



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE  
ZACATECAS  
"FRANCISCO GARCÍA SALINAS"



Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica

Doctorado en Ciencias de la Ingeniería

# TESIS DOCTORAL

**GESTIÓN DEL RIEGO BASADO EN LA  
VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN DEL AGUA  
EN EL SUELO MEDIANTE LISIMETRÍA DE  
PESADA**

Presenta:

**Laura Ávila Dávila**

Directores:

Dr. Carlos Francisco Bautista Capetillo

Dr. José Miguel Molina Martínez

Dr. Julián González Trinidad

Zacatecas, México

2021



Universidad Autónoma de Zacatecas  
“Francisco García Salinas”

Unidad Académica de Ingeniería  
Eléctrica

Doctorado en Ciencias de la  
Ingeniería



Universidad Politécnica de Cartagena

Escuela Técnica Superior de  
Ingeniería Agronómica

Doctorado en Técnicas Avanzadas en  
Investigación y Desarrollo Agrario y  
Alimentario

## TESIS DOCTORAL

en modalidad de co-tutela

### **GESTIÓN DEL RIEGO BASADO EN LA VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN DEL AGUA EN EL SUELO MEDIANTE LISIMETRÍA DE PESADA**

presentada por

**Laura Ávila Dávila**

para optar al Grado de Doctora por la Universidad Autónoma de Zacatecas y  
por la Universidad Politécnica de Cartagena

Director de Tesis en la UAZ  
Dr. Carlos Francisco Bautista  
Capetillo

Director de Tesis en la UPCT  
Dr. José Miguel Molina  
Martínez

Codirector de Tesis en la UAZ  
Dr. Julián González Trinidad

## **Agradecimientos**

Esta Tesis Doctoral es un fruto de la dedicación, esfuerzo y paciencia de un grupo de personas que han puesto los medios, conocimientos y tiempo necesarios. En las siguientes líneas expresaré mi agradecimiento a todas aquellas personas que han colaborado en el desarrollo de esta Tesis.

A los Dres. Carlos Francisco Bautista Capetillo y Julián González Trinidad, mis directores de Tesis, por darme la oportunidad de crecer y fortalecer mis conocimientos al permitirme realizar este trabajo bajo su dirección, Por su confianza desde el primer instante, sus consejos y enseñanzas y brindarme los recursos necesarios para lograr la meta.

Al Dr. José Miguel Molina Martínez, director de Tesis, por permitirme realizar mi estancia académica en su grupo de investigación y motivarme para obtener el grado de Doctora por ambas universidades. Por hacerme parte de sus investigaciones y permitirme usarlas para el desarrollo de este trabajo, su confianza puesta sobre mí y sus consejos.

Al Consejo de Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico durante los tres años del posgrado.

Al Grupo Operativo GENHIDRO, a la empresa AGROSOLMEN y al Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), cuya financiación mediante el proyecto “Desarrollo e implementación de un equipo de ferticontrol por lisimetría de pesada para uso en

agricultura intensiva” con referencia IDI-20190146 han permitido la realización de los trabajos de investigación enmarcados en esta Tesis Doctoral.

A mis amigos, por su cariño y apoyo en toda mi vida académica, que tal vez sin ustedes no hubiera llegado hasta este momento. Por estar siempre al tanto de mis avances y logros, y alegrarse por ellos. Especialmente, por los buenos momentos vividos.

A David, por aparecer en mi vida, por alentarme a conseguir mis propósitos y no rendirme, por creer en mí, por sus consejos y por estar siempre que necesito de su apoyo o ser escuchada. Por los grandes momentos vividos, únicos e irrepetibles, y por ser una de las personas que me quiere ver feliz.

Y finalmente a mi familia, por su amor, apoyo incondicional y confianza en mí. A mis hermanos, por hacer más ameno mis momentos de estrés y desánimo con sus palabras de aliento. A mis padres, por alegrarse y estar orgullosos de mis logros académicos, aunque sin entender muy bien a qué me dedicaba me alentaban a luchar por mis propósitos. A mi mamá Martha, por estar siempre cuando la he necesitado y su cariño.

## Índice

<b>Resumen</b> .....	1
<b>Abstract</b> .....	5
<b>1. Introducción</b> .....	9
<b>2. Antecedentes y Estado del Arte</b> .....	15
2.1. Propiedades físicas del suelo .....	15
2.2. Propiedades hidrodinámicas del suelo.....	17
2.2.1. Movimientos del agua en el suelo.....	17
2.2.2. Tipos de agua .....	19
2.2.3. Potencial hídrico.....	19
2.2.4. Contenidos de agua en el suelo .....	20
2.2.5. Frente húmedo.....	23
2.3. Infiltración .....	24
2.4. Evapotranspiración del cultivo .....	33
<b>3. Materiales y Métodos</b> .....	39
3.1. Determinación de la infiltración del agua del suelo.....	39
3.1.1. Zona de estudio .....	39
3.1.2. Materiales .....	41
3.1.3. Cálculo de los flujos de agua .....	42
3.1.4. Cálculo de la velocidad de infiltración del agua en el suelo.....	44
3.1.5. Estimación del contenido de agua en el suelo.....	45
3.1.6. Validación .....	46
3.1.7. Modelos de calibración .....	46
3.2. Evapotranspiración del pimiento y coeficiente de cultivo.....	49
3.2.1. Área de estudio.....	49

---

3.2.2. Descripción del lisímetro de pesada compacto .....	49
3.2.3 Manejo del cultivo.....	50
3.2.4. Determinación de la Evapotranspiración y coeficientes de cultivo .....	51
3.2.5. Productividad del agua .....	54
<b>4. Resultados y Discusión.....</b>	<b>55</b>
4.1. Infiltración del agua en el suelo .....	55
4.1.1. Estimación de la entrada de la lluvia.....	57
4.1.2. Estimación del contenido de agua en el suelo.....	58
4.1.3. Velocidad de infiltración del agua en el suelo .....	60
4.1.4. Calibraciones de modelos .....	63
4.2. Evapotranspiración del pimiento y coeficiente de cultivo.....	65
4.2.1. Condiciones meteorológicas .....	65
4.2.2. Evapotranspiración del cultivo.....	66
4.2.3. Coeficiente de cultivo .....	70
4.2.4. Rendimiento .....	73
<b>5. Conclusiones .....</b>	<b>75</b>
<b>6. Referencias.....</b>	<b>79</b>
<b>7. Producción científica.....</b>	<b>89</b>
7.1. Artículos de difusión.....	89
7.2. Publicaciones en congresos.....	89
7.3. Artículos en revistas indexadas como coautora.....	92
7.4 Artículos en revistas indexadas como primera autora .....	93

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b> Sistema trifásico del suelo.....	16
<b>Figura 2.</b> Poros de un suelo de textura gruesa (arenoso) y un suelo de textura fina (arcilloso). .....	16
<b>Figura 3.</b> Representación de los movimientos del agua a través del suelo durante un evento de lluvia. ....	18
<b>Figura 4.</b> Contenidos de humedad en el suelo.....	21
<b>Figura 5.</b> Comportamiento del contenido de agua en el suelo. ....	22
<b>Figura 6.</b> Avance del frente húmedo en diferentes horizontes del suelo: a) textura fina, b) textura gruesa y c) horizonte inferior de textura fina e inferior de textura gruesa. ....	23
<b>Figura 7.</b> Curva típica de capacidad de infiltración del agua en el suelo. ....	24
<b>Figura 8.</b> Experimentación para la ley de Darcy. ....	26
<b>Figura 9.</b> Infiltrómetro de doble anillo. ....	32
<b>Figura 10.</b> Zona de estudio, finca Las Tiesas en Alicante España. ....	40
<b>Figura 11.</b> Lisímetro de pesada compacto, a) vista general, b) vista detallada y c) movimiento del agua a través de los recipientes.....	42
<b>Figura 12.</b> Área de estudio, a) Región de Murcia y b) localización de la parcela experimental. .....	49
<b>Figura 13.</b> Vista superior del lisímetro de pesada compacto durante la experimentación. .	50
<b>Figura 14.</b> Variaciones de masa de los dos recipientes del lisímetro de pesada compacto durante el 2017. ....	56
<b>Figura 15.</b> Contenido de agua en el suelo y variable hidrológicas obtenidas con el lisímetro de pesada compacto, a) Marzo y b) Abril.....	58
<b>Figura 16.</b> Diagramas de dispersión de la velocidad de infiltración del agua en el suelo...	61
<b>Figura 17.</b> Ajuste de modelos de infiltración a los valores de 13 14 de marzo.....	63
<b>Figura 18.</b> Datos meteorológicos promedio para períodos de 10 días, a) temperatura ambiente, b) humedad relativa, c) velocidad del viento y d) evapotranspiración de referencia <i>ET0</i> . ....	65
<b>Figura 19.</b> Evapotranspiración diaria del pimiento medido con el lisímetro de pesada ( <i>ETCLYS</i> ), riego, lluvia y drenaje, a) 2019 y b) 2020.....	66

**Figura 20.** Correlación entre *ETCLYS* medido por el lisímetro de pesada y *ETCFAO* determinado por la metodología de la FAO-56 y entre *ETCLYS* y *ETO*. ..... 69

**Figura 21.** Coeficientes de cultivo del pimiento durante el ciclo de cultivo (valores del lisímetro y la metodología FAO-56). ..... 70

**Figura 22.** Ajuste polinómico de los valores del coeficiente de cultivo (*KC*) obtenidos para 2019 y 2020: a) Ajuste polinómico de segundo orden y b) ajuste polinómico de tercer orden. .... 71

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Datos de lluvia de los días analizados por los diferentes dispositivos .....	57
<b>Tabla 2.</b> Balance hídrico de los días involucrados en la determinación de la $\theta_{FC}$ .....	59
<b>Tabla 3.</b> Comparación del contenido de agua a capacidad de campo obtenido en el suelo con los valores de la literatura. ....	60
<b>Tabla 4.</b> Valores de la velocidad de infiltración del agua en un suelo franco limoso. ....	62
<b>Tabla 5.</b> Valores de los parámetros de los modelos de infiltración para el suelo franco limoso. ....	64
<b>Tabla 6.</b> Balance hídrico de temporada en milímetros. ....	67
<b>Tabla 7.</b> Valores de $K_C$ obtenidos en este estudio y otros trabajos. ....	73
<b>Tabla 8.</b> Datos de producción de ambas temporadas.....	74



## Resumen

La agricultura es el mayor consumidor de agua en el mundo, y ante la creciente demanda del uso público e industrial, el uso de eficiente del agua en el riego es una necesidad que va cobrando mayor relevancia. En regiones áridas y semiáridas donde el agua es escasa, tal es el caso del sureste español, la implementación de las tecnologías ha permitido hacer un mejor manejo y gestión del agua. Las herramientas de precisión, como lo son los lisímetros de pesada, proporcionan información en tiempo real, por lo cual, es posible hacer una caracterización y definición del comportamiento de los parámetros involucrados en el movimiento del agua en el suelo, del desarrollo vegetativo del cultivo y el estado hídrico del cultivo.

En esta Tesis, dos enfoques para la medición de la velocidad de infiltración del agua en el suelo fueron propuestos a partir de los valores de masa reportados por los dos recipientes de un lisímetro de pesada, datos obtenidos bajo distintas condiciones de lluvia y diferentes contenidos de humedad en el suelo. Además, la evapotranspiración y los coeficientes de desarrollo vegetativo del pimiento (*Capsicum annuum L*) fueron determinados durante la temporada primavera verano de los años 2019 y 2020. Ambas investigaciones realizadas para ayudar en el uso eficiente del agua en la agricultura en climas semiáridos y con escasas de agua generalizada.

Usualmente, la infiltración del agua en el suelo es medida en campo mediante pruebas que requieren el uso de los cilindros concéntricos, sin embargo, estos dispositivos son

propensos a errores ya que existe un movimiento lateral del agua bajo el anillo. En las últimas décadas se han desarrollado varias posibilidades para compensar estos errores, que se basan en principios físicos, electrónicos y matemáticos. Así que la primera línea de actuación de esta Tesis fue centrada en el desarrollo de dos enfoques que permitan la determinación de la velocidad de infiltración del agua en un suelo franco limoso, usando los datos de masa reportados por un lisímetro de pesada.

Partiendo del hecho de que con el lisímetro de pesada la determinación de los flujos actuantes en el suelo es más precisa, como se han demostrado con la evapotranspiración y el drenaje. Fue asumido un movimiento vertical descendente del agua en el suelo y con ayuda de la ley de conservación de la masa, 12 eventos de lluvia fueron analizados. Se ha monitoreado el comportamiento del contenido de humedad del suelo y se estableció el contenido a capacidad de campo a partir de los valores del lisímetro de pesada en el que ambos enfoques son basados. La velocidad de infiltración de estos eventos mostró una velocidad variable al comienzo de la lluvia hasta alcanzar un máximo, para descender a una velocidad estable o básica. Esta velocidad de infiltración básica fue de  $1.49 \pm 0.36 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ , una velocidad dentro del rango de los suelos con texturas finas que reportan una baja capacidad de infiltración. Cuatro modelos empíricos o semiempíricos de infiltración de la literatura fueron calibrados con los valores obtenidos con nuestros enfoques, mostrando un mejor ajuste el modelo de Horton.

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) ofrece coeficientes normalizados de diferentes cultivos para establecer las necesidades de hídricas de los mismos. Sin embargo, estos coeficientes pueden no representar las condiciones climatológicas, edafológicas, prácticas de cultivo del lugar donde se realiza la siembra. Por lo que, en la segunda línea de actuación de esta Tesis, la evapotranspiración ( $ET_{C_{LYS}}$ ) y los coeficientes de cultivo ( $K_{C_{LYS}}$ ) del pimiento fueron determinados con un lisímetro de pesada compacto para el clima Mediterráneo español, de la temporada primavera-verano, entre los meses de febrero y agosto de los años 2019 y 2020.

$ET_{C_{LYS}}$  fue determinada a partir de un balance de agua con los valores de masa del lisímetro y los valores de  $K_{C_{LYS}}$  se determinaron como la relación entre la evapotranspiración

del cultivo medida con el lisímetro de pesada y la evapotranspiración de referencia. Los valores medios de  $K_{C_{1ys}}$  para el pimiento para las etapas inicial, media y final fueron 0.57, 1.06 y 0.80, respectivamente. Se obtuvieron modelos de regresión del coeficiente de cultivo ( $K_C$ ) en función de las unidades térmicas fraccionales, logrando una correlación máxima de 0.67 ( $R^2$ ). En general, los valores de  $K_C$  obtenidos en este trabajo de investigación fueron menores en las etapas inicial y final y mayores en la etapa intermedia, en comparación con los valores de FAO-56 y con los valores de otros países con condiciones semiáridas.

El rendimiento del pimiento también fue evaluado, encontrándose un aumento del 7.72% en 2019 y un 3.49% en 2020 en comparación con el rendimiento reportado por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino del Gobierno español en 2019, con pérdidas mínimas de agua por drenaje. Los resultados de trabajo de Tesis pueden ayudar a los agricultores a determinar las necesidades de agua de sus cultivos y a mejorar la eficiencia del agua en lugares semiáridos con condiciones similares a las del estudio.



## **Abstract**

Agriculture is the biggest consumer of the global water supplies, competing for the resource with the growing demand for public and industrial use. It is essential to implement technologies that help the better water management in irrigation; this gained relevance in arid and semi-arid regions where water is scarce, such as the southeast of Spain. Precision tools, such as weighing lysimeters, provide real time information for the characterization and definition of the behavior of the parameters involved in the vegetative development, the water status of crops and water movement in the soil, making efficient use of the vital liquid.

In this Thesis, two approaches were proposed to measure the water infiltration rate of the soil using the mass values reported by the two lysimeter vessels under different rain conditions and different soil moisture contents. In addition, the evapotranspiration and vegetative development coefficients of bell pepper (*Capsicum annuum L*) were determined during the spring-summer season of 2019 and 2020, Both investigations were conducted in the southeast of Spain in the regions of Murcia and Albacete, to contribute to the water efficiency in agriculture in semi-arid climates and widespread shortages of water.

Usually, the infiltration estimation is made by tests with the concentric cylinders, which are prone to errors due to the lateral movement under the ring. Several possibilities have been developed over the last decades to compensate these errors, which are based on physical, electronic and mathematical principles. So, the first action line of this Thesis was focused on the development of two approaches to determine the infiltration rate/speed in a

silt loam soil by means mass values reported by a weighing lysimeter. Because with the lysimeter it is possible to determine acting soil flows very precisely; then with the help of mass conservation and assuming a downward vertical movement, 12 rain events were analyzed.

In addition, it was possible to monitor the behavior of soil moisture and to establish the content at field capacity from the values of the weighing lysimeter, from which both approaches are based. The infiltration rate of these events showed a variable rate at the beginning of the rainfall until reaching a maximum, to descend to a stable or basic rate. This basic infiltration rate was of  $1.49 \pm 0.36 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ , this is because soils with fine textures have reported low infiltration capacity. Four empirical or semi-empirical models of infiltration were calibrated with the values obtained with our approaches, showing a better fit with the Horton's model.

The Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) offers standardized crop coefficients to establish the water requirement of crops. However, these coefficients can change due to different conditions, such as climatic variations and cultivation practices. So, in the second action line of this Thesis, the actual evapotranspiration ( $ET_{C_{lys}}$ ) and crop coefficients ( $K_{C_{lys}}$ ) of bell pepper were determined with a compact removable weighing lysimeter between February and August for two crop seasons 2019 and 2020 for the Spanish Mediterranean.

$ET_{C_{lys}}$  was determined from the water balance, and the  $K_{C_{lys}}$  values were determined as the ratio of the actual evapotranspiration, measured on the removable weighing lysimeter, and the reference evapotranspiration. The average values of  $K_{C_{lys}}$  for the bell pepper for the initial, middle, and final stages were 0.57, 1.06, and 0.80, respectively.  $K_C$  regression models were obtained as a function of the fraction thermal units, achieving a maximum correlation of 0.67 ( $R^2$ ). In general, the  $K_C$  values obtained in this research work were lower in the initial and end stages and larger in the middle stage compared to the FAO-56 values and to values in other countries with semiarid conditions.

---

The bell pepper yield increased by 7.72% in 2019 and by 3.49% in 2020 compared to the yield reported by the Ministry of the Environment and Rural and Marine Areas of the Spanish Government in 2019 and with minimal water loss through drainage. The results in this work can help farmers to determine the crop water requirements and to improve system efficiency in semiarid locations with conditions like those of the study.



## 1. Introducción

El 71% de la superficie del planeta está cubierto por agua, de la cual el 97.5% es salada y está retenida en los océanos, mientras que el 2.5% es agua fresca o dulce. El 68.7% del agua dulce está congelada en glaciares y casquetes polares, el 30.1% es agua subterránea y el 1.2% está en la superficie en forma de lagos, ríos, vapor de aire, humedad en el suelo, pantanos, seres vivos e hielo terrestre (USGS, 1993).

El sector agrícola es el mayor usuario de agua dulce en el mundo, consumiendo cerca 85% del total (Vico and Porporato, 2010). La agricultura compite con otros sectores por el vital líquido, tales como la industria, la minería, la demanda urbana, entre otros, haciendo que aumente la escases de agua para el sector agrícola (Sánchez-Bravo *et al.*, 2020). La agricultura de regadío es de vital importancia para la población mundial ya que produce el 40% de los alimentos en el mundo, en tan sólo el 18% del total del tierras cultivadas alrededor del mundo (García-Tejero *et al.*, 2011).

La distribución desigual del agua y el impacto del cambio climático, causante de temperaturas elevadas y bajos niveles de precipitación, provocan mayor demanda hídrica de los cultivos y añaden incertidumbre al garantizar el abastecimiento de agua a la agricultura (Evans and Sadler, 2008). Esta problemática es reflejada en las regiones áridas y semiáridas, donde las fuentes de abastecimiento se ven reducidas a medida que el cambio climático va aumentando (Parra *et al.*, 2020). En consecuencia, estas regiones demandan estrategias para mejorar la eficiencia del uso del vital líquido para obtener cultivos sostenibles y

económicamente rentables, este es el caso del sureste de España (Fernández-Pacheco *et al.*, 2014; Navarro-Hellín *et al.*, 2016).

La eficiencia de la aplicación del agua en el riego es baja, alrededor del mundo se estima cerca del 40%, significando que el 60% del agua extraída de las fuentes de abastecimiento es desperdiciada. Al mejorar la eficiencia de aplicación coadyuvará a mejorar los beneficios económicos y ambientales (Ooi *et al.*, 2010). Entre los diferentes métodos de riego que logran hacer un uso eficiente del agua es el localizado (Sandhu *et al.*, 2019), su eficiencia de aplicación van de 70 a 95% suponiendo un sistema de riego en buenas condiciones y bien diseñado (Pereira *et al.*, 2010); sin embargo, si este no se cumple, el sistema derrochará agua debido a que la tasa o el volumen de aplicación del riego no es el adecuado, el sistema es defectuoso o ambos.

Para hacer un uso eficiente del recurso hídrico es necesario el entendimiento de la actuación de los flujos de agua en el sistema suelo-planta-atmosfera. A partir del balance de esos flujos es posible conocer los requerimientos hídricos de cualquier cultivo. Los flujos considerados como entrantes a dicho sistema son el riego y la lluvia; la evapotranspiración, el drenaje más allá de la zona de raíces y los escurrimientos superficiales son considerados como los flujos de salida o pérdidas de agua (Jensen, 2007).

Los requerimientos o necesidades hídricas de los cultivos son definidos por la evapotranspiración, este parámetro incluye características genéticas del cultivo y condiciones climáticas a los que se está siendo sometidos (Allen *et al.*, 1998). Antes de satisfacer dicho requerimiento hídrico es necesario conocer la capacidad que tiene el suelo en aceptar y almacenar el agua entrante, esto para no aplicar de manera arbitraria el agua y causar escurrimientos superficiales no deseados. Esto ayudará a controlar la disponibilidad de agua dentro de la zona de raíz, en orden para mejorar la calidad y productividad de los cultivos, y así, establecer una programación de los requerimientos hídricos del cultivo con una tasa de aplicación del riego adecuada.

En este contexto, la velocidad de infiltración indicará la cantidad o el volumen de agua que entra en determinado tiempo (Kirkham, 2010). La infiltración del agua en el suelo varía en espacio y tiempo, debido a la textura del suelo, prácticas culturales, porosidad,

densidad aparente, variaciones del clima, compactación, contenido de humedad inicial, entre otras (Mattar *et al.*, 2015; Yuan *et al.* 2019). Cuando la intensidad de lluvia o la tasa de riego excede la capacidad de infiltración del suelo se producen encharcamientos y escurrimientos superficiales, causando bajas eficiencias de aplicación del riego y erosión del suelo por el arrastre de las partículas sólidas con el agua (Ali, 2010; Arriaga *et al.*, 2010).

Existen modelos matemáticos que describen el movimiento del agua en el suelo a partir de variables que gobiernan e influyen en el proceso de infiltración que requieren de experimentación complicada y detallada para describirlo. A largo de los años estos modelos han sido simplificados a modelos empíricos o semiempíricos resultantes de la experimentación en las diferentes texturas de suelo. Los dispositivos que usualmente han sido usado para medir *in situ* la velocidad de infiltración del agua debido a su simplicidad y fácil operación en una dimensión son los infiltrómetros (Ali, 2010; Mahmood and Latif, 2005; Teófilo-Salvador and Morales-Reyes, 2018).

El volumen infiltrado en estos dispositivos es medido con dos enfoques, volumen de agua necesario para mantener un nivel constante de encharcamiento en el anillo interior o volumen obtenido por la disminución del nivel de agua del anillo interior (Arriaga *et al.*, 2010; Fatehnia *et al.*, 2016). Sin embargo, los datos obtenidos con estos dispositivos pueden no representar un movimiento vertical, debido a que pueden presentarse flujos horizontales de agua debajo de los anillos y que representaría errores de medición; dichos anillos son de acero y crean una compactación en un suelo húmedo o destrucción de la estructura de un suelo seco ya que son instalados usando la fuerza (Bagarello and Sgroi, 2004).

Una vez caracterizado y entendido el comportamiento del agua en el suelo, una forma sencilla de lograr la programación de los riegos es mediante la utilización de manuales de riego. Estos ofrecen valores estándar de los coeficientes de desarrollo de diferentes cultivos y velocidades de infiltración de diferentes texturas de suelos. Sin embargo, al usarlos no se estaría representando las condiciones climáticas del lugar en donde se realiza la plantación, ya que dichos valores fueron calibrados en condiciones distintas, y esto puede causar un exceso en la aplicación del agua e ir arrastrando un sesgo en la planeación. Además, éstas metodologías no cuenta con una supervisión continua en el tiempo, y no es posible detectar

alguna incidencia (Elaydi, 2017). Mediante el uso de tecnologías es posible medir los parámetros que intervienen en el riego, obteniendo información previa y haciendo un monitoreo continuo en el tiempo de estos parámetros que ayudarán en el diseño y corrección de la aplicación del agua (Katyara *et al.*, 2017).

Entre las tecnologías que ayudan en la planeación del riego están los sensores electrónicos que monitorizan y miden las variables *in situ* presentes en el clima, el suelo y planta, teniendo en cuenta de ante mano cuáles variables serán las utilizadas en la toma de decisión del cuándo y cuánto regar, y así saber qué tipo de sensor utilizar (Pereira *et al.*, 2010). En este contexto, los lisímetros de pesada han sido ampliamente usados para establecer y calibrar modelos matemáticos referentes al riego, ya que miden de manera directa las pérdidas de agua mediante la evapotranspiración o drenaje y los flujos entrantes de agua como la lluvia o el riego (Bello and Van Rensburg, 2017; Hannes *et al.*, 2015). Por lo que muestran ser una herramienta factible y precisa de medir de forma directa la infiltración del agua en el suelo.

A partir de lo anteriormente descrito, se ha planteado la siguiente hipótesis, con la utilización de un lisímetro de pesada es posible hacer la gestión del riego mediante la caracterizar de la capacidad de infiltración de un suelo y la determinación de la evapotranspiración de cultivo, por su alta precisión de medición, y sus buenos resultados en la determinación de los flujos de agua actuantes en el suelo.

Para demostrar dicha hipótesis, el objetivo general de esta Tesis Doctoral fue hacer una gestión del riego y optimización del recurso hídrico en zonas con limitaciones de agua, como el sureste español, a través del desarrollo y aplicación de enfoques matemáticos que describan la velocidad de infiltración del agua en el suelo en función del contenido de humedad de un suelo franco-limoso y la determinación de la evapotranspiración y coeficientes de desarrollo del pimiento (*Capsicum annuum L.*) usando los datos de masa de un lisímetro de pesada.

