

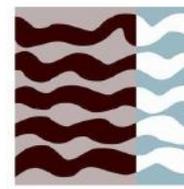


Universidad
Politécnica
de Cartagena



UPCT

**Escuela Técnica Superior de
Ingeniería Agronómica**



ETSIA

***Máster Universitario
en Ingeniería Agronómica***

Optimización del riego mediante el uso de
sensores de humedad del suelo en un cultivo de
naranjos en el Campo de Cartagena

Autor: Ramón Antonio Moreno Olmo

Dirección: José Alberto Acosta Avilés

Codirección: Silvia Martínez Martínez

Cartagena, enero de 2023

Agradecimientos

Agradecer a mis tutores José Alberto y Silvia su rápida respuesta siempre a pesar de yo no poder estar involucrado al cien por cien con el trabajo por mi situación laboral.

Agradecer a mi madre por animarme a estudiar el máster, y ver mi potencial desde pequeño y guiarme hasta el punto donde estoy, sin ella no lo habría conseguido.

Agradecer a Paqui Flores su ayuda en este trabajo y en general apoyarme en los momentos que lo necesito, me alegra el poder contar con personas como tú en mi vida.

Por último, agradecer a la empresa Widhoc por brindarme la oportunidad de poder realizar este ensayo.

ÍNDICE

Agradecimientos	2
INDICE FIGURAS	4
INDICE DE TABLAS	5
Resumen.....	6
Abstract	6
1.Introducción	7
1.1. Importancia del agua en la agricultura	7
1.2. Uso de sensores para optimizar el agua de riego	8
1.3. Cultivo del naranjo	9
2.Objetivos	11
3.Material y métodos.....	11
3.1. Parcela de estudio	11
3.2. Cálculo de las necesidades hídricas del cultivo.....	13
3.3. Equipos utilizados	14
3.3.1. Equipo 1	15
3.3.2. Equipo 2.....	17
3.3.3. Tensiómetros.....	18
3.3.4. Resumen equipos.....	19
3.4. Datalogger D WIDE.....	20
3.5. Servidor	20
3.6. Instalación de los equipos.....	21
3.7. Toma de datos en campo.....	23
4. Resultados y discusión	23
4.1. Propiedades del suelo	23
4.2. Cálculo y comparación de la capacidad de campo y punto de marchitez permanente ..	26
4.3. Potencial matricial.....	29
4.4. Curvas de retención de humedad	31
4.5. Agua de riego	32
4.6. Necesidades hídricas del cultivo e interpretación de datos a lo largo del ciclo de cultivo	33
5. Conclusiones.....	38
6. Bibliografía	39
7. Anexos	40

INDICE FIGURAS

Figura 1. Evolución de la producción en la Región de Murcia. Fuente: Consejería de Agua, Agricultura, Ganadería, Pesca y Medio Ambiente. Estadística Agraria Regional.....	7
Figura 2. Evolución de las hectáreas cultivadas en la Región de Murcia. Fuente: Consejería de Agua, Agricultura, Ganadería, Pesca y Medio Ambiente. Estadística Agraria Regional.....	8
Figura 3. Evolución de las hectáreas dedicadas a la producción de naranja a nivel mundial. Fuente: FAO.....	10
Figura 4. Evolución de las toneladas obtenidas en la producción de naranja a nivel mundial. Fuente: FAO.....	10
Figura 5: Imagen satelital de la parcela donde se ha realizado el ensayo a escala 1/100. Fuente: Google Earth.....	12
Figura 6. Primer equipo con el datalogger, el panel solar y los cables sobrantes de los sensores instalados.	15
Figura 7. Sensor TDR-315 que mide humedad volumétrica del suelo. Fuente: AClima	17
Figura 8. Sensor TEROS12 que mide humedad volumétrica del suelo. Fuente: Lab ferrer	18
Figura 9. Tensiómetro de 30 cm. Fuente: Irrrometer.....	18
Figura 10. Resultados del análisis granulométrico realizado al suelo de la parcela de estudio.	24
Figura 11. Representación de los datos recogidos por los sensores TEROS12	24
Figura 12. Representación de los datos recogidos por los sensores TDR315	25
Figura 13. Representación de los datos recogidos por los sensores TDR310	25
Figura 14. Capacidad de campo y punto de marchitez permanente para los diferentes sensores, análisis y modelos utilizados en el estudio.	28
Figura 15. Representación de los datos recogidos por los sensores TEROS21	30
Figura 16. Representación de los datos recogidos por los tensiómetros	30
Figura 17. Curva de retención de humedad de los sensores TEROS12 superficial y TDR315	31
Figura 18. Curva de retención de humedad de los sensores TEROS12 profundo y TDR315	32
Figura 19. Curva de retención de humedad: tensiómetro superficial y el sensor TDR315.....	32
Figura 20. Curva de retención de humedad: tensiómetro profundo y el sensor TDR315	32
Figura 21. Parámetros hídricos obtenidos durante la realización del ensayo por el riego aportado y la climatología de la zona	35
Figura 22. Medidas de potencial matricial obtenidas durante toda la realización del ensayo ..	36
Figura 23. Medidas de humedad volumétrica obtenidas durante la realización del ensayo para los sensores TDR315 superficial y profundo	36
Figura 24. Medidas de conductividad eléctrica obtenidas durante la realización del ensayo para los sensores TDR315 superficial y profundo	37

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Plan de abonado para el cultivo de naranjo.....	11
Tabla 2. Sensores y profundidades del equipo 1	19
Tabla 3. Sensores y profundidades del equipo 2	19
Tabla 4. Profundidades de los tensiómetros instalados	20
Tabla 5. Resultados obtenidos del análisis físico-químico	23
Tabla 6. Media y desviación típica obtenida para que los sensores TEROS12, TDR310y TDR315	25
Tabla 7. Capacidad de campo y punto de marchitez permanente de los sensores TEROS12, TDR310 Y TDR315.....	26
Tabla 8. Modelos para obtener el contenido de humedad volumétrica retenido a -33kPa.....	27
Tabla 9 : Modelos para obtener el contenido de humedad volumétrica retenido a -1500kPa..	27
Tabla 10. Parámetros usados en los modelos de contenido de humedad volumétrica	27
Tabla 11. Capacidad de campo y punto de marchitez permanente obtenidos con los modelos, en el laboratorio y los sensores	27
Tabla 12. Media y desviación típica obtenidas para los sensores de potencial matricial TEROS21 y los tensiómetros.....	30
Tabla 13. Resultados obtenidos en el análisis de agua	33
Tabla 14. Medidas de humedad volumétrica de los sensores TEROS12, TDR310 y TDR315, riego y precipitaciones	40
Tabla 15. Medidas de potencial de los sensores TEROS21, los tensiómetros, riego y precipitaciones	40

Resumen

El Decreto-Ley n.º 3/2020, de 27 de julio, de recuperación y protección del Mar Menor, en su Artículo 32. Suministro de información relativa al volumen real de agua suministrada y monitorización de su aplicación al riego, apartado 2, indica que “las explotaciones agrícolas de regadío deberán contar con dispositivos para la medición del volumen de agua de riego aplicado por sector, y con una monitorización por sensores del contenido y/o potencial matricial del agua en el suelo (disponibilidad de agua para el cultivo)”. Por este motivo es necesario evaluar los programas de riego que se están desarrollando en distintos cultivos, con el fin de optimizarlos si fuese necesario, y de este modo garantizar el cumplimiento de la citada ley.

Este trabajo fin de master se desarrolló en una explotación comercial de naranjos donde se instalaron sensores de potencial matricial, sensores de humedad volumétrica y conductividad eléctrica del suelo, así como tensiómetros, todos ellos a dos profundidades (30-60 cm). Los datos de los sensores eran enviados automáticamente cada media hora a través del datalogger y tecnología 2G a un servidor donde son almacenados y tratados, mientras que los datos de los tensiómetros eran recogidos manualmente cada semana. El volumen de riego aplicado era recogido a través de un caudalímetro instalado en la manga de riego. Se calculó las necesidades hídricas del cultivo a través de la metodología de la FAO para evaluar si el volumen de agua aplicado era suficiente. De igual modo, se compararon las medidas de los diferentes sensores de humedad volumétrica tanto entre ellos como con modelos de regresión lineal de varios autores. Además, se compararon las medidas de potencial matricial del sensor TERS21 y las de los tensiómetros, denotando que estos últimos mayoraban levemente las medidas respecto a los sensores, aunque ambos detectaron correctamente riegos y precipitaciones. Se concluyó que los sensores TDR315 eran los óptimos para medir la humedad volumétrica del suelo. Finalmente, se demostró que los modelos de Delgado y Barreto y de Malavé son útiles para estimar la capacidad de campo y el punto muerto de marchitez en suelos franco arcillosos.

Abstract

Decree-Law No. 3/2020, of July 27, recovery and protection of the Mar Menor, in its Article 32. Provision of information regarding the actual volume of water supplied and monitoring of its application to irrigation, section 2, indicates that "irrigated farms must have devices for measuring the volume of irrigation water applied by sector, and with sensor monitoring of the content and/or matric potential of water in the soil (availability of water for crop)". For this reason, it is necessary to evaluate the irrigation programs that are being developed in different crops, in order to optimize them if necessary, and thus guarantee compliance with the aforementioned law.

This master's thesis was developed in a commercial orange grove where matric potential sensors, volumetric humidity and soil electrical conductivity sensors were installed, as well as tensiometers, all of them at two depths (30-60 cm). The data from the sensors were sent automatically every half hour through the datalogger and 2G technology to a server where they are stored and processed, while the data from the tensiometers were collected manually every week. The applied irrigation volume was collected through a flow meter installed in the irrigation pipe. The water needs for the crop were calculated using the FAO methodology to assess whether the volume of water applied was enough. In addition, the measurements of the different volumetric humidity sensors were compared among themselves and with linear regression models from various authors. In addition, the matric potential measurements from the TERS21 sensor and those of the tensiometers were compared, denoting that tensiometers slightly increased the measurements with respect to the sensors, although both correctly detected irrigation and precipitation. It was concluded that the TDR315 sensors were the best for measuring volumetric soil moisture. Finally, it was shown the Delgado and Barreto and Malavé models are useful to estimate the field capacity and the wilting point in clay loam soils.

1.Introducción

1.1. Importancia del agua en la agricultura

El agua es un bien escaso en la Región de Murcia, y debido a la insuficiencia e irregularidad de las precipitaciones, se ha convertido en un bien de alto valor en nuestra región.

Esta falta de agua está creando serios problemas ambientales, como es la desertificación de la tierra. Además, de acuerdo con Moreno González y López Martínez (2012), no toda la precipitación está disponible, ya que el 85% regresa a la atmósfera y solo el 15% restante podría ser utilizada. Por estas razones, en el mundo, y especialmente en esta región, es muy importante la conservación de este recurso, lo cual requiere importantes esfuerzos tanto económicos como técnicos. No obstante, a medida que avanza la tecnología van surgiendo herramientas que pueden ser utilizadas por los agricultores y técnicos de campo que ayudan en esta labor.

Se ha de destacar que uno de los ejes centrales, desde el punto de vista económico y social, en la Región de Murcia es la agricultura, la cual tanto en producción como en hectáreas cultivadas de cultivos herbáceos y leñosos de regadío (Figuras 1 y 2) han ido en aumento en los últimos años, y cuya tendencia es la de continuar aumentando en los próximos años. Esta actividad necesita un consumo de agua constante en el tiempo, por ello es necesario, para que sea sostenible en el futuro, optimizar al máximo posible el uso del agua.

