural networks for calibration of time domain reflectometry measurements. *Hydrological Sciences Journal* 46: 389-398.
- Persson, M. 2002. Evaluating the linear dielectric constant-electrical conductivity model using time-domain reflectometry. *Hydrological Science Journal* 47 (2): 269-277.
- Rhoades, J., P. Ratts and R. Prather. 1976. Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. *Soil Science Society of America Journal* 40, 651–655.
- Richards, D. 1983. The grape root system. *In: J. Janick (Ed.). Horticultural Reviews* 5: 127 – 168.

Sadzawka, A., M.A. Carrasco, R. Grez y M. Mora. 2004. Métodos de análisis recomendados para los suelos chilenos. Comisión de Normalización y Acreditación Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo. 113p.

Sandoval, E., J. Dörner, O. Seguel, J. Cuevas y D. Rivera. 2012. Métodos de análisis físicos de suelos. Universidad de Concepción. Publicaciones Departamento de Suelos y Recursos Naturales, número 5, Chillán, Chile. 80p.

Schoeneberger, P., D. Wysocki, E. Benham, and W. Broderson. 2002. Field book for describing and sampling soils, (ver. 2.0). Natural Resources Conservation Service, USDA, National Soil Survey Center, Lincoln, NE.

Sentek technologies. 2011. Calibration manual for Sentek soil moisture sensors. 61p.

Seyfried, M. S. and M. D. Murdock. 2001. Response of a new soil water sensor to variable soil, water content, and temperature. *Soil Science Society of America Journal* 65: 28-34.

Soil Survey Staff. 1999. Soil taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. 2nd edition. Natural Resources Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 436.

Topp, G., J.L. Davis and A.P. Annan. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, 16 (3): 574-582.

Uribe, J., R. Cabrera, A. De la Fuente, M. Paneque. 2012. Atlas bioclimático de Chile. Universidad de Chile, Santiago, Chile. 232p.

Western, A. and R. Grayson. 1998. The Tarrawarra data set: Soil moisture patterns, soil characteristics, and hydrological flux measurements. *Water Resource Research* 34 (10): 2765–2768.

Wraith, J.M. and D. Or. 2001. Soil water characteristic determination from concurrent water content measurements in reference porous media. *Soil Science Society of American Journal* 65: 1659–1666

Wyseure, G., M. Mojid and M. Malik. 1997. Measurement of volumetric water content by TDR in saline soils. *European Journal of Soil Science* 48: 347-354.

Young, M. H., J. B. Fleming, O.J. Wierenga and A. W. Warrick. 1997. Rapid laboratory calibration of time domain reflectometry using upward infiltration. *Soil Science Society of America Journal* 61: 707-712.

Zazueta, F. and J. Xin. 1994. Soil moisture sensors. Bulletin 292, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. 11p.

Zúñiga, C. 2004. Manejo del riego mediante un monitoreo hídrico en tiempo real determinado con la técnica Frequency Domain Reflectometry. Memoria de Ingeniero Agrónomo, Universidad de Chile, Facultad de Agronomía. Santiago, Chile. 47p.

APÉNDICE

Apéndice 1. Características físicas y morfológicas del pedón.

1.1. Características físicas y morfológicas del pedón descrito en el fundo La Castellana.

Profundidad (cm)	
0 – 12	Pardo rojizo oscuro (5YR 3/3) en húmedo; franco arcillo limosa; muy adhesivo y muy plástico; estructura de bloques subangulares gruesos y medios, moderados, con tendencia a estados dispersos. Raíces medias y finas, comunes; poros medios y finos, comunes; reacción al HCL leve; límite lineal, claro.
12 – 20	Pardo rojizo oscuro (5YR 3/3) en húmedo; franco arcillo limosa; moderadamente adhesivo y muy plástico; estructura de bloques subangulares medios, moderados. Raíces medias y finas, abundantes; poros medios y finos, abundantes; reacción al HCL fuerte; límite lineal, abrupto.
20 – 33	Pardo oscuro (7,5YR 3/3) en húmedo; arcillo limosa; adhesivo y plástico; masivo. Raíces gruesas, comunes, medias y finas abundantes; poros finos y muy finos, abundantes; nódulos de CaCO ₃ finos irregulares, comunes; reacción al HCL fuerte en matriz como en nodulos; límite lineal, claro.
33 – 61	Pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2) en húmedo; areno francosa; no adhesivo y ligeramente plástico; estructura de bloques subangulares medios a finos, débiles. Raíces gruesas, escasas y finas, comunes; poros gruesos y medios, comunes; nódulos de CaCO ₃ finos irregulares, comunes; reacción al HCL violenta en matriz como en nodulos; límite lineal, abrupto.
61 – 75	Gris rojizo oscuro (5YR 4/2) en húmedo; franca; ligeramente adhesivo y moderadamente plástico; masivo. Raíces medias, escasas; poros finos y muy finos abundantes; moteados finos, comunes; reacción al HCL fuerte; límite lineal, claro.
75 – 102	Gris rojizo oscuro (5YR 4/2) en húmedo; franco arcillosa; adhesivo y muy plástico; estructura de bloques subangulares medios, moderados. Poros medios, abundantes; moteados finos, comunes; reacción al HCL fuerte.

