



TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE QUIMICA  
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de Licenciatura  
en Ingeniería Ambiental

**“Aproximación multimetodológica para el cálculo de la huella  
hídrica en cultivos de cebolla, Tierra Blanca, Cartago”**

Melany Díaz Espinoza

Cartago, setiembre, 2022



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

**“Aproximación multimetodológica para el cálculo de la huella hídrica en cultivos de  
cebolla, Tierra Blanca, Cartago”**

Informe presentado a la Escuela de Química del Instituto Tecnológico de Costa Rica como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Ambiental con el grado de licenciatura.

**Miembros del tribunal**

---

**Dr. Federico Masís Meléndez**  
**Supervisor**

---

**Dra. Karolina Villagra Mendoza**  
**Lector 1**

---

**M.Sc. Fernando Watson Hernández**  
**Lector 2**

---

**Dra. Mary Luz Barrios Hernández**  
**Coordinadora COTRAFIG**

---

**MGLA. Ricardo Coy Herrera**  
**Director Escuela de Química**

---

**M.Sc. Diana A. Zambrano Piamba**  
**Coordinadora de Ingeniería Ambiental**



## **Agradecimientos**

A mi familia, Bertilda, Gilberto, Lorraine y Anthony; que han creído en mí más que yo misma, que siempre han respaldado y apoyado mis decisiones a lo largo de este camino.

A mi tutor, Federico Masís, por toda su entrega y dedicación a mi proceso de aprendizaje, así como por su ejemplo profesional de siempre ir más allá.

A los profesores Karolina Villagra y Fernando Watson, por aportar a este trabajo con su increíble experiencia y compartir conmigo de su conocimiento.

A la universidad pública, por permitirme el acceso a educación de calidad y a una formación integral.

Y por supuesto, a las personas que se convirtieron en mi familia durante estos años, y de los que aprendí tanto en esta etapa de mi vida, gracias, Josefina, Luis, Nicolas y Rodrigo.

# Tabla de contenido

<b>Resumen</b> .....	<b>13</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>14</b>
<b>1. Introducción</b> .....	<b>15</b>
<b>2. Objetivos</b> .....	<b>17</b>
2.1 Objetivo General: .....	17
2.2 Objetivos Específicos: .....	17
<b>3. Marco teórico</b> .....	<b>18</b>
3.1 Importancia de la gestión del recurso hídrico.....	18
3.2 Estudio de caso cultivo de cebolla en Tierra Blanca de Cartago.....	20
3.3 Huella Hídrica.....	22
3.4 Modelo CropWat .....	26
3.5 Balance hídrico en suelos .....	28
3.6 Sensores de humedad.....	32
<b>4. Materiales y métodos</b> .....	<b>34</b>
4.1 Caracterización del sitio, suelo y variables climatológicas .....	34
4.1.1 Sitio de estudio .....	34
4.1.2 Caracterización del suelo .....	35
4.2 Cuantificación de huellas hídricas .....	37
4.2.1 Cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET <sub>0</sub> ).....	37
4.2.2 Aproximación de lámina de riego .....	37
4.2.3 Cálculo de la evapotranspiración real por el método CropWat .....	38
4.2.4 Cálculo de la evapotranspiración real por el método Saldo hídrico.....	40
4.2.5 Huella verde y huella azul.....	41
4.2.6 Calibración de sensores CS650 y determinación de agua superflua.....	41
4.2.7 Calculo huella gris.....	42

<b>5. Resultados y discusión .....</b>	<b>44</b>
5.1 Caracterización del sitio, suelo y variables climatológicas .....	44
5.1.1 Información climatológica y evapotranspiración real .....	44
5.1.2 Caracterización del suelo .....	46
5.2 Cuantificación de las huellas hídricas .....	50
5.2.1 Estimación ETa por componente azul y verde.....	50
5.2.2 Calculo huella verde y huella azul .....	51
5.2.3 Calculo de la huella gris .....	52
<b>6. Conclusiones .....</b>	<b>56</b>
<b>7. Recomendaciones .....</b>	<b>57</b>
<b>8. Referencias.....</b>	<b>58</b>
<b>9. Anexos .....</b>	<b>63</b>

## Lista de figuras

Figura 1. Balance de agua en el suelo de la zona radicular. ....	29
Figura 2. Esquema de una curva de retención de agua en suelo.....	30
Figura 3. Sitio de estudio. ....	34
Figura 4. Estación meteorológica. ....	35
Figura 5. Anillos con muestras de suelo en el equipo caja de arena.....	36
Figura 6. Sensor SoilVUE™10 marca Campbell Scientific. ....	38
Figura 7. Interfaz de CropWat 8.0 .....	39
Figura 8. Determinación punto de saturación para el modelo de calibración de los sensores de humedad.....	42
Figura 9. Datos meteorológicos cultivo E515.....	44
Figura 10. Datos meteorológicos cultivo Alvara. ....	45
Figura 11. Curva de infiltración.....	50
Figura 12. a) y b) Curva característica de retención de agua.....	48
Figura 13. Resultados huella hídrica verde y azul para cultivo E515 y Alvara, por ambos métodos.....	52
Figura 14. Curva de calibración sensores de humedad.....	53

## Lista de cuadros

Cuadro 1. Toma de muestras. ....	35
Cuadro 2. Variables de entrada del cultivo para el cálculo de evapotranspiración real, por el método CropWat. ....	39
Cuadro 3. Variables de entrada del suelo para el cálculo de evapotranspiración real, por el método CropWat. ....	40
Cuadro 4. Parámetros obtenidos para la curva de infiltración. ....	49
Cuadro 5. Parámetros obtenidos para el modelo de la curva de retención de Campbell .....	46
Cuadro 6. Resultados evapotranspiración real métodos CropWat y Saldos. ....	51
Cuadro 7. Parámetros obtenidos para la modelación de la curva de calibración de los sensores de humedad. ....	53
Cuadro 8. Datos obtenidos a partir de los sensores para el cálculo de huella gris en ambos cultivos. ....	54

## Lista de siglas y acrónimos

<b>ADT</b>	Agua disponible total
<b>AFA</b>	Agua fácilmente aprovechable
<b>DA</b>	Dirección de Agua del MINAE
<b>CC</b>	Capacidad de campo
<b>ENSO</b>	Fenómeno del Niño/Oscilación del Sur
<b>ET</b>	Evapotranspiración
<b>ETverde</b>	Evapotranspiración real asociada al componente verde la huella hídrica
<b>ETazul</b>	Evapotranspiración real asociada al componente azul la huella hídrica
<b>FAO</b>	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
<b>ha</b>	Hectárea
<b>HH</b>	Huella hídrica
<b>HH<sub>azul</sub></b>	Huella hídrica azul
<b>HH<sub>verde</sub></b>	Huella hídrica verde
<b>HH<sub>gris</sub></b>	Huella hídrica gris
<b>IICA</b>	Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura
<b>IMN</b>	Instituto Meteorológico Nacional
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization
<b>MAG</b>	Ministerio de Agricultura y Ganadería
<b>MINAE</b>	Ministerio de Ambiente y Energía
<b>NO<sub>3</sub></b>	Nitrato (mg/L)
<b>m.s.n.m</b>	Metros sobre el nivel del mar
<b>ODS</b>	Objetivos de Desarrollo Sostenible
<b>ONU</b>	Organización de las Naciones Unidas
<b>pF</b>	Logaritmo de la presión negativa ( $\log   - \text{cm H}_2\text{O}  $ )
<b>PMP</b>	Punto de marchitez permanente
<b>PIB</b>	Producto interno bruto
<b>RAC</b>	Requerimiento de agua del cultivo