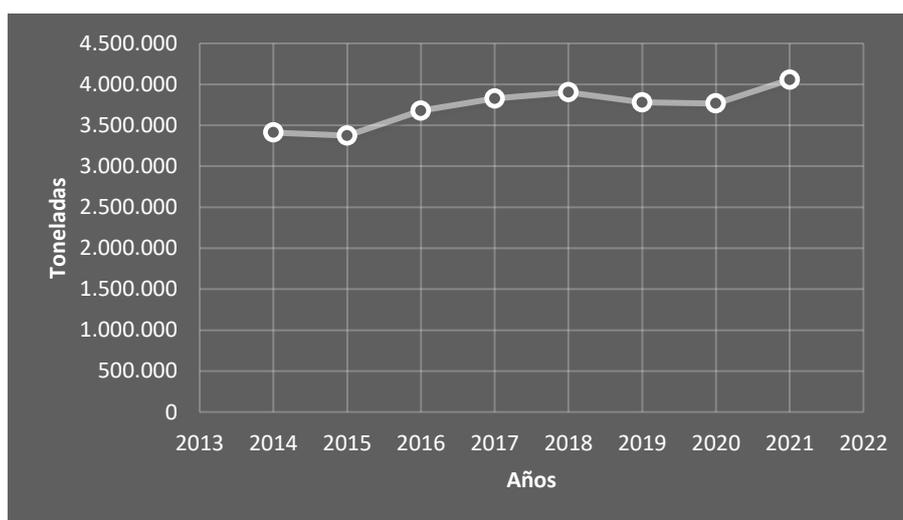


Figura 1. Evolución de la producción en toneladas en la Región de Murcia. Fuente: Consejería de Agua, Agricultura, Ganadería, Pesca y Medio Ambiente. Estadística Agraria Regional

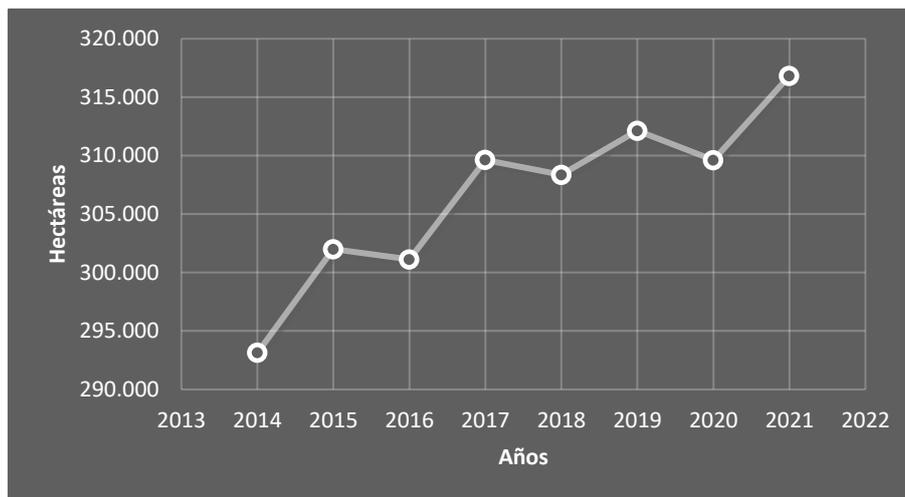


Figura 2. Evolución de las hectáreas cultivadas en la Región de Murcia. Fuente: Consejería de Agua, Agricultura, Ganadería, Pesca y Medio Ambiente. Estadística Agraria Regional

1.2. Uso de sensores para optimizar el agua de riego

La práctica del riego consiste en aplicar al suelo la cantidad óptima de agua en el momento adecuado para que las plantas puedan aprovecharla. Entre las diferentes técnicas para motorizar el agua en el suelo y optimizar el riego, destaca el uso de sensores de humedad y de potencial hídrico del suelo. Mediante la aplicación de estos dispositivos es posible medir de manera continua la humedad del suelo a nivel radicular, pudiendo conocer además la disponibilidad de agua para los cultivos (Mzezewa *et al.*, 2011).

Los métodos clásicos de riego agrícola suelen ser ineficientes y consumen muchos recursos. La agricultura de precisión supone un avance en la productividad, pues desarrolla estrategias para recopilar, procesar y analizar datos temporales y espaciales, y combinarlos para dar soporte a las decisiones de gestión de recursos (Grindlay y Lizárraga, 2012). En este sentido, permite incrementar la productividad hídrica, nutritiva e incluso de mano de obra. El diseño y la configuración de parcela para el uso de estas nuevas tecnologías es clave garantizar el uso correcto y el mayor aprovechamiento de esta inversión, lo que permitirá garantizar la mayor productividad posible y una mejor gestión del agua y de la solución nutritiva empleadas.

Para cultivos abiertos y en invernadero, medir y controlar los niveles de agua y nutrientes en el suelo es un requisito necesario para optimizar la gestión del agua en zonas semiáridas. Por lo que el uso de sensores es una herramienta que ayudará a superar las limitaciones que puedan surgir en el futuro, ya que la demanda de agua sigue creciendo, mientras que su disponibilidad es cada día más limitada. El control preciso del riego (cantidad y tiempo) permitirá mejorar el rendimiento del agua y minimizar o eliminar las pérdidas (lixiviación y escorrentía), así como gestionar mejor los recursos hídricos.

Un parámetro de gran importancia en la agricultura, y concretamente para la adecuada gestión de los recursos hídricos e interpretación de los modelos meteorológicos, es la humedad del suelo. Existen multitud de metodologías para estimar dicha humedad: métodos gravimétricos, sondas de neutrones, tensiómetros, sensores capacitivos, etc. Pero estos métodos presentan algunos inconvenientes y limitaciones, por ejemplo, el método gravimétrico es destructivo y presenta una precisión sumamente baja, no supera el 3% (Alva *et al.*, 1999). De igual modo, los sensores capacitivos, aunque presentan una medida indirecta más precisa, al tratarse de un método indirecto, para que las mediciones se aproximen a la realidad es necesaria

tanto una calibración a partir de un estudio del terreno como que se mantenga una relación coherente entre el contenido de humedad volumétrica presente en el suelo y el coeficiente dieléctrico que utiliza la sonda para medirlo.

No obstante, para una correcta interpretación de los datos suministrados por los sensores, también es necesaria la comparación entre el contenido de humedad del suelo con otras propiedades de este, como son la textura y la densidad, siempre teniendo en cuenta la importante variabilidad espacial que presentan estas propiedades en los campos agrícolas. El efecto de la textura en la dinámica del agua del suelo es predominante, afectando a su almacenamiento y su movilidad, el cual depende de la proporción de arcilla, arena y limo (Porta *et al.*, 2003, Henríquez y Cabalceta, 2012). Esto hace que el método de determinación del agua en el suelo sea muy importante, sobre todo cuando se realizan mediciones directas en el campo ya que tiene que permitir tomar decisiones rápidas.

A pesar de que el modo de determinación de la humedad del suelo directamente en campo ha sido mejorado significativamente en los últimos años, dando lugar al desarrollo de diversos tipos de instrumentos disponibles en el mercado, la mayoría de ellos necesitan ser calibrados, así como ser usados bajo ciertas condiciones, lo que hace necesario conocer el comportamiento de los mismos en diferentes tipos de suelos antes de decidir cuál de ellos utilizar.

1.3. Cultivo del naranjo

El naranjo es una planta que pertenece a la familia *Rutaceae* y pertenece al género *Citrus*. Se cultiva principalmente por su fruta, la naranja, la cual es muy importante en la alimentación ya sea en fresco o procesado.

Según la FAO, a nivel mundial, España en 2021 se sitúa en el puesto número seis en cuanto a producción de naranja, haciéndolo un cultivo importante en el país, lo cual ha sido debido a la climatología de la zona, siendo esta idónea para que prosperen los árboles, especialmente en la zona mediterránea.

La evolución en cuanto a hectáreas cultivadas a nivel mundial (Figura 3) ha tenido un declive leve a lo largo de los años, pasando de 151.000 ha en 2013 a 141.000 ha en 2020. Sin embargo, esto no ha afectado a su producción (Figura 4), que se han mantenido relativamente estable, con unos valores cercanos a 3.500.000 toneladas.

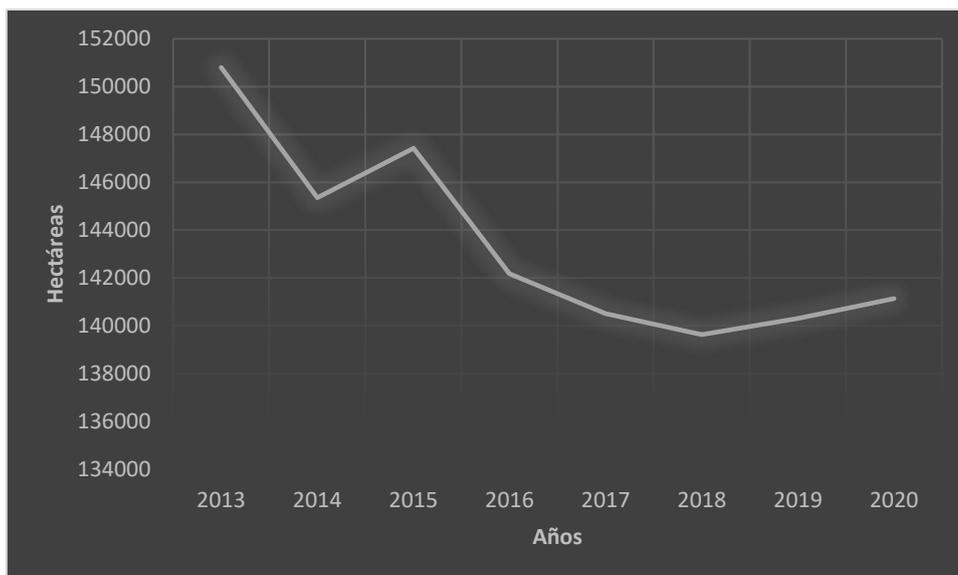


Figura 3. Evolución de las hectáreas dedicadas a la producción de naranja a nivel mundial. Fuente: FAO

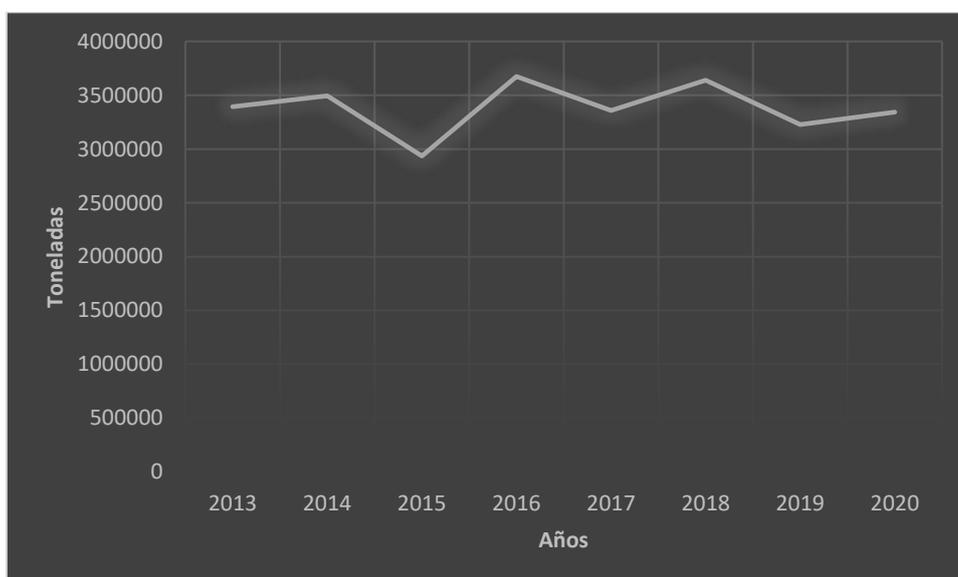


Figura 4. Evolución de las toneladas obtenidas en la producción de naranja a nivel mundial. Fuente: FAO

Según infoagro las necesidades de riego varían entre 6000 y 7000 m³ ha⁻¹ por ciclo, el cual se realiza principalmente por riego localizado mediante goteros, siempre teniendo en cuenta que mediante los riegos el agua llegue a la zona de actividad radicular.

Los naranjos absorben nutrientes todo el año, pero absorben más durante la floración y la formación del fruto. El calcio (Ca) es el elemento más abundante la parte vegetativa de la planta, seguido de nitrógeno (N), Potasio (K), Magnesio (Mg), Azufre (S) y fósforo (P). Pero el N y K están en principalmente en el fruto. Alrededor del 30% del total de N en las plantas, el 70% del K es en la naranja.

En lo que respecta a la fertilización, es de vital importancia tener en cuenta el nitrógeno procedente de la nitrificación del humus del suelo durante un año. También tiene especial

interés el aporte de calcio para evitar fisiopatías en el cultivo. Un ejemplo de plan de abonado para el cultivo de naranja sería el indicado en la Tabla 2.

Tabla 1. Plan de abonado para el cultivo de naranja. Fuente: elaboración propia

En UF	N	P2O5	K ₂ O	CaO
Necesidades maximas	240	60	120	0
Aportes agua riego	0	0	10	171
Aportes MO Suelo	1	0	0	0
Aportes Fertilizantes	58	30	100	0
Deficit	181	30	10	-171

Este plan de abonado viene definido en unidad fertilizante, la cual hace referencia a un kg puro de cada uno de los nutrientes. En este aparecen los principales compuestos que determinan en gran parte el correcto desarrollo de los cítricos, el nitrógeno para el cuajado y el crecimiento foliar, potasio para la madurez del fruto, y calcio para prevenir el rajado.

Hay que tener en cuenta los valores máximos que se pueden llegar a aportar, ya sea mediante aplicación directa a base de fertilizantes o indirectamente a través del agua de riego mediante la fertirrigación. Tiene importancia también la liberación de ciertos nutrientes desde la materia orgánica presente en el suelo tras su mineralización.

2. Objetivos

El objetivo general de este estudio es evaluar el uso de tres sensores de humedad de suelo para la optimización del riego en un cultivo de naranjos en el Campo de Cartagena.

Los objetivos específicos son:

- Caracterización del suelo de la parcela de estudio.
- Cálculo de las necesidades de riego.
- Instalación de los sensores de humedad de suelo.
- Seguimiento del contenido de humedad del suelo durante el ciclo de cultivo.
- Elección del tipo de sensor más adecuado para el control de la humedad de suelo.
- Cálculo de las necesidades hídricas del cultivo, para una posterior optimización del regadío.
- Comparación de los diferentes modelos de sensores instalados en la misma parcela de estudio junto con diferentes modelos de regresión lineal.