Apéndice 1. (Continuación)

1.2. Características físicas y morfológicas del pedón descrito en el fundo Vasangel.

Profundidad (cm)	
0 – 12	Pardo rojizo oscuro (5YR 3/2) en húmedo; franco arcillo arenosa; ligeramente adhesivo y ligeramente plástico; bloques subangulares gruesos a medios, moderados. Raíces gruesas, escasas, finas y medias abundantes; poros medios, escasos, finos abundantes; reacción al HCL moderada; límite lineal, gradual.
12 – 28	Pardo rojizo oscuro (5YR 3/3) en húmedo; franco arcillo arenosa; ligeramente adhesivo y plástico; estructura de bloques subangulares medios y finos, débiles. Raíces gruesas, comunes, medias y finas, abundantes; poros medios, escasos, finos, comunes; nódulos de cristales solubles finos, abundantes; reacción al HCL violenta en matriz; límite lineal, claro.
28 – 57	Pardo rojizo oscuro (2,5YR 3/3) en húmedo; franco arcillo arenosa; ligeramente adhesivo y moderadamente plástico; estructura de bloques subangulares medios, débiles. Raíces medias, comunes, finas, escasas; poros finos, abundantes; filamentos de cristales solubles medios, abundantes; reacción al HCL violenta en matriz; límite lineal, abrupto.
57 – 74	Pardo muy oscuro (7,5YR 2,5/3) en húmedo; franco arcillo limosa; adhesivo y plástico; estructura de bloques subangulares gruesos a medios, moderados. Raíces medias, comunes; poros finos y muy finos, abundantes; filamentos de cristales solubles medios y finos, comunes; reacción al HCL violenta en matriz; límite lineal, claro.
74 – 90	Pardo oscuro (7,5YR 3/4) en húmedo; areno francosa; no adhesivo y ligeramente plástico; estructura de bloques subangulares gruesos, moderados. Poros finos y muy finos, comunes; filamentos de cristales solubles medios y finos, comunes; reacción al HCL moderada en matriz.

Apéndice 1. (Continuación)

1.3. Características físicas y morfológicas del pedón descrito en el fundo Mallorquina.

Profundidad (cm)	
0 – 12	Pardo rojizo oscuro (5YR 3/2) en húmedo; franca; moderadamente adhesivo y plástico; bloques subangulares medios a finos, débiles; tendencia a estados dispersos. Raíces gruesas, escasas, finas y medias comunes; poros medios y finos comunes; reacción al HCL moderada; límite ondulado, gradual.
12 – 29	Pardo rojizo oscuro (2,5YR 2,5/4) en húmedo; franca; moderadamente adhesivo y plástico; estructura de bloques subangulares medios, moderados. Raíces gruesas, comunes, medias y finas, abundantes; poros medios, escasos, finos, comunes; reacción al HCL fuerte; límite lineal, claro.
29 – 47	Pardo oscuro (7,5YR 3/4) en húmedo; franco arcillo limosa; adhesivo y plástico; estructura de bloques subangulares gruesos a medios, moderados. Raíces medias, comunes, finas, escasas; poros finos, abundantes; reacción al HCL violenta; límite lineal, claro.
47 – 76	Pardo oscuro (10YR 3/3) en húmedo; franco arcillo limosa; adhesivo y plástico; estructura de bloques subangulares gruesos, moderados. Raíces medias, comunes; poros finos y muy finos, abundantes; reacción al HCL violenta; límite lineal, difuso.
76 – 98	Pardo oscuro (10YR 3/2) en húmedo; franco arcillo limosa; adhesivo y moderadamente plástico; estructura de bloques subangulares gruesos, moderados. Poros finos y muy finos, comunes; reacción al HCL moderada.

Apéndice 2. Resumen curva característica de retención de agua, distribución de tamaño de poros y humedad aprovechable para los 3 sitios en estudio.

	Fundo	Profundidad (cm)								
		Mallorquina			La Castellana			Vasangel		
		30	50	80	30	50	80	30	45	60
-2 (hPa)	cm ³ cm ⁻³	0,619	0,550	0,623	0,631	0,514	0,508	0,604	0,520	0,538
-60 (hPa)	cm ³ cm ⁻³	0,474	0,441	0,541	0,592	0,429	0,441	0,449	0,421	0,427
-300 (hPa)	cm ³ cm ⁻³	0,388	0,383	0,496	0,559	0,308	0,404	0,362	0,271	0,347
-5000 (hPa)	cm ³ cm ⁻³	0,274	0,224	0,322	0,366	0,114	0,198	0,160	0,137	0,141
-15000 (hPa)	cm ³ cm ⁻³	0,228	0,186	0,276	0,332	0,083	0,136	0,126	0,078	0,108
PDR	cm ³ cm ⁻³	0,144	0,109	0,082	0,040	0,085	0,067	0,155	0,099	0,112
PDL	cm ³ cm ⁻³	0,086	0,058	0,045	0,032	0,121	0,038	0,088	0,150	0,080
Ha	cm ³ cm ⁻³	0,160	0,197	0,220	0,227	0,225	0,268	0,236	0,193	0,239

PDR: Poros de drenaje rápido (> 50 μm); PDL: Poros de drenaje lento (< 50 μm, > 10 μm);

Ha: Humedad aprovechable (< 10 μm, > 0,02 μm)

Apéndice 3. Análisis de varianza de los distintos parámetros medidos en agua por los sensores GS3.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Permisividad	383	0,86	0,84	2,73

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	5836,20	35	166,75	59,23	<0,0001
Tratamiento	5836,20	35	166,75	59,23	<0,0001
Error	976,90	347	2,82		
Total	6813,09	382			