## Lista de parámetros

<b>a</b>	Parámetro empírico de ajuste, vinculado a la humedad inicial del suelo [-]
<b>Ac</b>	Fracción de agotamiento crítico [-]
<b>b</b>	Parámetro de ajuste relacionado a la distribución de tamaño de poro [-]
<b>Da</b>	Densidad Aparente ( $\text{g/cm}^3$ )
<b>Dp</b>	Drenaje profundo (mm)
<b>E</b>	Escorrentía (mm)
<b>Ea</b>	Presión real de vapor (kPa)
<b>Es</b>	Presión de valor de saturación (kPa)
<b>ETa</b>	Evapotranspiración real (mm)
<b>ETc</b>	Evapotranspiración de cultivo (mm)
<b>ET0</b>	Evapotranspiración de referencia (mm)
<b>G</b>	Flujo de calor de suelo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ )
<b>I</b>	Agua de riego (mm)
<b>Ib</b>	Infiltración básica (mm/min)
<b>In</b>	Agua interceptada por las hojas de plantas (mm)
<b>Ka</b>	Permitividad dieléctrica relativa [-]
<b>Kc</b>	Coefficiente de cultivo [-]
<b>Ks</b>	Coefficiente de estrés hídrico del cultivo [-]
<b>Ky</b>	Factor de respuesta rendimiento [-]
<b>L</b>	Carga de contaminante (cm/sem)
<b>n</b>	Parámetro de ajuste empírico del modelo de calibración [-]
<b>P</b>	Precipitación (mm)
<b>Pt</b>	Porosidad total [-]
<b>Rn</b>	Radiación neta en la superficie del cultivo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ )
<b>t</b>	Tiempo (min)
<b>T2</b>	temperatura media del aire a 2 m de altura ( $^{\circ}\text{C}$ )
<b>U</b>	Agua ascendente por capilaridad (mm)
<b>U2</b>	velocidad del viento a 2 m de altura ( $\text{m s}^{-1}$ )
<b><math>\alpha</math></b>	Parámetro de ajuste empírico del modelo de calibración [-]
<b><math>\beta</math></b>	Parámetro de ajuste empírico del modelo de calibración [-]
<b><math>\mu</math></b>	Parámetro empírico de ajuste, relacionado a la estructura del suelo [-]
<b><math>\theta</math></b>	Contenido de agua volumétrica ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )

$\Theta_{CC}$	Contenido de agua volumétrico a capacidad de campo ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )
$\Theta_{PMP}$	Contenido de agua volumétrico en punto de marchitez ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )
$\Theta_r$	Contenido de agua volumétrico residual ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )
$\Theta_s$	Contenido de agua volumétrico saturado ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )
$\Psi$	Potencial mátrico (kPa) (bar)
$\Psi_b$	Presión de entrada de aire
$\Delta$	pendiente de la curva de presión de vapor ( $\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$ )
$\Delta S$	Cambio en la humedad del suelo [-]
$\gamma$	Constante psicrométrica ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ )

# **Aproximación multimetodológica para el cálculo de la huella hídrica en cultivos de cebolla, Tierra Blanca, Cartago**

## **Resumen**

La gestión del recurso hídrico bajo un escenario de adaptación al cambio climático toma cada vez mayor importancia. Mientras tanto, la agricultura hace uso del 70% del consumo mundial de los recursos hídricos, lo que pone a esta industria bajo el reto de alimentar a una población creciente en un contexto de incertidumbre. Esta situación se agrava en lugares en que ya se experimenta la escasez del recurso, como Tierra Blanca de Cartago, una de las tres principales zonas de producción cebollera del país. Este estudio propone la cuantificación de la huella hídrica como herramienta para una mejor gestión, realizando la aproximación del componente azul y verde por dos métodos y la incorporación de sensores de humedad en el cálculo del componente gris, en dos cultivos de cebolla en Tierra Blanca. Las cebollas estudiadas se cultivaron en distintas épocas del año, y corresponden a la variedad Alvara y al híbrido E515. Los resultados obtenidos señalan que la cantidad de agua necesaria para producir una tonelada de cebolla E515, fue de 378,25 m<sup>3</sup> calculado con la herramienta CropWat y de 390 m<sup>3</sup> por el método de balance de Saldo hídrico, mientras que para la cebolla Alvara fue de 184 m<sup>3</sup> y 203,1 m<sup>3</sup> respectivamente. La mayor diferencia entre ambas cebollas estudiadas fue la duración del cultivo, la estación que predominó durante su desarrollo y el riego aplicado. También, se evidenciaron los cambios en las propiedades físicas del suelo a lo largo de los días de desarrollo, pasando de una infiltración base de 1,8 mm/min a 0,82 mm/min. Por último, se señala la importancia ambiental de la cuantificación del componente gris, al representar valores del 70% y 49% del total de la huella hídrica de los dos cultivos estudiados, que significa una potencial fuente de contaminación al no gestionar correctamente las entradas de agua en relación con la infiltración base del suelo.

**Palabras clave:** huella hídrica, cultivo de cebolla, Tierra Blanca, gestión del recurso hídrico.

## **Abstract**

The management of water resources under a scenario of adaptation to climate change is becoming increasingly important. Meanwhile, agriculture makes use of about 70% of the world's consumption of water resources, which puts this industry under the challenge of feeding a growing population in a context of uncertainty. This situation is aggravated in places where the resource is already scarce, as is the case of Tierra Blanca de Cartago, one of the three main onion production areas in the country. This study proposes the quantification of the water footprint as a tool for better management, through the approach by two methods and the incorporation of humidity sensors, in two onion crops in Tierra Blanca. The results obtained indicate that the water footprint, or the amount of water necessary to produce a ton of E515 onion, was 378,25 m<sup>3</sup> with the CropWat tool and 390,0 m<sup>3</sup> by the balance method, while for the Alvara onion was 184 m<sup>3</sup> and 203,1 m<sup>3</sup> respectively. The greatest difference between both onions studied was the duration of the crop, the season that prevailed during most of its development and the irrigation applied. Also, changes in the physical properties of the soil were evidenced throughout the days of development, going from a base infiltration of 1,8 mm/min to 0,82 mm/min. Finally, the environmental importance of the quantification of the gray component is pointed out, as it represents the 70% and 49% of the total water footprint of the crops studied, which represents a potential source of contamination if the water inflows are not correctly managed in relation to the base infiltration of the soil.

**Keywords:** water footprint, onion crops, Tierra Blanca, water management.

## 1. Introducción

La relación de la agricultura con el agua históricamente ha representado beneficios claros para la humanidad, como lo son el incremento de la producción agrícola y el mejoramiento económico-social de la población rural. Sin embargo, con los avances de las últimas décadas ha sido necesario cuestionarse sobre el desarrollo de la agricultura intensiva y los impactos negativos que acarrea. Hoy, la agricultura es el mayor usuario de todos los recursos hídricos tomados en su conjunto, se estima que este sector absorbe alrededor del 70% del consumo mundial (FAO, 2003). Además, se calcula que la mitad de esa agua no se aprovecha eficientemente en los cultivos debido a procesos de evaporación e infiltración.

Si observamos este problema con enfoque de cambio climático, el sector agrícola enfrenta retos a corto plazo, tal como lo es la reducción del agua disponible en un contexto de creciente demanda mundial de alimentos. Es un hecho como, en la actualidad, el calentamiento global afecta el ciclo hidrológico y así los patrones de precipitación y su disponibilidad. En 2021, las sequías afectaron a muchas partes del mundo y específicamente en América del Sur, la sequía causó grandes pérdidas agrícolas y perturbó la producción de energía y el transporte fluvial (Elpaís.cr, 2021). De igual manera, Centroamérica, y en particular Costa Rica, en los últimos años han sido testigos y han padecido de la intensificación de los fenómenos climatológicos extremos sobre el territorio. Como muestra, enero de 2019 tuvo un déficit de lluvias entre 60% y 75% en el Caribe y la Zona Norte, convirtiéndolo en el segundo enero más seco en 71 años, solo superado por el 2002 (IMN, 2019).