Para lograr el objetivo general fueron planteados los siguientes objetivos específicos:

1. Desarrollar dos enfoques para la determinación de la velocidad de infiltración del agua cuando el contenido de humedad en el suelo está por encima y por debajo de la capacidad de campo a partir de un balance hídrico de los datos de masa del lisímetro de pesada durante lluvias inestables.
2. Calibrar los modelos de infiltración de Kostiakov, Kostiakov Modificado, Horton y Philip con los datos obtenidos en los dos enfoques de velocidad de infiltración determinados en el objetivo anterior.
3. Medir la evapotranspiración y determinar los coeficientes de desarrollo del pimiento durante las dos temporadas de plantación del 2019 y 2020 con los datos del lisímetro de pesada, comparando los resultados con otras metodologías y obtener modelos del coeficiente del cultivo en función de las unidades térmicas fraccionales.
4. Evaluar el rendimiento del pimiento durante las temporadas del 2019 y 2020 mediante indicadores de productividad de uso del agua y el valor promedio de producción en la región.

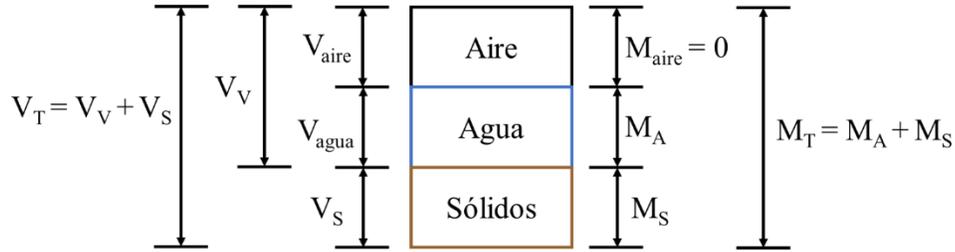


## 2. Antecedentes y Estado del Arte

Se hará una breve definición de los principales conceptos que intervienen en la relación agua-suelo-planta y su estudio a lo largo de los años, para entender el movimiento del agua en el suelo, el proceso de infiltración, y la determinación del requerimiento hídrico del cultivo.

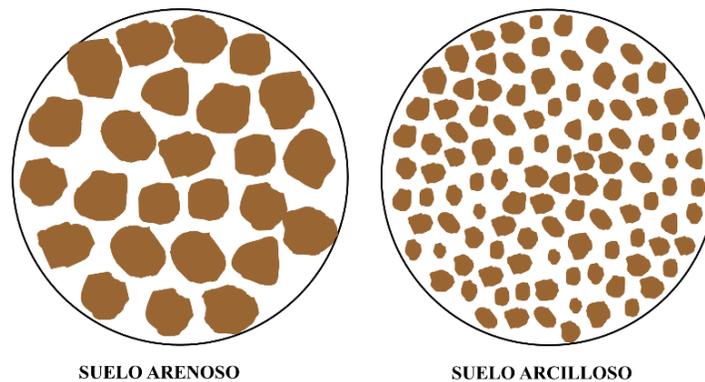
### 2.1. Propiedades físicas del suelo

El suelo es un sistema trifásico poroso (Fig. 1) que consta de una **fase sólida**, formada por minerales de distintos tamaños y materia orgánica, una **fase líquida** representada por el agua y una **fase gaseosa** constituida por aire u otros gases (Ali, 2010). La suma de la masa del agua ( $M_A$ ) y de la masa las partículas sólidas ( $M_s$ ) representan la masa total del suelo ( $M_T$ ), ya que la masa del aire ( $M_{aire}$ ) es considerada despreciable. En cambio, el volumen total del suelo ( $V_T$ ) es igual a la suma de los volúmenes de las tres fases del suelo; el volumen de vacíos ( $V_v$ ) representa la suma del volumen de aire ( $V_{aire}$ ) y el volumen de agua ( $V_{agua}$ ), todo esto es reflejado en la Fig. 1.



**Figura 1.** Sistema trifásico del suelo.

La textura o granulometría del suelo indica el contenido de las partículas sólidas en función a su diámetro y se definen tres clases: las partículas gruesas con diámetro entre 2 mm y 50  $\mu\text{m}$  son denominadas **arenas**, diámetros de partículas de 50  $\mu\text{m}$  a 2  $\mu\text{m}$  son **limos** y menores de 2  $\mu\text{m}$  son **arcillas** (Staff, 1951). El tamaño de las partículas sólidas define el tamaño y el número de poros o vacíos del suelo. Un suelo arcilloso cuenta con gran cantidad de espacios porosos, en cambio en un suelo arenoso tiene menos huecos, debido a que sus partículas sólidas son más grandes y ocupan mayor espacio, como se aprecia en la Fig. 2 (Tarjuelo Martín-Benito, 1991).



**Figura 2.** Poros de un suelo de textura gruesa (arenoso) y un suelo de textura fina (arcilloso).

Por ende, la porosidad de un suelo ( $P$ ) es medida como el cociente entre el volumen de vacíos ( $V_V$ ) y el volumen total que ocupa el suelo ( $V_T$ ); ésta también puede ser estimada a partir de la densidad aparente ( $\rho_a$ ) y real del suelo ( $\rho_r$ ). La densidad aparente es definida como la relación entre la masa del suelo secado a estufa ( $M_S$ ) y el  $V_T$ , y para obtener la densidad real de un suelo se tiene que dividir la  $M_S$  sobre el volumen que ocupa los sólidos ( $V_S$ ), ésta última densidad tiene un valor promedio de 2.65 a 2.7  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  en partículas

minerales como las del suelo (Koorevaar *et al.*, 1999). Todo lo antes señalado puede ser observado en la siguiente Ecuación 1 y teniendo en cuenta la Fig. 1:

$$P(\%) = \frac{V_v}{V_T} = \frac{V_T - V_s}{V_T} = 1 - \frac{V_s}{V_T} = 1 - \frac{V_s \times M_s}{M_s \times V_T} = \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_r}\right) \cdot 100 \quad (1)$$

Una alta densidad aparente indica un suelo con porosidad pequeña y por lo tanto compactado; la compactación afecta a la aeración, permeabilidad, velocidad de infiltración del agua y drenaje del suelo, además, dificulta el desarrollo de la raíces y la emergencia de la semilla o plántula (Koorevaar *et al.*, 1999).

## 2.2. Propiedades hidrodinámicas del suelo

### 2.2.1. Movimientos del agua en el suelo

Los movimientos de agua a través del espacio poroso en el suelo pueden clasificarse en función en su dirección (Duchaufour, 1998; Plaster, 2013; Wang *et al.*, 2017):

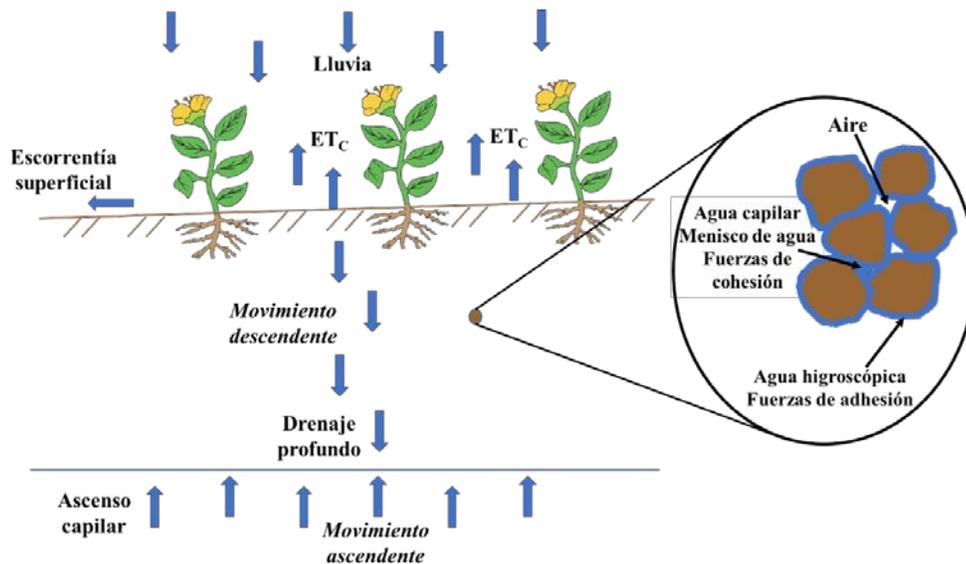
- i. **Escorrentía superficial**, se le domina al agua que circula paralelamente a la superficie del suelo arrastrando las partículas finas de éste.
- ii. **Movimientos descendentes**, es el agua que se mueve de forma descendente a través del suelo debido a la fuerza de gravedad. La velocidad del agua dentro del suelo es rápida en las primeras horas después de la lluvia, ya que el agua primero circula entre los grandes poros; el agua nunca se detiene por lo que seguirá moviéndose lentamente hasta alcanzar la capa permeable del suelo alimentando a las corrientes subterráneas.

Es su paso, el agua va quedando retenida en los poros medianos y pequeños por acción de la capilaridad; es decir, mediante las fuerzas de adhesión y cohesión que son lo suficientemente elevadas para oponerse a la gravedad, las partículas sólidas van creando una película fina de agua alrededor de cada una de ellas y meniscos de agua entre ellas.

La fuerza de adhesión es la fuerza de atracción ente las moléculas de agua y las partículas del suelo; una vez que la partícula del suelo ya fue recubierta por las moléculas del agua las fuerzas de cohesión comienzan a actuar, es decir las moléculas de agua empieza atraerse entre sí ya que no pueden adherirse a las partículas sólidas. Por lo que únicamente, el agua presente en los meniscos puede ser absorbida por las raíces de la planta.

- iii. **Movimientos ascendentes**, son las pérdidas de agua a través de la evaporación o evapotranspiración en periodos secos donde no hay ingresos de agua en el suelo, por lo que, si el suelo es cercano al manto freático o alguna corriente subterránea tratará de compensar estas pérdidas con agua subterránea a través del efecto de la capilaridad, a esto se le denomina ascenso capilar.

En la Fig. 3 se representa el comportamiento del agua de un evento de lluvia dentro del suelo, basado en los tres movimientos anteriormente descritos.



**Figura 3.** Representación de los movimientos del agua a través del suelo durante un evento de lluvia.

### 2.2.2. Tipos de agua

A partir de la descripción del movimiento descendiente del agua en el suelo, el agua en el suelo puede agruparse en tres grupos en función a su unión de la partícula del suelo y disponibilidad para las plantas, (Tarjuelo Martín-Benito, 1991), los cuales son:

- i. *Agua gravitacional*, es el agua que ocupa brevemente los grandes poros y que es drenada por la acción de la fuerza de la gravedad.
- ii. *Agua capilar*, es el agua que logra vencer la fuerza de gravedad y es retenida entre las partículas sólidas del suelo, formando un menisco de agua disponible para las plantas, ver Fig.3.
- iii. *Agua higroscópica*, es el agua que está fuertemente ligada a las partículas del suelo y que no puede ser usada por las plantas, ver Fig.3.

### 2.2.3. Potencial hídrico

La tendencia del movimiento descendente del agua desde la superficie del suelo a través de las partículas sólidas, las raíces, macroorganismos, semillas, entre otros, es medida mediante el potencial hídrico del suelo (Foth, 1990). El potencial hídrico ( $\Psi$ ) mide la energía necesaria para que las moléculas de agua realicen el trabajo del movimiento descendente de más a menos potencial (Duchaufour, 1998). El  $\Psi$  es el resultado de las contribuciones individuales de los diferentes niveles de energía del agua en el suelo y es expresado como la suma del potencial de gravedad ( $\Psi_g$ ), el potencial mátrico ( $\Psi_m$ ) y el potencial osmótico ( $\Psi_o$ ). Usualmente, la unidad de los potenciales es el bar. 1 bar equivale a 0.1 MPa, 100 kPa o 3 pF en escala logarítmica (Plaster, 2013).

El  $\Psi_g$  es el movimiento que gobierna la infiltración del agua de lluvia, definido como el movimiento desde elevaciones altas a bajas, este potencial tiene un valor positivo y es el primer movimiento en un suelo saturado. El  $\Psi_m$  es el resultante de la atracción de agua con

las partículas del suelo, su valor es negativo y está presente en un suelo insaturado. Por último, el  $\Psi_o$  se presenta únicamente en suelos con alto contenido en sales, las moléculas de agua son atraídas por los iones de sal, este es el más bajo de los potenciales y tiene un valor negativo. En la mayoría de los suelos, el potencial hídrico sólo está dado por la suma de  $\Psi_g$  y  $\Psi_m$ , representado en la Ecuación 2 (Duchaufour, 1998; Plaster, 2013):

$$\Psi = \Psi_g + \Psi_m \quad (2)$$

Cuanto más bajo es el potencial de agua del suelo, el agua es atraída más estrechamente a las partículas del suelo y puede moverse con menos libertad. Usualmente, el valor del potencial hídrico es negativo, porque el valor mayor representa el  $\Psi_m$ . Por lo tanto, mientras mayor sea el valor absoluto del número negativo, menor será el potencial hídrico. Cuando se habla de un valor potencial hídrico alto, indica que el agua se mantiene libre, se mueve fácilmente y es disponible para las plantas. El agua se mueve de un alto potencial, es decir de un suelo húmedo, a un potencial bajo donde el suelo está seco. Este proceso permite la infiltración, en el cual el agua se mueve fácilmente hasta un estado de bajo potencial. Cuando la lluvia cae a un suelo seco, el agua tiene un alto potencial por lo que tiene un gran movimiento en el suelo (Plaster, 2013).

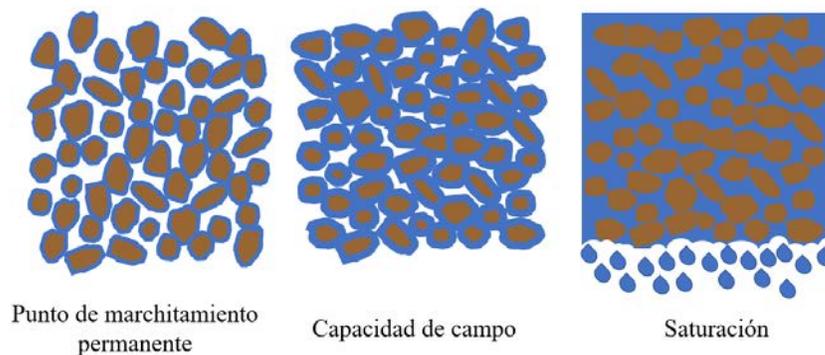
#### 2.2.4. Contenidos de agua en el suelo

A partir de los tipos de agua y de los potenciales definidos anteriormente, tres contenidos de agua o humedad en el suelo son definidos a partir de su disponibilidad para las plantas y retención en el suelo (ver Fig. 4):

- i. **Contenido de agua a saturación** ( $\theta_s$ ), este contenido de humedad es alcanzado cuando todos los espacios vacíos del suelo se encuentran llenos de agua; en este nivel, el suelo ya no es capaz de aceptar más agua por lo que comienza a desplazar o drenar agua por la parte inferior durante 24 a 48 horas hasta alcanzar un estado de estabilidad. El agua también comienza a almacenarse en la parte superficial, causando el denominado escurrimiento superficial. Un suelo saturado no permite

la respiración de la planta por los bajos niveles de oxígeno afectando el desarrollo de la planta (Villalobos *et al.*, 2002). En este contenido de agua el potencial mátrico es cero y el gravitacional es el dominante (Plaster, 2013). Según Villalobos *et al.* (2002) and Delleur (2006), el  $\theta_s$  corresponde al 85% de porosidad del suelo.

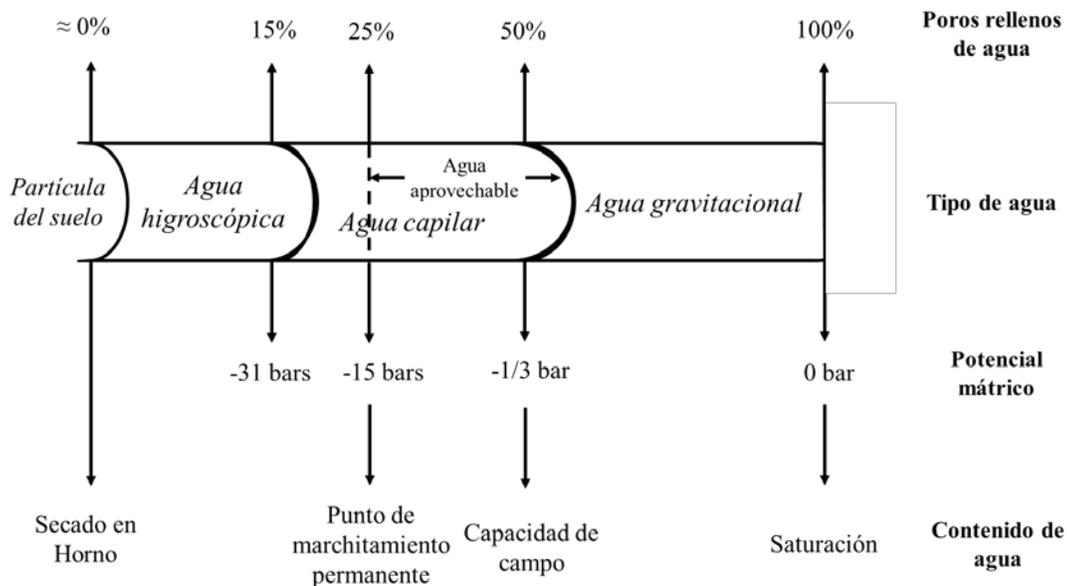
- ii. **Contenido de agua a capacidad de campo** ( $\theta_{CC}$ ), según su definición este es alcanzado dos o tres días después de un evento de lluvia o riego que llevo el suelo a saturación, es decir, cuando el drenado del agua se haya detenido, evitando las pérdidas de agua por evapotranspiración. (Duchaufour, 1998). En este nivel, el potencial mátrico y el gravitacional están en equilibrio, dando un potencial hídrico cercano a 1/3 bar. Este contenido de agua es el ideal para el crecimiento de la planta, ya que existe suficiente aire y el agua es más libre debido a su alto potencial (Plaster, 2013).
- iii. **Contenido de agua en el punto de marchitamiento permanente** ( $\theta_{PMP}$ ), es el contenido en el cual la planta muere de forma irreversible, debido a que la poca agua almacenada en el suelo está fuertemente ligada a las partículas del suelo y no puede ser absorbible por las raíces de la planta (Duchaufour, 1998) ver Fig. 4. El valor del potencial hídrico es usualmente de -15 bars, variando acorde a las plantas. El agua sigue agotándose hasta alcanzar el agua higroscópica donde es retenida entre los - 31 y -10,000 bars y sólo puede ser removida cuando el suelo es secado en horno (Plaster, 2013).



**Figura 4.** Contenidos de humedad en el suelo.

El contenido de humedad útil del suelo en la cual el cultivo pueda extraer el agua está entre  $\theta_{CC}$  y  $\theta_{PMP}$  y es denominado como humedad aprovechable del suelo (HA); en suelo arenosos, la HA es baja debido a su textura gruesa, mayor para los limos y arcillas (Duchaufour, 1998; Fuentes Ruíz *et al.*, 1997). Sin embargo, no todos los cultivos son capaces de extraer todo ese contenido de agua resultante, es decir, algunos cultivos perecen en límites superiores al  $\theta_{PMP}$  por lo que es necesario agregarle un factor que fraccione la HA del suelo, este factor indica cuando el cultivo comienza a mostrar síntomas de clorosis, afecciones en el crecimiento, marchitez, entre otros (Fuentes Ruíz *et al.*, 1997).

En la Fig. 5 se muestra un resumen de los apartados anteriores que describen los estados del agua en el suelo.



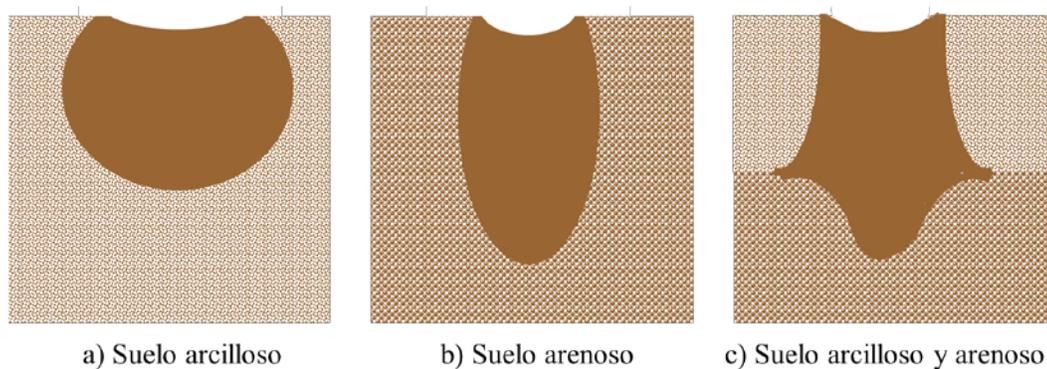
**Figura 5.** Comportamiento del contenido de agua en el suelo.

Moreno *et al.* (1978) establecieron una relación entre la retención de humedad y la textura del suelo en el margen del agua no disponible (agua higroscópica entre 4.2 y 6.0 pF). Ellos han encontrado una fuerte dependencia del contenido de humedad y las partículas finas. Cuando el suelo está entre 4.2 y 4.6 pF, las partículas menores a 0.02 mm son las que dominan la retención de humedad, y para tensiones que van de 4.6 a 6.0 pF las partículas que controlan la retención de humedad son las menores a 0.002 mm.

### 2.2.5. Frente húmedo

El agua que está ligada a la partícula sólida del suelo se va haciendo más grande con el paso del tiempo, por lo que un determinado momento suelta el agua y permite el avance de ésta, gracias al empuje de la gravedad y arrastre de la capilaridad que hace que el flujo de agua sea mueva en todas direcciones, definiendo a su paso un frente húmedo y dejando atrás un suelo casi saturado. Durante, el avance del agua a través del suelo va sufriendo pérdidas por fricción, en suelos con poros pequeños como los suelos arcillosos sufre más pérdidas, por lo que el avance del agua es lento, en cambio en suelos arenosos con poros más grandes el movimiento del frente húmedo es más rápido (Plaster, 2013), esto es reflejado en la Fig. 6a y 6b.

En la Fig. 6c, el agua es fuertemente retenida en los pequeños poros de los suelos arcillosos por lo que al llegar al horizonte arenoso el frente húmedo tiende expandirse a los costados en lugar de ser arrastrado a los grandes poros de suelo arenoso, usualmente el agua se mueve de los grandes a los pequeños poros por el potencial matricial. Cuando el horizonte superior este saturado, el potencial gravitacional será lo suficientemente alto para arrastrar el agua por gravedad a la arena (Plaster, 2013).



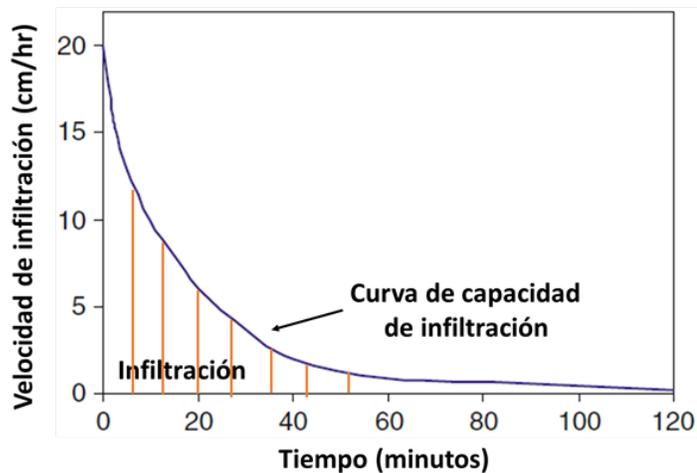
**Figura 6.** Avance del frente húmedo en diferentes horizontes del suelo: a) textura fina, b) textura gruesa y c) horizonte inferior de textura fina e inferior de textura gruesa.

### 2.3. Infiltración

Al proceso de entrada de agua en el suelo se le conoce como infiltración, así que la cantidad de agua infiltrada en un determinado tiempo se le denomina infiltración acumulada (I), y la infiltración por unidad de tiempo es dada por la velocidad de infiltración, (VI) (Kirkham, 2010; Smith *et al.*, 2002), esta relación es descrita en la siguiente Ecuación 3:

$$VI = \frac{dI}{dt}, \quad I = \int_0^t VI dt \quad (3)$$

En las primeras etapas de la entrada del agua en un suelo relativamente seco domina el gradiente matricial sobre la gravitacional (Kirkham, 2010; Smith *et al.*, 2002). A medida que el frente húmedo va avanzando el potencial mátrico va disminuyendo, ya que el potencial gravitacional va aumentando en la zona húmeda (casi saturada) del frente húmedo, por lo que la infiltración puede considerarse un movimiento vertical descendente (Ferguson, 1994; Smith *et al.*, 2002). Conforme el tiempo pasa la infiltración se estabiliza a una velocidad básica o constante inducida por la gravedad que se aproxima a la conductividad hidráulica (Ferguson, 1994). La infiltración no ocurre en condiciones de saturación (Smith *et al.*, 2002).



**Figura 7.** Curva típica de capacidad de infiltración del agua en el suelo.

Al graficar la VI del agua en el suelo con respecto al tiempo se forma una curva exponencial inversa desde la velocidad máxima de infiltración hasta cuando se vuelve

estable, esta curva se muestra en la Fig. 7. A esta curva se le denomina capacidad de infiltración, cuando la velocidad de aplicación del riego o la intensidad de lluvia es mayor a la velocidad que define la curva se produce escorrentía superficial, es decir agua que fluye paralelamente a la superficie del suelo (Delleur, 2006; Horton, 1941). La tasa de aplicación del riego debe ser diseñado a partir de la VI básica para evitar la escorrentía superficial, y lograr eficiencia en el uso del agua (Fuentes Ruiz et al., 1997).

La VI es variable en espacio y tiempo, debido a la textura del suelo, conductividad hidráulica saturada, existencia de diferentes estratos o horizontes con diferente textura, prácticas culturales, porosidad, densidad aparente, variaciones del clima, grado de compactación, contenido inicial de agua en el suelo, materia orgánica, entre otras (Mattar *et al.*, 2015; Tarjuelo Martín-Benito, 1991; Yuan *et al.*, 2019).