3. Material y métodos

3.1. Parcela de estudio

La parcela donde se realizó el ensayo pertenece a una empresa hortofrutícola del campo de Cartagena. Se trata de una parcela con 3,24 ha de superficie dedicadas al cultivo de naranjos (Figura 5).



Figura 5: Imagen satelital de la parcela donde se ha realizado el ensayo. Fuente: Google Earth

La topografía general de la zona del Campo de Cartagena se caracteriza por una amplia llanura, con ligera pendiente hacia el mar. Destacan suelos de textura franca, especialmente caliza, con moderada capacidad de intercambio catiónico, bajos contenidos en materia orgánica, nitrógeno y fósforo asimilable, moderados en potasio asimilable y ligeramente salinos.

Según la CRCC (Comunidad de Regantes del Campo de Cartagena), la temperatura media anual en el Campo de Cartagena es de 17,5 °C y la precipitación media anual es de unos 300 mm. Vale la pena señalar que las probabilidades de registrar una gran cantidad de lluvia en un mes determinado son pequeñas, e incluso en otoño y primavera hay años en los que no se registran precipitaciones. Debido a lo mencionado anteriormente el clima del Campo de Cartagena se puede definir como árido.

La parcela tiene los siguientes datos de plantación y de riego:

- Separación entre árboles: 4,5 m
- Separación entre filas de árboles: 6,5 m
- Goteros por árbol: 6 goteros
- Goteros hasta final de línea: 36 goteros
- Caudal emisor: 2,2 l h⁻¹

La naranja cultivada pertenece a la variedad navelpower. Los árboles en el momento del ensayo presentaban una edad de 22 años.

Algunas de las labores habituales en la parcela son labrar las calles de los árboles para favorecer aireación radicular, así como realizar una poda periódicamente para rejuvenecer la madera y darle una forma más homogénea al árbol.

En el sistema de riego se disponen dos mangas a los laterales de los árboles con un total de 6 goteros por árbol de un caudal 2,2 l h⁻¹, son goteros auto compensantes con eficiencia de 0,9.

3.2. Cálculo de las necesidades hídricas del cultivo

Para el cálculo de las necesidades hídricas del cultivo se ha utilizado el método de la evapotranspiración potencial del cultivo de referencia (*Ecuación de Penman-Monteith*), multiplicándolo por la k_c de cultivo correspondiente.

Según la FAO (Allen *et al.*, 2006), los requerimientos de agua de los cultivos se definen como la cantidad de agua necesaria para compensar las pérdidas por evapotranspiración. El requerimiento de agua del cultivo se refiere al agua del cultivo que es necesaria proporcionar mediante riego o precipitación.

Las necesidades básicas de riego representan la diferencia entre las necesidades de agua de los cultivos y la precipitación disponible. En este sentido, la principal estrategia para determinar los requerimientos hídricos de los cultivos, con referencia a parámetros como la evapotranspiración del cultivo (ET_0) utilizada a través de la ecuación FAO Penman-Monteith para determinar los requerimientos de riego, también requiere conocer la disponibilidad de precipitación. El comportamiento del agua en el suelo estudiado puede determinar la cantidad de riego, comprender la humedad volumétrica y el potencial hídrico, y comprender cómo el suelo retiene el agua debido a sus propiedades físicas, permitiendo intervalos de tiempo entre riegos.

La ET_0 es la evapotranspiración potencial del cultivo de referencia. Se calcula en base a diferentes variables climáticas (temperatura, humedad relativa, radiación solar, velocidad del viento, etc.). Hace referencia al agua que pierde por evaporación el suelo y por transpiración un cultivo de referencia. Este dato está disponible diariamente en la red de estaciones climáticas del SIAM (siam.imida.es).

La evapotranspiración de referencia (ET_0) fue definida por Allen *et al.* (1998) como: *“la tasa de evapotranspiración de una superficie extensa de gramíneas verdes de 12 cm de altura, uniforme, de crecimiento activo, con una resistencia a la superficie de 70 s m^{-1} y un albedo de 0,23 que asombran totalmente el suelo y que no escasea el agua”*.

La ET_c es la evapotranspiración potencial del cultivo. Hace referencia a toda el agua que puede perder diariamente el cultivo (en este caso el naranjo) por evaporación del suelo y por transpiración del cultivo. Se calcula multiplicando ET_0 por un coeficiente corrector (coeficiente de cultivo, K_c) que depende del tipo de cultivo y de la fase fenológica en la que se encuentra.

La ET consta de dos procesos: la evaporación directa del suelo y la transpiración de las plantas. Ocurren al mismo tiempo, por lo que se ha hecho un gran esfuerzo para cuantificarlos por separado (Zhang *et al.*, 2013). Este parámetro es importante porque representa la cantidad de agua que los cultivos pueden llegar a perder en un día, en un área específica, por lo que se puede determinar si se requiere riego; los resultados se pueden dar en altura por unidad de agua o tiempo (Allen *et al.*, 2006).

Existen diferentes metodologías para realizar estimaciones más o menos exactas de la evapotranspiración de los cultivos, ET_c . Pero el método más usado debido a sus resultados y facilidad de aplicación es el FAO56, el cual viene definido por los parámetros de la evapotranspiración en condiciones estándar, de referencia y el coeficiente de cultivo, en el cual vienen implicados los efectos de transpiración de plantas y el suelo (Allen *et al.*, 1998).

Para calcular la ET_c , se debe calcular previamente la evapotranspiración de referencia (ET_0) mediante la ecuación de FAO Penman-Monteith (Allen *et al.*, 2006):

$$E_{to} = \frac{0.408\Delta(Rn - G) + Y * \frac{900}{T + 273} * u_2(es - ea)}{\Delta + Y(1 + 0,34u_2)}$$

Donde:

- ET_0 : evapotranspiración de referencia (mm día^{-1})
- Rn: radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ m}^{-2}\text{día}^{-1}$)
- Ra: radiación extraterrestre (mm día^{-1})
- G: flujo de calor de suelo ($\text{MJ m}^{-2}\text{día}^{-1}$)
- T: t^{a} media del aire a 2 metros de altura ($^{\circ}\text{C}$)
- u_2 : velocidad media del viento a 2 metros de altura (m s^{-1})
- es: presión de vapor de saturación (kPa)
- ea: presión real de vapor (kPa)
- es-ea: déficit de presión de vapor (kPa)
- Δ : pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$)
- Y: constante psicrométrica ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$)

Según Allen *et al.* (2006), “El coeficiente de cultivo (K_c) es la relación entre la evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar con la evapotranspiración de referencia (ET_C/ET_0), que está documentado por muchos autores para la mayoría de los cultivos de importancia agrícola”.

$$ET_C = K_C * ET_0$$

Donde:

- ET_C : evapotranspiración del cultivo [mm d^{-1}].
- K_c : coeficiente del cultivo [adimensional].
- ET_0 : evapotranspiración del cultivo de referencia [mm d^{-1}].

La relación entre los términos anteriores indica que la ET_C resulta en una demanda diaria de agua, ya que las condiciones climáticas provocan pérdidas de agua diariamente, sin embargo, el riego no se realiza todos los días para satisfacer dicha demanda. Esto se debe a que el suelo actúa como un reservorio, capaz de almacenar el agua recibida en sus microporos, evitando que se seque por completo y abasteciendo al cultivo durante un tiempo. Cuando el suelo se seca hasta un nivel que no cause daño al cultivo, se restablecen las condiciones de humedad mediante el riego (Gurovich, 1985).

Por lo tanto, además de las condiciones meteorológicas que van a intervenir en el estado del cultivo, es de vital importancia ser conscientes de que las propiedades del suelo van a influir de manera determinante en el contenido de humedad en el suelo, ya que las fuerzas que actúan sobre el agua en su retención están estrechamente relacionadas con las partículas coloidales que conforman el suelo.

3.3. Equipos utilizados

Al tratarse de un gran número de sensores fue imposible conectar todos a un mismo datalogger, ya sea por el número de conectores o por el gran consumo de batería que presentaría, haciendo imposible el funcionamiento de forma autónoma mediante energía solar. Por este motivo se agruparon los sensores en dos equipos instalados en calles paralelas:

3.3.1. Equipo 1

El equipo estaba formado por una estaca de 3 m de altura para que el panel solar sobresalga por encima del arbolado y obtenga suficiente radiación solar para funcionar de forma autosuficiente y constantemente (Figura 6).



Figura 6. Panel solar del equipo alojado por encima del árbol

Alojado en la estaca se encontraba el datalogger (Figura 7), que es “el corazón del equipo”, el cual posteriormente se describirá en detalle.



Figura 7. Primer equipo con la estaca con el datalogger, el panel solar y los cables sobrantes de los sensores instalados.

El equipo también presentaba un sensor ambiental llamado “WES” (Figura 8). El sensor “Widhoc Enviromental Sensor (WES)” es un sensor ambiental que es capaz de medir los siguientes parámetros ambientales: Humedad Relativa, Temperatura y Presión. El sensor dispone de un escudo de radiación de gran calidad que protege el sensor y su electrónica de la lluvia y de la radiación solar. Gracias a sus características y forma, el flujo de aire fluye en su interior, lo que permite la obtención de medidas extremadamente confiables.



Figura 8. Sensor ambiental WES

Contaba también con un caudalímetro que se encontraba conectado a la manga de riego de la calle de la parcela donde se situaba el equipo instalado, el cual, a su vez, estaba conectado al datalogger. Se encargaba de dar las mediciones del caudal que pasa por la manga de riego en litros hora⁻¹ a través de un emisor de pulsos que lleva integrado (Figura 9).



Figura 9. Caudalímetro instalado en la manga de riego de la parcela de estudio

Por otro lado, tenía instalados, a una profundidad de 20 y 40 cm, dos sensores TEROS21 (Figura 10). El TEROS21 es un sensor de potencial de agua de matriz, con un acabado de cerámica que absorbe el agua, proporciona lecturas de potencial de agua y temperatura sin sensibilidad a las sales.



Figura 10. Sensor TEROS21 que mide potencial matricial del suelo. Fuente: Lab ferrer

Este equipo también presentaba dos sensores TDR310 instalados a 30 y 60 cm de profundidad (Figura 11).



Figura 11. Sensor TDR-310 que mide humedad volumétrica del suelo. Fuente: ACCLIMA

Por último, este equipo presentaba dos sensores TDR315 instalados a 30 y 60 cm de profundidad (Figura 12).



Figura 12. Sensor TDR-315 que mide humedad volumétrica del suelo. Fuente: ACCLIMA

Tanto el TDR310 como el TDR315 son sensores que funcionan en base a que la velocidad de propagación de una onda electromagnética se hace más lenta en función de la presencia de agua en el suelo. Esta clase de sensores envían una onda electromagnética a través de unas varillas de metal y miden el tiempo que tarda la onda en viajar por el suelo y regresar, convierte el tiempo que tarda en lecturas de la humedad del suelo en todas las condiciones de temperatura. La principal diferencia es su longitud midiendo las varillas 10 y 15 cm y afectando esto al volumen de suelo medido y, por tanto, a los valores obtenidos.

3.3.2. Equipo 2

En la Figura 13 se presenta la instalación del segundo de los equipos instalado en una calle paralela a la descrita para el equipo 1.



Figura 13. Segundo equipo con la estaca con el datalogger, el panel solar y los cables sobrantes de los sensores instalados.

Este equipo tenía dos sensores TEROS 12 instalados a 30 y 60 cm de profundidad (Figura 14). Se trata de un sensor que mide el contenido volumétrico de humedad en el suelo (volumen de agua contenida por volumen total de suelo), su temperatura y su conductividad eléctrica. Este sensor puede medir la conductividad eléctrica aparente o “bulk” y la denominada “del agua de poro”.



Figura 14. Sensor TEROS12 que mide humedad volumétrica del suelo. Fuente: Lab ferrer

3.3.3. Tensiómetros

Se trata de dos tensiómetros del fabricante Irrrometer instalados a profundidades de 30 y 60 cm (Figuras 15 y 16). El tensiómetro mide los cambios en la tensión del agua en el suelo, es decir, determina los cambios en el contenido de humedad del suelo.

A medida que el suelo se seca, las partículas del suelo retienen la humedad con más fuerza. Los tensiómetros miden la fuerza del suelo para retener el agua. La mayoría de estos tienen una punta de cerámica adherida a la columna de agua. El tensiómetro se instala a la profundidad deseada (medidas comerciales de 15, 30, 60 y 90 cm). A medida que el suelo se seca, comienza a absorber agua a través de la cerámica, creando succión en la columna de agua. Esta fuerza se mide con un manómetro. Los tensiómetros funcionan bien en suelos con alto contenido de humedad, pero tienden a perder contacto con el suelo cuando éste se encuentra muy seco.