Un estudio publicado por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2010) sobre los efectos del cambio climático en la agricultura costarricense revela que los niveles de precipitación observados en los últimos años son inferiores a los que permiten lograr la mayor producción, por lo que el cambio climático ya puede estar teniendo efectos adversos sobre toda la producción agropecuaria. En ese estudio también se contabilizaron los impactos económicos del cambio climático sobre la producción agropecuaria considerando hasta el año 2100, con relación al PIB de 2007. Los resultados sugieren que, de no tomarse medidas, hacia 2050 las pérdidas serían entre el 1% y 2% del PIB e incrementarían de forma importante, llegando a representar del 4% al 12% para el 2100.

Así, se hace evidente que la creciente escasez de agua no es solo un desafío para la seguridad alimentaria y la producción agropecuaria, sino que además nos aleja como sociedad del

cumplimiento de los objetivos de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (FAO, 2019). Según un análisis de la Organización Meteorológica Mundial (2021), durante el período de 50 años entre 1970 y 2019, los riesgos meteorológicos, climáticos e hídricos representaron el 50% de todas las catástrofes, el 45% de todas las muertes registradas y el 74% de todas las pérdidas económicas registradas a nivel mundial.

La huella hídrica es una de las principales metodologías para analizar y cuantificar el uso del agua por alguna actividad determinada, que puede definirse como un indicador de uso y contaminación del agua, permitiendo comprender de manera más integral la presión o impacto ejercido sobre el recurso hídrico y su relación con la producción de bienes (IICA, 2016). En consecuencia, cada vez es más utilizada a lo largo del mundo para facilitar la mejora de políticas en la gestión del agua y la planificación hidrológica. Por ende, tiene un impacto en la sostenibilidad y resiliencia de las sociedades humanas, actuando como herramienta que aporta información para una mejor adaptación al cambio climático.

Esta investigación busca establecer una línea base de la huella hídrica actual que demandan cultivos agrícolas de la zona de Tierra Blanca, aplicando dos métodos de cálculo en dos variedades de cebolla con el fin de hacer un uso más racional y sostenible del agua. Se busca ayudar a potenciar la producción agrícola sostenible para reducir el consumo de recursos, el impacto ambiental y los costos de producción, desde el eje hídrico.

## **2. Objetivos**

### 2.1 Objetivo General:

- Analizar la huella hídrica en dos cultivos de cebolla en Tierra Blanca, como línea base para la mejora de la gestión del recurso en la zona.

### 2.2 Objetivos Específicos:

- Caracterizar las propiedades físicas del suelo y las variables meteorológicas con potencial influencia en la huella hídrica de dos cultivos.
- Estudiar el concepto de huellas hídricas en dos cultivos, utilizando al menos dos herramientas de cálculo para la evapotranspiración real e incorporando el uso de sensores de humedad para la estimación de la carga de contaminante.
- Evaluar y comparar entre sí los resultados obtenidos a partir de las distintas herramientas.

### **3. Marco teórico**

#### **3.1 Importancia de la gestión del recurso hídrico**

En un contexto de creciente escasez de agua y de disminución de su calidad alrededor del mundo, predicciones presentadas por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en 2015 estiman que durante los próximos años la cantidad necesaria de agua para la producción de alimentos en el mundo se elevará hasta en un 55%, esto provocado principalmente por el aumento en la población y los cambios en cuanto a patrones de consumo. Es así como la crisis por desabastecimiento de agua ha sido considerada por diferentes sectores como uno de los principales riesgos para el mundo, causando grandes impactos en términos ambientales y económicos, pero también sociales y humanitarios. De hecho, uno de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) planteados por la ONU en 2015, que representan los desafíos que tiene el mundo para ponerle un alto a la pobreza, proteger el planeta y garantizar la prosperidad para 2030; es el recurso hídrico. Así, el ODS número 6 pretende lograr un acceso universal y equitativo al agua potable y a servicios de saneamiento adecuados, así como mejorar la calidad del agua a nivel global. Se propone como meta a 2030, aumentar considerablemente el uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores y asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce para hacer frente a la escasez de agua y reducir considerablemente el número de personas que sufren falta de este líquido.

Lo anterior representa sin duda un gran reto para la sociedad actual. Previamente se han realizado estudios que señalan que, además del acelerado aumento en la presión sobre las fuentes de agua dulce las últimas décadas, los fenómenos climáticos son cada vez más frecuentes y de mayor intensidad, lo que ha generado periodos de sequía más extremos y prolongados en distintas regiones del planeta (Organización de las Naciones Unidas, 2015).

Los eventos climatológicos de El Niño/Oscilación del Sur (ENSO) y La Niña, por ejemplo, han ocasionado una mayor variación interanual en el clima de los trópicos. Según Fournier y Di Stefano (2004), El Niño representa un período de menores lluvias, atraso en el inicio de las mismas, mayores temperaturas, reducción de la nubosidad, veranillos más prolongados entre julio y agosto y una mayor insolación. Lo anterior puede favorecer la ocurrencia de incendios forestales y pérdidas en la producción de granos, así como provocar desfases en la ejecución de prácticas de manejo agrícola.

En el caso específico de Costa Rica, el país se encuentra localizado entre los trópicos de Cáncer y Capricornio, una región sumamente vulnerable a los efectos del fenómeno del ENSO. Como muestra, según el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) (2019), el comportamiento de las lluvias en noviembre 2018 mostró un déficit de un 75% en Cartago, 47% en el Pacífico Norte, 48% en el Pacífico Central y 10% en el Pacífico Sur. La situación se mantuvo incluso hasta 2019 cuando Cartago reportó un déficit de 60%; las regiones del Pacífico Central y Norte de 75%, la Región Pacífico Sur y la Zona Norte de 20%. Este déficit hídrico del país provocó que para julio de 2019 el Gobierno de la República declarara estado de emergencia, consecuencia del comportamiento anormal de las precipitaciones como efecto ENOS. Se estima que en ese año la situación afectó el consumo humano, las actividades productivas agrícolas y el medio ambiente, según el Gobierno de la República.

Conjuntamente con los problemas de escasez, desabastecimiento y contaminación del agua, se conoce que la vulnerabilidad de los recursos hídricos en Costa Rica es alta debido a que por décadas han respondido a los diferentes modelos de desarrollo (Morales, 2013) y su alteración. Esto, por ejemplo, por la alta tasa de deforestación de los años 1950-1980, los cambios de uso del suelo, los procesos erosivos, la compactación del terreno debido a la ganadería, escorrentía y la sobreexplotación.

Se suma a la problemática, un exceso de legislación inconexa, que han favorecido en la última década más de 134 conflictos por el agua en el país (O'neal, 2019). Así, la historia de Costa Rica en gestión del agua data de 132 años, con la primera Ley de Aguas de 1884, la cual respondía el modelo agroexportador de café (Alvarado, 2003) y que básicamente regula el uso privado y concesiones de una época muy diferente a la actual, considerando los cambios en tamaño y distribución de la población, así como las nuevas prácticas de consumo (Morales, 2013). Hoy existen 275 leyes vigentes relacionados con el agua y más de 1500 prestadores del servicio, lo cual dificulta la resolución de los conflictos que se generan en las comunidades y una gobernanza adecuada del recurso hídrico en todo el territorio nacional (Alvarado, 2003).

Más recientemente, es evidente el aumento de los esfuerzos por atender esta problemática. En 2021 el Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), por medio de la Dirección de Agua (DA) inició el proceso de elaboración de una nueva Política Hídrica Nacional y el Plan Nacional para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (MINAE, 2021). En junio de ese mismo año, se firmó una reforma al artículo 50 de la Constitución Política, para declarar el acceso al agua como un derecho humano, citando que, “toda persona tiene el derecho humano, básico e

irrenunciable de acceso al agua potable, como bien esencial para la vida”. Además, se menciona que el agua es un bien de la nación, indispensable para proteger tal derecho humano.

La dificultad y complejidad de la gestión del recurso hídrico en agricultura es una realidad que se extiende por todo el mundo y de la cual Costa Rica no es excepción, tomando en cuenta que la participación del sector agropecuario en el comercio exterior del país es de suma relevancia. Para 2014, un 47,1% del total del territorio fue dedicado a actividades agropecuarias (Sepsa, 2018), el equivalente a concesiones de agua por un total cercano a 0,5 km<sup>3</sup>, donde 88% de este volumen proviene de fuentes superficiales y 12% restante de aguas subterráneas (Morales, 2013).