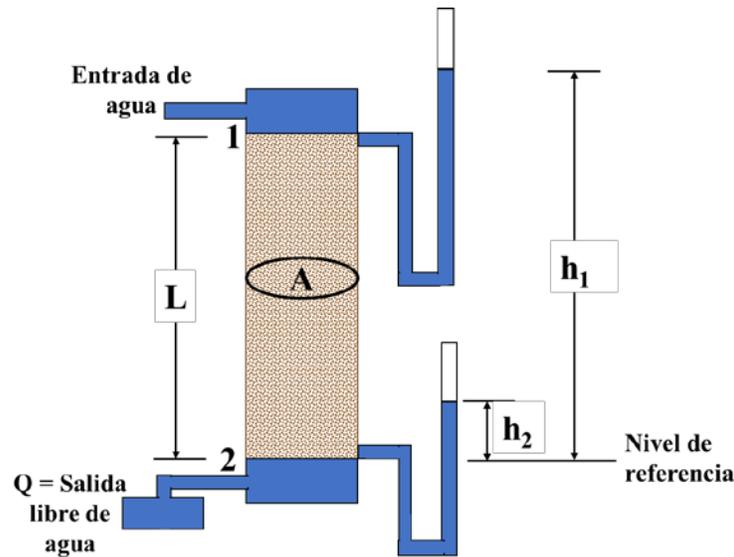
La velocidad de infiltración del agua está condicionada al contenido de humedad presente en el instante que comience el ingreso de agua en el perfil del suelo, un suelo seco tendrá mayor velocidad de infiltración ya que el agua se mueve hacia a una parte donde el suelo tiene un potencial más bajo. La velocidad de infiltración (dI) básica es mayor para suelos de textura gruesa y baja en suelos de textura fina (Villalobos *et al.*, 2002). La compactación disminuye la VI, ya que se obstruyen los grandes poros que sirven de canales por donde el agua se mueve. La materia orgánica mejora la estructura del suelo y por lo tanto la VI (Plaster, 2013).

La infiltración puede ser determinada indirectamente mediante la solución numérica de las ecuaciones del flujo en el medio poroso (Smith *et al.*, 2002). El primer modelo en describir velocidad del agua en el suelo fue la ley Darcy obtenida experimentalmente en suelo saturado en 1856, usando una columna de suelo vertical de longitud L y de área transversal A, ver la Fig. 8. Esta ley establece que el flujo de agua entrante a un suelo saturado es linealmente proporcional a la sección por la cual se está moviendo y al gradiente hidráulico ( $dh/dL$ ), entendiéndose por este último como la pendiente entre los dos puntos en los cuales se está midiendo la altura del agua (Ecuación 4). Cada tipo de suelo tiene una constante de proporcional lineal específico (K), Darcy lo denominó como conductividad hidráulica e

indica la habilidad que tiene el suelo a transmitir el agua en un suelo saturado (Ferguson, 1994; Kirkham, 2010).

$$Q \propto A \cdot \left( \frac{h_1 - h_2}{L} \right) \quad (4)$$

$$Q = K \cdot A \cdot \left( -\frac{dh}{dL} \right)$$



**Figura 8.** Experimentación para la ley de Darcy.

En términos de velocidad del flujo por unidad de área, la ecuación de Darcy puede ser rescrita usando la equivalencia de la ecuación de continuidad (Ecuación 5), resultando la Ecuación 6 (Ferguson, 1994; Koorevaar *et al.*, 1999; Smith *et al.*, 2002):

$$Q = v \cdot A \quad (5)$$

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{K \cdot A \cdot \left( -\frac{dh}{dL} \right)}{A} = -K \cdot \frac{dh}{dL} \quad (6)$$

donde  $v$  es la velocidad del agua,  $Q$  es el caudal de agua ingresado,  $h$  representa el potencial de energía comprendido entre el potencial mátrico más el potencial gravitacional y  $L$  es medido en dirección del flujo vertical con  $z$  positivo hacia abajo, tenemos que (Angulo-Jaramillo *et al.*, 2016; Smith *et al.*, 2002):

$$h = \Psi - z \quad (7)$$

La conductividad hidráulica debe estar en función del contenido de humedad, para ser usada en flujo no saturado (Delleur, 2006; Tarjuelo Martín-Benito, 1991), la ecuación resultante es denominada la ecuación de Darcy-Buckingham quedando de la siguiente manera:

$$v = -K(\theta) \left( \frac{d\Psi}{dz} - 1 \right) \quad (8)$$

Cuando un suelo no está saturado los valores del  $\Psi$  son menores que cero, esto porque en un suelo no saturado domina más el potencial matricial que el gravitacional (Delleur, 2006; Tarjuelo Martín-Benito, 1991).

Años después Richards (1931) estableció su modelo del movimiento de agua en suelo no saturados (Ecuación 10), conjugando la ley de Darcy-Buckingham (Ecuación 8) y la ecuación de continuidad en dirección vertical (Ecuación 9). Se establece un flujo de agua vertical descendente con coordenadas conocidas que parten de la superficie del suelo. En este modelo son implicados los contenidos de humedad ( $\theta$ ), el cabezal de succión y la conductividad hidráulica del suelo ( $K$ ). Asumiendo un suelo homogéneo, uniforme, material poroso inerte y con un efecto del movimiento en el aire insignificante (Ali, 2010; Angulo-Jaramillo *et al.*, 2016; Smith *et al.*, 2002).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial z} \quad (9)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K(\theta) \left( \frac{\partial \Psi}{\partial z} - 1 \right) \right) \quad (10)$$

Algunos de los parámetros del modelo de Richards requieren de experimentación detallada, por lo que modelos simplificados basados en propiedades físicas del suelo, fueron propuesto para describir la infiltración del agua unidireccional del suelo; entre los cuales destacan Kostiakov, Kostiakov Modificado, Lewis (1937), Philip (1957), Horton (1941), Mahmood and Latif (2005), Mattar *et al.* (2015), entre otros.

El modelo de Kostiakov fue desarrollado a partir de las observaciones del volumen infiltrado y el tiempo, por lo que no tiene un significado físico con respecto al suelo (Kirkham, 2010). A partir de los datos obtenidos en la experimentación fue observado que tendían a un valor final constante, así que al modelo original de Kostiakov le fue agregado una constante al final y se le denominó Kostiakov Modificado. Horton (1941) estableció su modelo de infiltración para nivel de cuenca, este modelo es resultado de simplificaciones realizadas a la ecuación de continuidad. En el modelo de Philip es asumido una condición inicial de encharcamiento (Kirkham, 2010).

Existen diferentes trabajos de investigación donde hacen mejoras a las ecuaciones típicas de determinación de infiltración de agua en el suelo. Yang, *et al.* (2020) establece una relación entre la capacidad de infiltración y el contenido de humedad para mejorar la ecuación de Horton. También existen trabajos donde se evalúan estos modelos típicos de infiltración como el trabajo de Babaei *et al.* (2018), el cual fue enfocado a encontrar el mejor modelo representativo para las tierras áridas de Irán y al mismo tiempo analizar la variabilidad espacial del proceso de infiltración. En este trabajo utilizan los modelos de Philip, Horton, Kostiakov, Kostiakov Modificado y Kostiakov Modificado Revisado mediante el uso de un infiltrómetro de tensión. El mejor modelo de predicción fue el de Kostiakov Modificado Revisado y además de ser el mejor para determinar la infiltración acumulada.

El efecto que tiene la vegetación en la superficie o el tipo de estructura del suelo sobre la velocidad de infiltración del agua fue evaluado por Almeida *et al.* (2018). En este trabajo fue analizada la VI de una intensidad de lluvia constante en un suelo desnudo, otro cultivado con labranza, otro sin labrar, y uno último con pasto. La infiltración acumulada fue determinada como la diferencia entre la lluvia artificial y el escurrimiento superficial. Este último parámetro fue calculado a partir de relación entre el volumen recolectado y el área experimental. Los datos de infiltración observados fueron ajustados a las ecuaciones de Kostiakov Modificada, Horton y Philip. La mayor velocidad de infiltración estable o básica encontrada fue cuando el suelo estaba sembrado sin labranza, en cambio las velocidades de un suelo cultivado con labranza y un suelo desnudo no difieren mucho. El modelo que mejor se ajusta es el de Horton. Concluyen que la cubierta vegetal es la que más influye en la velocidad de infiltración independientemente del suelo y no tanto por el tipo de labranza.

De manera parecida, Li *et al.* (2018) determinaron la infiltración en suelos franco-limosos, arenosos y una mezcla de ambos, en algunos de estos suelo les fue agregado una capa de octadecilamina para simular una capa hidrofóbica (repelente al agua). Los perfiles de suelo fueron construidos dentro de una botella de Marriot ya que entrega una tasa contante de agua. Así que la infiltración acumulada fue determinada a partir de la disminución del volumen de agua en un tiempo específico dividido por el área de la sección transversal de la botella. El avance del frente húmedo fue determinado visualmente con respecto al tiempo. El frente húmedo alcanzó los 45 cm en suelos sin capa repelente y 35 cm en aquellos suelos que si tenían dicha capa. Los perfiles de suelo con textura franco-limosa y arenosa produjeron zonas de transición bruscas del contenido de agua. La infiltración acumulada y la VI en un suelo franco limoso con capa repelente al agua disminuyeron conforma aumentaba el tiempo, concluyen que la posición de las capas del suelo tiene menor importancia con respecto a la capa de repelencia al agua en el efecto al comportamiento de la infiltración.

Cui *et al.* (2019) encontraron que la velocidad de infiltración de agua en el suelo (VI) es afectada por el contenido de humedad del suelo y principalmente por el volumen de raíces. Las raíces con diámetro mayores a 4.5 mm tuvieron una correlación negativa con la VI, en cambio la VI inicial era afectada por el contenido de agua en el suelo, disminuyendo conforme el tiempo va aumentando. Las VI fueron determinadas de forma automática a través de un sistema que consistía en una computadora, una cámara, un trípode y una bomba peristáltica, en cinco diferentes pastizales artificiales. Una bomba suministraba agua al suelo a una tasa constante, y la cámara controlada por la computadora capturaba imágenes cada 3 minutos. El algoritmo de determinación de VI estaba basado en el cambio de humedad del área, el gasto entrante y el tiempo. Todo esto fue realizado en una región de la meseta de China y en un suelo franco areno-limoso con una temperatura anual promedio de 9 °C y precipitaciones anuales de 584 mm.

Al igual que en el trabajo anterior, Liu *et al.* (2019) encontraron la relación entre el contenido de humedad del suelo y la raíces de tres diferentes pastizales en un suelo arenoso y bajo condiciones frías de la Región Autónoma de Mongolia en China. El contenido de humedad es el principal factor que influye en la velocidad de infiltración inicial y para la velocidad estable influyen la humedad y las raíces. La influencia de ambos disminuye con la

duración del tiempo de infiltración. La velocidad de infiltración fue determinada con el mismo sistema que utilizó Cui *et al.* (2019) y el mismo algoritmo.

Una simulación de la infiltración en un suelo heterogéneo con contenido de humedad inicial arbitrario, lluvia inestable y de drenaje libre fue realizada por Herrada *et al.* (2014). Utilizaron el método unidimensional de Richards para el cálculo de la VI. En condiciones de drenaje libre, asumen una variación del contenido de agua con respecto a la profundidad es igual a cero y la profundidad es igual a L en el fondo. Por lo tanto, la velocidad de infiltración es igual a la intensidad de la lluvia en el límite superior donde z es igual a cero y las condiciones de humedad menores a la saturación. Cuando el suelo está saturado la infiltración es determinada como lluvia menos escurrimiento superficial. La humedad del suelo en cualquier profundidad es determinada a partir del cambio de los flujos que atraviesa los límites superior e inferior del perfil del suelo. Los flujos son determinados a partir de las mediciones de la conductividad hidráulica del suelo y del cabezal de presión en saturación.

Un sistema para simular los procesos de infiltración, ascenso capilar, evapotranspiración y escurrimiento superficial fue desarrollado por del Valle Paniagua, *et al.* (2009) y sus resultados fueron validados con valores reales de arcilla y arena. La infiltración fue modelada con la ecuación de Richards, el ascenso capilar con la ley de Darcy ya que el agua asciende desde el manto freático y se comporta como un suelo saturado, para la modelación de la evapotranspiración potencial se utilizó la ecuación de Penman y de manera independiente con datos de precipitaciones se modeló el escurrimiento superficial. Su sistema desarrollado responde preguntas como: ¿cuál es la cantidad de escurrimiento superficial? y ¿cuándo se produce?, ¿para qué tipos de superficie se producen estancamientos?, ¿de qué magnitud son? y ¿cuándo suceden?, ¿cómo se comportan las capas del suelo? y ¿qué sucede cuando una de ellas se satura? y ¿cómo cambia la distribución del agua en el suelo a través del tiempo?

En cuanto a la escorrentía superficial, en el trabajo de Adekalu, *et al.* (2007) analizaron el efecto de acolchonado producido por la hierba en la infiltración, la escorrentía superficial y erosión del suelo. Probaron tres tipos de suelo con pendiente, con la intensidad de lluvia típica de la zona y con diferentes volúmenes de hierba. El volumen de agua infiltrada

se calculó como la diferencia entre el volumen de agua añadida y la suma de la escorrentía y el volumen interceptado por el mantillo de residuos de hierba. Existió una alta correlación entre las tres variables, la escorrentía y la erosión del suelo disminuyeron con la cantidad de hierba, pero aumentaron con la pendiente. La escorrentía tenía una correlación negativa con el contenido de arena, pero positivamente con el contenido coloidal (materia orgánica y arcilla). La infiltración aumentó y la erosión se redujo grandemente mientras mayor era la cobertura de hierba. Los residuos de hierba de elefante aumentan el almacenamiento de agua en el suelo y ayudan a reducir la erosión.

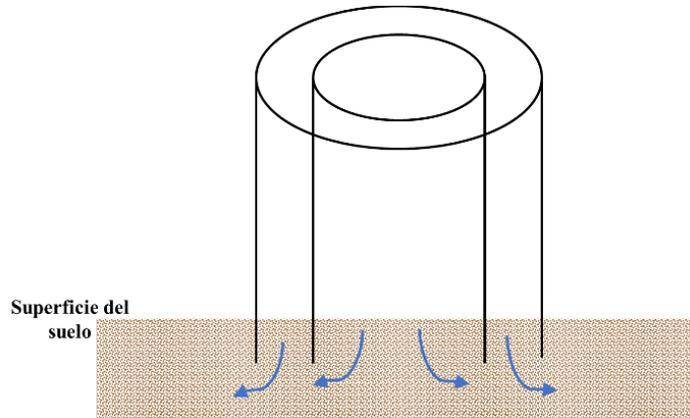
Entre los dispositivos más usados para obtener información de la infiltración *in situ* por su fácil manejo son los infiltrómetros, y estos pueden ser de uno o dos anillos (Fig. 9). Los infiltrómetros trabajan en condiciones de encharcamiento, es decir, los anillos o cilindros de metal son hincados dentro del suelo a poca profundidad (hasta 10 cm), después son rellenados de agua y la velocidad con que el agua se va moviendo dentro del suelo es registrada (Ali, 2010; Bagarello and Sgroi, 2004), a partir de la Ecuación 11:

$$VI = (\text{Lámina Infiltrada}_{i-1} - \text{Lámina Infiltrada}_i) / (\text{Tiempo}_{i-1} - \text{Tiempo}_i) \quad (11)$$

donde la lámina infiltrada representa el volumen de agua que ha entrado en un tiempo determinado.

Al paso del tiempo en estas pruebas *in situ*, la velocidad de infiltración se establece en una velocidad estable denominada conductividad hidráulica (Seiler and Gat, 2007). El flujo del agua por debajo del anillo no es únicamente vertical, esto por no haber paredes que obliguen al movimiento vertical, así que las fuerzas de capilaridad del suelo circundante hacen que el agua se mueva de manera lateral. En el caso del infiltrómetro de doble anillo trata de eliminar el error antes mencionado, al colocar un anillo externo con agua entre los dos anillos que forzará el movimiento vertical del agua que está dentro del anillo central (Ali, 2010).

Sin embargo, durante el hincado de los anillos de metal en el suelo se crea una compactación en suelos húmedos y fracturación de la macroestructura en suelos secos (Bagarello and Sgroi, 2004).



**Figura 9.** Infiltrómetro de doble anillo.

En el trabajo de Arriaga *et al.* (2010) se determinó la VI y conductividad hidráulica saturada de dos diferentes suelos, franco-arenoso y arcilloso, por medio de un infiltrómetro de doble anillo con condiciones de caída de cabezal, es decir, el nivel del agua medido dentro del anillo central disminuye en función del tiempo. Atribuyen las diferencias de los resultados en las propiedades hidráulicas, a la densidad aparente del suelo y al tamaño y distribución de las partículas. Los suelos con mayor contenido de arena y baja densidad aparente tienen mayor velocidad de infiltración casi-estable, infiltración acumulada y conductividad hidráulica a saturación. La conductividad a saturación fue determinada a partir de una ecuación que toma valores del radio del cilindro, profundidad de inserción del anillo, longitud de capilaridad macroscópica del suelo que es de  $0.12 \cdot \text{cm}^{-1}$  para la mayoría de los suelos agrícolas y dos constantes empíricas adimensionales que depende de la profundidad de inserción y de encharcamiento. Otros trabajos acerca de la determinación de la infiltración usando diferentes infiltrómetros son los de Mahmood and Latif (2005) y Fatehnia *et al.* (2016).

En algunas investigaciones utilizan el lisímetro para medir el flujo de drenado del agua del perfil de un suelo no saturado, como el trabajo de Masarik *et al.* (2004). A través de un lisímetro de equilibrio de tensión ajustan continuamente la tensión del lisímetro al

potencial mátrico del suelo circundante mediante un sensor disipador de calor que miden el potencial mátrico y una bomba que aplica succión al lisímetro. La succión comenzaba a los 2 kPa y paraba a los -35 kPa. El ajuste automático de la tensión del lisímetro permite mantener un equilibrio casi constante entre el suelo dentro del lisímetro y el suelo circundante, lo que proporciona una recogida más precisa del drenaje sin ser subestimada.

## 2.4. Evapotranspiración del cultivo

El método más eficaz en la programación del riego es basarlo en el consumo hídrico del cultivo, es decir, en la evapotranspiración (ET). El objetivo es compensar con riego las pérdidas de agua por ET del cultivo, que engloba dos procesos: i) pérdidas de agua por evaporación del suelo donde está creciendo el cultivo y ii) pérdidas de agua por la transpiración del cultivo, ambos procesos ocurren simultáneamente y es difícil distinguir entre uno y otro. Al hacer esto, se trata de mantener las mismas condiciones humedad en el suelo antes de sufrir dichas pérdidas de agua (Allen *et al.*, 1998; Shukla *et al.*, 2013), claro está que dichas condiciones de humedad deben estar dentro de la humedad aprovechable para el cultivo.

A medida que aumenta el área foliar del cultivo la evaporación del suelo va disminuyendo, esto se debe a que es principalmente determinada por la radiación solar que impacta sobre el suelo; en cambio la transpiración aumenta a medida que el cultivo se va desarrollando (Allen *et al.*, 1998)

La evapotranspiración puede clasificarse en función a las condiciones en la que es determinada:

- i. **Evapotranspiración de referencia** ( $ET_0$ ), refiere a la evapotranspiración de un cultivo hipotético similar a un pasto verde de gran extensión, abordando la demanda evaporativa del clima independientemente del tipo de cultivo. El cultivo hipotético asume una altura uniforme, bien regado, creciendo activamente y

uniformemente y causando sombra sobre toda la superficie del suelo (Pereira *et al.*, 2010).

El método estándar para determinar la  $ET_O$  es el de FAO Penman-Monteith, éste utiliza datos de temperatura del aire, humedad relativa del aire, velocidad del viento, horas luz y radiación solar. La  $ET_O$  también puede ser determinada a partir de datos de un tanque evaporímetro, condicionado a un buen manejo del tanque (Allen *et al.*, 1998).

- ii. **Evapotranspiración del cultivo ( $ET_C$ )**, es la ET referida a cualquier cultivo que este bajo buenas condiciones, es decir, buena fertilización, óptimas condiciones de humedad en el suelo, sin enfermedades, creciendo en grandes extensiones de tierra y que alcanza su máximo rendimiento, tomando en cuenta las afectaciones por condiciones climáticas. La  $ET_C$  es la relación entre la  $ET_O$  y un coeficiente de cultivo ( $K_C$ ), éste último caracteriza el crecimiento del cultivo en sus diferentes etapas fenológicas y resume las diferencias fisiológicas entre cultivos (Allen *et al.*, 1998).
- iii. **Evapotranspiración real o actual, ( $ET_a$ )**, es la ET del cultivo producida bajo condiciones diferentes a las antes mencionadas. El valor de  $ET_a$  se determina de la misma forma que la  $ET_C$ , sin embargo, hay que afectarlo por un coeficiente de estrés hídrico  $K_S$  o hacer un ajuste al  $K_C$  si presenta condiciones adversas a las óptimas, las cuales pueden ser la presencia de salinidad del suelo, plagas o enfermedades, estrés hídrico o exceso de agua, entre otras (Allen *et al.*, 1998).

La programación del riego a partir de la  $ET_C$  es buena si existe una medición precisa de este parámetro. A partir de las variaciones máscas de un lisímetro de pesada de precisión, y con un balance hídrico es posible determinar la evapotranspiración con muy buena exactitud (Allen *et al.*, 1998). Este método es ampliamente utilizado alrededor del mundo como parámetro determinante en el requerimiento hídrico del cultivo. A continuación, se verán algunos trabajos referentes al cálculo de la  $ET_C$  para distintos cultivos y diferentes condiciones climatológicas, esto para entender la importancia que tienen esas variables en la

determinación de  $ET_C$ . Además de otros trabajos donde son determinadas diferentes variables consideradas en el balance hídrico del suelo.

En los trabajos de Herbrich and Gerke (2016), Hannes *et al.* (2015), Peters *et al.* (2014) y Schrader *et al.* (2013) determinaron la evapotranspiración del cultivo y la lluvia a partir de los datos de masa de los dos recipientes de un lisímetro de pesada. El flujo de agua dentro de los recipientes es determinado como la diferencia de la masa en dos puntos de tiempo. Cuando la suma de la variación de masa de los dos recipientes con respecto al tiempo es mayor a cero indica que ha ingresado agua de lluvia, en cambio, cuando la suma es menor a cero indica que está ocurriendo pérdidas de agua por parte de la evapotranspiración del cultivo.

La lluvia es un parámetro presente en el balance hídrico del cultivo, en el trabajo de Hoffman *et al.* (2016) determinan la lluvia como se indica en el trabajo de Peters *et al.* (2014) en tres lisímetros que tiene área de  $1 \text{ m}^2$  y la comparan con la registrada en tres pluviómetros Hellman simples con área de captación de  $100 \text{ cm}^2$  y una altura de 33 cm, y con un pluviómetro de cubo basculante de  $200 \text{ cm}^2$ . Encontrando que los datos de precipitación obtenidos con la metodología de Peters *et al.* proveen una alta exactitud posible si son evitados errores sistemáticos (distorsiones por el viento o pérdida por evaporación). Los pluviómetros Hellman que fueron colocados directamente en la superficie del suelo tiene una comparable captación y precisión de medición de la lluvia como la del lisímetro por lo que podría ser una opción para grandes periodos. Sin embargo, Ducho and Biddle (2010) determinaron que los pluviómetros de cubo basculante llegan a ser insuficientes cuando la lluvia excede una intensidad de  $50 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  y cuando el viento supera una velocidad de  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . De manera similar en el 2007, Meissner *et al.* midieron la precipitación que se produce en forma de rocío, niebla y escarcha a través de un lisímetro. Estos eran determinados por los pequeños incrementos de masa y cuando las condiciones climáticas eran propicias.

Entre las metodologías indirectas en la determinación de la  $ET_C$  está el método estándar propuesto por Allen *et al.* (1998), en el Manual 56 de la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). El método consta de dos pasos, primero es determinado

la evapotranspiración de cultivo de referencia ( $ET_O$ ), en el cual se asume un cultivo hipotético similar al pasto que creciendo en buenas condiciones de humedad y con una altura uniforme. La  $ET_O$  es calculada a partir de datos climáticos, como la humedad relativa del aire, horas luz, radiación solar, velocidad del viento y temperatura del aire; este método es llamado FAO Penman-Monteith y representa el efecto del clima en el requerimiento hídrico del cultivo. El segundo paso refiere a un coeficiente de cultivo ( $K_C$ ), que representa el efecto del cultivo sobre la  $ET_C$  que integra propiedades físicas y fisiológicas del cultivo. Este parámetro puede ser determinado a partir de dos enfoques, el primero de ellos es denominado coeficiente único y es el cociente entre  $ET_C$  y la  $ET_O$ ; en el segundo enfoque, el  $K_C$  es la suma del efecto de la evaporación ( $K_e$ ) y transpiración ( $K_{cb}$ ) sobre el cultivo.

Existen diferentes maneras de determinar la  $K_C$ , una de ellas es considera el estrés de la cosecha a través de las unidades térmicas fraccionales (FTU) o días grados de crecimiento de la temperatura media del aire. Las FTU miden el calor acumulado por encima de la temperatura de mínima (conocida como basal) que varía entre las especies de cultivos; el crecimiento de las plantas es nulo cuando la temperatura está por debajo de la temperatura basal. En el trabajo de Martínez-Cob (2008) se desarrollaron dos ecuaciones de segundo y tercer orden polinomial de  $K_C$  diarios para el maíz en función de las FTU a partir de  $ET_C$  y  $ET_O$  medidos con el lisímetro. Ellos encontraron que los valores de  $K_C$  determinados a partir de la metodología FAO ( $ET_C$  del lisímetro sobre la  $ET_O$  de Penman-Monteith) son ligeramente peores a los que ellos validaron. Recomiendan evitarla para la programación del riego en tiempo real, esto porque con antelación la temporada fenológica del maíz debe ser dividida en cuatro etapas, por lo que no se tendrían en cuenta las posibles variaciones que causarían las condiciones climáticas sobre el cultivo. Con el uso de las FTU se mejoraría la incertidumbre causada con la metodología de la FAO.

En este sentido, en la investigación de Mateos *et al.* (2013) fue determinada la evapotranspiración de diferentes campos con hortalizas (ajo y algodón) y huertas de árboles (melocotón, olivos y mandarina) en el sureste de España a partir de los índices vegetativos (IV) y la  $ET_O$ . Usando imágenes satelitales determinan la fracción de cobertura vegetal para estimar el  $K_{cb}$  y el  $K_e$  a partir de la metodología propuesta en el Manual 56 de la FAO. Los modelos obtenidos fueron validados con la ET medida con un sistema de Eddy covarianza

que consiste de varios dispositivos que miden la velocidad del viento, la densidad de vapor de agua y temperatura del aire. El método IV- $ET_O$  es bueno para determinar la variabilidad de ET para grandes zonas de riego. La parte débil del método es la determinación de la componente de la evaporación del suelo, ya que únicamente el enfoque del coeficiente doble puede ser aplicado cuando se conoce la fecha de humectación del suelo. Otro trabajo que utiliza las imágenes satelitales para determinar los índices vegetativos del cultivo y así calcular la evapotranspiración de los cultivos fue realizado por Kullberg *et al.* (2017)

En el trabajo de Fernández-Pacheco *et al.* (2014) utilizan el procesamiento de imágenes digitales para estimar los  $K_C$  de la lechuga en una provincia de Murcia, España. Tomaban fotografías de la cobertura vegetal de una superficie de  $1\text{ m}^2$ , las imágenes eran procesadas para separar el suelo de la vegetación, usando el número de píxeles correspondientes a la vegetación (V), al suelo y la suma de ambos (T) era calculado el porcentaje de la cobertura del suelo, PGC. El  $K_C$  fue determinado con la metodología de la FAO, así que la  $ET_C$  fue medida con una estación de razón de Bowen que mide el flujo de calor latente necesario para causar la evaporación del agua en el suelo calculado mediante el método de la Razón de Bowen-Balance de Energía y la  $ET_O$  fue determinada con el método FAO Penman-Monteith a partir de los datos de una estación climatológica, ambas estaciones instaladas en el lugar.