Figura 15. Tensiómetro de 30 cm. Fuente: Irrrometer



Figura 16. Tensiómetros Irrometer de 30 cm y 60 cm instalados en la parcela de estudio

3.3.4. Resumen equipos

A continuación, se muestra una serie de tablas resúmenes de los equipos que hubo instalados en la parcela y sus respectivos sensores (Tablas 3, 4 y 5).

Tabla 2. Sensores y profundidades del equipo 1

EQUIPO 1	
Sensor	Profundidad (cm)
TEROS 12	30
TEROS 12	60
WES	-

Tabla 3. Sensores y profundidades del equipo 2

EQUIPO 2	
Sensor	Profundidad (cm)
TEROS21	20
TEROS21	40
TDR310	30
TDR310	60
TDR315	30
TDR315	60
Caudalímetro	-
WES	-

Tabla 4. Profundidades de los tensiómetros instalados

TENSÍÓMETROS	
Sensor	Profundidad (cm)
Tensiómetro	30
Tensiómetro	60

3.4. Datalogger D WIDE

El dispositivo D-WIDE es un datalogger multifunción compatible con una gran cantidad de sensores y protocolos de comunicación (Figura 17). Es un dispositivo muy versátil y compacto que puede utilizarse en una gran cantidad de aplicaciones y ámbitos diferentes. Es un dispositivo totalmente autónomo que se alimenta a través de baterías recargables y paneles, lo cual unido a sus características de muy bajo consumo permite una autonomía prácticamente ilimitada en condiciones de sol normales. La electrónica se encuentra dentro de una caja estanca (IP65) de policarbonato con gran resistencia a las condiciones ambientales y de muy reducidas dimensiones 120 x 120 x 90 mm.

El equipo permite la conexión de sensores con las siguientes interfaces de comunicación:

- SDI-12.
- En voltaje (0-5 V).
- En corriente (4–20 mA).
- Digital (De pulsos).



Figura 17. Datalogger D WIDE alojado en la estaca del equipo

3.5. Servidor

Los datos brutos son recogidos por los sensores y enviados por el datalogger al servidor, que tras pasarlos por una serie de ecuaciones matemáticas se las muestra al usuario en su panel de cliente de manera clara y concisa (Figura 18).

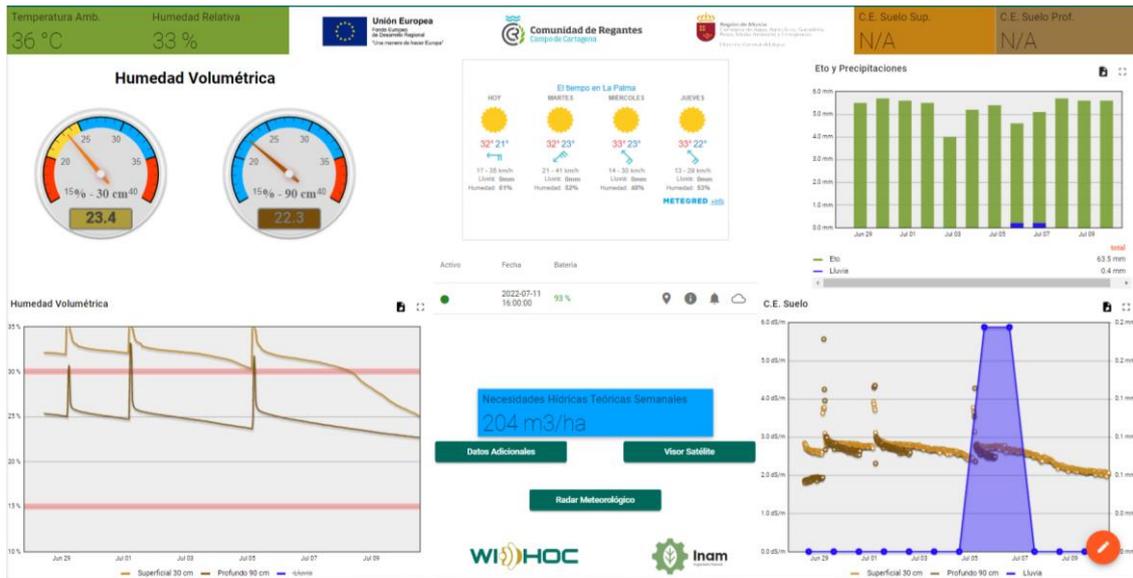


Figura 18. Representación de los datos en el servidor

La representación de los datos del estado de humedad del suelo incluye relojes con colores, así como graficas para que su interpretación sea más sencilla para el usuario.

3.6. Instalación de los equipos

La instalación de los equipos se realizó el día 30 de noviembre de 2021 usando una barrena, haciendo un agujero a 60 cm de profundidad máxima (Figura 19). Como se ha descrito anteriormente, estos equipos estaban compuestos por dos dataloggers con los sensores TERSO12, TDR310, TDR315, TERSO21 y WES conectados a ellos.



Figura 19. Técnico de Widhoc usando una barrena para realizar el agujero donde irán instalados los sensores a las profundidades correspondientes.

Tras la realización del agujero, se introdujeron en él los sensores de forma que queden bien alineados con el perfil del suelo a unos 15-20 cm del gotero, de este modo se asegura que los sensores queden dentro del bulbo húmedo que se formará cuando se realicen los riegos (Figura 20).



Figura 20. Técnico de Widhoc introduciendo los sensores en el agujero realizado con la barrena.

El equipo quedó distribuido de la siguiente manera (Figura 21):

- Cerca del agujero donde van instalados los sensores se localizará una estaca donde se aloja el datalogger junto con el panel solar y el sensor ambiental.
- En el suelo, clavados a dos profundidades, estaban los sensores de humedad volumétrica y potencial matricial, dentro del bulbo húmedo que genere el gotero. En el caso de que el equipo presente caudalímetro este irá situado en la manga de riego.



Figura 21. Imagen esquemática de como quedaría la distribución de los sensores y el equipo una vez finalizada la instalación.

3.7. Toma de datos en campo

La toma de datos de campo se realizó desde el mes de diciembre de 2021 a julio de 2022. Estos datos procedieron de los sensores de humedad volumétrica y potencial matricial descritos anteriormente, los cuales funcionaron de forma automática a través del envío de datos mediante tecnología 2G incorporada en el datalogger, el cual forma parte del equipo. De igual modo, se tomaron los valores registrados por los tensiómetros, en este caso la toma de datos se realizó de manera manual en el campo a través de las lecturas de los manómetros que llevan incorporados.

La humedad volumétrica (θ_v) es el volumen de agua por unidad de volumen de suelo. Los valores equivalentes a suelo plenamente hidratado (capacidad de campo) o a déficit hídrico extremo (punto de marchitez) dependen en gran medida de la textura del suelo. Por lo tanto, para interpretar estos valores es más útil interpretar la evolución de la humedad en el tiempo que fijarnos en valores absolutos.

Adicionalmente, antes de la instalación de los equipos, se realizó un muestreo de los suelos de la parcela de estudio (13/10/2021) a dos profundidades 30 y 60 cm, donde se determinaron las siguientes propiedades (laboratorio externo): textura, materia orgánica, densidad aparente, conductividad eléctrica, nitrógeno total, capacidad de campo, punto de marchitez y humedad disponible.

Del mismo modo, se realizó un muestreo de agua de riego el día 17/09/2021, y se determinaron los siguientes parámetros (laboratorio externo): pH, conductividad eléctrica, concentración de sales totales solubles, sodio, calcio, magnesio, potasio, boro, cloruros, sulfatos y nitratos.

Los análisis de los datos obtenidos se han realizado a través de Excel utilizando diferentes variables estadísticas.

4. Resultados y discusión

4.1. Propiedades del suelo

La tabla 5 presenta las propiedades de suelo analizadas, como se puede observar el pH del suelo fue básico (Porta *et al.*, 1999), siendo un suelo no salino (USDA, 1996), con un contenido en materia orgánica bajo (Porta *et al.*, 1999). De igual modo, el suelo de la parcela presenta una relación C/N baja, lo que indica una posible liberación alta de nitrógeno. Finalmente, hay que indicar que la CC se encuentra cercana al 29% y el PMP al 16%, con una humedad disponible del 12%.

Tabla 5. Resultados obtenidos del análisis físico-químico

Parámetro	Profundidad 30cm	Profundidad 60cm
Densidad aparente (g cm^{-3})	1,38	1,39
pH	8	8,1
C.E (mS cm^{-1})	0,528	0,595
Materia orgánica (%)	1,56	1,5
Relación Carbono/Nitrógeno	6,19	10,43
Capacidad de Campo (%)	29	28.1
Intervalo de humedad disponible (%)	12,4	12
Punto de marchitez permanente (%)	16,6	16,1

La parcela presentaba un suelo franco arcilloso, con una granulometría compuesta por un 26 % de arena, 36 % de limo y un 38 % de arcilla (Figura 22).

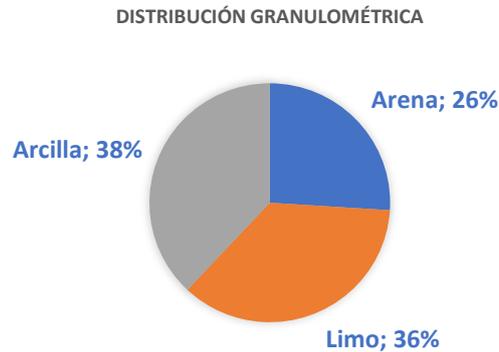


Figura 22. Resultados del análisis granulométrico realizado al suelo de la parcela de estudio.

En las siguientes gráficas (Figuras 23, 24 y 25) se presentan las lecturas de los sensores TERSO12, TDR315 Y TDR310 que fueron tomadas a la misma hora y mismo día que la lectura de los tensiómetros, cuyos valores fueron tomados manualmente. Indicar que estos sensores miden la misma variable, humedad volumétrica contenida en el suelo, pudiendo comparar sus medidas de manera directa. De igual modo, se incluyen los riegos realizados y las precipitaciones que ocurrieron durante el periodo de estudio.