En síntesis, a pesar de que se conoce históricamente acerca de la necesidad del acceso al agua para la vida en La Tierra, no ha habido antes una atención adecuada a la gestión de este importante recurso y su contaminación en las cadenas de producción de bienes y servicios. Además de esto, a nivel mundial, la producción de bienes de uso intensivo de agua se ha desconectado espacialmente de los consumidores finales. Existe en la actualidad poca conciencia en la sociedad sobre el hecho de que la organización y las características de las cadenas de producción y suministros influyen de forma directa en los volúmenes de consumo, distribución y contaminación del agua dulce asociada a un producto (A. Hoekstra, Chapagain, Aldaya, & Mekonnen, 2011). Esta visualización y reconocimiento del uso del recurso hídrico detrás de los productos que se consumen permitiría cuantificar sus efectos y así entender el carácter global del agua dulce para sentar las bases que faciliten el proceso de mejorar la gestión de este recurso en todo el mundo.

A partir de aquí y tomando en cuenta lo vulnerable que es este recurso, se han realizado propuestas sobre diversos procedimientos para poder hacer un uso óptimo del mismo. Para esto, es necesario cuantificar las cantidades utilizadas a través de toda la cadena de producción de un producto o servicio determinado (Camacho, García, Gonzalez, & Fernandez, 2015) y de esta forma, monitorear su impacto en la sostenibilidad del medio ambiente. Existe entonces una compleja red de relaciones en torno al agua, que posee el potencial de proporcionar información relevante para la esfera política y económica, para usuarios y gestores en procesos de planificación y toma de decisiones acertadas acerca de este recurso (Rodríguez, Galarretaeta, & Kruse, 2014).

### **3.2 Estudio de caso cultivo de cebolla en Tierra Blanca de Cartago**

En Costa Rica, el sector agropecuario es el segundo generador de empleo del país, para el año 2005, el 15% de la población económicamente activa dependía en forma directa de la agricultura. Inclusive, en más de 70 cantones del país el trabajo agropecuario representa la principal actividad económica (Arias, 2005). Los productos tradicionales del país representan alrededor del 60% de las exportaciones (Pomareda & López, 2010), por lo que es una industria de gran importancia y con mucho potencial de mejora.

Específicamente Cartago es una de las tres zonas principales de producción cebollera en Costa Rica, abarcando principalmente los distritos de Tierra Blanca, Llano Grande, Cot y Potrero Cerrado. Su aporte a la producción nacional representa cerca del 74% y concentra alrededor de 300 productores (CNP, 2015). Sin embargo, no se escapa del contexto mundial de escases de agua, esta zona ya ha empezado a presentar bajas en las fuentes naturales utilizadas en irrigación. Se estima que, según la proyección del crecimiento de la población para Cartago, entre el 2002 y el 2025 en relación con la oferta hídrica, existirá un déficit de 250 l/s agua para el 2025 (Varela, 2007). Adicionalmente, se esperan impactos en la productividad, debido a la sensibilidad de los productos, a fluctuaciones de desempeño ante la falta de agua y factores incontrolables de clima, según un estudio realizado por Azofeifa (2004). Tal es el caso Tierra Blanca, donde el jefe de la agencia del MAG informó que, una encuesta con productores de la zona confirmó casos en que los rendimientos bajaron más del 50% de lo esperado (Barquero, 2019).

La agricultura convencional de Tierra Blanca representa un 80% la producción de cebolla, 40 % de papa y un 30 % de zanahoria, que se consume en el país (MAG:DRCO, 2016). Sin embargo, la creciente escasez del recurso hídrico no es la única problemática a la que se enfrentan los agricultores de la zona, donde son cada vez más los terrenos en que se evidencia la degradación de los suelos y pérdida de su productividad. Según datos del MAG (2016), en la zona, el 20% de los propietarios manejan su finca y el cultivo y el 80% alquilan la tierra, lo que da como resultado una inestabilidad para invertir en prácticas sostenibles. Esto ha provocado un aumento en términos generales de malas prácticas agrícolas, relacionadas principalmente a la preparación del suelo, uso de los fitosanitarios, mala disposición para eliminar los envases vacíos de los plaguicidas y el uso excesivo del tratamiento químico, lo que ocasiona no solo una alta carga residual en los productos cosechados, sino que afecta directamente la calidad de las aguas subterráneas.

En esta zona del país, según el MAG-Foro Nacional de Cadena Agroalimentaria de la Cebolla (2004), la fecha más importante de producción es la que inicia la última semana de abril y cosecha hacia finales de agosto. Esta época corresponde a la siembra de invierno y el cultivo se desarrolla bajo la lluvia, por lo que no requieren instalar sistema de riego. Posteriormente sigue en importancia la siembra de finales de agosto y setiembre que culmina durante enero; esta requiere el uso de riego en las etapas finales o el uso de variedades que toleren alto déficit hídrico. Estos dos periodos corresponden a los estudiados en la presente investigación, donde se cultivó cebolla E515 y Alvara, respectivamente.

La cebolla es una especie bianual, con temperatura óptima para su desarrollo de 14 °C, con máximas de 30 °C y mínimas de 7 °C (CIMS, 2010). Este cultivo se produce tanto en suelos arcillosos como en francos, preferiblemente con el pH entre 6,0 y 6,5. El híbrido E515 presenta como principales características para un correcto desarrollo un fotoperiodo de 10-12 horas, latitudes entre 0°- 32° y alturas mayores de 1300 m.s.n.m. Soporta precipitaciones por lo que se puede cultivar tanto en verano como en invierno, soporta alta humedad relativa, y aunque tolera climas variados se da mejor en climas templados. Es un híbrido de bulbo mediano, follaje verde intenso, que tarda en desarrollar alrededor de 100 a 120 días, dependiendo de la zona; sin embargo, da mejores resultados si se le alarga el ciclo. La variedad Alvara por su parte, tiene un fotoperiodo de 11-13 horas con alta luminosidad, se desarrolla bien en latitudes 0°- 32°, alturas entre 1300-2400 msnm, tolera elevada humedad relativa y precipitaciones. Tiene un bulbo amarillo de madurez intermedia de entre 95-110 días después del trasplante (CIMS, 2010).

### **3.3 Huella Hídrica**

El hecho de replantearse el uso del agua a través de las cadenas de suministro ha tomado interés a partir de la incorporación del concepto de “huella hídrica” por Hoekstra en 2002, él lo definió como un indicador para medir de manera cuantitativa el consumo de este recurso para la producción de bienes y servicios, buscando un valor que reflejara el impacto que este consumo tenía en los recursos globales de agua dulce (A. Y. Hoekstra & Hung, 2002).

Posteriormente, la Red Internacional de Huella Hídrica definió el término huella hídrica como el volumen total de agua dulce utilizado por personas, empresas o países para producir, consumir o utilizar bienes y servicios. Este indicador toma en cuenta el uso directo e indirecto del agua y especifica espacio-tiempo (Mekonnen & Hoekstra, 2011). Por su parte, la

organización ISO (International Organization for Standardization, 2014), en su normativa internacional 14046, define la huella hídrica como un parámetro que cuantifica los posibles impactos ambientales relacionados con el agua, entre ellos la eutrofización, salinización, acidificación, escasez, etc. Todo esto bajo el esquema de análisis de ciclo de vida.

El interés en este tema se incrementó velozmente después de que fuera introducido el término huella hídrica en la literatura académica y además, con el aumento en la inclusión de los criterios acerca de responsabilidad social en las corporaciones, dependencia del agua y el riesgo relacionado con ella en diferentes empresas de la industria agroalimentaria (Romero, Quintero, & Monserrate, 2016). Esto les permite utilizar el indicador como punto de referencia para la generación de estrategias que contribuyeran con el impacto ambiental y que al mismo tiempo reforzaran la imagen corporativa así como la distinción de un productor en el mercado (A. Hoekstra et al., 2011).