Una función de doble sigmoide fue obtenida para relación de PGC y la altura de la planta (h) ya que mostraban una distribución similar. De igual manera, el  $K_C$  y la relación de PGC/h mostraron una similar distribución, así que fue obtenida una función logarítmica de ambos. Esta metodología propuesta se ajusta a las condiciones climáticas del lugar y a las etapas de desarrollo de los cultivos. Esta investigación sirvió de base para el trabajo de Escarabajal-Henarejos *et al.* (2015), donde fue estimado el requerimiento hídrico de la lechuga a partir de los componentes del balance hídrico. La humedad aprovechable del suelo fue establecida con una fracción de agotamiento permisible de 0.15 de la capacidad de campo del suelo. Por lo tanto, los riegos fueron programados para para mantener en umbrales próximos la capacidad de campo, evitando llegar a niveles por debajo del máximo agotamiento permisible.

El método propuesto por Fernández-Pacheco *et al.* (2014) mostró ser una técnica sencilla que permitió la determinación uno de los parámetros del balance hídrico y así tener una óptima gestión de la lechuga como lo demostraron Escarabajal-Henarejos *et al.* (2015), obteniendo mayor productividad del cultivo y menor consumo de agua.

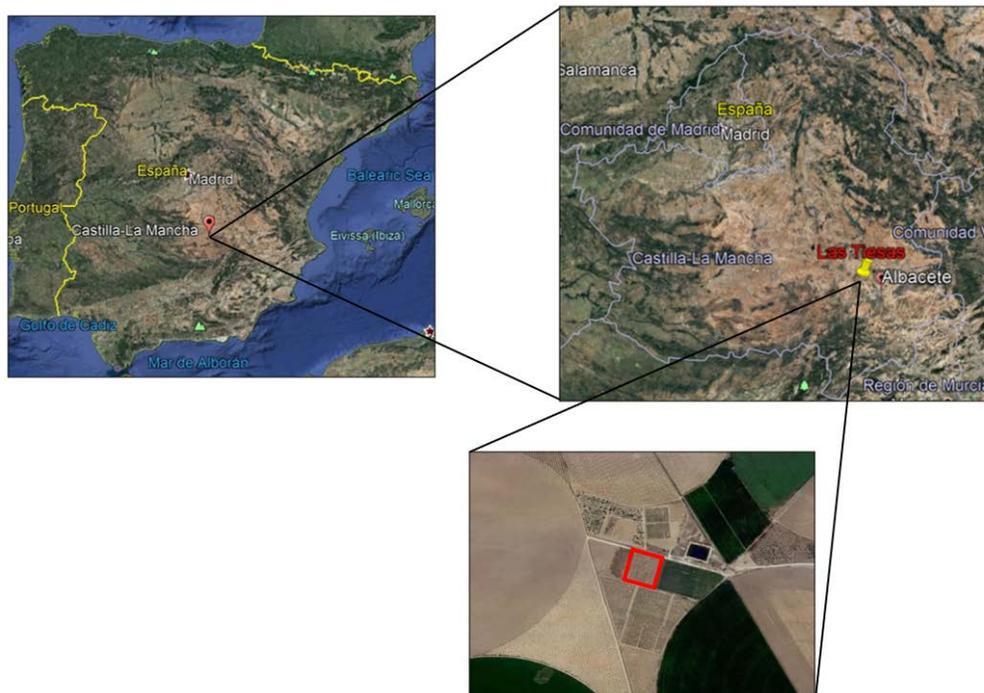
### **3. Materiales y Métodos**

Las distintas regiones ubicadas en del Mediterráneo Español son caracterizadas por su creciente escasez de agua, sobreexplotación del recurso hídrico, y contaminación de los acuíferos a causa de los nitratos y salinización. Estas regiones exigen una apropiada gestión del riego para obtener producciones óptimas y económicas rentables, evitando daños al medio ambiente con aplicaciones excesivas de riego (Gallardo *et al.*, 2013). A continuación, se mostrados los dos trabajos realizados para el desarrollo de esta Tesis y ayudar en la mejora del uso hídrico en la agricultura para estas regiones.

#### **3.1. Determinación de la infiltración del agua del suelo**

##### **3.1.1. Zona de estudio**

La zona de estudio fue la finca Las Tiesas cuya extensión es de 1 ha, localizada en Albacete, España (39° 3' 31" N, 2° 6' 04" O y con una elevación de 695 msnm) durante el año 2017 (Fig. 10). Albacete es caracterizado con un clima semiárido, con una lluvia anual promedio de 384 mm, temperaturas altas en verano de hasta de 40 °C, mínimas de -6 °C y con una temperatura promedio de 30 °C.



**Figura 10.** Zona de estudio, finca Las Tiesas en Alicante España.

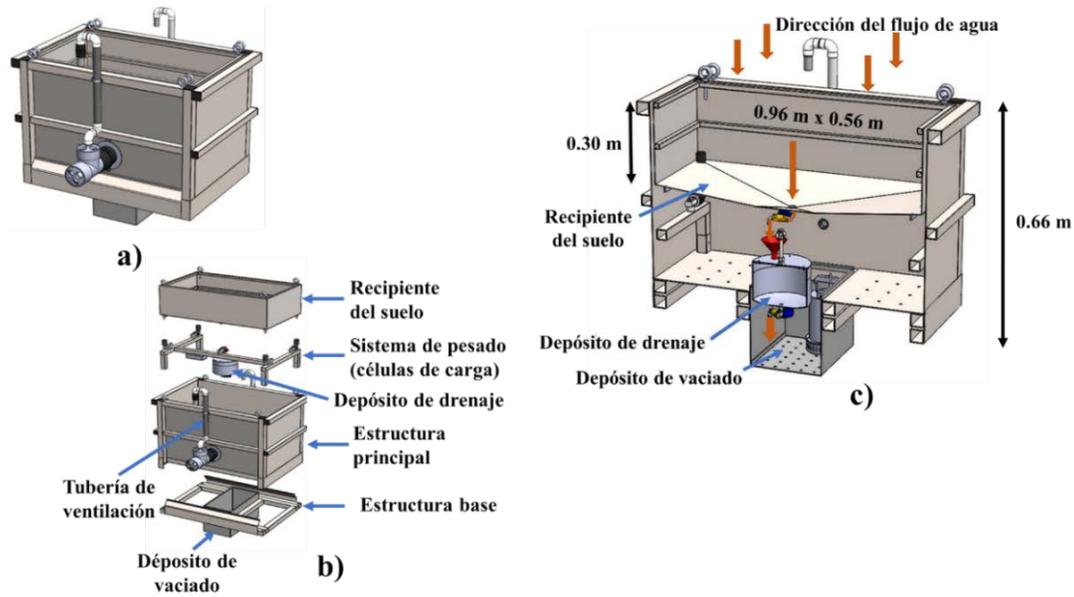
El suelo fue clasificado con textura franco limosa a partir de los porcentajes del suelo obtenidos con un tamizado, el método del hidrómetro de Bouyoucos (27.1% de arena, 51.5% de limo y 21.4% de arcilla) y el triángulo de textura de la USDA (Departamento de Agricultura de E.U.A.) (Staff, 1951); el contenido de materia orgánica fue de 2.77% y una densidad aparente de  $1.38 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Los contenidos de agua a capacidad de campo y punto de marchitez permanente fueron obtenidos por los métodos de la membrana y olla a presión resultando en  $0.35 \text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$  y  $0.16 \text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ , respectivamente. El contenido de humedad inicial del suelo, del día 8 de febrero cuando inicia el experimento, fue inferido de la densidad aparente del suelo y del volumen total que ocupa el suelo en el lisímetro, quedando en  $0.23 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ .

### 3.1.2. Materiales

El lisímetro de pesada compacto usado en esta investigación, modelo LISITN-AC-E<sub>1</sub> (Telenatura, Alicante, España) consta de dos recipientes. El recipiente superior es denominado recipiente de suelo y tiene dimensiones de 0.56 m × 0.96 m y una profundidad de 0.30 m en los extremos y 0.35 m en el centro, el cual almacena un volumen de suelo reconstituido de la parcela experimental intentado mantener las mismas condiciones de donde fue extraído (Fig. 11). El suelo dentro del recipiente está aislado de su ambiente de tal manera que los flujos laterales y flujos del ascenso capilar son cero (Ruiz-Peñalver *et al.*, 2015).

El segundo recipiente, denominado depósito de drenaje, está localizado por debajo del recipiente del suelo, el cual sirve para almacenar el exceso de agua drenado por el perfil del suelo. El recipiente del suelo tiene un agujero en la parte central del fondo que permite el flujo del agua hacia a una electroválvula, después a un embudo y finalmente llega al depósito de drenaje (ver Fig. 11c). El sistema de medición del depósito de drenaje fue configurado para que cuando un almacenamiento de 3000 g de agua fuera reportado, la electroválvula localizada debajo de este depósito se abriera y comenzara el vaciado del agua; mientras esto ocurre la electroválvula del recipiente del suelo es cerrada para evitar pérdidas de cuantificación de agua.

Las variaciones de masa de ambos recipientes son detectadas por células de carga, cuatro para el recipiente del suelo y una para depósito de drenaje. Las células de carga envían una señal eléctrica al datalogger (modelo CR300, Campbell Scientific, Logan, UT, USA) acorde a la deformación causada por el objeto que ellas soportan, esta señal eléctrica es convertida a un valor de masa por el propio datalogger. La resolución de medición de recipiente del suelo es de 20 g (0.033 mm) y para el depósito de drenaje es de 1 g (0.002 mm). Basados en la norma española UNE 500520 (AENOR, 2002) los datos de masa de ambos recipientes fueron muestreados cada segundo y el promedio de 60 segundos (un minuto) era registrado como un valor instantáneo. Esto garantiza la máxima calidad y representatividad de los datos obtenidos. Para más detalles constructivos del este lisímetro de pesada compacto revisar el trabajo de Nicolás-Cuevas *et al.*, (2020).



**Figura 11.** Lisímetro de pesada compacto, a) vista general, b) vista detallada y c) movimiento del agua a través de los recipientes.

### 3.1.3. Cálculo de los flujos de agua

El lisímetro contiene un suelo aislado, por lo que es posible determinar las entradas y salidas de agua del suelo basados en los registros de los datos de masa, mediante la ecuación de balance de masa (Allen *et al.*, 1998), con la Ecuación 12:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{dP}{dt} + \frac{dIR}{dt} - \frac{dD}{dt} - \frac{dET}{dt} - \frac{dSr}{dt} \quad (12)$$

donde  $\frac{dS}{dt}$  es el cambio de agua almacenada en el suelo (g),  $\frac{dP}{dt}$  es la cantidad de agua que ingresa por lluvia (g),  $\frac{dIR}{dt}$  es la cantidad que ingresa por riego (g) es decir, la tasa o velocidad con la que están aplicando el riego,  $\frac{dD}{dt}$  es la cantidad de agua drenada más allá de la zona de raíces (g),  $\frac{dET}{dt}$  es la cantidad de agua pérdida por la evapotranspiración del cultivo (g), y  $\frac{dSr}{dt}$  es el agua pérdida por escurrimiento superficial (g), todo los parámetros evaluados con respecto al tiempo.

Únicamente, los eventos de lluvia fueron analizados para conocer la velocidad de entrada de agua dentro del suelo. Las lluvias tienen una duración más larga de aplicación y por lo tanto dan una mejor exactitud de los resultados. Las variables de riego y evapotranspiración no fueron consideradas durante los eventos de lluvia, excepto en la determinación de los contenidos de humedad, ya que hay lapsos de tiempo sin lluvia (Hannes *et al.*, 2015; Peters *et al.*, 2014), así que la Ecuación 12 fue reformulada a la ecuación 13:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{dP}{dt} - \frac{dD}{dt} - \frac{dSr}{dt} \quad (13)$$

El escurrimiento fue despreciado debido a que no fue observado en este experimento. Las variables conocidas del experimento son las masas acumuladas de los recipientes del suelo (S) y depósito de drenaje (D), así que el flujo de ambos recipientes es determinado por el incremento de la masa (m) del recipiente sobre el tiempo (Hannes *et al.*, 2015), como la Ecuación 14:

$$\frac{dS_{lis}}{dt} \text{ o } \frac{dD_{lis}}{dt} = \frac{m_{i+1} - m_i}{t_{i+1} - t_i} \quad (14)$$

donde  $\frac{dD_{lis}}{dt}$  es el flujo de agua del depósito de drenaje sobre el tiempo  $\frac{dS_{lis}}{dt}$  es el flujo de agua en recipiente de suelo sobre el tiempo,  $m_i$  es la masa del recipiente en el instante  $i$ ,  $m_{i+1}$  es la masa del recipiente en el instante  $i+1$ ,  $t_i$  es el tiempo en el instante  $i$  y  $t_{i+1}$  es el tiempo en el instante  $i+1$ .

La lluvia es calculada a partir de la metodología reportada por Haselow *et al.* (2019), Hannes *et al.* (2015), Gebler *et al.* (2015) y Peters *et al.* (2014), cuando se cumple la condición de  $\frac{dS_{lis}}{dt} + \frac{dD_{lis}}{dt} > 0$ ; por lo que la Ecuación 15 fue usada:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{dS_{lis}}{dt} + \frac{dD_{lis}}{dt} \quad (15)$$

Esta lluvia calculada está en función del tiempo y se le denomina intensidad de lluvia (Ali, 2010). La lluvia reportada diariamente es la suma de las intensidades en mm/min de las 24 horas del día.

### 3.1.4. Cálculo de la velocidad de infiltración del agua en el suelo

La infiltración del agua tiene un comportamiento vertical descendente en el suelo dentro del lisímetro (Ruiz-Peñalver *et al.*, 2015) y en condiciones libres de drenaje (Herrada *et al.*, 2014). Cuando el contenido de humedad del suelo está por debajo del contenido de agua a capacidad de campo, el aumento del agua almacenada en el recipiente del suelo representa la velocidad de infiltración  $\frac{dI}{dt}$  sin la componente de drenaje. La velocidad de infiltración fue entonces representada con la Ecuación 16, la cual fue llamada Enfoque 1 (Wang and Chu, 2020):

$$\frac{dI}{dt} = \frac{dS_{lis}}{dt} \quad (16)$$

Sin embargo, una vez alcanzado el contenido de agua a capacidad de campo, el suelo no es capaz de almacenar más agua y por lo tanto comenzará a drenar agua (Wang and Chu, 2020). En este sentido, la suma del agua almacenada y drenada representa la velocidad de infiltración del agua en el perfil del suelo; el modelo que representa la  $\frac{dI}{dt}$  es representado en la Ecuación 17 el cual es llamado Enfoque 2:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{dS_{lis}}{dt} + \frac{dD_{lis}}{dt} \quad (17)$$

Ambos enfoques son válidos si el contenido de agua a saturación no es alcanzado y si la intensidad de lluvia no sobrepasa la capacidad de infiltración básica del suelo. En este experimento el suelo nunca llegó a sobrepasar a ambos, por lo que no hubo escorrentía superficial. Estas ecuaciones cumplen con el principio de la conservación de la masa y ecuación de continuidad.

Los flujos y velocidades de infiltración resultantes representan el área del lisímetro ( $0.54 \text{ m}^2$ ), es decir  $1 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$  del lisímetro es igual a  $1.85 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$  o  $1.85 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  de  $1 \text{ m}^2$  de superficie, asumiendo que un  $1 \text{ L}$  de agua es igual a  $1 \text{ kg}$  de masa de agua y que  $1 \text{ mm}$  es igual a  $1 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2}$  (Haselow *et al.*, 2019).

Los eventos de riego no fueron analizados porque su tiempo y volumen de aplicación fueron pequeños y no permiten la visualización de la curva de infiltración; la velocidad de infiltración fue constante a través de los dos o tres horas de riego.

### 3.1.5. Estimación del contenido de agua en el suelo

El contenido de agua en el perfil del suelo dentro del recipiente del suelo fue determinado por el método gravimétrico, la masa del suelo húmedo era conocida en cualquier instante a partir de los datos registrados del recipiente del suelo. Una vez, que el valor del contenido de agua gravimétrico era conocido fue convertido a un valor volumétrico ( $\theta_v$ ) con la Ecuación 18:

$$\theta_v = \left( \frac{m_i - m_{seca}}{m_{seca}} \right) \cdot \rho_b \quad (18)$$

donde  $\theta_v$  es el contenido volumétrico del instante  $i$  ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ),  $\rho_b$  es la densidad aparente del suelo,  $m_i$  es la masa húmeda del suelo dentro del recipiente del suelo en el instante  $i$  (g) y  $m_{seca}$  es la masa seca del suelo dentro del recipiente del suelo. Este último valor es inferido de la densidad aparente del suelo y el volumen total del recipiente del suelo ( $0.161 \text{ m}^3$ ) (Villalobos *et al.*, 2002). La masa húmeda en el instante  $i$  representa la suma de suelo y agua; la masa de la estructura del recipiente no es considerada ya que este fue tarado a cero antes de insertar el suelo dentro del recipiente.

El contenido de humedad a capacidad de campo ( $\theta_{CC}$ ) fue establecida dos o tres días después de los eventos de lluvia, cuando el suelo paro de drenar y el recipiente del suelo tuvo un valor constante, indicando que el suelo ya era capaz de retener el agua (Kirkham, 2010). La evapotranspiración fue calculada por su efecto en la redistribución del agua en el suelo, la cual fue obtenida usando el método de balance de masas. (Ecuación 12), teniendo en cuenta que la evapotranspiración y la lluvia no ocurren al mismo tiempo.

### 3.1.6. Validación

Un total de 12 eventos de lluvia del 2017 fueron analizados desde el 8 de febrero hasta el 30 de mayo, los cuales fueron i) 13 de febrero, ii) 18 de febrero, iii) 19 de febrero, iv) 24 de febrero, v) 13 de marzo, vi) 14 de marzo, vii) 27 de abril, viii) 28 de abril, ix) 29 de abril, x) 30 de abril, xi) 10 de mayo y xii) 30 de mayo. En el caso del Enfoque 2, solamente fueron usados los eventos v) hasta x) ya que en esos eventos ocurre el drenaje.

### 3.1.7. Modelos de calibración

Los resultados de la velocidad de infiltración  $\left(\frac{dl}{dt}\right)$  del suelo fueron usados para calibrar modelos de infiltración empíricos y físicos de autores previamente mencionados. Uno de ellos es el modelo Kostiakov, el cual puede ser representado por la Ecuación 19:

$$\frac{dl}{dt} = a \cdot b \cdot t^{b-1} \quad (19)$$

donde  $t$  es el tiempo de infiltración y  $a$  y  $b$  son constantes empíricas (Ali, 2010; Fok, 1986; Hartley, 1992; Kirkham, 2010; Lewis, 1937). Esta ecuación tiene una condición límite,  $\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{dl}{dt} = 0$  (Haverkamp *et al.*, 1988; Philip, 1957). Los dos parámetros empíricos fueron determinados a partir de un ajuste iterativo de datos obtenidos experimentalmente con nuestros dos enfoques (Hartley, 1992).

El parámetro  $b$  de la ecuación de Kostiakov está limitado a ser más grande que cero y menor a uno; por lo que el valor inicial de la velocidad de infiltración tiende a ser infinito y una velocidad básica a cero en un tiempo infinito. En eventos de riego o lluvias grandes, Lewis, (1937) observó que la velocidad de infiltración tiende a un valor constante antes del final del riego o lluvia. Por consiguiente, la ecuación de Kostiakov en los eventos largos usualmente sobreestima la infiltración (Haghiabi *et al.*, 2011; Smerdon *et al.*, 1988), para solucionar esto una constante fue añadida a la Ecuación 20 para representar la velocidad de infiltración básica, resultando en la ecuación de Kostiakov Modificada:

$$\frac{dI}{dt} = a \cdot b \cdot t^{b-1} + c \quad (20)$$

donde  $c$  es una constante empírica que representa la velocidad de infiltración básica (Ali, 2010; Furman *et al.*, 2006; Strelkoff *et al.*, 2009). Esta ecuación también es conocida como Kostiakov-Lewis o modelo de Mezencev. Su condición límite es  $\lim_{t \rightarrow \infty} dI/dt = c$  (Haverkamp *et al.*, 1988).

El modelo de Philip para la velocidad de infiltración de un medio poroso homogéneo es una simplificación del modelo de Richards. El primer término de la ecuación establece la absorción capilar del agua dentro del suelo ( $S$ ) y el segundo término representa una serie truncada de un pequeño tiempo de encharcamiento ( $A$ ), representado en la Ecuación 21:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{1}{2} \cdot S \cdot t^{-1/2} + A \quad (21)$$

donde  $S$  es la sorptividad y  $A$  es un valor constante (Philip, 1957; Smerdon *et al.*, 1988). Su condición límite es  $\lim_{t \rightarrow \infty} dI/dt = A$  (Haverkamp *et al.*, 1988).

Horton establece un modelo basado en el comportamiento natural de la ley de exponencial inversa, es decir la velocidad de infiltración que disminuye exponencialmente a un valor contante y es proporcional al volumen infiltrado como sigue:

$$\frac{dI}{dt} = V_f + (V_0 - V_f)e^{-\beta \cdot t} \quad (22)$$

donde  $V_f$  es la velocidad de infiltración final o básica.  $V_0$  es la velocidad de infiltración inicial y  $\beta$  es una constante empírica de cambio desde velocidad inicial a final (Horton, 1941). La condición límite es  $\lim_{t \rightarrow \infty} dI/dt \geq 0$  (Philip, 1957).

Cuando comparamos los cuatro modelos anteriormente descritos puede ser observado que los parámetros del modelo de Kostiakov no tienen significado físico y no es apto para largos tiempos ya que se pierde su representatividad y exactitud de la velocidad de infiltración del agua en el suelo, además para un tiempo igual a cero, la velocidad de

infiltración parece indeterminada. En el modelo de Kostiakov Modificado una constante fue añadida para representar la velocidad básica de en largos tiempos de infiltración. En el caso del modelo de Horton, la infiltración inicial es definida con un valor infinito y su modelo describe el comportamiento de la velocidad como una curva inversa exponencial. Finalmente, Philip describe la velocidad de infiltración cuando hay una pequeña cantidad de encharcamiento y sus parámetros tienen significado físico para el comportamiento del suelo cuando permite la entrada de agua.

Las estadísticas usadas para evaluar la exactitud de la estimación de la velocidad de infiltración del agua en el suelo usando el lisímetro de pesada y los modelos mencionados arriba fueron: desviación estándar ( $s$ ), raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) a través de las siguientes ecuaciones:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \quad (23)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \quad (24)$$

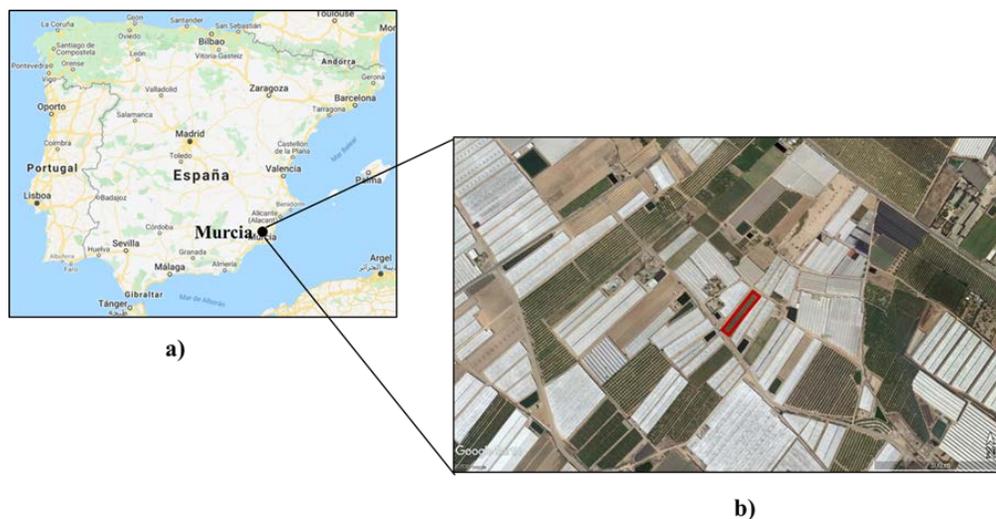
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{y})^2} \quad (25)$$

donde  $n$  es el número de datos,  $Y_i$  es el valor medido en  $i$ ,  $\hat{Y}_i$  es el valor estimado en  $i$  y  $\bar{y}$  es la media de los valores medidos (Wackerly *et al.*, 2010).

## 3.2. Evapotranspiración del pimiento y coeficiente de cultivo

### 3.2.1. Área de estudio

El experimento fue conducido durante 2019 y 2020 en una parcela comercial de pimiento (*Capsicum annuum L.* var. Maestral) localizada en San Javier en la Región de Murcia en el sureste de España (Fig. 12), con coordenadas geográficas 37°51'11.80" N, 0°49'50.00" E y una altitud de 15 m.s.n.m. (metros sobre el nivel del mar). La parcela experimental está a campo abierto y con área circundante dominada por invernaderos, la parcela es resaltada en rojo en la Fig. 12b. El clima predominante de la zona de estudio ha sido identificado como subdesierto Mediterráneo, con temperatura máxima y mínima de 36.6 °C y 12.9 °C, respectivamente, y una lluvia anual promedio de 313 mm (Escarabajal-Henarejos *et al.*, 2015).



**Figura 12.** Área de estudio, a) Región de Murcia y b) localización de la parcela experimental.

### 3.2.2. Descripción del lisímetro de pesada compacto

El lisímetro de pesada usado en esta investigación es el mismo descrito en el apartado 3.1.2. El dispositivo fue instalado en el centro de la parcela, en un agujero excavado

considerando las dimensiones del lisímetro, evitando los bordes debido a que es necesario que este rodeado por la misma vegetación para obtener mediciones confiables (Aboukhaled *et al.*, 1982). El suelo extraído en la excavación fue colocado en el recipiente superior del lisímetro, tratando de mantener el suelo inalterado. Una caracterización hidrodinámica del suelo arcilloso fue realizado basado en la metodología propuesta por USDA (Staff, 1951) con una densidad aparente de  $1.38 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . El sistema de riego usado fue goteo, con emisores colocados a cada 25 cm y una tasa de aplicación de  $2.2 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$  (Fig. 13).