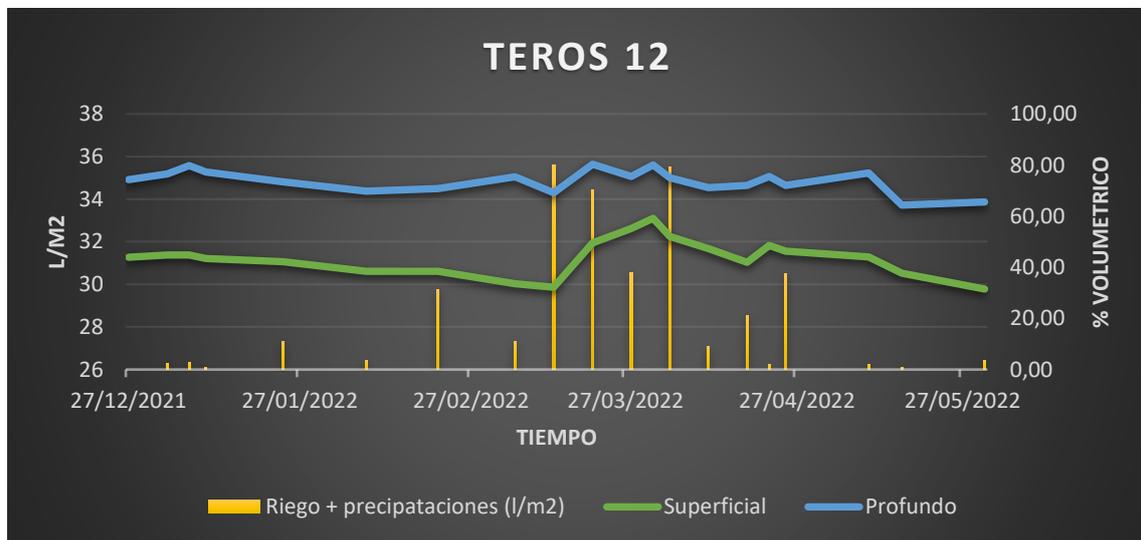


Figura 23. Representación de los datos recogidos por los sensores TERSO12

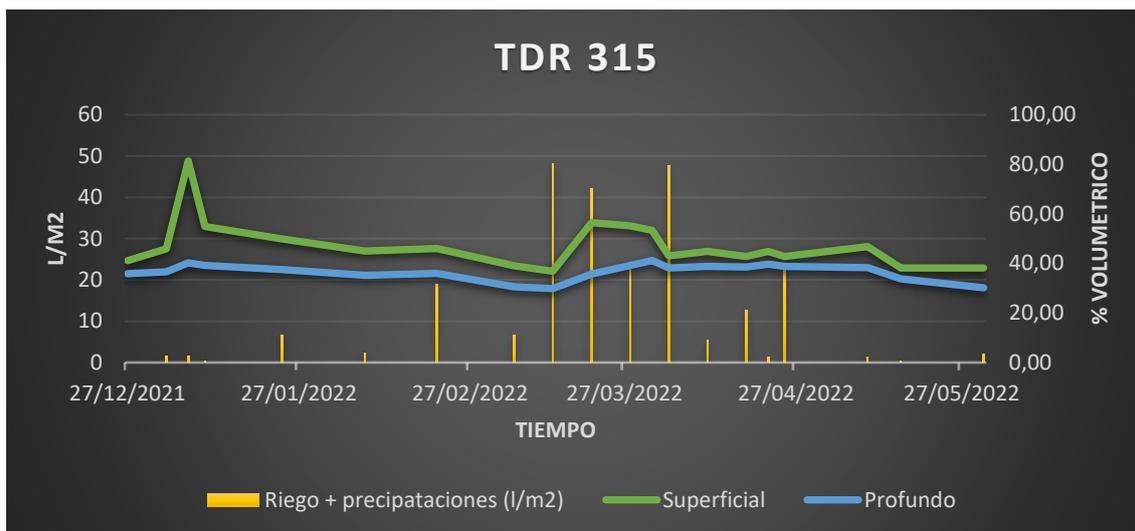


Figura 24. Representación de los datos recogidos por los sensores TDR315

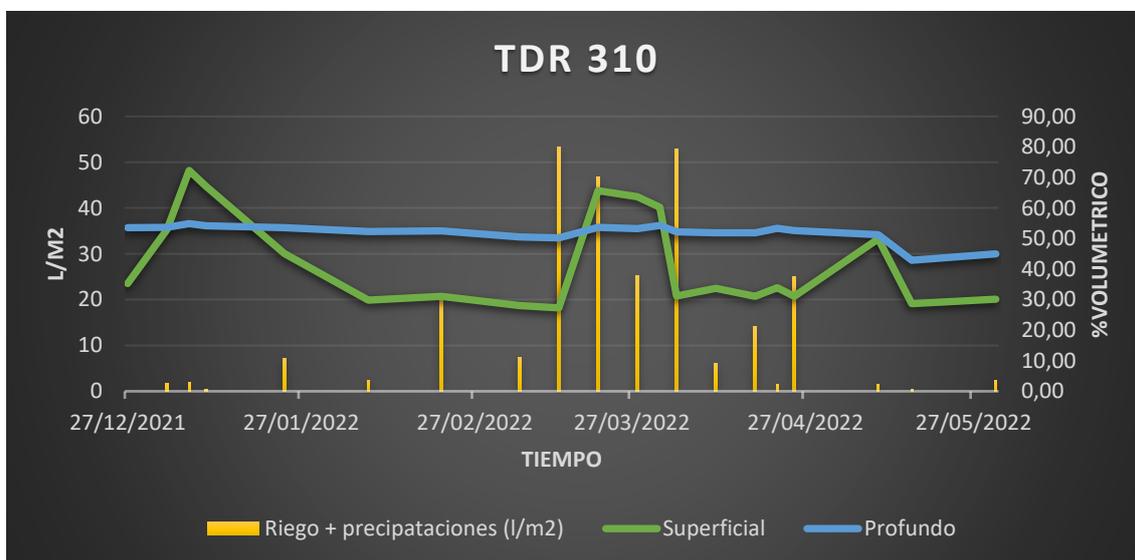


Figura 25. Representación de los datos recogidos por los sensores TDR310

La tabla 6 presenta los valores medios de cada uno de los sensores, tanto superficial como profundo.

Tabla 6. Media y desviación típica obtenida para que los sensores TEROS12, TDR310y TDR315

	Humedad Volumétrica (%) TEROS12		Humedad Volumétrica (%) TDR310		Humedad Volumétrica (%) TDR315	
	Superficial	Profundo	Superficial	Profundo	Superficial	Profundo
Media	31,25	34,85	28,29	34,60	28,39	22,00
Desviación típica	0,85	0,52	10,16	1,95	5,80	1,95

Como se puede observar los datos recogidos por los TEROS12 (Figura 23) son los que menos variación en la medida han tenido, oscilando entre 29-31% en la humedad superficial y 33-35% en la humedad profunda, haciendo de estos una medida poco fiable, ya que denotan que no han sido capaces de detectar los riegos y precipitaciones de una manera eficaz.

Por otro lado, los sensores TDR310 han oscilado entre 18-48% en la humedad superficial y 28-36% en la humedad profunda (Figura 24). Mientras que los TDR315 han oscilado entre 18-22% en la humedad superficial y 18-24% en la humedad profunda (Figura 25). Por lo que los

sensores TDR310 son más sensibles a cambios en el contenido de humedad respecto a los TDR315, aunque también podría tratarse de que el modelo 310 mayor significativamente estas medidas, haciéndolas no representativas de la realidad.

Cabe destacar que los valores registrados por las sondas profundas de los modelos TEROS12 y TDR310 ha sido superiores, en la mayor parte del ciclo de cultivo, a las registradas con las sondas superficiales. Por el contrario, la sonda TDR315 ha registrados valores superiores en superficie a los registrados en profundidad, siendo este comportamiento una tendencia más correcta en un suelo franco arcilloso.

4.2. Cálculo y comparación de la capacidad de campo y punto de marchitez permanente

La capacidad de campo es la cantidad de agua que el suelo puede retener cuando este se ha saturado o se encuentra suficientemente humedecido y posteriormente se le permite drenar libremente, evitando pérdidas por evapotranspiración, hasta que el potencial hídrico del suelo se estabilice. De este modo, la capacidad de campo se refiere al contenido de humedad volumétrica retenido a -33kPa.

El punto de marchitez permanente es aquel que se produce cuando toda el agua del suelo se ha perdido, ya sea por lixiviación, evapotranspiración, por lo que el agua del suelo no está disponible para el cultivo. Bajo estas condiciones, los cultivos se marchitarán permanentemente y no podrán recuperarse cuando se coloquen en condiciones de inundación. De este modo, el punto de marchitez permanente se refiere al contenido de humedad volumétrica retenido a -1500kPa.

El intervalo de humedad disponible es la cantidad de humedad del suelo teóricamente disponible para las plantas, está determinada por la diferencia entre los límites superior e inferior de humedad, y su valor para cada tipo de suelo depende principalmente de su textura.

Estos valores se pueden obtener de manera gráfica mediante la representación de los datos enviados por el datalogger al servidor, usando el día 5 de abril como referencia, día que se registraron hasta 64 mm de lluvia en pluviómetros instalados en estaciones climáticas por Widhoc, día en el que el suelo alcanzó condiciones de saturación y, por tanto, de capacidad de campo (Tabla 7).

Tabla 7. Capacidad de campo y punto de marchitez permanente de los sensores TEROS12, TDR310 Y TDR315

	TEROS12	TDR310	TDR315
Capacidad de Campo (%)	35	36	31
Punto de Marchitez Permanente (%)	28	20	22

Con el fin de comparar la fiabilidad de las medidas obtenidas se utilizaron algunos modelos de regresión lineal propuestos por varios autores para calcular estos parámetros.

Los modelos que se usaron fueron los siguientes:

- El modelo de Delgado y Barreto (1988), el cual fue desarrollado a partir de 160 suelos de Venezuela.
- El modelo de Malavé (1991), el cual fue desarrollado para diez suelos representativos de áreas agrícolas de Venezuela.

- El modelo de Pineda – Viloría (1997), el cual fue desarrollado para suelos de la zona del Lago de Valencia en Venezuela a través de 444 horizontes de suelos.

Como la determinación de la capacidad de campo, el punto de marchitez permanente y por consiguiente el intervalo de humedad disponible son difíciles de calcular, normalmente se utiliza la cantidad de agua retenida a -33 kPa (Tabla 8) y -1500 kPa (Tabla 9).

Tabla 6. Modelos para obtener el contenido de humedad volumétrica retenido a -33kPa

Autor	Ecuación	R²
Delgado y Barreto, 1988	$29,06 - (0,290 * AR) - (0,253 * L) + (0,135 * A) + (2,56 * MO)$	0,79
Malavé, N. 1991	$23,953 - (0,2228 * AR) + (4,6436 * MO)$	0,85
Pineda – Viloría, 1997	$57,550 + 1,405 * CO - 0.559 * AR$	0.77

AR = arena (%), L = limo (%), A = arcilla (%), MO = materia orgánica, CO= carbono orgánico(%)

Tabla 7. Modelos para obtener el contenido de humedad volumétrica retenido a -1500kPa

Autor	Ecuación	R²
Delgado y Barreto, 1988	$16,55 - (0,174 * AR) - (0,164 * L) + (0,154 * A) + (1,24 * MO)$	0,87
Malavé, N. 1991	$16,1608 - (0,1877 * AR) + (1,0528 * MO)$	0,80
Pineda – Viloría, 1997	$3,515 + 1,431 * CO + 0,499 * MO$	0,76

AR = arena (%), L = limo (%), A = arcilla (%), MO = materia orgánica (%), CO= carbono orgánico(%)

Siendo los valores necesarios para calcular estos parámetros los siguientes (Tabla 10).

Tabla 8. Parámetros usados en los modelos de contenido de humedad volumétrica

AR	L	A	MO	CO
26	36	38	1,5	0,9

AR = arena (%), L = limo (%), A = arcilla (%), MO = materia orgánica, CO= carbono orgánico(%)

La tabla 11 y la Figura 26 presenta los resultados obtenidos para la capacidad de campo y punto de marchitez permanente tanto de los modelos de regresión lineal mostrados anteriormente, como los obtenidos del análisis físico-químicos del laboratorio y los observados

gráficamente el día que se alcanzó saturación en el suelo estudiado a través de una gran precipitación (64 mm).

Tabla 9. Capacidad de campo y punto de marchitez permanente obtenidos con los modelos, en el laboratorio y los sensores

%	Delgado y Barreto (1988)	Malavé, N. (1991)	Pineda – Viloría (1997)	Laboratorio 30cm	Laboratorio 60cm	TEROS12	TDR310	TDR315
CC	21,4	25,1	44,3	29	28,1	35	36	31
PMP	13,8	12,9	23,8	16,6	16,1	28	20	22

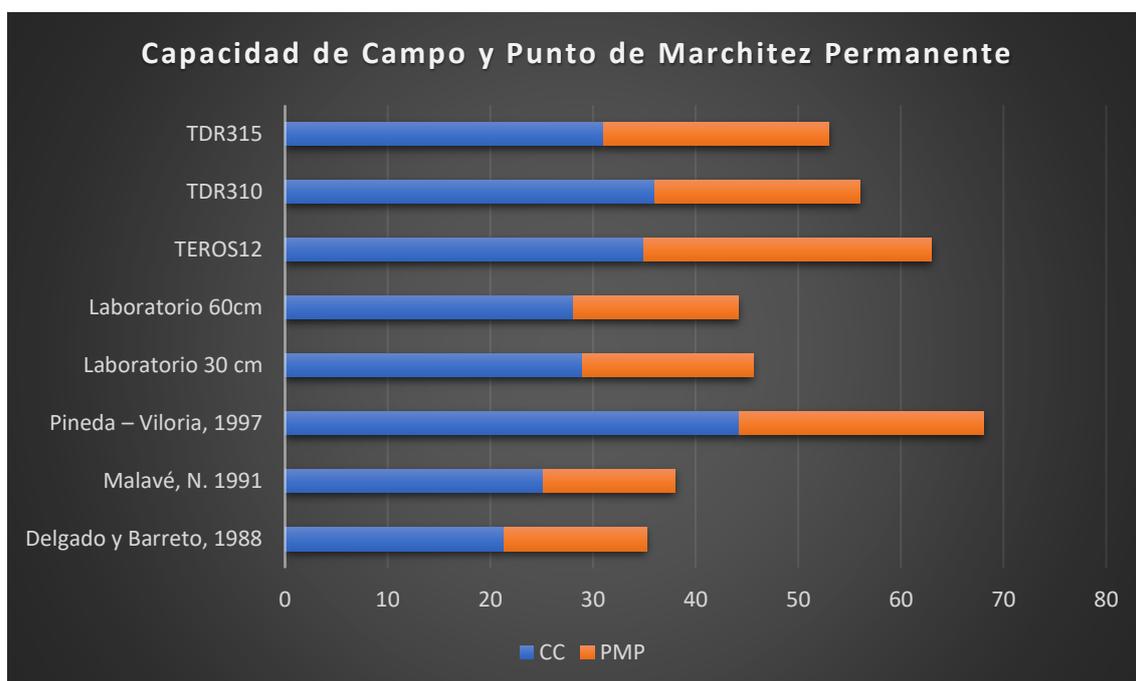


Figura 26. Capacidad de campo y punto de marchitez permanente para los diferentes sensores, análisis y modelos utilizados en el estudio.

El modelo que más se ajusta a lo obtenido en el laboratorio es el de Delgado y Barreto (1988) seguido del de Malavé (1991), el resto ofrecen valores o demasiado bajos o altos que poco se aproximan con los niveles de humedad reales.