Esta es una metodología que promueve y apoya el uso sostenible del recurso hídrico a través de información transparente y completa sobre el consumo y la contaminación del agua, en relación con la disponibilidad de esta (IICA, 2017). Además, el enfoque de huella hídrica puede proporcionar información sobre demanda de agua de los cultivos y posibilidades relacionadas para ahorrar agua (Thaler, Gobin, & Eitzinger, 2017).

El agua se puede clasificar en tres categorías que envuelven el término “apropiación de agua fresca”, estas incluyen la que se consume y la requerida para asimilar la contaminación causada en el proceso de producción. Estas tres categorías se definen a continuación según Camacho et al. (2015):

- ✓ Huella hídrica azul, es el volumen de agua implicado en la obtención del cultivo procedente de aguas superficiales o subterráneas.  
Esta categoría incluye el agua incorporada al producto así como el agua que no regresa a la misma zona de captación, mismo período o que se evapora, siendo este último el más significativo (A. Hoekstra et al., 2011). La huella hídrica azul mide la cantidad de agua disponible en un período determinado que se consume por lo que no se devuelve inmediatamente dentro de la misma cuenca.
- ✓ Huella hídrica verde, es el volumen de agua procedente de las precipitaciones disponible en el suelo, que vuelve a la atmósfera mediante los procesos de evapotranspiración de los cultivos.

El agua verde se refiere a la precipitación en la tierra que no se escurre ni recarga el agua subterránea, sino que se almacena en el suelo o permanece temporalmente sobre la vegetación. Eventualmente, esta parte de la precipitación se evapora o transpira a través de las plantas. El agua verde puede volverse productiva para el crecimiento de los cultivos, sin embargo, no toda va a ser absorbida de forma exitosa.

Para el caso de la agricultura, es posible cuantificarla como la evapotranspiración total del agua de lluvia.

- ✓ Huella hídrica gris, es el volumen de agua necesario para que la concentración de sustancias contaminantes del agua se reduzca hasta alcanzar los estándares de calidad exigidos.

El concepto de huella hídrica gris ha surgido del reconocimiento de que el tamaño de la contaminación del agua se puede expresar en términos del volumen de agua que se requiere para diluir los contaminantes de manera que se vuelvan inofensivos. La huella hídrica gris es un indicador de capacidad de asimilación adecuada, por esta razón se utiliza la concentración natural como referencia y no la concentración real en el cuerpo receptor.

Como se describió, para el caso de la agricultura el mayor componente de la huella hídrica azul y verde es la evapotranspiración (ET). Esta se conoce como la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo (FAO, 2006). Esta se expresa en milímetros de altura de agua por unidad de tiempo y se ve afectada por el clima, las características del cultivo, el manejo y suelo en que se desarrolla el cultivo. Las diferencias entre los conceptos evapotranspiración del cultivo de referencia ( $ET_0$ ), la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar ( $ET_c$ ) y la evapotranspiración del cultivo bajo varias condiciones de manejo y ambientales o evapotranspiración real ( $ET_a$ ) se basan en los distintos factores que incorpora su cálculo. En el caso de la  $ET_0$ , es un parámetro relacionado con el clima que expresa la fuerza evaporativa de la atmósfera, por lo que toma en cuenta las variables climatológicas sobre una superficie cultivada estándar, como lo es un cultivo hipotético de pasto. La  $ET_c$ , por su parte, incorpora además factores relacionados al tipo de cultivo, la variedad y las etapas de desarrollo. Esta se define como la demanda evaporativa de la atmósfera sobre cultivos que crecen bajo condiciones óptimas de agua en el suelo, con características adecuadas tanto de manejo como ambientales, y que alcanzan la producción potencial bajo las

condiciones climáticas dadas. Por último, la ETa, realiza un ajuste al ETc, el cual toma en cuenta la corrección cuando existen condiciones distintas a las óptimas o hay limitantes ambientales. Entonces, es posible relacionar el valor de ETa con la cantidad de agua requerida para compensar la pérdida por evapotranspiración del cultivo, que se define como requerimiento de agua del cultivo (RAC).

Según el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA, 2017) la evaluación de la huella hídrica consta de cuatro fases:

a. Definición de objetivos y alcance de la evaluación: a favor de la transparencia y claridad, deben entablarse las razones para desarrollar la evaluación, y definir sus límites. Esta discusión preliminar definirá, finalmente, las decisiones que deben tomarse durante el estudio, así como las suposiciones.

b. Contabilidad de la huella hídrica: en esta fase se recolectan datos y se desarrolla la cuantificación. Uno de los métodos más utilizados actualmente es el propuesto por Hoekstra (A. Hoekstra et al., 2011) en el Manual de Estándar Mundial Para la Evaluación de la Huella Hídrica. Indica que la huella hídrica de un cultivo se calcula con la siguiente ecuación:

$$HH=HHverde+HHazul+HHgris \text{ [vol/masa]} \quad \text{[EC 1]}$$

c. Análisis de sostenibilidad de la huella hídrica: Los resultados de huella hídrica son evaluados desde el punto de vista de la sostenibilidad ambiental, económica y social.

d. Formulación de estrategias de respuesta: con base en los resultados, se plantean estrategias o políticas de respuesta para mejorar la gestión del recurso hídrico.

La aplicación de la metodología de evaluación de la huella hídrica plantea grandes posibilidades en torno a dos aspectos fundamentales para conseguir reducir los impactos del cambio climático sobre los usos del agua. La evaluación de la huella hídrica azul provee información asociada al uso eficiente del agua azul. La evaluación de la huella hídrica verde ofrece nueva información en torno a la sostenibilidad hídrica de las cuencas, planteando estrategias de conservación y restauración de áreas estratégicas para la producción de agua, como una medida efectiva y necesaria para mitigar los impactos del cambio climático en la región (Cascante, Castro, & Moreira, 2017).

A continuación, se detalla la información necesaria para la correcta evaluación de la huella hídrica del cultivo:

- Datos climáticos y de precipitación de la cuenca para el periodo de tiempo determinado: se requiere conocer la distribución de la precipitación que irriga de manera natural al cultivo. Consecuente a esto es necesario calcular la evapotranspiración que se ve afectada por datos climáticos como la temperatura, radiación solar, velocidad del viento, entre otros.
- Uso del suelo: se requiere conocer la distribución de suelos agrícolas en la misma, el sector del cultivo, su área y tipo de cosecha.
- Datos sobre el riego de los cultivos: es necesario conocer los periodos y la frecuencia de riego, así como las cantidades de agua utilizada.
- Características del suelo: para determinar el comportamiento del agua en el suelo, es necesario conocer las características texturales básicas del suelo y sus características hidráulicas.

Para el sector agrícola en específico, el uso y consumo de agua está directamente vinculado a actividades específicas como el riego, fertilización y manejo de enfermedades y plagas, además, lavado de equipos y todos los procesos posteriores a la cosecha. En general, los productos de origen agrícola tienen mayor impacto en la etapa del cultivo, la cual abarca el 90% de la huella hídrica del producto final (Camacho et al., 2015). Es aquí donde se ve reflejada la utilidad de la cuantificación de la huella hídrica en los procesos agrícolas, y que trae consigo beneficios como lo son la generación de consciencia sobre el dónde u el cómo de la utilización del agua y por supuesto también la identificación de riesgos en potencia a los que se enfrenta un sistema de producción a la sombra de un panorama de déficit de este recurso. Además, permite una mejor toma de decisiones acerca de cómo manejarlo y cómo gestionar los procesos en los que este recurso interviene, así como la posibilidad de tener participación en políticas a nivel local y nacional de sostenibilidad ambiental y productiva que propicien la reglamentación de acciones concretas para reducir el consumo.