*Figura 13. Vista superior del lisímetro de pesada compacto durante la experimentación.*

### 3.2.3 Manejo del cultivo

El cultivo del pimiento, previamente sembrado bajo condiciones de invernadero, fue trasplantado con una altura de 10 cm. El marco de plantación fue de 1 m entre líneas y 0.33 m entre plantas, dejando un total de tres plantas y tres goteros dentro del área del lisímetro como se observa en la Fig. 13. El ciclo vegetativo hasta la cosecha fue de 195 días. El esquema de riego fue programado para compensar las pérdidas por  $ET_c$  calculadas con el lisímetro y con una eficiencia de aplicación del sistema de riego del 91%.

La dosis de fertilización fue aplicada con el agua de riego acorde a las recomendaciones del Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación (2020); mientras tanto,

las malas hierbas y las plagas se manejaban de acuerdo con las prácticas comunes en la zona agrícola.

### 3.2.4. Determinación de la Evapotranspiración y coeficientes de cultivo

El cálculo de la evapotranspiración comenzó el día del trasplante del cultivo, el 15 de febrero para la temporada del 2019 y el 10 febrero para la temporada del 2020. Luego, mediante la aplicación del riego, el suelo alcanzó la capacidad de campo, el valor inicial de recipiente del suelo representa la masa del suelo más la masa de agua más la masa de tres plantas. Con el paso del tiempo, si el suelo no recibía agua, la masa del recipiente disminuía debido a la  $ET_C$ . Cuando se aplicaba el riego o se producían precipitaciones, la masa del recipiente del suelo aumentaba rápidamente; si se excedía la capacidad de campo del suelo, éste comenzaba a drenar o descargar el exceso de agua de la parte inferior del recipiente del suelo, lo que se reflejaba en el aumento de la masa del depósito de drenaje. Una vez que se detuvo el riego o las precipitaciones, el suelo volvía a perder agua debido a la  $ET_C$ .

A partir del comportamiento operacional del lisímetro descrito anteriormente, se calculó la evapotranspiración diaria del cultivo aplicando la ecuación de balance hídrico (Miranda *et al.*, 2006) y las condiciones establecidas en el trabajo de Peters *et al.* (2014), según las ecuaciones (26) y (27):

$$ET_{CLYS} = I - \Delta DD - \Delta RS \quad (26)$$

En condiciones de ausencia de agua de lluvia o de riego, la ecuación (26) quedaría como sigue:

$$ET_{CLYS} = -\Delta RS \quad (27)$$

donde  $I$  es la profundidad de riego (mm),  $\Delta RS$  es la variación de masa en el recipiente de del suelo (mm), y  $\Delta DD$  es el aumento de masa en el depósito de drenaje (mm).

A partir de los datos obtenidos con el lisímetro, se calcularon los valores diarios del coeficiente de cultivo ( $K_{C_{lys}}$ ) mediante la Ecuación 28:

$$K_{C_{lys}} = \frac{ET_{C_{LYS}}}{ET_0} \quad (28)$$

donde  $ET_0$  es la evapotranspiración de referencia estimada por el método FAO Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998), considerando los registros climáticos generados en una estación meteorológica automática construida con un registrador de datos (datalogger modelo CR10X, Campbell Scientific, Logan, UT, USA), un piranómetro (modelo CM14, KIPP&ZONEN Delft), sensores de temperatura y humedad relativa colocados en 1.5 m sobre el nivel del suelo (sonda MP100, Campbell Scientific, Logan, UT, USA), un anemómetro y una anemoveleta a 2 m de altura (modelos A100R y W200P, respectivamente, de Vector Instruments Ltd., Rhyl, North Wales, UK), y un pluviómetro (modelo ARG100, Campbell Scientific, Logan, UT, USA). La estación meteorológica automática se instaló junto al lisímetro de pesada. La duración de las etapas fenológicas se definieron de acuerdo con las recomendaciones de Allen *et al.* (1998).

El valor de  $ET_C$  determinado con el método FAO-56 se comparó con el  $ET_{C_{LYS}}$  obtenido con el lisímetro, el modelo FAO-56 (Allen *et al.*, 1998) es el siguiente:

$$ET_{C_{FAO}} = ET_0 \cdot K_{C_{FAO}} \quad (29)$$

donde  $K_{C_{FAO}}$  hace referencia a los valores propuestos por la FAO en el Manual 56 para el pimiento para las diferentes etapas fenológicas del cultivo.

A partir de la temperatura media del aire obtenida con la estación meteorológica, se determinaron las unidades térmicas de cultivo (TU) para todo el ciclo vegetativo (Martínez-Cob, 2008):

Si  $T_a > T_b$ :

$$TU_i = (T_a - T_b)_i \quad (30)$$

Si  $T_a \leq T_b$ :

$$TU_i = TU_{i-1}$$

donde  $TU_i$  es la unidad térmica del día  $i$  en  $^{\circ}\text{C}$ ,  $TU_{i-1}$  es la unidad térmica del día  $i - 1$  en  $^{\circ}\text{C}$ ,  $T_b$  es la temperatura basal o mínima a la que puede desarrollarse el pimiento, la cual es de  $10^{\circ}\text{C}$  (Vidal, 2011) y  $T_a$  es la temperatura media del aire en  $^{\circ}\text{C}$  del día  $i$ .

Los valores TU se convirtieron en unidades térmicas de fracción acumulada (FTU):

$$FTU_i = \frac{TU_i}{\Sigma TU_i} \quad (31)$$

donde  $\Sigma TU_i$  es la suma total de las TU. Para un óptimo crecimiento del pimiento Vidal (2011) propone un valor  $\Sigma TU$  de  $2020 \pm 220^{\circ}\text{C}$ . En este experimento, el total de unidades térmicas acumuladas para las temporadas 2019 y 2020 fue de 1860 y 1904  $^{\circ}\text{C}$ , respectivamente. Se obtuvo una relación entre los resultados de la FTU y el coeficiente de cultivo del lisímetro utilizando el algoritmo de los mínimos cuadrados (Verma, 2016).

Se utilizaron diferentes estadísticos para comparar los resultados obtenidos de las diferentes metodologías, como el error medio de estimación (MEE), la raíz del error cuadrático medio (RMSE), el error cuadrático medio sistemático ( $MSE_s$ ), el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el índice de acuerdo (IA):

$$MEE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i - \hat{Y}_i \quad (32)$$

$$MSE_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2 \quad (33)$$

$$IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|\hat{Y} - \bar{y}| + |Y_i - \bar{y}|)^2} \quad (34)$$

donde  $n$  es el número de datos,  $Y_i$  es el valor medido de  $i$ ,  $\hat{Y}_i$  es el valor estimado en la regresión del día  $i$  o el valor a ser comparado y  $\bar{y}$  es la media de los valores medidos del día  $i$  (Wackerly *et al.*, 2010; Willmott *et al.*, 1985).

### 3.2.5. Productividad del agua

Según la metodología propuesta por Playán and Mateos, (2006), la productividad del agua se determinó como la relación entre la producción obtenida y el volumen consumido por el cultivo, expresado en  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , el rendimiento del cultivo por superficie cultivada en  $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$  y los beneficios económicos por superficie cultivada, en  $\text{€}\cdot\text{ha}^{-1}$ .

## **4. Resultados y Discusión**

### **4.1. Infiltración del agua en el suelo**

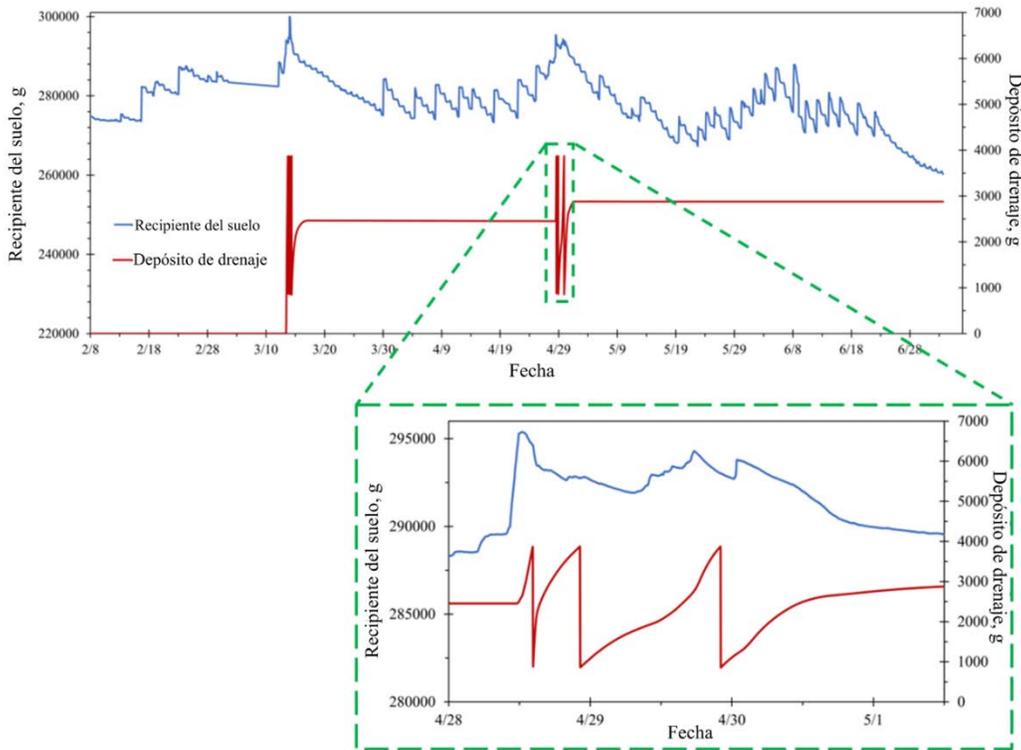
La Fig. 14 muestra las curvas de masa de los dos recipientes de cultivo del lisímetro de pesada compacto en el intervalo de tiempo analizado. Los datos iniciales reportados por el recipiente del suelo indica la masa de las partículas del suelo más el contenido del agua. Por consiguiente, las variaciones de masa registradas después de este punto inicial indican las variaciones del contenido de agua en el suelo.

Los aportes de la lluvia y riego se pueden diferenciar por el tipo de aumento que presentan en la curva del recipiente del suelo (línea azul de la Fig. 14). El riego tiene un aumento muy vertiginoso en poco tiempo, mientras que la lluvia tiene un crecimiento discontinuo en el tiempo, en cambio, los descensos pueden representar las pérdidas por evapotranspiración, las pérdidas por drenaje o ambas.

En el caso de los datos del recipiente de drenaje (línea roja de la Fig. 14), la subida de la curva representa que el drenaje ha comenzado y los descensos repentinos indican el vaciado del recipiente. En el gráfico inferior puede apreciarse a detalle lo anteriormente descrito. Para darle continuidad a la línea del depósito de drenaje se mantuvo la última masa registrada antes de iniciar el vaciado durante los instantes de tiempo que duro este proceso y después le fue sumado la variación de masa que se registraba cada minuto.

Como se muestra en la Fig. 14, únicamente dos eventos de drenaje fueron registrados por el recipiente el 13-14 de marzo y el 28-30 de abril. El recipiente de drenaje fue programado para abrir su válvula a los 3000 g de almacenamiento y descarga (para evitar dañar la celda de carga); por lo tanto, la curva del recipiente de drenaje en la Fig. 14 muestra masas acumuladas inferiores a 4000 g.

El vaciado es casi instantáneo, toma menos de 3 minutos y no se pierde ninguna gota ya que la válvula debajo del recipiente del suelo es cerrada. El evento de marzo causó más drenaje que el de abril, en menos tiempo de lluvia. Esto indica que la intensidad de la lluvia del evento de marzo fue mayor que la del evento de abril, más agua cayó en menos tiempo. Los siete eventos de lluvia entre febrero y marzo contribuyeron a que el primer evento de drenaje ocurriera el 14 de marzo. Mientras tanto, los cinco eventos de lluvia ocurridos entre abril y mayo causaron el segundo evento de drenaje en el día 28-30 de abril.



**Figura 14.** Variaciones de masa de los dos recipientes del lisímetro de pesada compacto durante el 2017.

#### 4.1.1. Estimación de la entrada de la lluvia

Los días lluviosos totales analizados fueron 12 y fueron determinados con la Ecuación 15, representando 11 eventos de lluvia. La Tabla 1 muestra los datos de lluvia registrados por día en el lisímetro de pesada y los registrados en un pluviómetro de la estación meteorológica perteneciente al Instituto Agronómico Provincial (ITAP) instalada a 800 m del lisímetro. La lluvia calculada con el lisímetro para el primer día analizado tiene una diferencia de 0.05 mm con el pluviómetro. Las diferencias encontradas pueden ser explicadas por el comportamiento espacial de la variabilidad de la lluvia (Camarasa Belmonte *et al.*, 2010) en una región, la cual tiene un impacto más grande en las zonas semiáridas como la de este estudio. Hay una diferencia promedio de 1.59 mm entre los dos dispositivos.

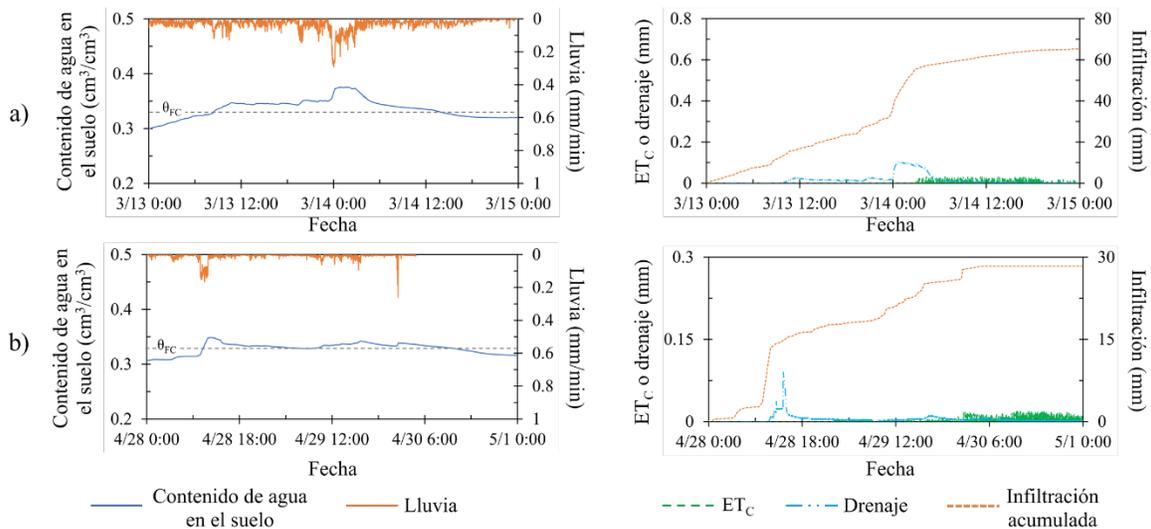
**Tabla 1.** Datos de lluvia de los días analizados por los diferentes dispositivos

Fecha	Lluvia registrada por día	
	Lisímetro de pesada (mm)	Estación meteorológica ITAP (mm)
13/02	3.55	3.60
18/02	3.16	3.30
19/02	2.76	2.90
24/02	1.30	1.00
13/03	36.77	26.70
14/03	28.53	22.30
27/04	7.04	6.40
28/04	7.06	5.90
29/04	8.16	8.30
30/04	2.44	1.6
10/05	1.01	1.10
30/05	2.11	1.60

### 4.1.2. Estimación del contenido de agua en el suelo

La Fig. 15 muestra el comportamiento de la lluvia y su relación con el contenido de agua del suelo, se observa que cuando la lluvia cae, hay un aumento de masa, y cuando el suelo alcanza la capacidad de campo y la lluvia continúa, hay drenaje; cuando hay una caída en la curva de humedad, el drenaje aumenta. Dos eventos de drenaje fueron causados con los eventos de lluvia de 13 y 14 de marzo, 28 de abril, 29 de abril, y 30 de abril así que con estos eventos fue posible determinar la capacidad de campo del suelo ( $\theta_{CC}$ ) basado en su definición y con el método gravimétrico (Ecuación 18).

Al trazar la curva de contenido de agua con la del depósito de drenaje fue posible determinar el momento en que se alcanzó  $\theta_{CC}$ . En ambos meses, el  $\theta_{CC}$  se estableció cuando la curva del depósito de drenaje se hizo constante, indicando que el suelo había dejado de drenar y que no había ninguna variación en el lisímetro de pesada. Se trazó una línea horizontal sobre el contenido de agua en el momento en que no se incrementó la masa del depósito de drenaje, lo que indica que se alcanzó el  $\theta_{CC}$  y se estableció dos días después del comienzo de la lluvia en  $0.33 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  (Fig. 15).



**Figura 15.** Contenido de agua en el suelo y variable hidrológicas obtenidas con el lisímetro de pesada compacto, a) Marzo y b) Abril.

**Tabla 2.** Balance hídrico de los días involucrados en la determinación de la  $\theta_{FC}$ .

Fecha	$dIR/dt$ , mm	$dP/dt$ , mm	$dD/dt$ , mm	$dET/dt$ , mm
13/03	0.00	36.77	14.04	0.00
14/03	0.00	28.53	29.57	5.41
28/04	10.62	5.90	8.65	0.00
29/04	0.00	8.30	5.65	0.65
30/04	0.00	1.60	3.05	4.94

Como el  $\theta_{cc}$  se estableció días después de los eventos de lluvia, la evapotranspiración ( $\frac{dET}{dt}$ ) estaba presente, por lo que fue calculada como se indica en los trabajos de Hannes *et al.* (2015), Haselow *et al.* (2019), y Peters *et al.* (2014), es decir con la Ecuaciones 26 y 27. La Tabla 2 tiene el balance hídrico de los días involucrados en el cálculo del  $\theta_{cc}$ .  $\frac{dET}{dt}$  es una variable que resta la humedad de la superficie del suelo, en los primeros días de cada evento representa el 0% de las pérdidas de agua y de las precipitaciones; aumentando a medida que la lluvia disminuye a lo largo de los días, de modo que en el segundo día  $\frac{dET}{dt}$  representa el 15.47% y el 10.32% de las pérdidas de agua y el 18.96% y el 7.83% de las precipitaciones. El total de las pérdidas de  $\frac{dET}{dt}$  para todos los días de cada evento utilizado para el cálculo de  $\theta_{cc}$  representa el 11.04% para el primero (Fig. 15a) y el 24.37% para el segundo (Fig. 15b).  $\frac{dET}{dt}$  representa el 8.28% de la lluvia del primer evento (Fig. 15a) y el 35.38% del segundo evento (Fig. 15b).

La Tabla 3 informa los valores del contenido de humedad a capacidad de campo obtenidos y algunos de la literatura para un suelo franco limoso. Los valores con menor desviación estándar con el resultado del lisímetro de pesada fueron el valor obtenido en el laboratorio en esta investigación y el valor máximo reportado por Assi *et al.* (2019) con  $0.014 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ . Seguido por los valores reportados por Allen *et al.* (1998) en gráficos y tablas y que son obtenidos usando los datos de la textura del suelo ( $\theta_s$ ,  $\theta_{cc}$  y  $\theta_{PMP}$ ) con  $0.02 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ , el cual tiene una buena concordancia con los resultados obtenidos en el laboratorio y el lisímetro.

**Tabla 3.** Comparación del contenido de agua a capacidad de campo obtenido en el suelo con los valores de la literatura.

$\theta_{CC}$ , $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$	Método de estimación e investigadores	
0.33	Lisímetro de pesada	
0.35	Laboratorio	
0.22-0.36	FAO	(Allen <i>et al.</i> , 1998)
0.30-0.31	Pedo-estructura	(Assi <i>et al.</i> , 2019)
0.244	Gravimétrico	(Porta-Casanellas and López-Acevedo, 2005)

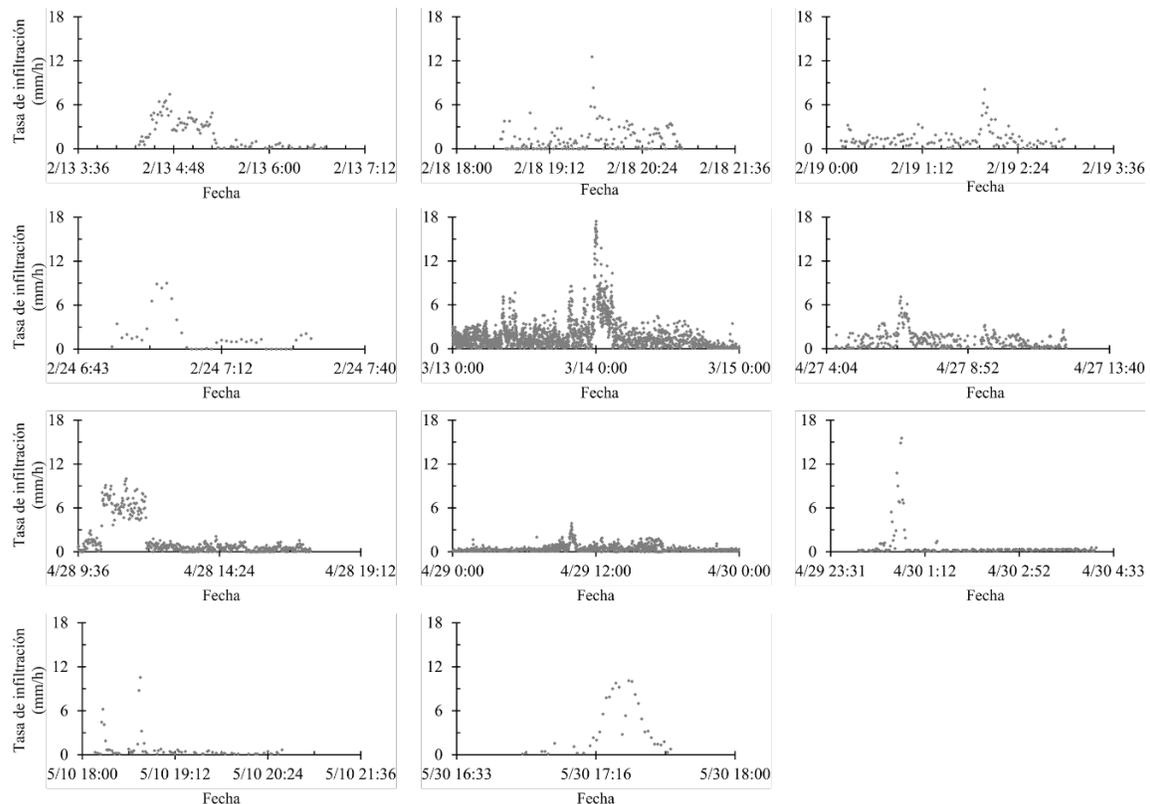
#### 4.1.3. Velocidad de infiltración del agua en el suelo

Se analizaron siete lluvias con el Enfoque 1 cuando el suelo estaba por debajo de la capacidad de campo (13, 18, 19 y 24 de febrero, 27 de abril y 10 y 30 de mayo), de modo que las variaciones positivas reportadas en el recipiente del suelo indicaban la velocidad de infiltración de agua. Según USDA *et al.* (1999) y Evanylo and McGuinn, (2000) la mejor manera de determinar la velocidad de infiltración es cuando el suelo está cerca de la capacidad de campo; cuatro eventos de cinco días de lluvia tuvieron drenaje debido a que el suelo estaba por encima de la capacidad de campo; en estas lluvias se aplicó el Enfoque 2 (13 y 14 de marzo y 28, 29 y 30 de abril).

En la Fig. 16 se muestran los 11 diagramas de la velocidad de infiltración de agua en el suelo de los 12 días de lluvia analizados, la mayoría de los gráficos tienen una duración de menos de 24 h. El suelo muestra un comportamiento muy similar en todas las gráficas, comienza con velocidades más bajas hasta que alcanza un pico máximo y luego disminuye hasta una velocidad estable o básica. La velocidad de infiltración básica se obtuvo considerando los 11 eventos de lluvia, estableciéndose en  $1.49 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  con una desviación estándar de  $0.36 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ . De acuerdo con USDA *et al.* (1999), esta velocidad se produce cuando el suelo está casi saturado y no disminuye o aumenta a medida que se añade más agua.

La velocidad de infiltración alcanza una variabilidad del 23% y podrían deberse a las alteraciones de las trayectorias de flujo, al obligar al agua a pasar por un orificio. Es necesario seguir investigando para reducir al mínimo esta variabilidad, es decir, una serie de orificios situados en el plano horizontal en el fondo del recipiente de suelo podría representar una reducción al mínimo de los errores en la variabilidad de la velocidad de infiltración medida. No obstante, nuestra metodología representa un enfoque para estimar la velocidad de infiltración y podría compararse con otras metodologías.

La variabilidad de la velocidad de infiltración inicial puede deberse a la intensidad de las lluvias y al contenido de humedad inicial (Cui *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2019). Los contenidos de humedad inicial de los siete diagramas de dispersión de la velocidad de infiltración por debajo de la capacidad de campo oscilaron entre 0.23 y 0.30  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  y los otros cuatro diagramas de dispersión fueron de 0.30 a 0.33  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ .



**Figura 16.** Diagramas de dispersión de la velocidad de infiltración del agua en el suelo.

La infiltración básica encontrada en ambos enfoques (resumida en la Tabla 4) fue baja comparada con los valores reportados en la literatura; sin embargo, los valores encontrados en esta investigación coinciden con los reportados por Li *et al.* (2018) para la humectación homogénea, cuyo valor fue obtenido con un contenido inicial de agua en el suelo de  $0.034 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ , el cual fue secado al aire y colocado en una columna de 50 cm. El valor más bajo obtenido en Li *et al.* (2018) se obtuvo con un suelo franco limoso ligeramente repelente al agua (esto fue logrado añadiendo octadecilamina al suelo).

La velocidad de infiltración básica obtenida con el lisímetro de pesada fue menor en comparación con los trabajos de investigación de Maldonado (2001) y Ali (2010) considerando el mismo tipo de suelo. Algunos factores que podrían haber causado el bajo valor de la velocidad de infiltración básica son el contenido de materia orgánica, la cubierta vegetal y la raíz del cultivo (Ali, 2010; Liu *et al.*, 2019); sin embargo, se necesita una mayor investigación para corroborarlo. El dispositivo usado pudo haber causado algún error experimental que influyó en la obtención de un valor bajo de VI básica y su variabilidad, puede ser usado algún filtro de datos para tratar de disminuir dicha variabilidad de la velocidad.

Los resultados obtenidos con los dos enfoques propuestos son sencillos y representativos de la capacidad actual de infiltración del suelo, donde las raíces han estado creciendo dentro del perfil del suelo, se han añadido fertilizantes y el perfil se ha compactado por la misma fuerza ejercida por el agua de lluvia y el riego. Todo esto no se refleja en los valores que se ven en la Tabla 4.