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Cont. volumétrico	383	0,85	0,83	2,64

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0,60	35	0,02	54,52	<0,0001
Tratamiento	0,60	35	0,02	54,52	<0,0001
Error	0,11	347	3,2E-04		
Total	0,71	382			

Apéndice 3. (Continuación)

<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R² Aj</u>	<u>CV</u>
Temperatura	383	0,67	0,63	1,18

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo.	42,83	35	1,22	19,95	<0,0001
Tratamiento	42,83	35	1,22	19,95	<0,0001
Error	21,28	347	0,06		
Total	64,12	382			

<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R² Aj</u>	<u>CV</u>
CEb	383	0,72	0,69	5,11

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo.	21,61	35	0,62	25,36	<0,0001
Tratamiento	21,61	35	0,62	25,36	<0,0001
Error	8,45	347	0,02		
Total	30,06	382			

Apéndice 4. Análisis de varianza no paramétrica de los distintos parámetros medidos en agua por los sensores GS3.

Variable	Tratamiento	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
Perm. dieléctrica	1,00	8	66,36	0,37	66,55	314,61	<0,0001
Perm. dieléctrica	2,00	10	60,82	0,21	60,85		
Perm. dieléctrica	3,00	9	57,76	0,27	57,86		
Perm. dieléctrica	4,00	13	55,51	0,20	55,46		
Perm. dieléctrica	5,00	11	53,81	0,29	53,90		
Perm. dieléctrica	6,00	10	56,29	0,16	56,26		
Perm. dieléctrica	7,00	13	59,94	0,67	60,04		
Perm. dieléctrica	8,00	13	64,70	0,28	64,58		
Perm. dieléctrica	9,00	8	66,03	0,22	66,03		
Perm. dieléctrica	10,00	10	59,22	0,32	59,22		
Perm. dieléctrica	11,00	9	62,08	0,23	62,14		
Perm. dieléctrica	12,00	13	67,28	0,17	67,30		
Perm. dieléctrica	13,00	11	51,92	0,37	51,86		
Perm. dieléctrica	14,00	10	56,03	0,20	56,04		
Perm. dieléctrica	15,00	13	62,46	0,19	62,46		
Perm. dieléctrica	16,00	13	62,90	0,33	63,00		
Perm. dieléctrica	17,00	8	62,82	0,20	62,89		
Perm. dieléctrica	18,00	10	62,50	0,27	62,56		
Perm. dieléctrica	19,00	9	62,18	0,22	62,22		
Perm. dieléctrica	20,00	13	60,17	1,96	60,94		
Perm. dieléctrica	21,00	11	57,89	3,67	55,72		
Perm. dieléctrica	22,00	10	63,64	0,32	63,46		
Perm. dieléctrica	23,00	13	63,79	0,87	64,16		
Perm. dieléctrica	24,00	13	61,97	0,65	61,70		
Perm. dieléctrica	25,00	8	70,97	3,79	72,13		
Perm. dieléctrica	26,00	10	69,38	3,39	71,71		
Perm. dieléctrica	27,00	9	63,70	3,03	65,06		
Perm. dieléctrica	28,00	13	60,58	2,87	58,54		
Perm. dieléctrica	29,00	11	63,74	0,54	63,74		
Perm. dieléctrica	30,00	10	60,94	2,27	60,77		
Perm. dieléctrica	31,00	13	61,13	2,19	62,62		
Perm. dieléctrica	32,00	13	61,89	0,41	61,66		
Perm. dieléctrica	33,00	8	64,14	0,75	64,19		
Perm. dieléctrica	34,00	10	59,04	4,81	55,61		
Perm. dieléctrica	35,00	9	58,38	2,89	60,60		
Perm. dieléctrica	36,00	8	60,92	0,23	60,82		

Apéndice 4. (Continuación)

Variable	Tratamiento	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
Cont. volumétrico	1,00	8	0,73	5,0E-03	0,73	314,46	<0,0001
Cont. volumétrico	2,00	10	0,66	2,1E-03	0,66		
Cont. volumétrico	3,00	9	0,64	2,1E-03	0,64		
Cont. volumétrico	4,00	13	0,62	1,5E-03	0,62		
Cont. volumétrico	5,00	11	0,61	1,7E-03	0,61		
Cont. volumétrico	6,00	10	0,63	1,3E-03	0,63		
Cont. volumétrico	7,00	13	0,66	0,01	0,66		
Cont. volumétrico	8,00	13	0,70	3,3E-03	0,70		
Cont. volumétrico	9,00	8	0,72	3,1E-03	0,72		
Cont. volumétrico	10,00	10	0,65	2,6E-03	0,65		
Cont. volumétrico	11,00	9	0,68	2,3E-03	0,68		
Cont. volumétrico	12,00	13	0,74	2,4E-03	0,74		
Cont. volumétrico	13,00	11	0,60	1,8E-03	0,60		
Cont. volumétrico	14,00	10	0,62	1,4E-03	0,63		
Cont. volumétrico	15,00	13	0,68	1,9E-03	0,68		
Cont. volumétrico	16,00	13	0,68	3,4E-03	0,69		
Cont. volumétrico	17,00	8	0,68	2,2E-03	0,68		
Cont. volumétrico	18,00	10	0,68	3,0E-03	0,68		
Cont. volumétrico	19,00	9	0,68	2,1E-03	0,68		
Cont. volumétrico	20,00	13	0,66	0,02	0,66		
Cont. volumétrico	21,00	11	0,64	0,03	0,62		
Cont. volumétrico	22,00	10	0,69	3,7E-03	0,69		
Cont. volumétrico	23,00	13	0,69	0,01	0,70		
Cont. volumétrico	24,00	13	0,67	0,01	0,67		
Cont. volumétrico	25,00	8	0,80	0,05	0,82		
Cont. volumétrico	26,00	10	0,77	0,05	0,81		
Cont. volumétrico	27,00	9	0,70	0,03	0,71		
Cont. volumétrico	28,00	13	0,66	0,03	0,64		
Cont. volumétrico	29,00	11	0,69	0,01	0,69		
Cont. volumétrico	30,00	10	0,67	0,02	0,66		
Cont. volumétrico	31,00	13	0,67	0,02	0,68		
Cont. volumétrico	32,00	13	0,67	4,3E-03	0,67		
Cont. volumétrico	33,00	8	0,70	0,01	0,70		
Cont. volumétrico	34,00	10	0,65	0,04	0,62		
Cont. volumétrico	35,00	9	0,64	0,02	0,66		
Cont. volumétrico	36,00	8	0,66	2,2E-03	0,66		