### **3.4 Modelo CropWat**

Según una revisión cuantitativa de la contabilidad y simulación de la huella hídrica para la producción de cultivos basada en publicaciones durante 2002–2018, realizada por Feng, B et al. (2020), el enfoque principal ha sido utilizar modelos de productividad de agua de cultivo o modelos hidrológicos para simular la huella hídrica en campos de cultivo, como CropWat.

CropWat es el programa informático de la FAO (FAO & Smith, 1992) para el cálculo de las necesidades hídricas de los cultivos. En la actualidad, los expertos de riego de esta organización lo recomiendan como modelo de simulación para la elaboración del calendario de los planes de riego, como una alternativa que se está presentando en la gestión de los recursos hídricos. Consiste en calcular los turnos, caudales y tiempos de riego basándose en las necesidades de agua del cultivo que viene determinado por el tipo de suelo, clima y cultivo. Este un programa es gratuito y disponible en la web de la FAO, que cuenta con sus propias bases de datos para diferentes cultivos, pero, además, puede emplear datos elaborados específicamente para un proyecto determinado.

Este modelo se acopla al enfoque de requisitos de agua de cultivos de campo (FCWR por sus siglas en ingles) para el cálculo de la huella hídrica, que asume que el requerimiento de agua del cultivo (RAC) se cumple por completo en el campo, por lo que la evapotranspiración del cultivo es igual a la RAC (Feng et al., 2020). Así se obtiene el valor de huella hídrica dividiendo la RAC por el rendimiento del cultivo.

Además, tomando en cuenta que el ET0 puede calcularse a partir de datos meteorológicos, este software utiliza el método Penman-Monteith (1986) que incorpora explícitamente parámetros tanto fisiológicos como aerodinámicos. El método Penman-Monteith fue desarrollado mediante la definición del cultivo de referencia, como un cultivo hipotético de referencia con una altura asumida de 0,12 m, una resistencia superficial fija de 70 s m<sup>-1</sup> y un albedo de 0,23. La superficie de referencia se asemeja a una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente, sombreando totalmente la tierra y con un adecuado aporte de agua. En base a la ecuación original de Penman-Monteith y a las ecuaciones de resistencia aerodinámica y de superficie, el método FAO Penman-Monteith para estimar ET0, se expresa como:

$$ET0 = \frac{0,408 \Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_2 + 273} u_2 (E_s - E_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad [EC 2]$$

Donde:

$R_n$  : radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>)

G: flujo de calor de suelo (MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>)

T<sub>2</sub>: temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)

$U_2$ : velocidad del viento a 2 m de altura ( $m s^{-1}$ )

$E_s$ : presión de vapor de saturación (kPa)

$E_a$ : presión real de vapor (kPa)

$\Delta$ : pendiente de la curva de presión de vapor ( $kPa^{\circ}C^{-1}$ )

$\gamma$  : constante psicrométrica ( $kPa^{\circ}C^{-1}$ )

Posteriormente, CropWat calcula el requerimiento de agua del cultivo (RAC) utilizando el enfoque de coeficiente de cultivos ajustado para condiciones no estándar, según la ecuación 3.

$$ETa = ET0 * Ks * Kc \quad [EC 3]$$

### 3.5 Balance hídrico en suelos

El balance hídrico en el suelo es una herramienta que permite entender el comportamiento del agua en el perfil y se basa en principios de conservación de masas de agua. Este depende de la capacidad del agua de lluvia (P) o riego (I) para ingresar al suelo a través de la superficie y almacenarse en la reserva del suelo ( $\Delta S$ ). Para su determinación, existen métodos directos, como el uso de lisímetro, e indirectos, que consisten en la evaluación del balance hídrico. Es así como, a partir de información de contenido de agua del suelo y sus propiedades físicas, se hacen consideraciones presupuestarias, o de “Saldo hídrico”, que incluyen el drenaje profundo de agua (Dp), la escorrentía de agua que no ingresa a la superficie (E), el agua perdida de la superficie por evapotranspiración (ET) y el agua absorbida por las raíces de las plantas y utilizada en la transpiración (Ritchie, 1998). Para esto, es preciso determinar correctamente las tasas de cada componente en el balance hídrico, descrito por la siguiente ecuación:

$$\Delta S = P + I + U - E - In - ET - Dp \quad [EC 4]$$

Donde los valores de agua ascendente por capilaridad (U) y el agua interceptada por las hojas de plantas (In) pueden ser despreciado para simplificar el cálculo. El balance de Saldo hídrico utiliza la lógica de entradas (P+I) y salidas (ET+Dp+E) del sistema diariamente, según la ecuación 4. El método consiste en evaluar los flujos de agua que entran y salen de la zona radicular del cultivo dentro de un determinado periodo de tiempo (FAO, 2006), según se observa en la figura 1.

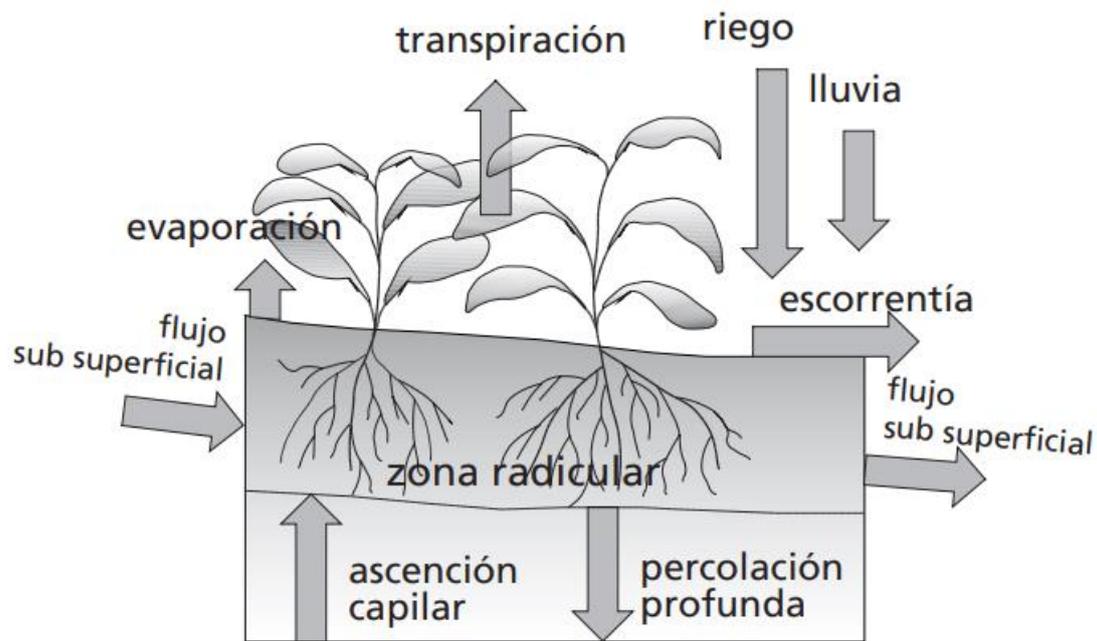


Figura 1. Balance de agua en el suelo de la zona radicular. Fuente (FAO, 2006).

La curva característica de retención de agua en el suelo es uno de los conceptos útiles mediante los cuales se puede determinar las funciones de propiedad del suelo no saturado y sus correspondientes características hidráulicas (Eyo, Ngambi, & Abbey, 2022).

El agua está fuertemente retenida por la superficie de las partículas del suelo, lo que crea una presión negativa, o succión, llamada potencial matricial ( $\psi$ ) que une el agua al suelo y que varía con la humedad presente en él. Se ejerce una succión relativamente débil sobre el agua cuando el suelo está saturado, en que el potencial matricial es alto, pero la succión aumenta a medida que el suelo se vuelve más seco y las fuerzas más fuertes retienen el agua en los poros pequeños (Bonan, 2019).

Así es como la curva característica de retención de agua se genera por la relación entre el contenido volumétrico ( $\theta$ ), que se define como la relación entre el volumen de agua y el volumen total del suelo de agua (Carnero & Carnero, 2018); y la succión del suelo. Esta curva suele ser una presentación semilogarítmica, donde el logaritmo de la presión negativa se denomina pF ( $\log | - \text{cm H}_2\text{O} |$ ).