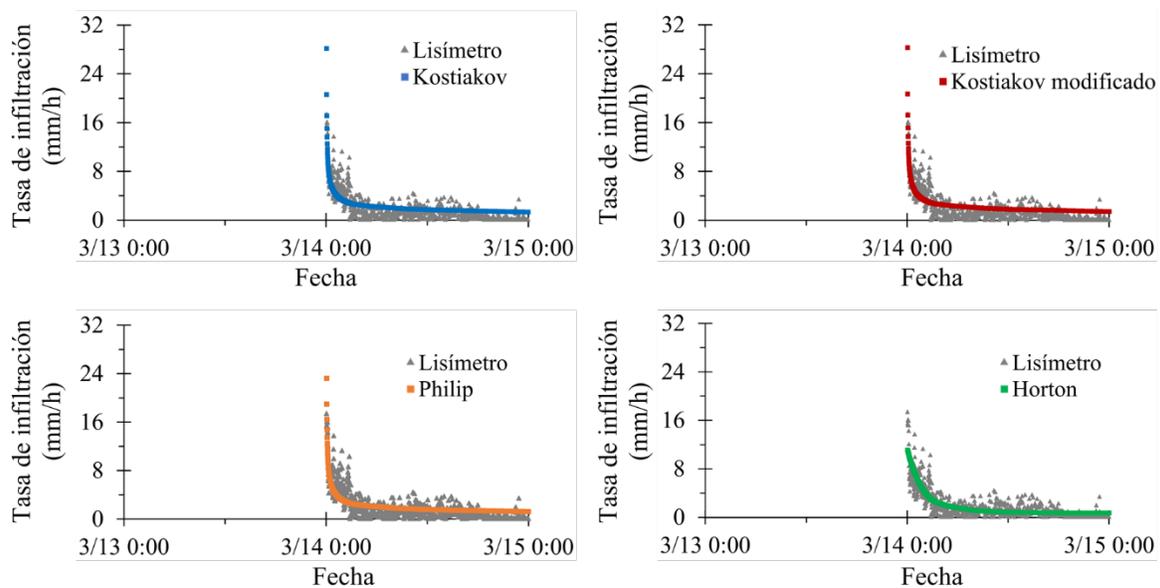
**Tabla 4.** Valores de la velocidad de infiltración del agua en un suelo franco limoso.

Velocidad de infiltración básica, $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$	Método e investigadores
1.13–1.85	Lisímetro de pesada
10.00–14.00	Cilindros concéntricos (Maldonado, 2001)
2.00–3.00	Humectación homogénea (Li <i>et al.</i> , 2018)
0.15–0.30	Ligeramente repelente al agua (Li <i>et al.</i> , 2018)
5.00–8.00	Cilindros concéntricos (Ali, 2010)

#### 4.1.4. Calibraciones de modelos

Los 11 diagramas de infiltración fueron calibrados con los cuatro modelos descritos anteriormente, desde su punto más alto. En la Fig. 17, sólo se presentan los cuatro modelos con mayor duración de las precipitaciones. El modelo que mostró el mejor ajuste fue el de Horton, con un RMSE de  $0.89 \pm 0.40$  y  $R^2$  de  $0.65 \pm 0.30$ , seguido por Kostiakov con un RMSE de  $1.06 \pm 0.40$  y  $R^2$  de  $0.63 \pm 0.23$ , Kostiakov Modificado con un RMSE de  $1.03 \pm 0.43$  y  $R^2$  de  $0.62 \pm 0.22$ , y finalmente Philip con un RMSE de  $1.30 \pm 0.42$  y  $R^2$  de  $0.48 \pm 0.17$ . El único modelo que estableció una velocidad de infiltración inicial más baja fue el de Horton.

Los modelos establecen el valor de la velocidad de infiltración básica en algunas de sus variables de la ecuación. En el caso de Kostiakov no tiene un valor establecido, Kostiakov Modificado estableció la infiltración básica en  $0.14 \pm 0.14 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  (en su constante  $c$ ) (Furman *et al.*, 2006; Strelkoff *et al.*, 2009), Philip en  $0.16 \pm 0.11 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  (en  $A$ ) y Horton en  $0.38 \pm 0.34 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  (en  $V_f$ ) (Horton, 1941; Philip, 1957). La calibración de los modelos mostró un comportamiento como el indicado por sus límites, la velocidad de infiltración tiende a valores constantes cercanos a cero cuando el tiempo tiende al infinito (Haverkamp *et al.*, 1988; Philip, 1957).



**Figura 17.** Ajuste de modelos de infiltración a los valores de 13 14 de marzo.

En el trabajo de investigación de Rodríguez Vásquez *et al.* (2008) y Mirzaee *et al.* (2014) fue medida la velocidad de infiltración con infiltrómetro de doble anillo para suelos limosos y arcillosos, los valores de sus parámetros obtenidos para los diferentes modelos de infiltración se muestran en la Tabla 5. En el primer trabajo, el contenido de agua se situó entre 24.3 y 31.1%, en el segundo no se mencionó, y nuestro rango fue de 0.23  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ .

Los parámetros de ajuste del modelo de Kostiakov en esta investigación comparados con los de Rodríguez Vásquez *et al.* (2008), tienen una diferencia del 39% para el parámetro *a*, mientras que para el parámetro *b* es del 20%. En el modelo de Philip, hay una diferencia de 35% para el parámetro *S* y el valor del parámetro *A* de Rodríguez Vásquez *et al.* (2008) es 25 veces mayor que el nuestro. Esta diferencia probablemente se debe a que el error de estimación es mayor en los cilindros concéntricos.

Hay una diferencia significativa con respecto al trabajo de Mirzaee *et al.* (2014) en los cuatro modelos, que varía entre el 68 y el 245%, porque los valores reportados son de un perfil de suelo con horizontes limo-limoso y arcilloso y la capacidad de infiltración característica de las arcillas es muy baja.

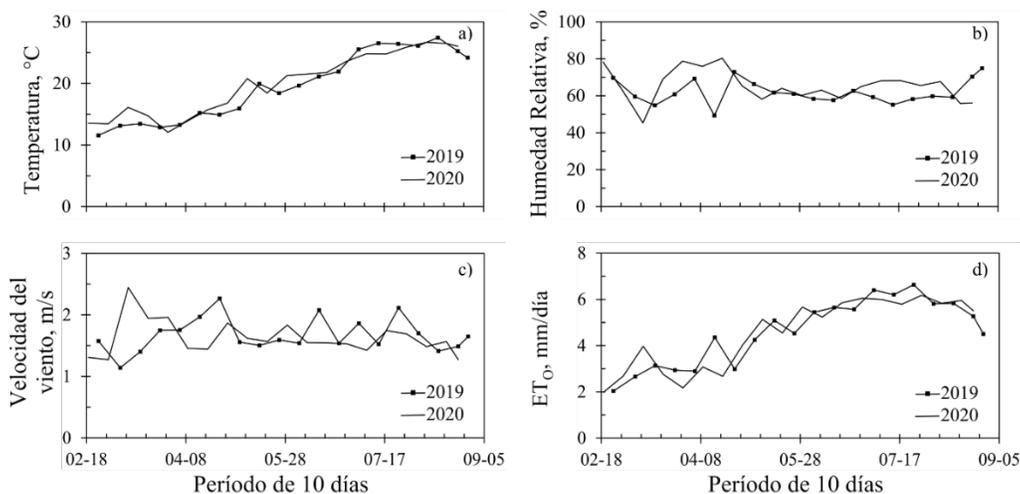
**Tabla 5.** Valores de los parámetros de los modelos de infiltración para el suelo franco limoso.

Modelo		Lisímetro de pesada	Rodríguez Vásquez <i>et al.</i> (2008)	Mirzaee <i>et al.</i> (2014)
Kostiakov	<i>a</i>	47.70	66.46	1.00
	<i>b</i>	0.62	1.12	3.11
Kostiakov Modificado	<i>a</i>	48.42		3.23
	<i>b</i>	0.50	--	0.84
	<i>c</i>	0.29		1.00
Philip	<i>S</i>	20.83	13.60	31.30
	<i>A</i>	0.30	7.93	1.00
Horton	$V_o$	14.44		58.8
	$V_f$	0.75	--	34.80
	$\beta$	0.28		1.00

## 4.2. Evapotranspiración del pimiento y coeficiente de cultivo

### 4.2.1. Condiciones meteorológicas

La temporada del cultivo del 2019 fue del 15 de febrero al 28 de agosto, mientras que la temporada de 2020 fue del 10 de febrero al 22 de agosto, ambas parten desde el día del trasplante. La temperatura media del aire, la humedad relativa media del aire, la velocidad del viento y  $ET_0$  para las diferentes temporadas se muestran en la Fig. 18. El comportamiento de las variables climáticas fue muy similar para los dos años. El mes de marzo, los días finales de abril y los primeros días de junio fueron más cálidos en 2020, mientras que los días finales de junio y principios de julio fueron más cálidos en 2019.



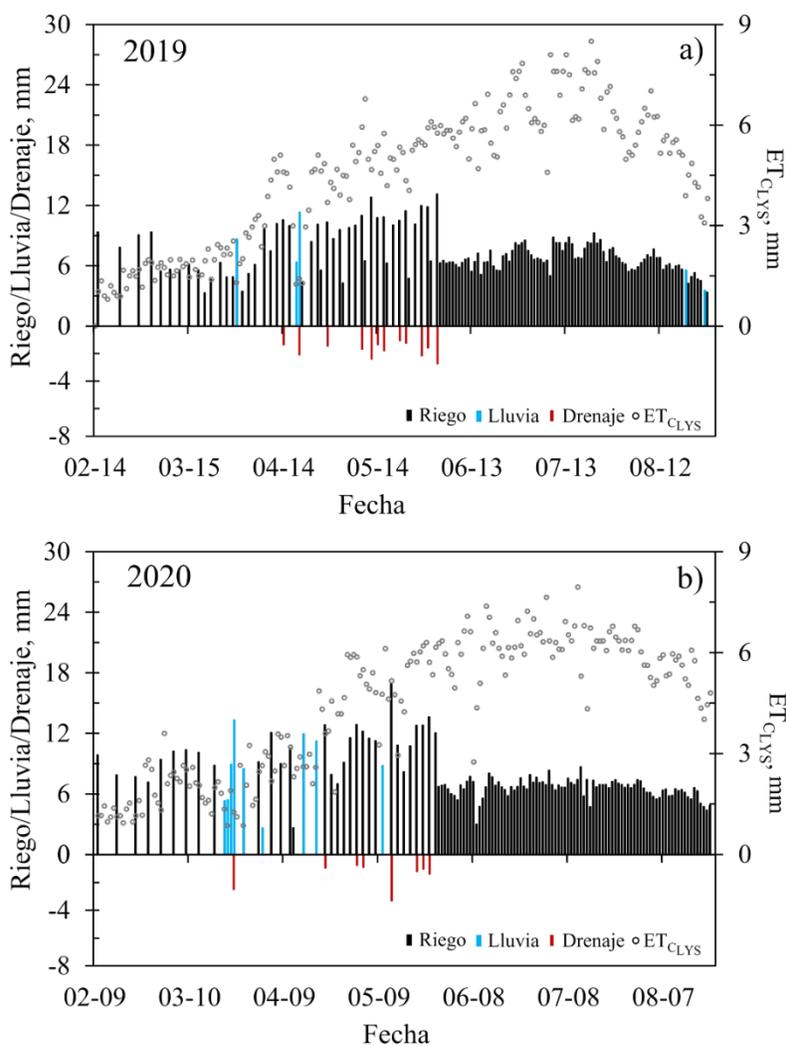
**Figura 18.** Datos meteorológicos promedio para períodos de 10 días, a) temperatura ambiente, b) humedad relativa, c) velocidad del viento y d) evapotranspiración de referencia  $ET_0$ .

La humedad relativa y velocidad del viento fueron más bajas en 2019 que en 2020 durante la mayor parte de la temporada del cultivo. La humedad relativa fue especialmente baja del 14 de marzo al 18 de abril y del 27 de julio al 10 de agosto en 2020. Los valores medios de humedad relativa registrados para las dos temporadas fueron superiores al 60%, con un promedio mínimo y máximo de 47.3% y 76.61%, respectivamente. La velocidad media del viento fue de  $1.67 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  en 2019 y de  $1.65 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  en 2020. La  $ET_0$  aumentó de

manera similar a la temperatura ambiente, con una  $ET_0$  promedio de  $4.6 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$  en 2019 y  $4.6 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$  en 2020.

#### 4.2.2. Evapotranspiración del cultivo

La Fig. 19 muestra los valores diarios de  $ET_C$  obtenida con el lisímetro, las entradas debidas a la lluvia y riego, y las pérdidas de agua por drenaje. Inicialmente, el riego fue aplicado cada tres días en promedio; sin embargo, de acuerdo al crecimiento del cultivo y el aumento de la  $ET_C$ , como efecto de las altas temperaturas del verano, la programación del riego cambio cada dos días, luego disminuyó hasta alcanzar un día entre riegos.



**Figura 19.** Evapotranspiración diaria del pimiento medido con el lisímetro de pesada ( $ET_{CLYS}$ ), riego, lluvia y drenaje, a) 2019 y b) 2020.

Los intervalos de riego mostraban una tendencia similar en ambas temporadas; el intervalo más amplio entre riegos para la temporada 2019 fue de cinco días y extendido hasta febrero, mientras para la temporada 2020, el intervalo más amplio fue de tres días en promedio y extendido hasta el 20 de abril. En abril, la  $ET_{CLYS}$  aumentó, haciendo que el intervalo disminuyera a dos días. En los días de finales de mayo, cuando comenzó el verano, el riego se realizaba diariamente. En este período, la evapotranspiración diaria era superior a 5 mm. Este intervalo comenzó más temprano en la temporada de 2020. La aplicación total del riego fue de 960.3 mm en 2019 y 936.1 mm en 2020. En 2020 hubo más eventos de lluvia, con 40.7 mm más de lluvia en el doble de eventos, por lo que se aplicó menos riego significando 2.52% menos de riego aplicado.

La Tabla 6 muestra los valores promedios de riego, lluvia, drenaje y evapotranspiración para ambos años.

**Tabla 6.** Balance hídrico de temporada en milímetros.

Temporada	Riego	Lluvia	Drenaje	$ET_{CLYS}$
2019	960.3	35.4	12.31	874.4
2020	936.1	76.1	12.03	854.6

Comparando la lámina de agua bruta de riego obtenida con el lisímetro con la obtenida usando la metodología de la FAO-56 fue encontrada una disminución del 1.33% en 2019 ya que la lámina de agua simulada con la FAO fue de 947.6 mm. En cuanto al año 2020, la lámina simulada fue 928.8 mm, lo que representa una disminución del 0.78% con respecto a las mediciones del lisímetro. Estas disminuciones fueron pequeñas, la diferencia de las láminas puede significar uno o dos riegos. Los drenajes reportados por el lisímetro alcanzaron un promedio de 12 mm, con 12 y 14 eventos para las temporadas 2019 y 2020, respectivamente.

En la primera temporada, los drenajes no superaron los 4 mm y fueron causados por los riegos que llegaron a superar los 10 mm de lámina; por ejemplo, el drenaje causado por las lluvias del 19 al 21 de abril tenía con una lámina de 28.4 mm. En la segunda temporada,

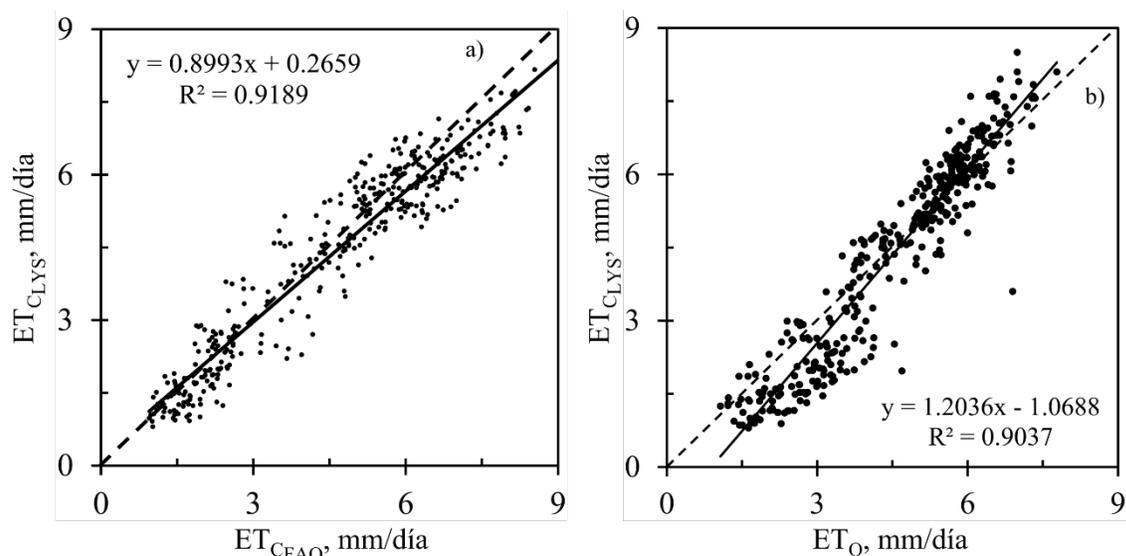
uno de los drenajes fue causado por la lluvia del 21 al 24 de marzo con una lámina acumulada de 33 mm y los otros fueron causados por una lámina de riego mayor a 12 mm. Las principales precipitaciones se produjeron en los meses de marzo y abril; el primer año, hubo cinco días de lluvia con una lámina acumulada de 35.4 mm, mientras que, en el segundo año, hubo lluvias con el doble de días y una lámina acumulada de 76.1 mm.

Al comparar la lámina de riego aplicada en este experimento, la cual es mayor de  $9,000 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  con la recomendada para el pimiento en la Región de Murcia de 8,500 a  $10,000 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  (López Marín *et al.*, 2017; Pellicer *et al.*, 2008), es notorio que se encuentra dentro del rango establecido y cercano al límite superior. Hay que tener en cuenta que las variaciones climáticas son las que más influyen en la determinación de la demanda evapotranspirativa de los cultivos, por lo que al aumentar la temperatura aumenta la demanda hídrica y mientras mayor duración de la plantación mayor volumen de agua usado.

Aunado a lo mencionado anteriormente, la  $ET_C$  aumentó cuando la temperatura también lo hizo y cuando el intervalo entre riegos disminuyó, lo que indica la relación que  $ET_C$  tiene con ambas variables. El valor máximo de  $ET_C$  se alcanzó cerca del 16 de julio para ambas estaciones. Cuando la aplicación de riego fue a escala diaria, la  $ET_C$  tuvo valores altos por encima de 5 mm. El comportamiento del  $ET_C$  durante los días de lluvia fue pequeño, y fue mayor el día después del riego o de la lluvia porque la evaporación del suelo húmedo fue más significativa; en este mismo contexto, en los días en que no hubo riego, debido a intervalos más largos, el  $ET_C$  se mantuvo o disminuyó, porque hay menos evaporación de un suelo con superficie seca (Allen *et al.*, 1998). El total de  $ET_C$  para la temporada 2019 fue de 874.4 mm y el total para 2020, fue de 854.6 mm.

Los valores de  $ET_{C_{LYS}}$  medidos con el lisímetro para ambas temporadas se compararon con las  $ET_O$  calculadas con el método FAO Penman-Monteith y las  $ET_C$  obtenidos con el método establecido por la metodología estándar de la FAO-56 ( $ET_{C_{FAO}}$ ) (Allen *et al.*, 1998), se presentan en la Fig. 20. El promedio resultante  $ET_{C_{LYS}}$  para las etapas inicial, media y final fue de 1.6, 5.8 y 5.4  $\text{mm} \cdot \text{día}^{-1}$ , respectivamente.

La correlación lineal entre  $ET_{CLYS}$  y  $ET_0$  mostró un buen acuerdo (Fig. 20b). El coeficiente de determinación fue de 0.90 y el RMSE fue de  $1.04 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$  para ambas estaciones, lo que indica la dependencia que existe entre las variables. En la comparación de  $ET_{CLYS}$  y  $ET_{CFAO}$ , la pendiente de regresión lineal fue cercana a la unidad y el RMSE fue de  $0.63 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ . Los valores de  $ET_{CFAO}$  en todo el ciclo de cultivo sobrestimaron los  $ET_{CLYS}$  en un 37.44%, con un valor medio de  $0.4 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ ; esto puede deberse a que los valores  $K_C$  utilizados en la metodología de la FAO-56 eran valores estándar calibrados en condiciones diferentes a las de este experimento.



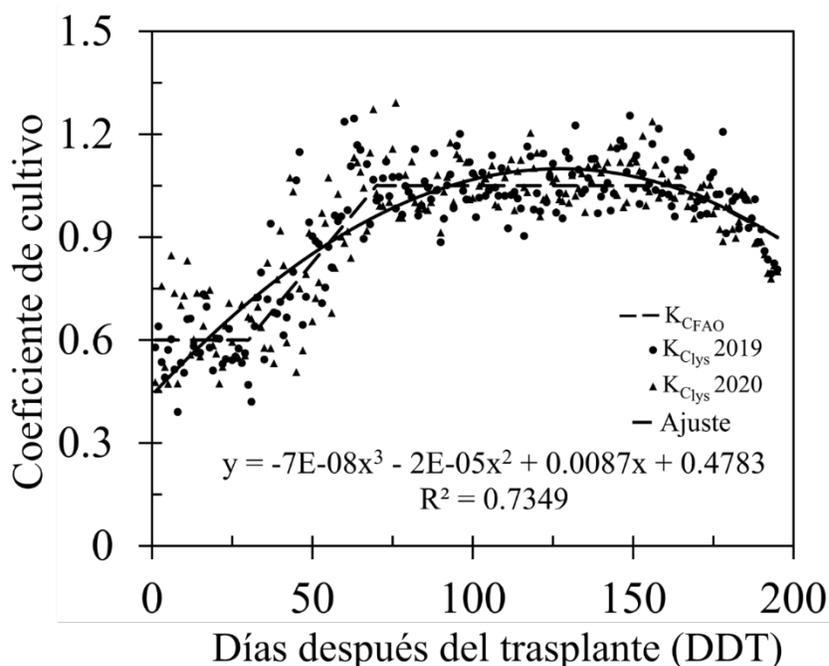
**Figura 20.** Correlación entre  $ET_{CLYS}$  medido por el lisímetro de pesada y  $ET_{CFAO}$  determinado por la metodología de la FAO-56 y entre  $ET_{CLYS}$  y  $ET_0$ .

El MEE fue cercano a 0 ( $0.03 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$  en 2019 y  $0.01 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$  en 2020), lo que indica un bajo sesgo entre  $ET_{CLYS}$  y  $ET_{CFAO}$ . De manera similar, las otras métricas mostraron el mismo comportamiento. Los valores de IA estuvieron cercanos al uno (0.98 en 2019 y 0.98 en 2020), indicando un buen acuerdo con ambos modelos  $ET_C$ . Sin embargo, los valores de  $MSE_S$  fueron de 4.05% en 2019 y 3.91% en 2020, lo que indica un alto sesgo, lo que significa que uno de los métodos debe ser mejorado. Los  $MSE_S$  obtenidos por Martínez-Cob, (2008) son muy similares a los resultados de esta investigación, siendo ambos  $MSE_S$  mayores que dos.

### 4.2.3. Coeficiente de cultivo

Los valores de los coeficientes de cultivo estimados a partir de la Ecuación 28 ( $K_{C_{lys}}$ ) y los valores establecidos en el documento de la FAO-56 para este cultivo ( $K_{C_{FAO}}$ ) se muestran en la Fig. 21. El  $K_{C_{lys}}$  inicial del lisímetro fue 0.57, el  $K_{C_{lys}}$  medio fue 1.06, y el  $K_{C_{lys}}$  final fue 0.80. Estos datos fueron ajustados a una curva polinómica de tercer grado, con un  $R^2$  de 0.73. En este modelo, se observó un  $K_{C_{lys}}$  máximo de 1.11 y un mínimo de 0.48.

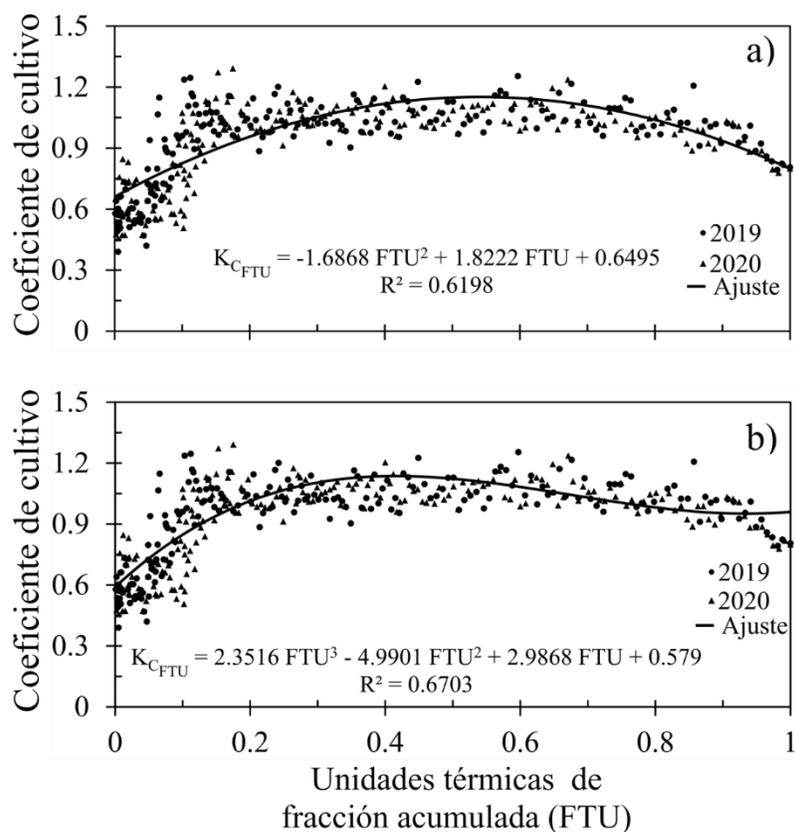
Al comparar  $K_{C_{lys}}$  con  $K_{C_{FAO}}$  se obtuvo un  $R^2$  de 0.79 y un RMSE de 0.09. Los valores de  $K_{C_{lys}}$  oscilaron alrededor de los valores recomendados por Allen *et al.* (1998).



**Figura 21.** Coeficientes de cultivo del pimiento durante el ciclo de cultivo (valores del lisímetro y la metodología FAO-56).

El salto en  $K_{C_{lys}}$  entre el 50 y 75 DDT (Fig. 21) puede deberse a los bajos valores de evapotranspiración de referencia reportados en esos días en ambas temporadas, siendo más significativos para la temporada de 2020. Cabe recordar que en la Ecuación 28, el  $K_{C_{lys}}$  esta en una función de  $ET_0$ , por lo que cuanto más bajo sea  $ET_0$ , más alto será  $K_{C_{lys}}$ .