De igual modo, los sensores TDR315 son los que más se aproximan a los valores obtenidos de los análisis del laboratorio, y al modelo de Delgado y Barreto (1988), seguido de los sensores TEROS12 y de los sensores TDR310. Parece que efectivamente los sensores TDR310 sobrestiman significativamente los valores de humedad por encima de los reales, mientras que el otro modelo, TDR315, al poseer unas varillas más largas puede muestrear mayor volumen de suelo, dando como resultados unos valores que parecen que se aproxima más a la humedad presente en el suelo.

4.3. Potencial matricial

La humedad volumétrica no es la única variable importante en el suelo para determinar las necesidades de riego de un cultivo, también es relevante conocer la fuerza con la que el agua esta retenida en el suelo por parte de las partículas coloidales, las cuales permitirán que el agua sea retenida o expulsada. De este modo, el potencial matricial del suelo (ψ_m) es la energía con la que está retenida el agua del suelo. Cuanto más negativo es el potencial, el agua del suelo estará menos disponible para el cultivo. Valores de ψ_m entre -10 y -25 kPa indican que el suelo está bien hidratado mientras que valores inferiores a -35kPa se estima que empieza a haber déficit hídrico en el suelo.

Según Pascual y Pascual-Seva (2020), el potencial matricial “*puede medirse como trabajo dividido entre volumen (potencial de presión expresado en bares, presión atmosférica o kPa, trabajo dividido entre masa o trabajo dividido entre peso)*”.

Los potenciales se dividen en potenciales de presión (ψ_p), de matriz (ψ_m), de gravedad (ψ_g) y osmóticas (ψ_o). La suma es igual al potencial hídrico.

$$\psi = \psi_p + \psi_m + \psi_g + \psi_o$$

Las fuerzas más importantes relacionadas con la absorción de agua por las plantas son la matriz y la tensión osmótica, que determinan la capacidad de retención y la capacidad de absorción de agua del suelo. Por un lado, la tensión matricial del suelo está determinada principalmente por el tamaño de las diferentes partículas del mismo, lo que determina su textura, ya que el agua se retiene en mayor medida en la superficie de las partículas más pequeñas y en los pequeños poros entre ellas. Por lo tanto, un suelo de textura fina (predominio de arcilla) tiene una gran cantidad de partículas con una gran superficie total, y una gran cantidad de poros de menor tamaño divididos entre las partículas, presentando una mayor retención de agua que la correspondiente a la textura gruesa (predominio de arena) (Pascual y Pascual-Seva, 2020).

A continuación, se muestran los datos obtenidos por el sensor TEROS21 y los tensiómetros, ambos aparatos son capaces de medir el potencial matricial del suelo (Figuras 27 y 28, tabla 12).



Figura 27. Representación de los datos recogidos por los sensores TEROS21

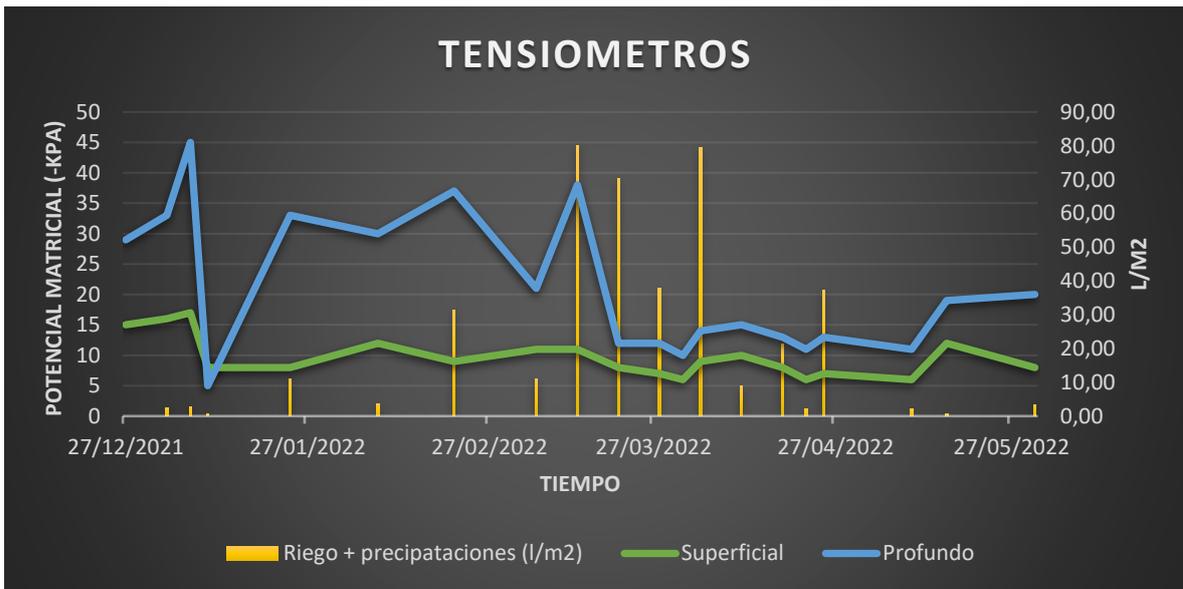


Figura 28. Representación de los datos recogidos por los tensiómetros

Tabla 10. Media y desviación típica obtenidas para los sensores de potencial matricial TEROS21 y los tensiómetros

	Potencial matricial (-kPa)		Tensiómetros (CBAR)	
	Superficial	Profundo	Superficial	Profundo
Media	-12,96	-9,65	-9,70	-21,05
Desviación típica	-1,87	-0,75	-5,16	-63,29

Ambas medidas pueden compararse directamente sin necesidad de realizar una conversión de unidades ya que 1 CBAR = 1 kPa. Se puede observar que los tensiómetros

presentan una gran desviación típica, lo que denota que a priori en algunas condiciones pueden llegar a dar datos atípicos que no sean representativos con la humedad real presente en el suelo.

Los valores recogidos por el sensor TEROS 21 denotan que el terreno se ha mantenido hidratado durante todo el ciclo del cultivo en rangos admisibles, produciéndose algún déficit leve. A 60 cm se ha mantenido estable la medida a lo largo del tiempo, mientras que a 30 cm ha variado en mayor medida, detectando correctamente riegos y lluvias (Figura 27).

Por otro lado, las medidas recogidas por los tensiómetros a 30 cm han marcado déficit severo en varias ocasiones, mientras que a 60 cm se ha mantenido estable la medida durante todo el ciclo (Figura 28). Destacar que a final de ciclo ambas medidas se han estabilizado siguiendo prácticamente la misma tendencia.

Comparando ambas medidas, se observa que a 60 cm la tendencia se ha mantenido estable, denotando que el terreno estaba correctamente hidratado (Figuras 27 y 28). El tensiómetro superficial marcó algunos valores de déficit severo mientras que el TEROS21 los identificaba como déficit leve. Ambos detectaron los riegos y lluvias de una manera eficaz.

4.4. Curvas de retención de humedad

La curva de retención de agua (HRC) en el suelo expresa la relación entre el contenido de agua y su potencial matricial, reflejando la capacidad del suelo para retener agua en base a la succión, esta relación depende de factores relacionados con la textura del suelo (Teepe *et al.*, 2003).

Aunque en este caso no sean curvas de retención propiamente dichas, ya que no se cuenta con una curva obtenida en laboratorio en condiciones controladas, proporcionan datos sobre rangos en los cuales estos aparatos son óptimos en sus mediciones. Cabe destacar que los tensiómetros a valores altos (70-100kPa) suelen sufrir problemas por cavitación debido a su naturaleza, haciendo que sus medidas no sean correctas.

A continuación, se van a utilizar para su representación los datos de humedad volumétrica obtenidos por los sensores TDR315, esto es debido a que anteriormente se ha concluido que son los sensores más veraces en cuanto a la representación de la humedad real presente en el suelo.

A priori se puede observar que los sensores TEROS21 (Figuras 29, 30, 31 y 32), los cuales presentan un rango de medición sumamente superior al de los tensiómetros, muestran mejores medidas cuando se tratan de valores intermedios de succión y son menos sensibles a valores próximos entre 0-5 kPa.

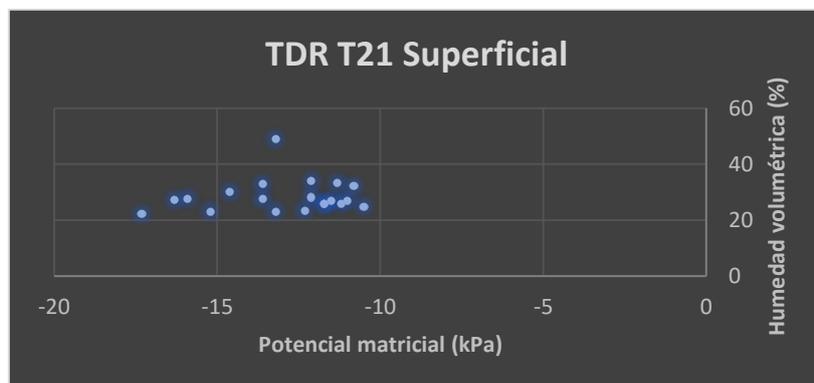


Figura 6. Curva de retención de humedad de los sensores TEROS12 superficial y TDR315

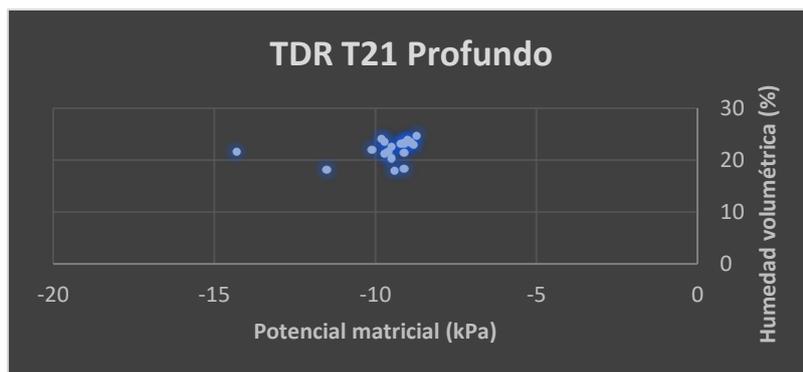


Figura 30. Curva de retención de humedad de los sensores TEROS12 profundo y TDR315

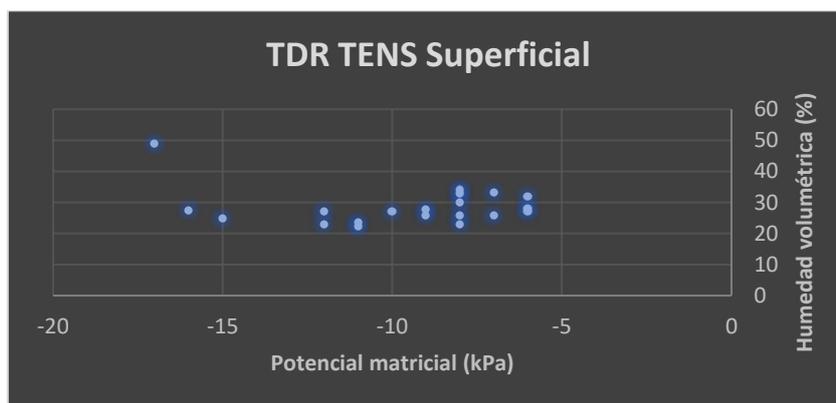


Figura 31. Curva de retención de humedad el tensiómetro superficial y el sensor TDR315

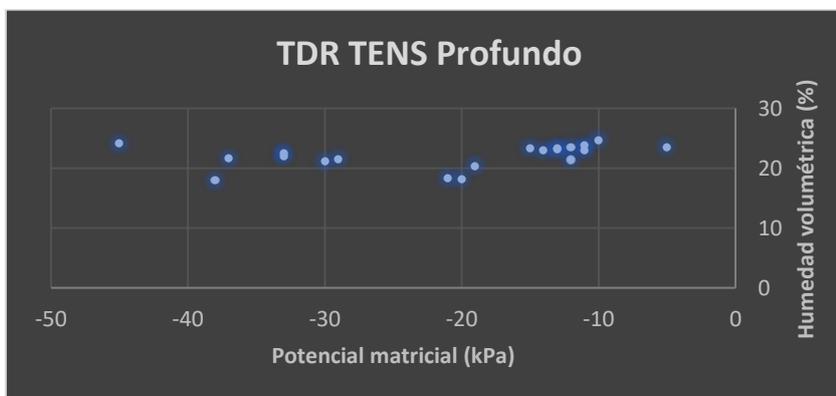


Figura 32. Curva de retención de humedad el tensiómetro profundo y el sensor TDR315

Por el contrario, los tensiómetros son más sensibles a valores de succión bajos (0-5 kPa) y parecen sobrestimar la medida de potencial hídrico en alguna ocasión, denotando un dato atípico alejado del resto.

Finalmente, los sensores TEROS21 al no presentar problemas por cavitación y un rango de medida más amplio no sobrestiman las medidas, haciéndolos más efectivos para medir el potencial hídrico del suelo.