Apéndice 4. (Continuación)

Variable	Tratamiento	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
Temperatura	1,00	8	20,91	0,30	20,75	300,50	<0,0001
Temperatura	2,00	10	21,37	0,21	21,30		
Temperatura	3,00	9	20,91	0,06	20,90		
Temperatura	4,00	13	21,12	0,04	21,10		
Temperatura	5,00	11	20,91	0,16	20,80		
Temperatura	6,00	10	21,07	0,07	21,10		
Temperatura	7,00	13	20,37	0,18	20,40		
Temperatura	8,00	13	20,37	0,05	20,40		
Temperatura	9,00	8	21,18	0,30	21,05		
Temperatura	10,00	10	21,30	0,43	21,15		
Temperatura	11,00	9	20,93	0,05	20,90		
Temperatura	12,00	13	21,69	0,59	21,40		
Temperatura	13,00	11	20,82	0,04	20,80		
Temperatura	14,00	10	20,70	0,09	20,70		
Temperatura	15,00	13	20,62	0,12	20,70		
Temperatura	16,00	13	21,68	0,46	21,50		
Temperatura	17,00	8	21,04	0,23	21,15		
Temperatura	18,00	10	20,79	0,14	20,70		
Temperatura	19,00	9	20,79	0,03	20,80		
Temperatura	20,00	13	20,72	0,06	20,70		
Temperatura	21,00	11	20,81	0,29	21,00		
Temperatura	22,00	10	20,45	0,05	20,45		
Temperatura	23,00	13	21,45	0,59	21,20		
Temperatura	24,00	13	20,91	0,22	20,80		
Temperatura	25,00	8	20,99	0,17	20,90		
Temperatura	26,00	10	20,86	0,08	20,80		
Temperatura	27,00	9	20,98	0,24	21,10		
Temperatura	28,00	13	20,65	0,05	20,70		
Temperatura	29,00	11	20,66	0,16	20,60		
Temperatura	30,00	10	21,27	0,45	21,10		
Temperatura	31,00	13	21,17	0,24	21,10		
Temperatura	32,00	13	21,05	0,05	21,00		
Temperatura	33,00	8	20,95	0,08	21,00		
Temperatura	34,00	10	20,83	0,16	20,80		
Temperatura	35,00	9	20,67	0,13	20,60		
Temperatura	36,00	8	20,46	0,05	20,50		

Apéndice 4. (Continuación)

Variable	Tratamiento	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
CEb	1,00	8	3,37	0,03	3,39	280,90	<0,0001
CEb	2,00	10	3,28	0,01	3,28		
CEb	3,00	9	3,04	0,01	3,05		
CEb	4,00	13	2,67	0,05	2,68		
CEb	5,00	11	2,58	0,03	2,59		
CEb	6,00	10	3,13	0,02	3,15		
CEb	7,00	13	3,04	0,01	3,05		
CEb	8,00	13	3,18	0,01	3,18		
CEb	9,00	8	3,42	0,02	3,43		
CEb	10,00	10	3,41	0,02	3,43		
CEb	11,00	9	3,24	0,02	3,25		
CEb	12,00	13	2,72	0,07	2,77		
CEb	13,00	11	3,07	0,01	3,08		
CEb	14,00	10	2,64	0,04	2,65		
CEb	15,00	13	3,37	0,02	3,35		
CEb	16,00	13	3,38	0,04	3,39		
CEb	17,00	8	3,32	0,09	3,39		
CEb	18,00	10	3,03	0,23	3,21		
CEb	19,00	9	2,84	0,01	2,83		
CEb	20,00	13	2,98	0,23	3,08		
CEb	21,00	11	2,72	0,32	2,57		
CEb	22,00	10	3,18	0,00	3,18		
CEb	23,00	13	3,21	0,14	3,28		
CEb	24,00	13	3,16	0,03	3,18		
CEb	25,00	8	2,73	0,19	2,68		
CEb	26,00	10	2,93	0,22	2,78		
CEb	27,00	9	3,04	0,27	3,18		
CEb	28,00	13	2,86	0,32	2,62		
CEb	29,00	11	3,25	0,00	3,25		
CEb	30,00	10	3,31	0,09	3,30		
CEb	31,00	13	2,94	0,40	2,68		
CEb	32,00	13	2,78	0,04	2,80		
CEb	33,00	8	3,23	0,16	3,28		
CEb	34,00	10	2,95	0,29	2,74		
CEb	35,00	9	3,00	0,22	3,18		
CEb	36,00	8	3,18	0,00	3,18		

Apéndice 5. Resumen de los valores obtenidos en los distintos fondos para los 6 tiempos de medición por los sensores GS3.