Se obtuvo una relación entre  $K_{C_{lys}}$  y las unidades térmicas fraccionales (FTU); la Fig. 22 muestra los dos gráficos resultantes del ajuste polinómico. Como se muestra en la Fig. 22a, el máximo valor de  $K_{C_{FTU}}$  fue de 1.15 para el rango de 0.43-0.62 de FTU; el  $K_{C_{FTU}}$  máximo de la Fig. 22b fue de 1.15 en el rango de 0.36-0.49. Aunque, el segundo ajuste (Fig. 22b) mostró un  $R^2$  ligeramente mejor, alcanzó un máximo de curva durante una etapa temprana del FTU y una disminución más lenta; el final de la curva se elevó y se alejó de los puntos observados.



**Figura 22.** Ajuste polinómico de los valores del coeficiente de cultivo ( $K_C$ ) obtenidos para 2019 y 2020: a) Ajuste polinómico de segundo orden y b) ajuste polinómico de tercer orden.

La suma promedio de FTU resultante fue de 1881.76, un valor que está dentro del rango propuesto por Vidal (2011). Hubo un sesgo menor entre  $K_{C_{FAO}}$  y  $K_{C_{FTU}}$ , seguido de  $K_{C_{FAO}}$  contra  $K_{C_{lys}}$  con 0.09 y con 0.48 los valores de  $K_{C_{FTU}}$  contra  $K_{C_{lys}}$ . Estos valores se muestran en la Tabla 7.

La Tabla 7 muestra los valores de  $K_C$  del pimiento estimados en dos trabajos de investigación. El trabajo de Shukla *et al.* (2013) se realizó en Florida, EE.UU. durante las temporadas de otoño-invierno del 2003 al 2008, con un rango de temperatura de 17-29 °C, una precipitación anual de 1260 mm·año<sup>-1</sup>, una  $ET_C$  total de 267 mm, y con un nivel freático alto. La cama del cultivo estaba cubierta con mantillo de plástico que cubría el 33% del área del lisímetro.

El segundo trabajo de investigación fue realizado por Muniandy *et al.* (2016) en la zona Peninsular de Malasia, caracterizada por tener un clima cálido y húmedo, durante el mes de agosto de 2013 a mayo de 2014. El rango de temperatura media es de 24-30 °C, una precipitación mensual de 125-270 mm y una humedad relativa (HR) de entre el 63 y el 88%. Ambas investigaciones utilizaron la misma metodología para determinar la  $ET_C$  y  $K_C$  que en este estudio.

El rango de temperatura y de la humedad relativa de ambos trabajos estaban en el mismo rango que este trabajo, pero con mayores precipitaciones que las registradas en todo un año y con experimentaciones realizadas en una temporada de siembra diferente en este estudio. Shukla *et al.* (2013) reportaron valores bimestrales altos de  $ET_C$  para sus temporadas, ya que el riego y las precipitaciones mantuvieron alta la capa freática y aumentaron la humedad del suelo debido al acolchonado. Por lo tanto, los valores  $K_C$  de esa investigación fueron los más altos (Tabla 7), fueron 50.88%, 14.15% y 60% más altos en cada etapa en comparación con los valores reportados con el lisímetro en esta investigación, respectivamente.

En cambio, los valores de Muniandy *et al.* (2016) en las etapas media y final fueron los más bajos, como se muestra en la Tabla 7. Las condiciones climáticas fueron muy similares a las del trabajo mencionado anteriormente, pero sin la influencia de la capa freática. Estos valores presentaron una reducción del 10.38% y del 5% en  $K_{C_{medio}}$  y  $K_{C_{final}}$ , con respecto a los reportados en este trabajo con el lisímetro, respectivamente. Los valores propuestos por Allen *et al.* (1998) presentaron una menor variabilidad con respecto a los obtenidos con el lisímetro en esta investigación, con un aumento en las etapas inicial y final de 5.26% y 12.5%, respectivamente, y una disminución en la etapa intermedia de 0.94%. Los

valores de la FAO corresponden a climas con una HR cercana al 45% y velocidades del viento cercanas a  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; nuestras condiciones satisfacen estas cifras.

**Tabla 7.** Valores de  $K_C$  obtenidos en esta investigación y otros trabajos.

Valores de $K_C$	Etapa fenológica del cultivo			Localización	Método de riego	Condiciones climáticas	Ciclo del cultivo
	Inicio	Medio	Final				
$K_{C_{lys}}$	0.57	1.06	0.80	Murcia, España	Goteo	Temp. 12-28°C RH 47%-77%	195
$K_{C_{FTU}}^*$	0.69	1.05	0.78			Lluvia < 100 $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$	
$K_{C_{FTU}}^{**}$	0.65	1.06	0.93			$ET_C \approx 860$ $\text{mm}\cdot\text{temporada}^{-1}$	
Allen <i>et al.</i> (1998)	0.60	1.05	0.9	Europa y Mediterráneo	--	RH $\approx$ 45%	125
Shukla <i>et al.</i> (2013)	0.86	1.21	1.28	Florida, EUA	Subsuperficial	Temp. 17-29°C Lluvia 1260 $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$ $ET_C \approx 267$ $\text{mm}\cdot\text{temporada}^{-1}$	100
Muniandy <i>et al.</i> (2016)	0.67	0.95	0.76	Kluang, Malasia	Aspersión	Temp. 24-30°C RH 63%-88% Lluvia 125-270 $\text{mm}\cdot\text{mes}^{-1}$	125

\* valores del polinomio de ajuste de segundo orden

\*\* valores del polinomio de ajuste de tercer orden

#### 4.2.4. Rendimiento

La Tabla 8 muestra un resumen de la producción final alcanzada en cada temporada. El rendimiento de pimienta en ambas temporadas fue superior al reportado por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2010) del Gobierno de España en 2019 de  $75.66 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  para la Región de Murcia.

El lisímetro de pesada compacto permitió una mayor precisión en el control del balance hídrico del cultivo, lo que incrementó el rendimiento y produjo un importante ahorro de agua en comparación con las prácticas habituales de la Región de Murcia. La producción de agua y los rendimientos económicos fueron similares en ambas temporadas.

En 2019 se obtuvo un mejor rendimiento, ya que el exceso de humedad del suelo provocado por las lluvias de 2020 generó un aborto de las flores, reduciendo la productividad del pimiento en ese año (López Marín *et al.* 2017)

**Tabla 8.** Datos de producción de ambas temporadas.

Temporada	Rendimiento del pimiento (t·ha <sup>-1</sup> )	Productividad del agua (Kg·m <sup>-3</sup> )	Rendimiento económico (€ha <sup>-1</sup> )
2019	81.5	8.49	64,457.55
2020	78.3	8.36	64,808.91

## **5. Conclusiones**

Los trabajos desarrollados para la elaboración de esta Tesis han permitido obtener las siguientes conclusiones:

### **Infiltración del agua en el suelo**

- a) A partir de los valores de masa de un lisímetro de pesada compacto y de los dos enfoques propuestos fue posible medir el comportamiento de velocidad de infiltración de agua de un suelo franco limoso en condiciones de lluvia inestable. Resultando un gráfico de dispersión de la velocidad de infiltración del suelo similar a la típica curva de infiltración, ya sea para tiempos de aplicación cortos o largos en condiciones de campo. El suelo mostró estar sujeto a una velocidad de infiltración variable y más rápida al principio del ingreso del agua, pero que alcanza una velocidad básica o estable a medida que el agua va llenando sus poros.
  
- b) El comportamiento de la humedad en el suelo fue establecido a cada minuto, sin embargo, el primer valor de la humedad tuvo que ser inferido de la densidad aparente del suelo, por lo que es necesario establecer el contenido de humedad inicial en futuras investigaciones. Sin embargo, la metodología usada en este trabajo para la determinación de la humedad del suelo con el lisímetro de pesada queda validada con

la capacidad de campo del suelo establecida en este trabajo ya que tiene una diferencia menor del 10% con la encontrada en laboratorio y otros valores de la literatura.

- c) Los enfoques de velocidad de infiltración son simples y satisfacen la conservación de la masa y la ecuación de continuidad para flujos incompresibles. Aunque en este trabajo son utilizados para condiciones de no saturación, pueden utilizarse para condiciones de saturación añadiendo la variable de escorrentía superficial que restaría al flujo entrante al suelo.
- d) Estos enfoques permiten caracterizar la velocidad de infiltración de un suelo homogéneo y no homogéneo en las profundidades donde la agricultura tiene lugar regularmente.
- e) La calibración del modelo de infiltración de Horton tuvo mejor ajuste con los datos medidos por el lisímetro, ya que este modelo describe la naturaleza de las curvas típicas de velocidad de infiltración que es la ley exponencial inversa.

### **Evapotranspiración del pimiento y coeficiente de cultivo**

- a) Los valores  $ET_C$  y  $K_C$  para el cultivo de pimientos fueron calculados usando un lisímetro de pesada compacto y una estación meteorológica automática para dos temporadas en el sureste semiárido de Murcia, España. La  $ET_C$  es afectada por eventos de riego y lluvia, que aumentaron la evaporación del suelo, notablemente cuando había un intervalo más corto entre los riegos.
- b) Los valores medios de  $K_C$  del pimiento para las etapas inicial, media y final fueron de 0.57, 1.06 y 0.80, respectivamente. Los valores de  $K_C$  fueron similares a los propuestos por Allen *et al.* (1998) porque las condiciones climáticas fueron similares en ambos estudios, sin embargo son inferiores en comparación con los valores de Shukla *et al.* (2013), en los que algunas condiciones climáticas fueron similares pero con mayor lluvia y mayor contribución por parte de la capa freática que causaron una mayor evaporación de agua del suelo.

- c) Fueron desarrollados modelos de segundo y tercer orden para el  $K_C$  en función de las unidades térmicas fraccionales, basados en los datos del  $K_C$  inferidos del lisímetro, con coeficientes de determinación superiores a 0.60. Así que, los valores de  $K_{C_{1ys}}$  y los modelos de FTU para el pimiento obtenidos en este estudio ayudarán a los agricultores a determinar las necesidades de agua del cultivo y a mejorar la eficiencia hídrica en lugares semiáridos con condiciones similares a las de este estudio, evitando el uso de los  $K_C$  propuestos por la FAO que son calibrados en condiciones climatológicas diferentes a la zona estudiada y que pueden llevar a crear un sesgo en la programación del riego.
- d) Un aumento del rendimiento del pimiento del 7.72% en 2019 y del 3.49% en 2020, en comparación con el rendimiento establecido por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, (2010) del Gobierno Español fue conseguido.

### **Limitantes del Trabajo y Líneas de Investigación Futuras**

Las limitantes de este trabajo de investigación son:

- No es posible cuantificar la escorrentía superficial con el lisímetro de pesada compacto usado.
- No visualización del avance del frente húmedo y la no comparación de los valores de humedad del suelo del sitio circundante al lisímetro de pesada compacto.
- Únicamente fue realizado en un cultivo hortícola y un tipo de suelo en específico.
- A pesar de la ventaja de movilidad del lisímetro de pesada compacto usado, sólo puede ser usado con cultivos hortícolas cuya profundidad de raíces sean menores o iguales a los 30 cm (por ejemplo, el apio, ajo, lechuga, cebolla, espinaca, pimiento y rábano, según el Manual 56 de la FAO). Esto se debe que se trabajó con las primeras versiones del diseño del nuevo lisímetro, las nuevas versiones tienen profundidades de 50 cm.

Para futuras investigaciones será necesario disponer de mayores instrumentos de medición (es decir, sensores de humedad del suelo) para caracterizar el avance del frente agua en el suelo, contenido de humedad y las fuerzas que actúan en él (con sensores de potencial de agua del suelo) que ayudarán a verificar que las condiciones dentro del lisímetro sean iguales al suelo circundante. Además, complementar al lisímetro de pesada para que pueda medir o recolectar el agua que pueda fluir por causa de la escorrentía superficial.

Durante toda la temporada del crecimiento del del cultivo puede determinarse algunas características agronómicas como su altura, diámetro del tallo, porcentaje de cobertura verde, profundidad de raíces, entre otras (aunque este último puede ser destructivo) y obtener modelos de ajuste en relación con el coeficiente de cultivo.

Las metodologías propuestas para la determinación de velocidad de infiltración y evapotranspiración del cultivo pueden ser extrapolados a otras texturas de suelo y cultivos hortícolas, que extenderán la validación de estos bajo diferentes condiciones climatológicas, técnicas de manejo del cultivo, entre otras.

Estas metodologías en conjunto pueden complementar a un sistema automático pueden ayudar para la programación en tiempo real de los riegos, que permita hacer un uso eficiente del recurso hídrico basado en la velocidad de entrada del agua en el suelo y la evapotranspiración del cultivo.

## 6. Referencias

- Aboukhaled, A., Alfaro, A., Smith, M., 1982. Lysimeter. FAO (Food Agric. Organ. United Nations) Irrigation.
- Adekalu, K.O., Olorunfemi, I.A., Osunbitan, J.A., 2007. Grass mulching effect on infiltration, surface runoff and soil loss of three agricultural soils in Nigeria. *Bioresour. Technol.* 98, 912–917. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.02.044>
- AENOR, 2002. Automatic weather station network. Criteria for the localization of sites and installation of sensor. Acquisition characteristics and sampling. UNE 500520-2002.
- Ali, M.H., 2010. Fundamentals of irrigation and on-farm water management. Springer Science & Business Media.
- 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. Fao, Rome 300, D05109.
- Angulo-Jaramillo, R., Bagarello, V., Iovino, M., Lassabatere, L., 2016. Infiltration Measurements for Soil Hydraulic Characterization. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-31788-5>
- Arriaga, F.J., Kornecki, T.S., Balkcom, K.S., Raper, R.L., 2010. A method for automating data collection from a double-ring infiltrometer under falling head conditions. *Soil Use Manag.* 26, 61–67. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2009.00249.x>
- Assi, A.T., Blake, J., Mohtar, R.H., Braudeau, E., 2019. Soil aggregates structure-based approach for quantifying the field capacity, permanent wilting point and available water capacity. *Irrig. Sci.* 37, 511–522. <https://doi.org/10.1007/s00271-019-00630-w>

- Babaei, F., Zolfaghari, A.A., Yazdani, M.R., Sadeghipour, A., 2018. Spatial analysis of infiltration in agricultural lands in arid areas of Iran. *Catena* 170, 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.05.039>
- Bagarello, V., Sgroi, A., 2004. Using the single-ring infiltrometer method to detect temporal changes in surface soil field-saturated hydraulic conductivity. *Soil Tillage Res.* 76, 13–24. <https://doi.org/10.1016/j.still.2003.08.008>
- Bello, Z.A., Van Rensburg, L.D., 2017. Development, calibration and testing of a low-cost small lysimeter for monitoring evaporation and transpiration. *Irrig. Drain.* 66, 263–272. <https://doi.org/10.1002/ird.2095>
- Camarasa Belmonte, A.M., Soriano Garcí, J., López-Garcí, M.J., 2010. The effect of observation timescales on the characterisation of extreme Mediterranean precipitation. *Adv. Geosci.* 26, 61–64. <https://doi.org/10.5194/adgeo-26-61-2010>
- Cui, Z., Wu, G.L., Huang, Z., Liu, Y., 2019. Fine roots determine soil infiltration potential than soil water content in semi-arid grassland soils. *J. Hydrol.* 578, 124023. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124023>
- de Almeida, W.S., Panachuki, E., de Oliveira, P.T.S., da Silva Menezes, R., Sobrinho, T.A., de Carvalho, D.F., 2018. Effect of soil tillage and vegetal cover on soil water infiltration. *Soil Tillage Res.* 175, 130–138. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.07.009>
- del Valle Paniagua, E.A., Bueno, G., Oleschko Lutkova, K., 2009. Modelling processes of the Soil Water Regime. *Terra Latinoam.* 27, 160–168. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.881.239>
- Delleur, J.W., 2006. *The Handbook of Groundwater Engineering*, 2nd ed.
- Duchaufour, P., 1998. *Handbook of Pedology*. Taylor & Francis Group.
- Elaydi, H., 2017. An Automated Irrigation System for Greenhouses. *Am. J. Electr. Electron. Eng.* 5, 48–57. <https://doi.org/10.12691/ajeec-5-2-3>
- Escarabajal-Henarejos, D., Molina-Martínez, J.M., Fernández-Pacheco, D.G., Cavas-Martínez, F., García-Mateos, G., 2015. Digital photography applied to irrigation management of Little Gem lettuce. *Agric. Water Manag.* 151, 148–157. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.08.009>
- Evans, R.G., Sadler, E.J., 2008. Methods and technologies to improve efficiency of water use. *Water Resour. Res.* 44, 1–15. <https://doi.org/10.1029/2007WR006200>
- Evanylo, G., McGuinn, R., 2000. Agricultural management practices and soil quality.
- Fatehnia, M., Paran, S., Kish, S., Tawfiq, K., 2016. Automating double ring infiltrometer with an Arduino microcontroller. *Geoderma* 262, 133–139.

<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.022>

Ferguson, B.K., 1994. Stormwater Infiltration. Lewis Publishers.

Fernández-Pacheco, D.G., Escarabajal-Henarejos, D., Ruiz-Canales, A., Conesa, J., Molina-Martínez, J.M., 2014. A digital image-processing-based method for determining the crop coefficient of lettuce crops in the southeast of Spain. *Biosyst. Eng.* 117, 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.07.014>

Fok, Y., 1986. Derivation of Lewis-Kostiakov intake equation. *J. Irrig. Drain. Eng.* 112, 164–171.

Foth, H.D., 1990. Fundamentals of soil science, 8th ed. John Wiley & Son, Michigan State University.

Fuentes Ruíz, C., Quiñones Pedroza, H., Rendón Pimentel, L., Hernández Saucedo, F.R., Sánchez Bravo, R., Magaña Sosa, G., Peña Peña, E., Enciso Medina, J., Martínez Sainos, F., Carrillo García, M., Herrera Ponce, J.C., Angeles Montiel, V., Castillo González, J., Martínez Austria, P., Replogle, J.D., Clemmens, A.J., de León Mojarro, B., Ruíz Carmona, V.M., Iñiguez Cobarrubias, M., Angeles Hernández, J.M., Sánchez Astello, M., Arteaga Tovar, R.E., 1997. Manual para diseño de zonas de riego pequeñas, Departamen. ed. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México.

Furman, A., Warrick, A.W., Zerihun, S.C.A., 2006. Modified Kostiakov Infiltration Function: Accounting for Initial and Boundary Conditions. *J. Irrig. Drain. Eng.* 132, 587–596. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2006\)132](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2006)132)

Gallardo, M., Thompson, B., Fernández, M.D., 2013. Water requirements and irrigation management in Mediterranean greenhouses: the case of the southeast coast of Spain, in: Food and Agriculture Organization of the United Nations (Ed.), Good Agricultural Practices for Greenhouse Vegetable Crops. Principle for Mediterranean Climate Areas. Rome, pp. 109–136.

García-Tejero, I.F., Durán-Zuazo, V.H., Muriel-Fernández, J.L., Rodríguez-Pleguezuelo, C.R., 2011. Water and Sustainable Agriculture. Springer 1–16. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-2091-6\\_1](https://doi.org/10.1007/978-94-007-2091-6_1)

Gebler, S., Hendricks Franssen, H.J., Pütz, T., Post, H., Schmidt, M., Vereecken, H., 2015. Actual evapotranspiration and precipitation measured by lysimeters: A comparison with eddy covariance and tipping bucket. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19, 2145–2161. <https://doi.org/10.5194/hess-19-2145-2015>

Haghiabi, A.H., Abedi-Koupai, J., Heidarpour, M., Mohammadzadeh-Habili, J., 2011. A new method for estimating the parameters of Kostikov and modified Kostiakov infiltration equations. *World Appl. Sci. J.* 15, 129–135.

- Hannes, M., Wollschläger, U., Schrader, F., Durner, W., Gebler, S., Pütz, T., Fank, J., von Unold, G., Vogel, H.-J., 2015. High-resolution estimation of the water balance components from high-precision lysimeters. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 12, 569–608. <https://doi.org/10.5194/hessd-12-569-2015>
- Hartley, D.M., 1992. Interpretation of Kostiakov infiltration parameters for borders. *J. Irrig. Drain. Eng.* 118, 156–165.
- Haselow, L., Meissner, R., Rupp, H., Miegel, K., 2019. Evaluation of precipitation measurements methods under field conditions during a summer season: A comparison of the standard rain gauge with a weighable lysimeter and a piezoelectric precipitation sensor. *J. Hydrol.* 575, 537–543. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.065>
- Haverkamp, R., Kutilek, M., Parlange, J.Y., Rendon, L., M., K., 1988. Infiltration under ponded conditions: 2. Infiltration equations tested for parameters time-dependence and predictive use. *Soil Sci.* 145, 317–329.
- Herbrich, M., Gerke, H.H., 2016. Autocorrelation analysis of high resolution weighing lysimeter time series as a basis for determination of precipitation. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 179, 784–798. <https://doi.org/10.1002/jpln.201600169>
- Herrada, M.A., Gutiérrez-Martin, A., Montanero, J.M., 2014. Modeling infiltration rates in a saturated/unsaturated soil under the free draining condition. *J. Hydrol.* 515, 10–15. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.026>
- Hoffman, M., Schwartengraber, R., Wessolek, G., Peters, A., 2016. Comparison of simple rain gauge measurements with precision lysimeter data. *Atmos. Res.* 174–175, 120–123.
- Horton, R.E., 1941. Approach toward a physical interpretation of infiltration capacity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 5, 339–417.
- Jensen, M.E., 2007. Beyond irrigation efficiency. *Irrig. Sci.* 25, 233–245. <https://doi.org/10.1007/s00271-007-0060-5>
- Katyara, S., Shah, M.A., Zardari, S., Chowdhry, B.S., Kumar, W., 2017. WSN Based Smart Control and Remote Field Monitoring of Pakistan's Irrigation System Using SCADA Applications. *Wirel. Pers. Commun.* 95, 491–504. <https://doi.org/10.1007/s11277-016-3905-5>
- Kirkham, M.B., 2010. *Principles of Soil and Plant Water Relations*. Academic Press.
- Koorevaar, P., Menelik, G., Dirksen, C., 1999. *Elements of soil physics.*, 5th ed, Elements of soil physics. Elsevier Science B.V. <https://doi.org/10.1097/00010694-198510000-00012>
- Kullberg, E.G., DeJonge, K.C., Chávez, J.L., 2017. Evaluation of thermal remote sensing

- indices to estimate crop evapotranspiration coefficients. *Agric. Water Manag.* 179, 64–73. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.07.007>
- Lewis, M.R., 1937. The rate of infiltration of water in irrigation-practice. *Trans. Am. Geophys. Union* 18, 361–368.
- Li, Y., Ren, X., Hill, R., Malone, R., Zhao, Y., 2018. Characteristics of Water Infiltration in Layered Water-Repellent Soils. *Pedosphere* 28, 775–792. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60414-4](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60414-4)
- Liu, Y., Cui, Z., Huang, Z., López-Vicente, M., Wu, G.L., 2019. Influence of soil moisture and plant roots on the soil infiltration capacity at different stages in arid grasslands of China. *Catena* 182, 104147. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104147>
- López Marín, J., Angosto, J.L., González, A., 2017. El cultivo de pimientos en invernadero y al aire libre - El caso del Campo de Cartagena. *Bibl. Hortic.* 68.
- Mahmood, S., Latif, M., 2005. A simple procedure for simulating surge infiltration using first-surge infiltrometer data. *Irrig. Drain.* 54, 407–416. <https://doi.org/10.1002/ird.192>
- Maldonado, T., 2001. Manual de Riego Parcelario [WWW Document]. Santiago Chile FAO. URL [http://www.fao.org/tempref/GI/Reserved/FTP\\_FaoRlc/old/prior/reccnat/pdf/MR\\_cap1.PDF](http://www.fao.org/tempref/GI/Reserved/FTP_FaoRlc/old/prior/reccnat/pdf/MR_cap1.PDF)
- Martínez-Cob, A., 2008. Use of thermal units to estimate corn crop coefficients under semiarid climatic conditions. *Irrig. Sci.* 26, 335–345. <https://doi.org/10.1007/s00271-007-0097-5>
- Masarik, K.C., Norman, J.M., Brye, K.R., Baker, J.M., 2004. Improvements to measuring water flux in the vadose zone. *J. Environ. Qual.* 33, 1152–1158.
- Mateos, L., González-Dugo, M.P., Testi, L., Villalobos, F.J., 2013. Monitoring evapotranspiration of irrigated crops using crop coefficients derived from time series of satellite images. I. Method validation. *Agric. Water Manag.* 125, 81–91. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.11.005>
- Mattar, M.A., Alazba, A.A., Zin El-Abidin, T.K., 2015. Forecasting furrow irrigation infiltration using artificial neural networks. *Agric. Water Manag.* 148, 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.09.015>
- Meissner, R., Seeger, J., Rupp, H., Seyfarth, M., Borg, H., 2007. Measurement of dew, fog, and rime with a high-precision gravitation lysimeter. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 170, 335–344. <https://doi.org/10.1002/jpln.200625002>
- Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación, 2020. Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España [WWW Document]. URL

- <https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/publicaciones/Publicaciones-fertilizantes.aspx>
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010. Anuario de Estadística 2010. Madrid, España.
- Miranda, F.R., Gondim, R.S., Costa, C.A.G., 2006. Evapotranspiration and crop coefficients for tabasco pepper (*Capsicum frutescens* L.). *Agric. Water Manag.* 82, 237–246. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.024>
- Mirzaee, S., Zolfaghari, A.A., Gorji, M., Dyck, M., Ghorbani Dashtaki, S., 2014. Evaluation of infiltration models with different numbers of fitting parameters in different soil texture classes. *Arch. Agron. Soil Sci.* 60, 681–693. <https://doi.org/10.1080/03650340.2013.823477>
- Moreno, F., Martín, J., Arrue, J.L., 1978. Relación entre Textura y Retención de Humedad para el Margen de pF 4,2-6,0, en Suelos de Andalucía Occidental. *An. Edafol. y Agrobiol.* 335–344.
- Muniandy, J.M., Yusop, Z., Askari, M., 2016. Evaluation of reference evapotranspiration models and determination of crop coefficient for *Momordica charantia* and *Capsicum annuum*. *Agric. Water Manag.* 169, 77–89. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.02.019>
- Navarro-Hellín, H., Martínez-del-Rincon, J., Domingo-Miguel, R., Soto-Valles, F., Torres-Sánchez, R., 2016. A decision support system for managing irrigation in agriculture. *Comput. Electron. Agric.* 124, 121–131. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.04.003>
- Nicolás-Cuevas, J.A., Parras-Burgos, D., Soler-Méndez, M., Ruiz-Canales, A., Molina-Martínez, J.M., 2020. Removable weighing lysimeter for use in horticultural crops. *Appl. Sci.* 10. <https://doi.org/10.3390/app10144865>
- Ooi, S.K., Cooley, N., Mareels, I., Dunn, G., Dassanayake, K., Saleem, K., 2010. Automation of on-farm irrigation: Horticultural case study. *IFAC Proc. Vol.* 43, 256–261. <https://doi.org/10.3182/20101206-3-jp-3009.00045>
- Parra, L., Botella-Campos, M., Puerto, H., Roig-Merino, B., Lloret, J., 2020. Evaluating Irrigation Efficiency with Performance Indicators: A Case Study of Citrus in the East of Spain. *Agronomy* 10, 1359. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091359>
- Pellicer, C., Pérez, A., Rincón, L., Abadía, A., Sáez, J., Saura, M.A. 2008. Balance de agua y nutrientes en un cultivo de pimiento de carne gruesa con fertilización ecológica. VIII Congreso SEAE, IV Congreso Iberoamericano Agroecología, Bullas-Murcia.
- Pereira, L.S., de Juan Valero, J.A., Picornell Buendía, M.R., Tarjuelo Martín-Benito, J.M., 2010. El Riego y sus Tecnologías. CREA-UCLM, Albacete, España.
- Peters, A., Nehls, T., Schonsky, H., Wessolek, G., 2014. Separating precipitation and evapotranspiration from noise - A new filter routine for high-resolution lysimeter data.