La figura 2 muestra un esquema cualitativo de una curva característica de retención de agua, donde  $\theta_s$  es el contenido de humedad volumétrica en la condición saturada y  $\theta_r$  es el contenido de humedad volumétrica residual en el cual es necesario gran incremento en la succión para

remover el agua remanente en los microporos, debido a que predominan las fuerzas de adhesión superficial. La condición de saturación en el suelo se da cuando el espacio poroso posee agua en su totalidad, esto quiere decir que el valor porcentual de  $\theta_s$  es equivalente a la porosidad total (Angella, Frías, & Salgado, 2016).

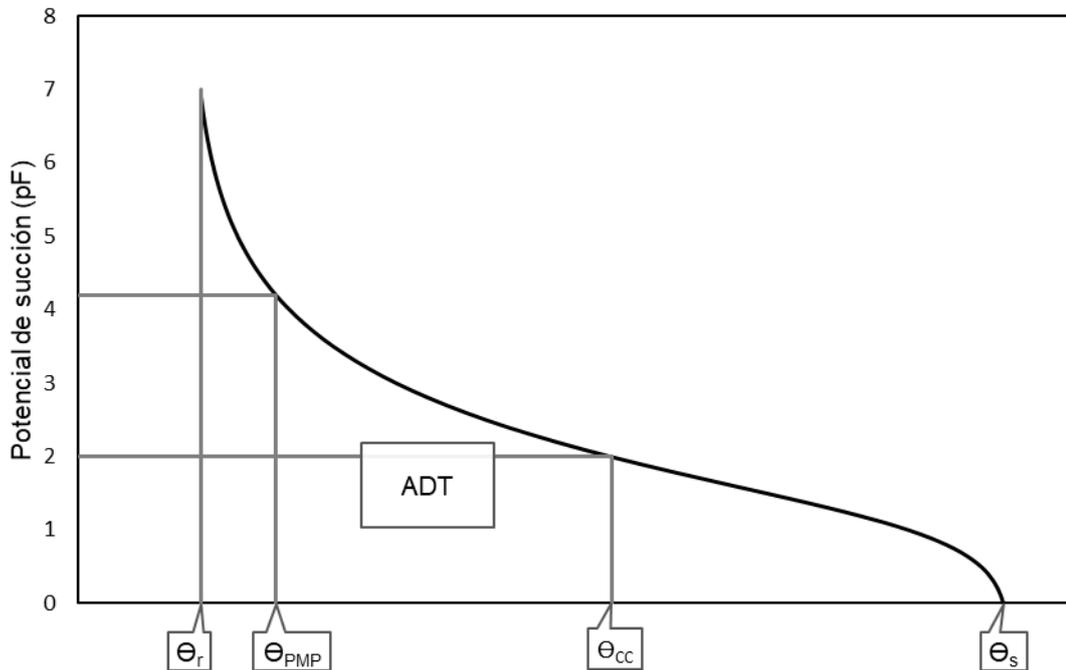


Figura 2. Esquema de una curva de retención de agua en suelo.

Cuando a una muestra de suelo saturada se le aplica una sobrepresión creciente o potencial matricial, no ocurre ningún flujo de salida hasta que se exceda cierto valor crítico en el cual los poros de entrada más grandes comienzan a vaciarse. Este potencial matricial crítico se conoce como presión de entrada de aire ( $\Psi_b$ ).

Conforme los poros drenan agua por aumento de la succión se pierde la condición de saturación, hasta llegar al valor máximo, representado por el residual, donde las raíces no tienen la fuerza suficiente para extraer esta película de agua del terreno. En medio de estos valores se encuentra el  $\theta$  de capacidad de campo (CC), que es la máxima cantidad de agua que un suelo puede retener en contra de la acción de la gravedad y se determina aplicando una succión que en el rango de 2 – 2,5, dependiendo del tipo de suelo (Weiler & McDonnell, 2004). Este valor corresponde al límite superior de almacenamiento de agua, mientras que el límite inferior se conoce como punto de marchitez permanente (PMP) (Zotarelli, Dukes, & Morgan, 2022) y se

determina a pF 4,2. El contenido de humedad presente en el suelo entre el  $\theta_{CC}$  y  $\theta_{PMP}$  se denomina agua disponible total (ADT).

Para comprender el uso de agua en el suelo es fundamental estudiar los procesos hidráulicos que ocurren en él. Su determinación directa requiere mucho tiempo y es costosa, pues se necesita un gran número de muestras, debido a la alta variabilidad espacial y temporal de las propiedades hidráulicas del suelo. Para representar estos procesos de una manera simplificada es útil el uso de modelos para estimar su capacidad de retención de agua por medio de propiedades fáciles de medir (Suelos, Cuenca, & Lago, 2011).

El modelo más simple entre estos es la función de retención de agua del suelo de Campbell (1974), que solo requiere un parámetro de forma de curva (b) que corresponde a la distribución de tamaño de poro, y el contenido de agua saturada en el potencial de  $\Psi_b$ . Este modelo relaciona la succión con el contenido de agua volumétrico y lo expresa de la siguiente forma:

$$\Psi = \Psi_b \left( \frac{\theta}{\theta_s} \right)^{-b} \quad [\text{EC } 5]$$

Donde:

$\Psi_b$ : valor de entrada de aire

b: parámetro de ajuste

Otra propiedad física importante estudiada para caracterizar el suelo es la velocidad de infiltración, que está determinada principalmente por el gradiente de potencial mátrico y gravitatorio y los valores de conductividad hidráulica en condiciones de flujo saturado e insaturado (Assan & Gorosito, 2010). La infiltración es una propiedad hidrodinámica, que considera el movimiento vertical del agua en el suelo y está estrechamente relacionada con los procesos de capilaridad y de las fuerzas asociadas a las partículas del suelo (Orjuela, Rubiano, & Camacho, 2010). Al comienzo del proceso de infiltración la velocidad de ingreso es alta, ya que el gradiente de potencial es muy grande, pero a medida que el suelo gana humedad, la velocidad de infiltración disminuye.

Se han desarrollado varias expresiones empíricas para describir la variación en el tiempo (t) de la lámina total infiltrada y la velocidad de infiltración, entre ellas se encuentra el modelo Kostiakov (1932), el cual se describe a continuación:

$$F_{(t)} = a t^u \quad [\text{EC } 6]$$

Donde:

$F_{(t)}$ : lamina de infiltración acumulada, respecto al tiempo transcurrido.

$a$ : parámetro empírico de ajuste, vinculado a las condiciones de la humedad inicial del suelo.

$\mu$ : parámetro empírico de ajuste, relacionado con la distribución estructural del suelo.

A partir de este modelo es posible determinar el valor de Infiltración básica ( $I_b$ ), que es la velocidad de entrada básica cuando la infiltración se mantiene constante (Orjuela et al., 2010).

Para la determinación de ambas curvas, es necesario conocer una propiedad básica y que se mide con facilidad en campo, la densidad aparente ( $D_a$ ). Esta propiedad relaciona la masa total de suelo seco con su volumen total, por lo que en ésta medición de densidad se tiene en cuenta el espacio que ocupan los poros en el suelo (Angella et al., 2016).

### **3.6 Sensores de humedad**

El contenido de agua del suelo se puede estimar en un campo utilizando lisímetros o sensores de humedad del suelo. Ambos métodos requieren una calibración cuidadosa para proporcionar una medida precisa del agua del suelo o del contenido de humedad del suelo (Sample, Fields, & Owen, 2016).

Los sensores de humedad del suelo asocian el valor del contenido volumétrico de agua del suelo a partir de otras propiedades del medio poroso, como la permitividad relativa ( $K_a$ ). Esta es determinada a través del tiempo en el que un pulso electromagnético transita en el suelo, donde el tiempo de propagación de la onda varía según el contenido de agua (Salgado, Romay, Zabala, & Génova, 2012). Muchos tipos de sensores de humedad del suelo están disponibles para una variedad de aplicaciones, entre ellos el CS655 y el SoilVUE™10, patentado por Campbell Scientific.