Fundo	Ti	Agua (bv) (cm ³ cm ⁻³)			ϵ_a			T (°C)			CEb (dS m ⁻¹)			CEp(dS m ⁻¹)		
		Prom	Desv	CV	Prom	Desv	CV	Prom	Desv	CV	Prom	Desv	CV	Prom	Desv	CV
Mallorquina	1	0,485	0,032	6,67	28,53	4,43	15,54	11,57	0,22	1,91	2,24	0,64	28,67	8,03	1,09	13,57
	2	0,477	0,046	9,64	28,10	6,03	21,46	14,07	0,76	5,41	2,44	0,77	31,44	8,44	1,52	18,00
	3	0,448	0,043	9,66	24,61	4,80	19,51	16,50	0,67	4,08	2,18	0,54	24,72	9,34	0,81	8,63
	4	0,359	0,039	10,81	17,27	2,55	14,79	16,43	1,18	7,20	1,52	0,32	21,32	10,72	2,11	19,65
	5	0,310	0,041	13,30	14,39	2,24	15,61	19,78	1,42	7,19	1,04	0,38	36,08	9,33	2,43	26,05
	6	0,276	0,021	7,53	12,55	1,01	8,08	15,83	0,51	3,19	0,87	0,26	30,38	10,13	3,08	30,36
La Castellana	1	0,588	0,026	4,37	48,89	5,25	10,75	12,30	0,68	5,55	3,83	1,06	27,72	7,34	1,33	18,17
	2	0,579	0,019	3,25	47,14	4,56	9,67	14,85	1,28	8,64	3,07	0,65	21,26	6,14	1,07	17,47
	3	0,571	0,026	4,60	44,91	5,93	13,21	14,36	1,71	11,90	2,84	0,70	24,67	6,00	1,01	16,77
	4	0,568	0,026	4,62	44,46	5,87	13,21	14,87	0,69	4,64	2,75	0,62	22,64	5,73	0,73	12,66
	5	0,554	0,059	10,66	42,75	9,20	21,52	15,19	0,86	5,68	2,70	0,60	22,27	6,40	1,86	29,00
	6	0,556	0,086	15,49	43,85	12,80	29,19	21,09	1,47	6,97	2,55	0,62	24,19	6,18	3,15	50,97
Vasangel	1	0,406	0,040	9,95	20,69	3,11	15,03	14,19	0,19	1,32	1,22	0,34	27,70	8,38	2,26	26,96
	2	0,364	0,048	13,17	17,64	3,05	17,31	14,19	0,78	5,48	1,01	0,26	25,86	9,81	4,18	42,57
	3	0,354	0,052	14,72	17,09	3,23	18,91	16,35	2,20	13,45	0,95	0,24	25,15	9,98	4,48	44,92
	4	0,319	0,040	12,64	14,87	2,23	15,02	16,52	5,52	33,40	0,78	0,21	26,56	10,93	4,92	44,99
	5	0,284	0,030	10,55	13,13	1,75	13,34	18,31	1,46	8,00	0,61	0,15	24,05	12,27	5,09	41,50
	6	0,250	0,018	7,40	11,29	0,85	7,49	16,24	1,04	6,40	0,44	0,19	43,08	12,88	5,04	39,12

Ti: Tiempo de medición referido al Cuadro 2.

ϵ_a : Permisividad dieléctrica.

CE_b: Conductividad eléctrica de la masa de suelo.

CE_p: Conductividad eléctrica del agua de los poros estimado en base al modelo de Hilhorst (2000).

Apéndice 6. Valores promedios de contenidos de agua volumétricos, gravimétricos y densidad aparente medidos por laboratorio.

Fundo	Ti	Agua (bm) (g g ⁻¹)			Agua (bv) (cm ³ cm ⁻³)			Da (g cm ⁻³)		
		Prom	Desv	CV	Prom	Desv	CV	Prom	Desv	CV
Mallorquina	1	0,35	0,06	16,65	0,35	0,07	20,16	1,12	0,10	8,80
	2	0,38	0,02	5,89	0,41	0,02	3,84			
	3	0,30	0,01	3,46	0,36	0,01	2,99			
	4	0,27	0,00	1,65	0,31	0,01	2,28			
	5	0,23	0,07	31,64	0,23	0,06	24,85			
	6	0,18	0,01	4,01	0,23	0,01	5,41			
La Castellana	1	0,58	0,00	0,43	0,63	0,00	0,73	1,06	0,06	5,30
	2	0,63	0,00	0,39	0,64	0,00	0,11			
	3	0,58	0,02	3,21	0,60	0,00	0,28			
	4	0,56	0,02	3,61	0,58	0,04	6,72			
	5	0,53	0,02	3,39	0,57	0,00	0,70			
	6	0,44	0,02	4,66	0,50	0,01	2,31			
Vasangel	1	0,27	0,03	12,54	0,34	0,02	4,49	1,27	0,10	7,50
	2	0,24	0,06	24,04	0,30	0,07	22,76			
	3	0,28	0,05	18,66	0,34	0,03	8,62			
	4	0,30	0,03	8,58	0,35	0,02	5,55			
	5	0,21	0,02	10,34	0,28	0,02	6,88			
	6	0,14	0,01	7,08	0,19	0,01	5,83			

Ti: Tiempo de medición referido al Cuadro 2.