4.5. Agua de riego

El agua de riego es también un factor determinante a la hora de manejar correctamente un buen uso del agua, ya que aparte de la cantidad y el tiempo, la calidad de la misma determina la aportación de sales al suelo o el lavado de las mismas.

La tabla 13 presenta los resultados del análisis de agua de riego, donde se puede observar que presenta un pH básico, y una concentración de sales normal, con una conductividad eléctrica de $1,25 \text{ mS cm}^{-1}$, por lo que se considera un agua de riego de moderada calidad. En cuanto a micronutrientes, cabe destacar la cantidad de calcio y magnesio las cuales habría que tener en cuenta a la hora de la fertilización. Finalmente, indicar que las concentraciones de cloruros, sulfatos y boro son bajas, por lo que no se esperan problemas de toxicidad en el cultivo.

Tabla 11. Resultados obtenidos en el análisis de agua

Parámetro	Resultado
pH	8
C.E (mS cm^{-1})	1,25
Sales Solubles Totales (mg l^{-1})	810
Sodio (mg l^{-1})	127
Potasio (mg l^{-1})	6,27
Calcio (mg l^{-1})	59,9
Magnesio (mg l^{-1})	33,7
Boro (mg l^{-1})	0,641
Cloruros (mg l^{-1})	198
Sulfatos (mg l^{-1})	190
Nitratos (mg l^{-1})	1,77

4.6. Necesidades hídricas del cultivo e interpretación de datos a lo largo del ciclo de cultivo

Como se puede apreciar en la Figura 33, las necesidades hídricas totales del cultivo han sido de $4.864,7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. La cantidad de agua aportada con los riegos ha sido de $517,85 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ mediante 68 riegos, y la precipitación total caída fue de $3944 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Aplicando la fórmula de la FAO para calcular la precipitación efectiva, se obtiene un total de $2.915,2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$.

Como se observa en la Figura 34, durante todo el periodo monitorizado se muestra una correcta hidratación en el perfil, presentando valores medios de potencial matricial de $-14,16 \text{ kPa}$ a 20 cm , y $-35,36 \text{ kPa}$ a 40 cm . Con los riegos aplicados durante la primera parte del periodo monitorizado, el estado energético del agua en suelo se mantiene dentro del rango óptimo de humedad, con un agotamiento permisible entre riegos, sin alcanzar déficit. El 05-07-2022 se alcanza un valor mínimo de $-42,3 \text{ kPa}$ (Déficit hídrico severo). Una vez aplicado el riego, se reestablece el contenido de agua fácilmente disponible en suelo.

Como se observa en la Figura 35, el valor medio de contenido volumétrico de agua en suelo medido mediante el sensor TDR310 muestra que a 30 cm de profundidad se encuentra al 33% , y a 60 cm se encuentra al $33,9\%$, y la media medida con el TDR315 indica que a 30 cm de profundidad se encuentra al 35% , y a 60 cm se encuentra al $23,3\%$, indicando que se mantienen correctamente hidratados en profundidad. Se detecta que llega la lámina de agua tras el riego, observando drenaje tras algunos riegos aplicados y tras las precipitaciones acumuladas durante el 05-04-2022.

Por su parte, en la Figura 36, la conductividad eléctrica aparente en suelo muestra un valor medio de $4,3 \text{ dS m}^{-1}$ a 30 cm , y $3,08 \text{ dS m}^{-1}$ a 60 cm medidos mediante TDR310. La capa superficial muestra un ligero descenso del valor de CE tras los riegos aplicados, indicando que se produce un correcto lavado de sales. Con la ausencia de riegos, se puede observar un

incremento en ambas capas, siendo más acusado en la zona superficial. La medida llevada a cabo mediante TDR315 presenta valores de $2,32 \text{ dS m}^{-1}$ a 30 cm, y $2,64 \text{ dS m}^{-1}$ a 60 cm. Tras las lluvias del 05-04-2022 se da un incremento notable, lo que indica que las sales se desplazan hacia la zona radicular.

De los resultados obtenidos se puede decir que se observa un correcto manejo del cultivo a excepción de algún déficit no intencionado, también cabe destacar que cuando se utiliza agua de mala calidad hay que incrementar la dosis de riego para satisfacer los requerimientos de lavado a fin de evitar la acumulación de sales en el bulbo húmedo. Dicha mayoración depende de dos factores: la conductividad eléctrica del agua de riego y la sensibilidad del cultivo a la salinidad. Al disponer de un agua de riego de buena/moderada calidad no habría que aumentar las dosis de riego habituales.

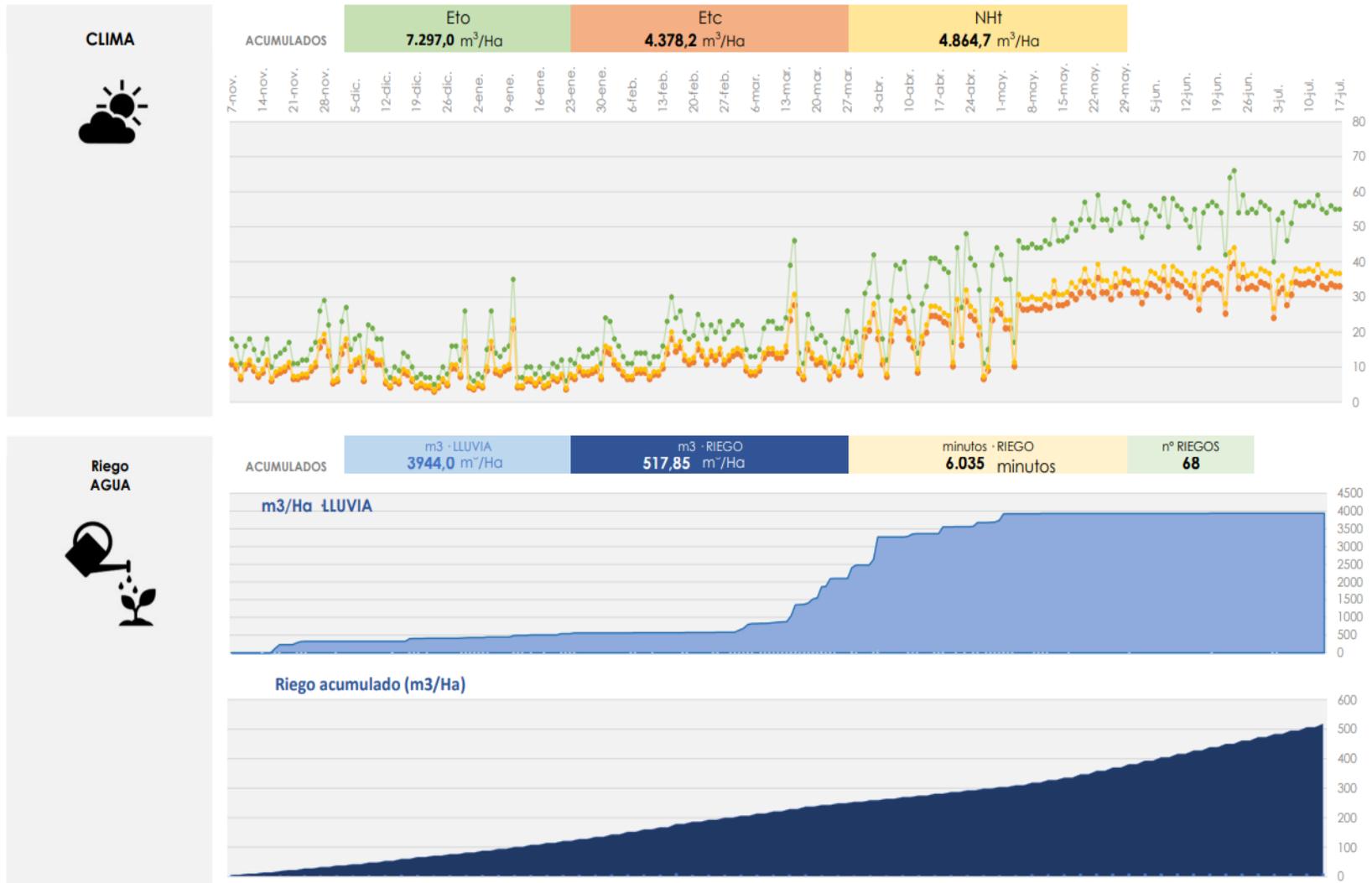


Figura 7. Parámetros hídricos obtenidos durante la realización del ensayo por el riego aportado y la climatología de la zona

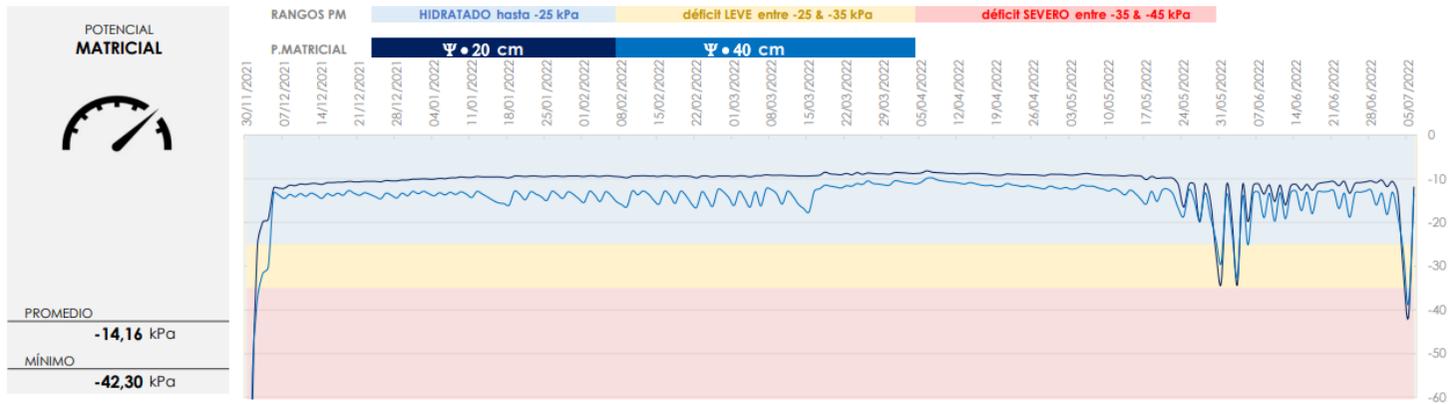


Figura 34. Medidas de potencial matricial obtenidas durante toda la realización del ensayo

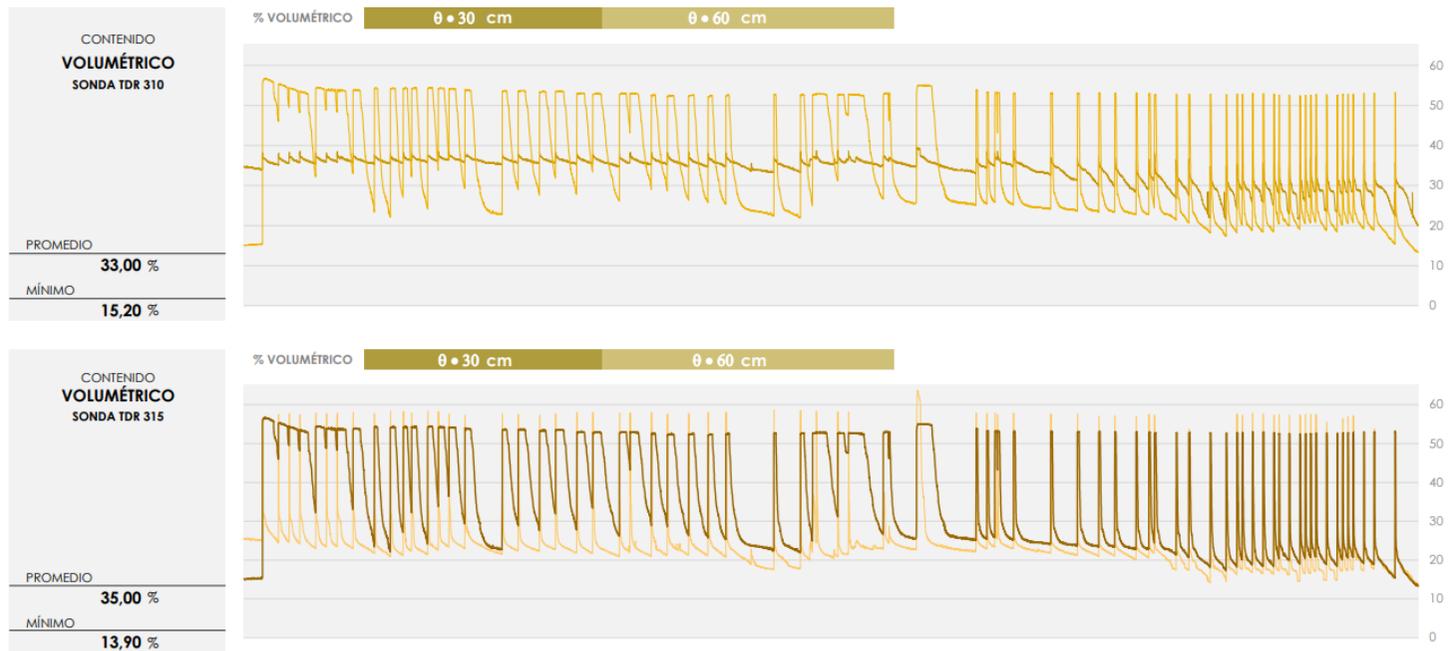


Figura 35. Medidas de humedad volumétrica obtenidas durante la realización del ensayo para los sensores TDR315 superficial y profundo