- Hydrol. Earth Syst. Sci. 18, 1189–1198. <https://doi.org/10.5194/hess-18-1189-2014>
- Philip, J.R., 1957. The Theory of Infiltration: 4. Sorptivity and Algebraic Infiltration Equation. *Soil Sci.* 84, 257–264.
- Plaster, E.J., 2013. *Soil Science & Management*, 6th ed. CENGAGE Learning.
- Playán, E., Mateos, L., 2006. Modernization and optimization of irrigation systems to increase water productivity. *Agric. Water Manag.* 80, 100–116. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.007>
- Porta-Casanellas, J., López-Acevedo, R.M., 2005. *Agenda de campo de suelos. Información de suelos para la agricultura y el medio ambiente*. Ediciones Mundiprensa.
- Richards, L.A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *J. Appl. Phys.* 1, 318–333. <https://doi.org/10.1063/1.1745010>
- Rodríguez Vásquez, A.F., Aristizábal Castillo, A.M., Camacho Tamayo, J.H., 2008. Variabilidad espacial de los modelos de infiltración de Philip y Kostiaikov en un suelo Ándico. *Eng. Agríc., Jaboticabal* 28, 64–75. <https://doi.org/10.12816/0013114>
- Ruiz-Peñalver, L., Vera-Repullo, J.A., Jiménez-Buendía, M., Guzmán, I., Molina-Martínez, J.M., 2015. Development of an innovative low cost weighing lysimeter for potted plants: Application in lysimetric stations. *Agric. Water Manag.* 151, 103–113. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.09.020>
- Sánchez-Bravo, P., Chambers V, E., Noguera-Artiaga, L., Sendra, E., Chambers IV, E., Carbonell-Barrachina, Á.A., 2020. How Consumers Perceive Water Sustainability ( HydroSOSustainable ) in Food Products and How to Identify It by a Logo. *Agronomy* 10, 1–13.
- Sandhu, O.S., Gupta, R.K., Thind, H.S., Jat, M.L., Sidhu, H.S., Yadvinder-Singh, 2019. Drip irrigation and nitrogen management for improving crop yields, nitrogen use efficiency and water productivity of maize-wheat system on permanent beds in north-west India. *Agric. Water Manag.* 219, 19–26. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.040>
- Schrader, F., Durner, W., Fank, J., Gebler, S., Pütz, T., Hannes, M., Wollschläger, U., 2013. Estimating Precipitation and Actual Evapotranspiration from Precision Lysimeter Measurements. *Procedia Environ. Sci.* 19, 543–552. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.06.061>
- Seiler, K.-P., Gat, J.R., 2007. *Groundwater Recharge form Run-off, Infiltration and Percolation*. Springer.
- Shukla, S., Jaber, F.H., Goswami, D., Srivastava, S., 2013. Evapotranspiration losses for pepper under plastic mulch and shallow water table conditions. *Irrig. Sci.* 31, 523–536. <https://doi.org/10.1007/s00271-012-0327-3>

- Smerdon, E.T., Blair, W., Reddell, D.L., 1988. Infiltration from irrigation advance data 114, 4–17.
- Smith, R.E., Smettem, K.R.J., Broadbridge, P., Woolhiser, D.A., 2002. Infiltration Theory for Hydrologic Applications, Water Reso. ed. American Geophysical Union, Washington, DC.
- Staff, S. survey, 1951. Soil Survey Manual. U.S. Dept. Agric. Handb. 34, 145. <https://doi.org/10.2307/1233734>
- Strelkoff, T.S., Clemmens, A.J., Bautista, E., 2009. Field properties in surface irrigation management and design. J. Irrig. Drain. Eng. 135, 525–536. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000119](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000119)
- Tarjuelo Martín-Benito, J.M., 1991. El riego por aspersión: diseño y funcionamiento, 3rd ed. Universidad de Castilla La Mancha.
- Teófilo-Salvador, E., Morales-Reyes, G.P., 2018. Proposal of the physical model of the multifunctional redesigned double ring infiltrometer (ICCRM). Tecnol. y Ciencias del Agua 9, 103–131. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-06-05>
- USDA, U.S.D. of A., NRCS, N.R.C.S., ARS, A.R.S., Institute Soil Quality, 1999. Soil Qualit. Test Kit Guide.
- USGS, 1993. The distribution of water on, in, and above the Earth. [WWW Document]. United States Geol. Surv. URL <https://www.usgs.gov/media/images/distribution-water-and-above-earth-0> (accessed 12.10.20).
- Verma, S.P., 2016. Análisis Estadístico de Datos Composicionales. Universidad Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- Vico, G., Porporato, A., 2010. Traditional and microirrigation with stochastic soil moisture. Water Resour. Res. 46, 1–11. <https://doi.org/10.1029/2009WR008130>
- Vidal, J.L., 2011. Efectos del factor térmico en el desarrollo del crecimiento inicial de pimiento (*Capsicum annum L.*) cultivado en campo. Universidad Nacional de Tucumán, Tucumán, Argentina.
- Villalobos, F., Mateos, L., Orgaz, F., Fereres, E., 2002. Fitotecnia bases y tecnologías de la producción agrícola. Mundi-Pren, Madrid, España.
- Wackerly, D.D., Mendenhall, W., Schaeffer, R.L., 2010. Mathematical statistics with applications, 7th ed. Learning Cengage.
- Wang, K., Yang, X., Liu, X., Liu, C., 2017. A simple analytical infiltration model for short-duration rainfall. J. Hydrol. 555, 141–154. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.049>

- Wang, N., Chu, X., 2020. Revised Horton model for event and continuous simulations of infiltration. *J. Hydrol.* 589, 125215. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125215>
- Willmott, C.J., Ackleson, S.G., Davis, R.E., Feddema, J.J., Klink, K.M., Legates, D.R., O'Donnell, J., Rowe, C.M., 1985. Statistics for the evaluation and comparison of models. *J. Geophys. Res.* 90, 8995. <https://doi.org/10.1029/jc090ic05p08995>
- Yang, M., Zhang, Y., Pan, X., 2020. Improving the Horton infiltration equation by considering soil moisture variation. *J. Hydrol.* 586, 124864. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124864>
- Yuan, J., Feng, W., Jang, X., Wang, J., 2019. Saline-alkali migration in soda saline soil based on sub-soiling technology. *Desalin. Water Treat.* 149, 352–362. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23856>



## **7. Producción científica**

### **7.1. Artículos de difusión**

1. Soler-Méndez, M., Ávila-Dávila, L., González-Trinidad, J., Ruiz-Canales, A., Molina-Martínez, J.M. 2019. Control de precisión del balance hídrico en tiempo real en cultivos hortícolas. *Agrícola Vergel, Revista de Fruticultura, Horticultura, Vid, Arroz.* 418,104-106.
2. Ávila-Dávila, L., Soler-Méndez, M., Bautista-Capetillo, C.F., Ruiz-Canales, A., Molina-Martínez, J.M. 2019. Digitalización de cultivos hortícolas para riego eficiente en tiempo real. *Agrícola Vergel, Revista de Fruticultura, Horticultura, Vid, Arroz.* 1-4.

### **7.2. Publicaciones en congresos**

#### **V Jornadas Doctorales**

Celebrado en la Universidad de Murcia en Murcia, España del 29 al 31 de mayo del 2019.

1. Ávila-Dávila L., Soler-Méndez M., Bautista-Capetillo C.F., González-Trinidad J., y Molina-Martínez J.M. Modelos de infiltración empleados en la dinámica del agua en suelos agrícolas

#### **X Congreso Ibérico de Agroingeniería 2019**

Celebrado en la Escuela Politécnica Superior (Universidad Zaragoza), Huesca, España del 3 al 6 de septiembre del 2019.

1. Ávila-Dávila, L., Soler-Méndez, M., Madrona-Sánchez, P., Ruiz-Canales, A., Bautista-Capetillo, C.F., González-Trinidad, J., y Molina-Martínez, J.M. Análisis de

- la velocidad de infiltración del agua en suelos saturados mediante lisímetros de pesada. Proceedings of the 10th Iberian Agroengineering Congress. 2019, 642-648. DOI: 10.26754/c\_agroing.2019.com.3370
2. Ávila-Dávila, L., Soler-Méndez, M., Ruiz-Peñalver, L., Bautista-Capetillo, C.F., y Molina-Martínez, J.M. Empleo de sumadores electrónicos en lisímetros de pesada de varias de células de carga. Proceedings of the 10th Iberian Agroengineering Congress. 2019, 953-958. DOI: 10.26754/c\_agroing.2019.com.3392
  3. Soler-Méndez, M., Madrona-Sánchez, P., Ávila-Dávila, L., Ruiz-Canales, A., y Molina-Martínez, J.M. Análisis del consumo de agua de *Hordeum vulgare L.* mediante un equipo de lisimetría de pesada. Proceedings of the 10th Iberian Agroengineering Congress. 2019, 906-910. DOI: 10.26754/c\_agroing.2019.com.3377
  4. Soler-Méndez, M., Molina-Martínez, J.M., Ávila-Dávila, L., y Ruiz-Peñalver, L. Automatización de pequeños jardines con Sonoff 4CH Pro R2 y EWelink. Proceedings of the 10th Iberian Agroengineering Congress. 2019, 911-916. DOI: 10.26754/c\_agroing.2019.com.3376
  5. Nicolás-Cuevas, J.A., Parras-Burgos, D., Ávila-Dávila, L., Soler-Méndez, M., Ruiz-Peñalver, L., y Molina-Martínez, J.M. Implementación de depósitos de muestreo en lisímetros de pesada y sus necesidades. Proceedings of the 10th Iberian Agroengineering Congress. 2019, 795-799. DOI: 10.26754/c\_agroing.2019.com.3449
  6. Nicolás-Cuevas, J.A., Parras-Burgos, D., Ávila-Dávila, L., Soler-Méndez, M., González-Trinidad, J., y Molina-Martínez, J.M. Evolución de prototipos de depósitos de drenaje para lisímetros de pesada. Proceedings of the 10th Iberian Agroengineering Congress. 2019, 773-777. DOI: 10.26754/c\_agroing.2019.com.3450

## II Symposium Ibérico de Ingeniería Hortícola 2020

Celebrado en la Escuela Superior Agraria del Instituto Politécnico de Viana Do Castelo del 4 al 6 marzo, en Refóios do Lima, Ponte de Lima (Portugal). Organizado por la Asociación Portuguesa de Horticultura (APH) junto con la sección de Ingeniería Hortícola de la Sociedad Española de Ciencias Hortícolas (SECH).

1. Ávila-Dávila L., Soler-Méndez M., Parras-Burgos D., Bautista-Capetillo C.F., Ruiz-Canales A. y Molina-Martínez J.M. Estimación de la velocidad de infiltración del agua en suelos no saturados empleando lisimetría de pesada. Actas Portuguesas de Horticultura. 2020, 34, 79-85. ISBN: 978-972-8936-36-5.
2. Ávila-Dávila L., Soler-Méndez M., Parras-Burgos D., González-Trinidad J., and Ruiz-Canales A. y Molina-Martínez J.M. Gestión del riego por medio de la velocidad

- de infiltración del agua en el suelo. *Actas Portuguesas de Horticultura*. 2020, 34, 86-90. ISBN: 978-972-8936-36-5.
3. Escarabajal Henarejos, D., Molina Martínez, J.M., Ávila Dávila, L., y Parras Burgos, D. Influencia de la temperatura en el boro obtenido en aguas desaladas. *Actas Portuguesas de Horticultura*. 2020, 34, 166-169. ISBN: 978-972-8936-36-5
  4. Escarabajal Henarejos, D., Molina Martínez, J.M., Guzmán Raja, I., Ávila Dávila, L., y Parras Burgos, D. Estudio energético del control de la concentración de boro en aguas desaladas mediante regulación de la temperatura. *Actas Portuguesas de Horticultura*. 2020, 34, 170-173. ISBN: 978-972-8936-36-5.
  5. Ruíz-Peñalver L., Ávila-Dávila L., Soler-Méndez M., Ruiz-Lozano L., y Molina-Martínez J.M. Deriva en la medida del peso por la temperatura en las células de carga y su posible compensación por software. *Actas Portuguesas de Horticultura*. 2020, 34, 357-364. ISBN: 978-972-8936-36-5.
  6. Ruíz-Peñalver L., Soler-Méndez M., Ruiz-Lozano L., Ávila-Dávila L. y Molina-Martínez J.M. Metodología de filtrado de datos en equipos de lisimetría de pesada. *Actas Portuguesas de Horticultura*. 2020, 34, 140-148. ISBN: 978-972-8936-36-5.
  7. Parras Burgos, D., Soler Méndez, M., Ávila Dávila, L., y Molina Martínez, J.M. Diseño estructural de un equipo de ferticontrol basado en lisimetría de pesada. *Actas Portuguesas de Horticultura*. 2020, 34, 128-133. ISBN: 978-972-8936-36-5.
  8. Parras Burgos, D., Polhmann Barbosa, T., Molina Martínez, J.M., Soler Méndez, M., Ávila Dávila, L., y Fernández-Pacheco, D.G. Uso de la realidad aumentada como complemento formativo en estudios de agronomía. *Actas Portuguesas de Horticultura*. 2020, 34, 186-189. ISBN: 978-972-8936-36-5.
  9. Soler-Méndez, M., Ávila-Dávila, L., Parras-Burgos, D., Ruiz-Lozano, L., Ruiz-Canales, A., Molina-Martínez, J.M. Estandarización de las dimensiones de un lisímetro de pesada de bajo coste para los principales cultivos hortícolas del sureste español. *Actas Portuguesas de Horticultura*. 2020, 34, 18-25. ISBN: 978-972-8936-36-5.
  10. Soler-Méndez, M., Ávila-Dávila, L., Parras-Burgos, D., Ruiz-Lozano, L., Ruiz-Canales, A., Molina-Martínez, J.M. Propuesta de plataforma de gestión global del riego y los nutrientes. *Actas Portuguesas de Horticultura*. 2020, 34, 149-156. ISBN: 978-972-8936-36-5

## **II Congreso de Jóvenes Investigadores en Ciencias Agroalimentarias**

Celebrado el 17 de octubre de 2019 en la Universidad de Almería, en Almería, España.

1. Ávila-Dávila L., Soler-Méndez M., Bautista-Capetillo C.F., González-Trinidad J., y Molina-Martínez J.M. Estudio y evaluación de modelos de gestión de los recursos hídricos en agricultura mediante lisimetría. Libro de Actas del II Congreso de Jóvenes Investigadores en Ciencias Agroalimentarias. 2019, p. 242. ISBN: 978-84-09-17547-5.
2. Soler-Méndez M., Molina-Martínez J.M., Ávila-Dávila L., Ruiz-Peñalver L. Sistema de inteligencia artificial para la gestión de la fertirrigación mediante redes de lisimetría de pesada y sensores agronómicos. Libro de Actas del II Congreso de Jóvenes Investigadores en Ciencias Agroalimentarias. 2019, p.274. ISBN 978-84-09-17547-5.

## **I Congreso Universitario en Innovación y Sostenibilidad Agroalimentaria (CUISA 2020)**

Celebrado el 24 al 25 de septiembre de 2020 en la Escuela Politécnica Superior de Orihuela de la Universidad Miguel Hernández en Orihuela, España.

1. Ávila-Dávila L., Soler-Méndez M., Escarabajal-Henarejos D. y Molina-Martínez J.M. Estimación de la lluvia efectiva mediante utilización de lisimetría de pesada. Actas del I Congreso Universitario en Innovación y Sostenibilidad agroalimentaria. 2020, 310-315. ISBN: 978-84-16024-90-2.

### **7.3. Artículos en revistas indexadas como coautora**

1. González-Trinidad, J.; Júnez-Ferreira, H.E.; Bautista-Capetillo, C.; Ávila Dávila, L.; Robles Roveló, C.O. Improving the Water-Use Efficiency and the Agricultural Productivity: An Application Case in a Modernized Semiarid Region in North-Central Mexico. *Sustainability* 2020, 12, 8122. <http://doi:10.3390/su12198122>
2. Escarabajal-Henarejos, D.; Parras-Burgos, D.; Ávila-Dávila, L.; Cánovas-Rodríguez, F.J.; Molina-Martínez, J.M. Study of the Influence of Temperature on Boron Concentration Estimation in Desalinated Seawater for Agricultural Irrigation. *Water* 2021, 13, 322. <https://doi.org/10.3390/w13030322>

## 7.4 Artículos en revistas indexadas como primera autora

1. Ávila-Dávila, L.; Molina-Martínez, J.M.; Bautista-Capetillo, C.; Soler-Méndez, M.; Robles Rovelo, C.O.; Jénez-Ferreira, H.E.; González-Trinidad, J. Estimation of the Evapotranspiration and Crop Coefficients of Bell Pepper Using a Removable Weighing Lysimeter: A Case Study in the Southeast of Spain. *Sustainability* 2021, 13, 747. <https://doi.org/10.3390/su13020747>



Article

### Estimation of the Evapotranspiration and Crop Coefficients of Bell Pepper Using a Removable Weighing Lysimeter: A Case Study in the Southeast of Spain

Laura Ávila-Dávila <sup>1,2,\*</sup>, José Miguel Molina-Martínez <sup>2</sup>, Carlos Bautista-Capetillo <sup>1,\*</sup>, Manuel Soler-Méndez <sup>2</sup>, Cruz Octavio Robles Rovelo <sup>1</sup>, Hugo Enrique Jénez-Ferreira <sup>1</sup> and Julián González-Trinidad <sup>1</sup>

- <sup>1</sup> Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas 98160, Mexico; corr03@hotmail.com (C.O.R.R.); hejenez@uaz.edu.mx (H.E.J.-F.); jgonza@uaz.edu.mx (J.C.-T.)  
<sup>2</sup> Research Group Ingeniería Agromófica y del Mar, Universidad Politécnica de Cartagena, 30203 Cartagena, Spain; josem.molina@upct.es (J.M.M.-M.); manuel.ia@agrosolmen.es (M.S.-M.)  
 \* Correspondence: laura\_14avila@uaz.edu.mx (L.Á.-D.); baucap@uaz.edu.mx (C.B.-C.); Tel.: +52-492-106-4540 (C.B.-C.)



**Citation:** Ávila-Dávila, L.; Molina-Martínez, J.M.; Bautista-Capetillo, C.; Soler-Méndez, M.; Robles Rovelo, C.O.; Jénez-Ferreira, H.E.; González-Trinidad, J. Estimation of the Evapotranspiration and Crop Coefficients of Bell Pepper Using a Removable Weighing Lysimeter: A Case Study in the Southeast of Spain. *Sustainability* 2021, 13, 747. <https://doi.org/10.3390/su13020747>

Received: 3 December 2020  
 Accepted: 10 January 2021  
 Published: 14 January 2021

**Publisher's Note:** MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



**Copyright:** © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

**Abstract:** Water use efficiency is essential in semiarid regions of Spain, and it can be achieved through a precise knowledge of the real crop water requirements (CWR). The Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) offers standardized crop coefficients to establish the CWR. However, these coefficients can change due to different conditions, such as climatic variations and cultivation practices. In this work, the evapotranspiration ( $ET_{C_{lyr}}$ ) and crop coefficients ( $K_{C_{lyr}}$ ) of bell pepper were obtained with a compact removable weighing lysimeter between February and August for two crop seasons (2019 and 2020).  $ET_{C_{lyr}}$  was determined from the water balance, and the  $K_{C_{lyr}}$  values were determined as the ratio of the crop evapotranspiration, measured on the removable weighing lysimeter, and the reference evapotranspiration. The  $K_{C_{lyr}}$  average values for the bell pepper in the initial, middle, and final stages were 0.57, 1.06, and 0.80, respectively.  $K_C$  regression models were obtained as a function of the fraction thermal units, achieving a maximum correlation of 0.67 ( $R^2$ ). In general, the  $K_C$  values obtained in this research work were lower in the initial and in the final stages and larger in the middle stage in comparison with the FAO-56 values and other research works values in semiarid conditions. The bell pepper yield increased by 7.72% in 2019 and by 3.49% in 2020 compared to the yield reported by the Ministry of the Environment and Rural and Marine Areas of the Spanish Government in 2019 and with a minimum water loss through drainage. The results in this work can help farmers to determine the crop water requirements and to improve the system efficiency in semiarid locations with similar conditions to those in the study.

**Keywords:** mini-lysimeter; thermal units; horticultural crop evapotranspiration; semiarid conditions

#### 1. Introduction

The irrigation areas in southeast Spain are characterized by limited water resources due to a semiarid climate. The Mediterranean basin has very hot summers that increase the crop water demand via an increase in the crop evapotranspiration rate [1–3]. Insufficient water for crop management causes poor water distribution and a reduction in agricultural yield, which is associated with less growth and crop development [4,5]; therefore, strategies must be adopted in order to optimize water resources and to obtain profitable crops [1].

In the Mediterranean area, Andalusia, Murcia, and Valencia are the three main regions of horticultural production, mostly involving spring–summer crops. The bell pepper production in this area mainly occurs in the Murcia region, where greenhouses reach up to 82% of the total cultivated hectares while open-field cultivation represents only 18%. The average greenhouse yield is 30% higher than the yield of open fields [6]. According to

2. Ávila-Dávila, L.; Soler-Méndez, M.; Bautista-Capetillo, C.F.; González-Trinidad, J.; Jénez-Ferreira, H.E.; Robles Rovelo, C.O.; Molina-Martínez, J.M. A Compact Weighing Lysimeter to Estimate the Water Infiltration Rate in Agricultural Soils. *Agronomy* 2021, 11, 180. <https://doi.org/10.3390/agronomy11010180>



Article

## A Compact Weighing Lysimeter to Estimate the Water Infiltration Rate in Agricultural Soils

Laura Ávila-Dávila <sup>1,2</sup>, Manuel Soler-Méndez <sup>2</sup>, Carlos Francisco Bautista-Capetillo <sup>1</sup>, Julián González-Trinidad <sup>1,\*</sup>, Hugo Enrique Jénez-Ferreira <sup>1</sup>, Cruz Octavio Robles Rovelo <sup>1</sup> and José Miguel Molina-Martínez <sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> Research Group Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, Autonomous University of Zacatecas, Campus UAZ Siglo XXI, Zacatecas 98160, Mexico; laura\_14avila@uaz.edu.mx (L.Á.-D.); baucap@uaz.edu.mx (C.F.B.-C.); hejunez@uaz.edu.mx (H.E.J.-F.); corr03@hotmail.com (C.O.R.R.)

<sup>2</sup> Research Group Ingeniería Agromóctica y del Mar, Technical University of Cartagena, Campus Alfonso XIII, ETISA, 30203 Cartagena, Spain; manuel.ia@agrosolmen.es

\* Correspondence: jgonza@uaz.edu.mx (J.G.-T.); josem.molina@upct.es (J.M.M.-M.); Tel.: +34-968-32-5929 (J.M.M.-M.)

**Abstract:** Infiltration estimation is made by tests such as concentric cylinders, which are prone to errors, such as the lateral movement under the ring. Several possibilities have been developed over the last decades to compensate these errors, which are based on physical, electronic, and mathematical principles. In this research, two approaches are proposed to measure the water infiltration rate in a silty loam soil by means of the mass values of a lysimeter weighing under rainfall conditions and different moisture contents. Based on the fact that with the lysimeter it is possible to determine acting soil flows very precisely, then with the help of mass conservation and assuming a downward vertical movement, 12 rain events were analyzed. In addition, it was possible to monitor the behavior of soil moisture and to establish the content at field capacity from the values of the weighing lysimeter, from which both approach are based. The infiltration rate of these events showed a variable rate at the beginning of the rainfall until reaching a maximum, to descend to a stable or basic rate. This basic infiltration rate was  $1.49 \pm 0.36$  mm/h, and this is because soils with fine textures have reported low infiltration capacity. Four empirical or semi-empirical models of infiltration were calibrated with the values obtained with our approaches, showing a better fit with the Horton's model.

**Keywords:** soil moisture; water balance; vertical movement; drainage; rainfall; water mass



**Citation:** Ávila-Dávila, L.; Soler-Méndez, M.; Bautista-Capetillo, C.F.; González-Trinidad, J.; Jénez-Ferreira, H.E.; Robles Rovelo, C.O.; Molina-Martínez, J.M. A Compact Weighing Lysimeter to Estimate the Water Infiltration Rate in Agricultural Soils. *Agronomy* 2021, 11, 180. <https://doi.org/10.3390/agronomy11010180>

Received: 27 November 2020

Accepted: 14 January 2021

Published: 18 January 2021

**Publisher's Note:** MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



**Copyright:** © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

### 1. Introduction

To understand the behavior of the hydrological cycle in the soil remains a challenge for science, specifically the movement of water through the soil and its capacity to retain it. To estimate the water exchange between a well-defined portion of soil and other physical systems to which water is transferred through evaporation, transpiration, percolation or drainage, several methods as gravimetric, tensiometry, humidity sensing, and lysimetry have been proposed in the specialized literature [1–3].

Infiltration is the hydrological process that describes the entry of water into a soil, and the amount of water that enters the soil in a given time represents the infiltration rate [4,5]. It is variable in space and time, due to hydrodynamic and physical soil properties, flow conditions, and cultivation practices, among others [6–9]. As water enters the soil profile through the forces of adhesion, the interaction of water and soil particles, and gravity, it fills the pores of the soil, defining a wet front as it passes through the soil profile. If the soil has a good structure and large pores, its infiltration rate will be high (as in the case of coarse-textured soils) and it will reach a deeper wet front compared to a fine-textured soil whose pores are smaller. It is assumed that if the soil is at its lower limit of initial