Apéndice 7. Estadísticas de las regresiones realizadas para la curva de calibración del sensor GS3.

7.1. Resumen Sensor

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,938
Coefficiente de determinación R ²	0,879
R ² ajustado	0,872
Error típico	0,053
Observaciones	18,000

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1,000	0,323	0,323	116,345	9,49E-09
Residuos	16,000	0,044	0,003		
Total	17,000	0,367			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	-0,113	0,049	-2,294	0,036	-0,217	-0,009	-0,217	-0,009
Variable X 1	1,194	0,111	10,786	0,000	0,959	1,429	0,959	1,429

Apéndice 7. (Continuación)

7.2. Resumen Ajuste

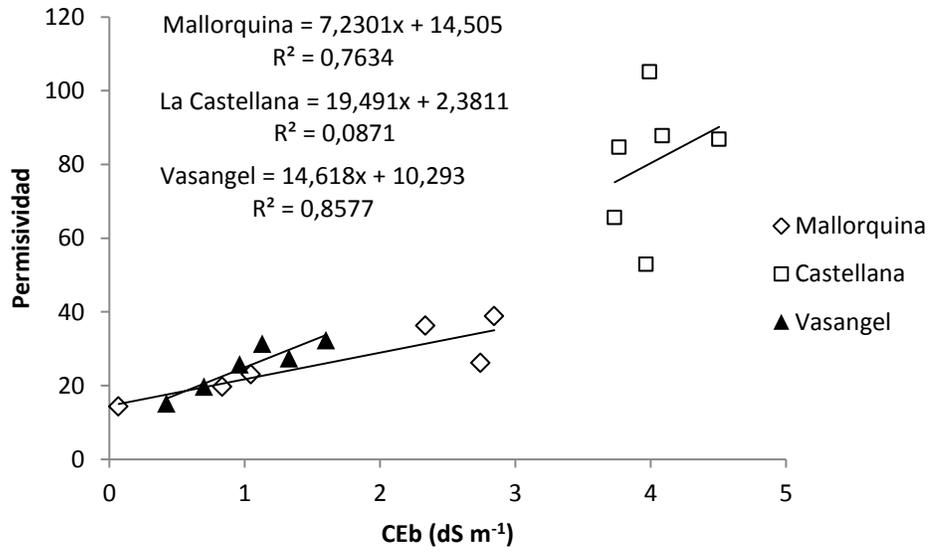
<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0,976
Coeficiente de determinación R ²	0,952
R ² ajustado	0,949
Error típico	0,033
Observaciones	18,000

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1,000	0,349	0,349	314,758	6,02E-12
Residuos	16,000	0,018	0,001		
Total	17,000	0,367			

	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	-0,048	0,026	-1,802	0,090	-0,104	0,008	-0,104	0,008
Variable X 1	1,117	0,063	17,741	0,000	0,983	1,250	0,983	1,250

Apéndice 8. Relación entre la conductividad eléctrica de la masa de suelo (CEb) y la permisividad.



Apéndice 9. Resumen de los valores obtenidos en los distintos fondos para los 6 tiempos de medición por el sensor POGO.

	Ti	Agua (bv) POGO			CEp (dS m ⁻¹)			CEb (dS m ⁻¹)			ε _a		
		Prom	Desv	CV	Prom	Desv	CV	Prom	Desv	CV	Prom	Desv	CV
Mallorquina	1	0,47	0,00	0,98	5,68	0,90	15,87	2,34	0,37	15,96	36,29	0,47	1,30
	2	0,38	0,06	15,01	9,94	2,73	27,44	2,74	0,20	7,35	26,15	5,06	19,34
	3	0,49	0,05	11,11	6,18	1,31	21,17	2,84	0,31	10,74	38,86	6,35	16,33
	4	0,33	0,04	10,89	4,04	0,28	6,85	1,05	0,23	21,98	23,05	3,37	14,63
	5	0,30	0,02	5,97	3,98	0,65	16,27	0,83	0,20	24,35	19,68	1,46	7,39
	6	0,23	0,02	9,38	4,73	1,16	24,55	0,07	0,02	35,69	14,39	1,51	10,51
Castellana	1	0,68	0,15	21,59	5,08	1,47	28,92	3,73	0,84	22,39	65,59	21,04	32,07
	2	0,44	0,11	25,49	12,33	4,93	40,02	3,82	0,29	7,49	33,21	11,82	35,59
	3	0,93	0,05	5,22	3,13	0,24	7,61	3,99	0,29	7,19	105,19	9,12	8,67
	4	0,84	0,05	5,47	3,97	0,84	21,16	4,09	0,45	10,93	87,78	7,66	8,72
	5	0,83	0,11	12,76	4,63	1,50	32,44	4,51	0,13	2,95	86,88	17,09	19,67
	6	0,80	0,11	13,48	3,82	1,26	33,06	3,77	0,08	2,12	84,72	17,09	20,17
Vasangel	1	0,44	0,03	6,58	4,57	1,34	29,32	1,16	0,30	25,93	32,34	3,03	9,37
	2	0,39	0,03	7,64	4,57	0,92	20,19	1,13	0,25	22,45	27,41	2,83	10,34
	3	0,42	0,01	2,87	3,13	0,09	2,74	1,11	0,08	7,09	31,37	1,31	4,17
	4	0,37	0,03	7,49	3,37	0,22	6,66	1,10	0,07	5,93	25,73	2,60	10,11
	5	0,30	0,01	2,53	3,38	0,22	6,63	1,07	0,06	5,87	19,68	0,64	3,26
	6	0,24	0,02	10,26	2,70	0,19	7,11	1,04	0,08	7,70	15,12	1,71	11,34

Ti: Tiempo de medición referido al Cuadro 2.