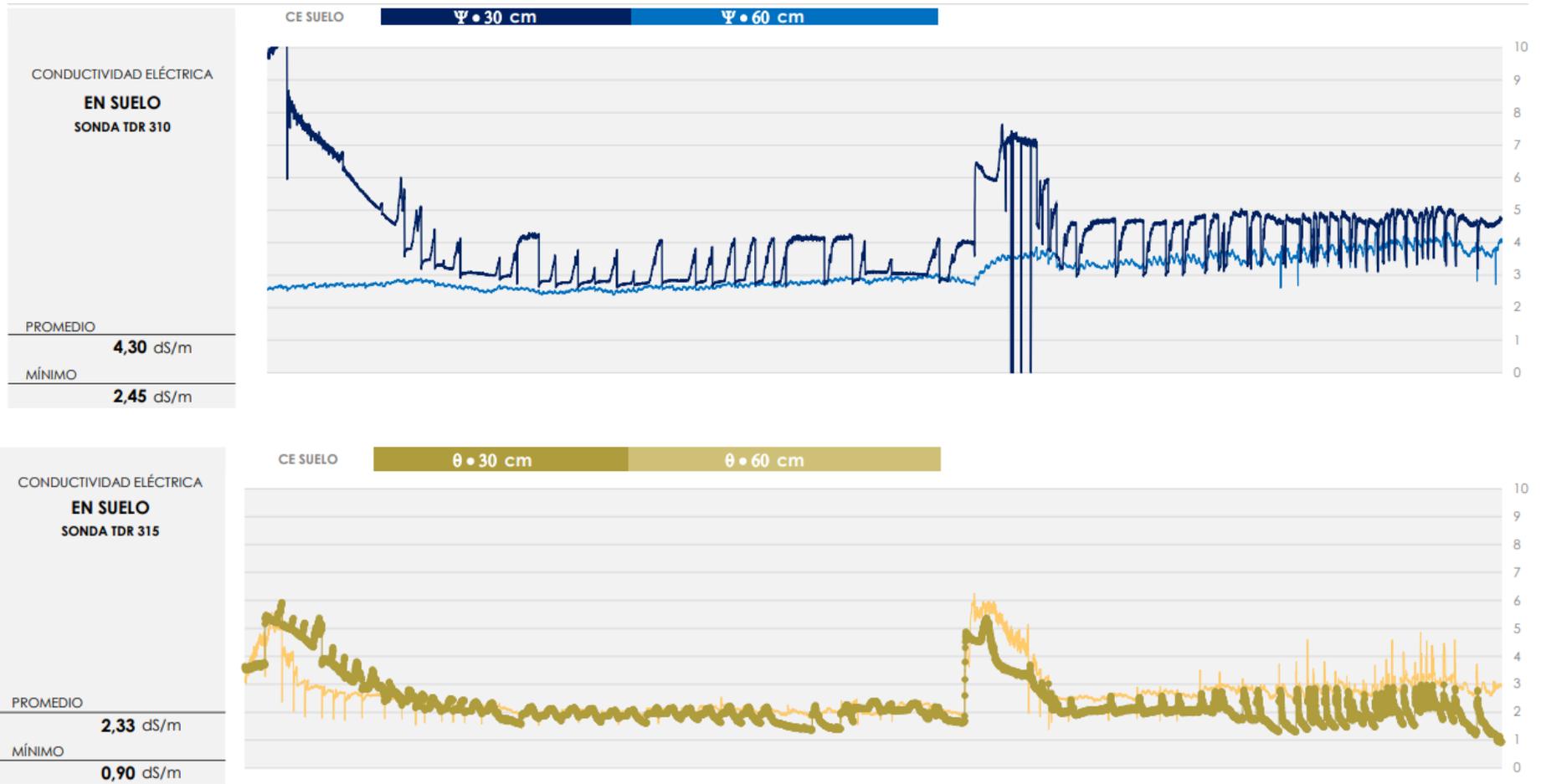


Figura 36. Medidas de conductividad eléctrica obtenidas durante la realización del ensayo para los sensores TDR315 superficial y profundo

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos permiten concluir que los sensores TDR315 son los óptimos para medir el contenido volumétrico del suelo frente a los sensores TDR310 y TEROS12. A pesar de que los sensores TEROS12 presentaban una menor desviación típica, esto resulta negativo, ya que denota menos sensibilidad a cambios en el contenido de humedad del suelo, ya que con el fin de optimizar el regadío lo máximo posible, interesa que los sensores utilizados presenten la máxima sensibilidad posible a los cambios de humedad en el suelo.

Por otro lado, los modelos de regresión lineal de *Delgado y Barreto* y de *Malavé* han resultado los más útiles a la hora de estimar la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente en el suelo, siendo estos los que más se aproximan a los valores obtenidos en el análisis realizado en el laboratorio y a los resultados del sensor TDR315.

En cuanto al potencial hídrico del suelo, los TEROS21, a pesar de que presentan menor sensibilidad a valores bajos de tensión, se comportan mejor en rangos intermedios de tensión y no presentan datos atípicos en su medición frente a los tensiómetros, que si los presentan, lo que denota una posible sobrestimación de los valores.

Tras evaluar el volumen de agua aportada mediante el riego durante los meses de estudio se concluye que sería necesario aumentar la dosis de regadío en función de la calidad de agua, además de espaciar más en el tiempo dichas dosis y evitar los posibles estados de déficits que se puedan llegar a alcanzar, lo que beneficiará notablemente al cultivo, además de una mayor optimización de los recursos hídricos.

6. Bibliografía

- Moreno González & López Martínez (2012) Agua y sostenibilidad: recursos, riesgos y remedios. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte de España
- Mzezewa, J., & Van Rensburg, L. D. (2011). Effects of tillage on runoff from a bare clayey soil on a semi-arid ecotope in the Limpopo Province of South Africa. *Water Sa*, 37(2).
- Grindlay Moreno, A. L., & Lizárraga Mollinedo, C. (2012). Regadío y territorio en la Región de Murcia: evolución y perspectivas de futuro. *Ciudad Y Territorio Estudios Territoriales*, 44(172), 281–298.
- Fares, A., & Alva, A. K. (1999). Estimation of citrus evapotranspiration by soil water mass balance1. *Soil Science*, 164(5), 302-310.
- Porta Casanellas, López-Acevedo Reguerin, M., and Roquero de Laburu, C. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente* (3a. ed.). Mundi-Prensa.
- Henríquez H Carlos Cabalceta Aguilar G. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo & Universidad de Costa Rica. (2012). *Guía práctica para el estudio introductorio de los suelos con un enfoque agrícola*. Asociación costarricense de la ciencia del suelo.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2022). FAOSTAT. <https://www.fao.org/faostat/es/#home>
- Infoagro (2022) El cultivo de las naranjas. Infoagro. <https://www.infoagro.com/citricos/naranja.htm>
- Comunidad de Regantes del Campo de Cartagena. (2022) Medio físico. CRCC. <https://www.crcc.es/medio-fisico/>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma: FAO, 298(0).
- Penman, H.L. . Natural evaporation from open water, bare soil and grass. (1948) *Proc. R. Soc. London. Proc. Ser. A*. 193: 120-146.
- Zhang, B., Y. Liu, D. Xu, N. Zhao, B. Lei, R. D. Rosa, P. Paredes, T. A. Paço, and L. S. Pereira. (2013). The dual crop coefficient approach to estimate and partitioning evapotranspiration of the winter wheat-summer maize crop sequence in North China Plain. *Irrig. Sci.* 31: 1303-1316. doi: 10.1007/s00271-013-0405-1
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (1998) *Crop evapotranspiration — guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and drainage paper 56. Food and Agriculture Organization, Rome.
- Gurovich Rosenberg L. A. (1985). *Fundamentos y diseño de sistemas de riego* (1a ed.). IICA.
- Delgado, F., y L. Barreto(1988). Una aproximación matemática para la elaboración de curvas de retención de humedad en suelos representativos de Los Llanos Occidentales. *Revista UNELLEZ de Ciencia y Tecnología* 6 (1-2):45-50.
- Malavé, N., (1991). Estudio preliminar de las relaciones entre características de retención de humedad y distribución de tamaño de partículas, materia orgánica y densidad aparente. Trabajo de Grado. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía, Departamento de Edafología. 92 p.
- Pineda, María & Viloria, Jesús. (1991). Funciones de pedotransferencia para estimar la retención de humedad de la cuenca del lago de Valencia.
- Pascual España, B.; Pascual Seva, N. (2020). *Riegos de gravedad y a presión*. Editorial Universitat Politècnica de València.

- Teepe, R., H. Dilling and F. Beese. (2003). Estimating water retention curves of forest soils from soil texture and bulk density. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 166(1): 111-119. Doi:10.1002/jpln.200390001.

7. Anexos

Tabla 12. Medidas de humedad volumétrica de los sensores TEROS12, TDR310 y TDR315 y riego y precipitaciones

Día	Humedad Volumétrica (%) TEROS12		Humedad Volumétrica (%) TDR310		Humedad Volumétrica (%) TDR315		Riego + precipitaciones (l/m2)
	Superficial	Profundo	Superficial	Profundo	Superficial	Profundo	
27/12/2021	31,27	34,91	23,5	35,7	24,7	21,5	0,00
03/01/2022	31,38	35,18	35,3	35,8	27,5	22	2,48
07/01/2022	31,38	35,57	48,2	36,6	48,8	24,1	2,77
10/01/2022	31,21	35,28	44,8	36,1	32,9	23,5	0,74
24/01/2022	31,06	34,811	30,1	35,7	29,9	22,5	10,91
08/02/2022	30,62	34,37	19,9	34,9	27	21,1	3,66
21/02/2022	30,61	34,49	20,7	35	27,6	21,6	31,40
07/03/2022	30,03	35,05	18,7	33,7	23,4	18,3	11,14
14/03/2022	29,87	34,3	18,2	33,5	22,1	17,9	80,10
21/03/2022	31,94	35,64	43,8	35,8	33,9	21,4	70,21
28/03/2022	32,62	35,06	42,5	35,5	33,1	23,5	38,00
01/04/2022	33,1	35,6	40,2	36,2	32	24,7	0,00
04/04/2022	32,25	35	20,8	34,8	25,8	22,9	79,40
11/04/2022	31,67	34,54	22,5	34,6	26,9	23,3	9,00
18/04/2022	31,03	34,64	20,7	34,6	25,7	23,1	21,22
22/04/2022	31,83	35,06	22,6	35,6	26,9	23,8	2,19
25/04/2022	31,56	34,65	20,7	35,1	25,7	23,3	37,37
10/05/2022	31,29	35,23	33,3	34,2	28,1	23	2,12
16/05/2022	30,53	33,72	19,1	28,6	22,9	20,3	0,77
31/05/2022	29,78	33,86	20,1	30	22,9	18,1	3,43

Tabla 15. medidas de potencial de los sensores TEROS21, los tensiómetros y riego y precipitaciones

Día	Potencial matricial (-kPa)		Tensiómetros (CBAR)		Riego + precipitaciones (l/m2)
	Superficial	Profundo	Superficial	Profundo	
27/12/2021	-10,5	-14,3	-15	-29	0,00
03/01/2022	-13,6	-10,1	-16	-33	2,48
07/01/2022	-13,2	-9,8	-17	-45	2,77
10/01/2022	-13,6	-9,7	-8	-5	0,74
24/01/2022	-14,6	-9,5	-8	-33	10,91
08/02/2022	-16,3	-9,7	-12	-30	3,66
21/02/2022	-15,9	-9,6	-9	-37	31,40
07/03/2022	-12,3	-9,1	-11	-21	11,14
14/03/2022	-17,3	-9,4	-11	-38	80,10
21/03/2022	-12,1	-9,1	-8	-12	70,21
28/03/2022	-11,3	-8,9	-7	-12	38,00
01/04/2022	-10,8	-8,7	-6	-10	0,00
04/04/2022	-11,2	-8,8	-9	-14	79,40
11/04/2022	-11	-8,9	-10	-15	9,00
18/04/2022	-11,7	-9,1	-8	-13	21,22
22/04/2022	-11,5	-9	-6	-11	2,19
25/04/2022	-11,7	-9,1	-7	-13	37,37
10/05/2022	-12,1	-9,2	-6	-11	2,12
16/05/2022	-15,2	-9,5	-12	-19	0,77
31/05/2022	-13,2	-11,5	-8	-20	3,43