ε_a: Permisividad dieléctrica.

CE_b: Conductividad eléctrica de la masa de suelo.

CE_p: Conductividad eléctrica del agua de los poros estimado en base al modelo de Hilhorst (2000)

Apéndice 10. Estadísticas de las regresiones realizadas para la curva de calibración del sensor POGO.

10.1. Resumen Ajuste

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,90927436
Coefficiente de determinación R ²	0,82677986
R ² ajustado	0,8159536
Error típico	0,06303999
Observaciones	18

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	0,30348951	0,30348951	76,3680	1,7309E-07
Residuos	16	0,06358464	0,00397404		
Total	17	0,36707415			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	-0,01336915	0,0496866	-0,26906955	0,79131	-	0,091961	-0,118700	0,0919617
Variable X 1	0,99947926	0,11437156	8,73887932	1,79E-07	0,75702239	1,241936	0,757022	1,2419361

Apéndice 10. (Continuación)

10.2. Resumen Sensor

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,82410038
Coefficiente de determinación R ²	0,67914143
R ² ajustado	0,65908777
Error típico	0,08579732
Observaciones	18

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	0,24929526	0,24929526	33,86620	2,6111E-05
Residuos	16	0,11777889	0,00736118		
Total	17	0,36707415			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	0,13124725	0,05056739	2,5954918	0,019518	0,02404917	0,238445	0,024049	0,2384453
Variable X 1	0,54664857	0,09393446	5,81946802	2,61E-05	0,34751642	0,745780	0,347516	0,7457807

Apéndice 11. Valores de contenido de agua promedio ($m^3 m^{-3}$), desviación estándar y coeficiente de variación medidos por el sensor Diviner 2000, para los distintos campos a 10, 30 y 50 cm de profundidad.

	Fecha	10 cm			30 cm			50 cm		
		Prom	Desv	CV	Prom	Desv	CV	Prom	Desv	CV
Mallorquina	25/08	0,44	0,005	1,10	0,44	0,003	0,67	0,48	0,004	0,83
	27/08	0,43	0,003	0,61	0,43	0,004	0,81	0,48	0,005	1,05
	29/08	0,31	0,001	0,27	0,42	0,004	0,85	0,48	0,002	0,43
	30/08	0,27	0,004	1,64	0,42	0,003	0,71	0,48	0,002	0,47
	01/09	0,24	0,003	1,19	0,41	0,003	0,77	0,48	0,008	1,60
	03/09	0,24	0,003	1,09	0,41	0,002	0,49	0,48	0,003	0,71
	05/09	0,23	0,001	0,60	0,40	0,002	0,59	0,47	0,005	1,11
	07/09	0,24	0,001	0,47	0,39	0,003	0,65	0,47	0,003	0,65
	10/09	0,26	0,025	9,82	0,39	0,004	0,92	0,44	0,024	5,39
	13/09	0,25	0,001	0,60	0,39	0,001	0,29	0,47	0,001	0,29
La Castellana	25/08	0,28	0,002	0,61	0,38	0,003	0,73	0,41	0,003	0,78
	27/08	0,28	0,005	1,68	0,38	0,002	0,53	0,42	0,004	0,93
	29/08	0,28	0,003	1,16	0,38	0,005	1,19	0,41	0,001	0,26
	30/08	0,28	0,003	1,10	0,38	0,001	0,31	0,41	0,004	1,04
	01/09	0,27	0,006	2,26	0,38	0,002	0,47	0,41	0,004	0,96
	03/09	0,28	0,004	1,39	0,38	0,003	0,66	0,42	0,005	1,29
	07/09	0,28	0,005	1,93	0,39	0,001	0,37	0,42	0,004	0,99
	13/09	0,27	0,004	1,31	0,38	0,002	0,60	0,41	0,002	0,52
Vasangel	29/08	0,37	0,005	1,39	0,45	0,004	0,98	0,45	0,004	0,90
	30/08	0,36	0,001	0,19	0,44	0,002	0,35	0,45	0,003	0,66
	01/09	0,34	0,004	1,24	0,43	0,002	0,58	0,44	0,002	0,34
	03/09	0,32	0,008	2,40	0,42	0,004	1,03	0,45	0,004	0,89

Apéndice 12. Valores promedio, desviación estándar y coeficiente de variación de contenido volumétrico de agua y conductividad eléctrica de poros estimados por los sensores GS3 destinados a la calibración del sensor Diviner 2000 para los distintos campos a 10, 30 y 50 cm de profundidad.

		Agua (bv)									CEp (dS m-1)								
		10 cm			30 cm			50 cm			10 cm			30 cm			50 cm		
		Prom	Desv	CV	Prom	Desv	CV	Prom	Desv	CV	Prom	Desv	CV	Prom	Desv	CV	Prom	Desv	CV
Mallorquina	25/08	0,57	0,003	0,59	0,60	0,003	0,57	0,59	0,013	2,20	7,63	0,055	0,72	9,02	0,029	0,32	8,30	0,420	5,06
	27/08	0,55	0,002	0,41	0,58	0,003	0,51				7,87	0,034	0,43	8,82	0,050	0,56			
	29/08	0,54	0,002	0,32	0,57	0,002	0,39				8,02	0,039	0,49	8,72	0,048	0,55			
	30/08	0,53	0,001	0,28	0,57	0,002	0,35	0,57	0,007	1,27	8,10	0,049	0,61	8,68	0,042	0,48	6,91	0,188	2,72
	01/09	0,52	0,002	0,38	0,55	0,003	0,48	0,55	0,005	1,00	8,26	0,034	0,41	8,80	0,062	0,71	7,13	0,263	3,69
	03/09	0,51	0,002	0,41	0,54	0,002	0,41	0,54	0,013	2,38	8,45	0,035	0,42	8,91	0,065	0,73	6,49	0,515	7,93
	05/09	0,49	0,002	0,47	0,53	0,003	0,62	0,53	0,006	1,05	8,58	0,037	0,43	9,08	0,079	0,87	6,51	0,193	2,97
	07/09	0,48	0,003	0,65	0,51	0,004	0,69	0,52	0,015	2,82	8,85	0,060	0,68	9,48	0,109	1,15	6,49	0,500	7,70
	10/09	0,45	0,003	0,56	0,49	0,004	0,78	0,52	0,017	3,19	9,13	0,040	0,44	9,68	0,105	1,08	6,02	0,512	8,51
13/09	0,43	0,001	0,29	0,47	0,002	0,46	0,50	0,005	0,97	9,36	0,036	0,38	9,93	0,058	0,58	6,12	0,137	2,24	
Castellana	25/08	0,46	0,011	2,47	0,40	0,000	0,05	0,45	0,000	0,04	7,65	0,456	5,96	10,53	0,056	0,53	8,52	0,041	0,48
	27/08	0,46	0,002	0,35	0,41	0,000	0,08	0,45	0,000	0,06	7,32	0,067	0,92	10,50	0,045	0,43	8,66	0,033	0,38
	29/08	0,46	0,002	0,50	0,41	0,001	0,14	0,46	0,000	0,05	7,47	0,094	1,26	10,51	0,033	0,31	8,72	0,019	0,22
	30/08	0,46	0,002	0,45	0,41	0,001	0,13	0,46	0,000	0,08	7,42	0,083	1,12	10,47	0,038	0,36	8,72	0,035	0,40
	01/09	0,45	0,003	0,67	0,42	0,000	0,11	0,46	0,001	0,15	7,54	0,089	1,18	10,56	0,029	0,28	8,69	0,032	0,37
	03/09	0,45	0,002	0,48	0,42	0,000	0,10	0,46	0,000	0,06	7,51	0,089	1,18	10,57	0,041	0,39	8,68	0,021	0,25
	07/09	0,45	0,002	0,49	0,42	0,000	0,08	0,46	0,000	0,07	7,50	0,091	1,21	10,65	0,018	0,17	8,75	0,015	0,18
	13/09	0,45	0,001	0,14	0,43	0,000	0,04	0,47	0,000	0,03	7,59	0,031	0,41	10,77	0,010	0,10	8,78	0,007	0,07
Vasangel	29/08	0,40	0,007	1,65	0,51	0,006	1,18	0,50	0,006	1,25	7,36	0,082	1,11	10,51	0,041	0,39	10,13	0,042	0,41
	30/08	0,38	0,007	1,92	0,47	0,010	2,15	0,47	0,006	1,29	7,60	0,072	0,95	10,77	0,122	1,13	10,25	0,050	0,49
	01/09	0,33	0,004	1,21	0,42	0,006	1,40	0,44	0,003	0,70	8,06	0,047	0,58	11,26	0,117	1,04	10,31	0,049	0,47
	03/09	0,31	0,004	1,35	0,39	0,004	1,01	0,43	0,002	0,47	8,36	0,057	0,68	11,58	0,128	1,10	10,32	0,044	0,43

Apéndice 13. Estadísticas de las regresiones realizadas para la curva de calibración del sensor Diviner 2000.

13.1. Resumen Sensor

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0,31891432
Coeficiente de determinación R ²	0,10170634
R ² ajustado	0,08721773
Error típico	0,07026164
Observaciones	64

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	0,03465436	0,03465436	7,01974	0,01021462
Residuos	62	0,30607525	0,0049367		
Total	63	0,34072962			

	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	0,33645276	0,04604669	7,3067748	6,32E-10	0,24440675	0,428499	0,244407	0,4284988
Variable X 1	0,31568658	0,11915038	2,64948029	0,01022	0,07750837	0,553865	0,077508	0,5538648

Apéndice 13. (Continuación)

13.2. Resumen Ajuste

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,96625524
Coefficiente de determinación R ²	0,93364919
R ² ajustado	0,93257901
Error típico	0,01909555
Observaciones	64

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	0,31812193	0,31812193	872,427	3,1308E-38
Residuos	62	0,02260769	0,00036464		
Total	63	0,34072962			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	0,00036178	0,01561678	0,02316583	0,98159	-0,0308557	0,031579	-0,030856	0,031579
Variable X 1	0,99930246	0,03383237	29,5368772	3,13E-38	0,9316725	1,066932	0,931673	1,0669324