El reflectómetro de contenido de agua CS655 es un sensor electromagnético de baja frecuencia que determina  $K_a$  utilizando el período de viaje bidireccional y la atenuación de voltaje de la señal aplicada a lo largo de dos varillas de 12 cm (Caldwell, Bongiovanni, Cosh, Halley, & Young, 2018).

Por otro lado, el SoilVUE™10 es un sensor de perfil de contenido de agua del suelo diseñado para redes de monitoreo ambiental y otras aplicaciones en que sea necesario realizar múltiples mediciones en un perfil. Este sensor logra una señal uniforme de alta resolución, combinando

el tiempo que dura en subir con una técnica avanzada de análisis de formas de onda para determinar el verdadero tiempo de viaje de un pulso de alta frecuencia (Campbell Scientific, 2019).

Muchos sensores electromagnéticos informan Ka directamente, lo que facilita el uso de relaciones empíricas bien establecidas basadas en los tres términos "universales" de Topp et al. (1980) o una linealización similar de dos términos (Ledieu et al., 1986).

## 4. Materiales y métodos

A continuación, se detallan los métodos y procedimientos utilizados, dividido en dos secciones principales referentes a cada objetivo específico de la investigación.

### 4.1 Caracterización del sitio, suelo y variables climatológicas

#### 4.1.1 Sitio de estudio

Este estudio tiene lugar en una finca agrícola ubicada en Tierra Blanca de Cartago (Figura 3), a una altitud de 2202 msnm, con coordenadas de latitud  $9^{\circ}92$  norte y longitud  $83^{\circ}89$  oeste, donde se analizaron dos periodos de cultivos de cebolla. El primero, del híbrido E515, tuvo una duración de 157 días (de setiembre del 2020 al 28 de febrero del 2021) mientras que el segundo, de la variedad Álvara, fue de 118 días (del 20 de abril a agosto 2021). Ambos periodos de cultivo de cebolla se realizaron en el área delimitada con la línea discontinua de color azul, en la figura 1, correspondiente a media hectárea.



Figura 3. Finca agrícola del estudio, correspondiente a media hectárea, ubicada en Tierra Blanca de Cartago.

En el lugar se encuentra instalada (marcada en la figura 3 con un símbolo de estrella) una estación meteorológica del laboratorio de hidrología de suelos del Tecnológico de Costa Rica (figura 4), la cual recopila datos climatológicos en tiempo real como precipitación, velocidad del viento, temperatura, humedad relativa y horas de sol; con una resolución de 2 minutos. Las bases de datos registradas por la estación se procesaron utilizando el software R 1.4.1103 (R Core Team, 2020) para obtener la información de clima necesaria en las siguientes secciones.



Figura 4. Estación meteorológica ubicada en Tierra Blanca, Cartago.

#### 4.1.2 Caracterización del suelo

Para obtener la curva característica de retención de agua y la curva de infiltración en el suelo, se realizaron visitas al campo durante el crecimiento del cultivo de cebolla Álvara. En cada visita se tomaron cuatro muestras del suelo superficial en cilindros y se realizaron tres repeticiones de la prueba de infiltración (Cuadro 1). Los puntos de muestreo se ubicaron en los alrededores de la estación meteorológica, donde también se encuentran los sensores de humedad; distanciados por aproximadamente 0,5 m.

Cuadro 1. Toma de muestras.

<b>día cultivo Alvara</b>	<b>Fecha</b>	<b>Actividad</b>
1	20/04/2021	Inicio cultivo
57	15/06/2021	Toma de anillos de suelo
61	19/06/2021	Toma de anillos de suelo Prueba infiltración
78	6/07/2021	Prueba infiltración Fin cultivo
118	15/08/2021	Toma de anillos de suelo Prueba infiltración

Para las pruebas de infiltración se utilizó el infiltrómetro de minidisco (Alemania, METER) en campo. El procedimiento consiste en llenar de agua el instrumento, se selecciona la succión dependiendo del tipo y la compactación del suelo, se coloca en un sitio liso de manera que la membrana tenga contacto directo con el suelo y se inicia la medición. Para asegurar una superficie lisa se colocó una capa fina de sílice debajo del disco de acero inoxidable del infiltrómetro, que aseguró un buen contacto entre las superficies. Las mediciones se realizaron registrando el tiempo transcurrido a intervalos regulares del volumen de agua en el depósito a medida que el agua se infiltraba, hasta que al menos 30 a 40 ml de agua se infiltraron en el suelo.

Una vez que se obtuvieron los intervalos de tiempo para cada volumen de agua infiltrada, se utilizó el modelo Kostiakov (1932) para describir el proceso de infiltración base y obtener parámetros hidráulicos del suelo.

La recolección de muestras de suelo para la determinación de la curva de retención se realizó con cilindros de acero inoxidable de 100 cm<sup>3</sup>, estos tienen un filo de corte en la parte inferior que permite el empuje contra el suelo y reduce los efectos perturbadores. Los anillos con las muestras de suelo se trasladaron al laboratorio. Se colocaron en la caja de arena (figura 5) a succiones de 30 hPa, 60 hPa y 100 hPa y se recopilaban datos de peso tras pasar al menos 10 días bajo cada succión. Este equipo permite obtener valores de humedad de la curva de retención de agua para entre pF 0 y pF 2.



Figura 5. Anillos con muestras de suelo en el equipo caja de arena.

Después los cilindros pasaron a platos de presión donde se sometieron a presiones de -0,33 bar y -1 bar, para obtener puntos de la curva en el rango de 2 y 3 en la escala pF. Por último, estos anillos se colocaron en el horno para obtener la masa seca constante a 105°C.

Con los datos obtenidos de peso relacionados a la presión aplicada se obtuvieron los parámetros de la curva. Se utilizó el modelo Campbell (1974), que ajusta los datos en una línea recta en una gráfica  $\log\psi$ - $\log\theta$  con una pendiente  $-b$ .

Además, con la información de masa a 105°C y el volumen conocido de los cilindros, se obtuvo la densidad aparente (ecuación 7). A partir del valor de densidad aparente, según la ecuación 8, también se obtuvo la porosidad total para cada fecha.

$$\text{Densidad aparente } (D_a) = \frac{\text{peso de suelo seco}}{\text{volumen del cilindro}} \quad [\text{EC } 7]$$

$$\text{Porosidad total } (P_t) = 1 - \frac{\text{densidad aparente}}{\text{densidad real}} \quad [\text{EC } 8]$$

Donde el valor de densidad real corresponde a la densidad de la fase sólida del suelo y tiene un valor de 2,65 g/cm<sup>3</sup> (Chavarría, 2011).

## 4.2 Cuantificación de huellas hídricas

Para la cuantificación de la huella hídrica, fue necesario determinar la evapotranspiración real (ETa) diaria del cultivo, que corresponde al requerimiento hídrico de la planta durante toda la duración del cultivo. Primeramente, se determinaron datos como la evapotranspiración potencial de referencia, irrigación, precipitación y a partir de estos se calculó la ETa por dos métodos, CropWat y balance de Saldo hídrico. Estos cálculos se detallan a continuación.

### 4.2.1 Cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET0)

Para el cálculo de la ET0 se hizo uso de la herramienta CROPWAT 8.0 (FAO, 2009) que utiliza como parámetros de entrada los promedios diarios de temperatura min (°C), temperatura máxima (°C), humedad relativa (%), velocidad del viento (km/h) e insolación solar (horas). El software, además toma en cuenta información suministrada de altitud, longitud y latitud de la finca.

### 4.2.2 Aproximación de lámina de riego

Debido a la falta de registros e información por parte de los agricultores, se realizó una estimación de la irrigación realizada a los cultivos. Se utilizaron datos de un equipo instalado en el campo, el SoilVUE™10 (figura 6), que es un sensor de perfil de contenido de agua del

suelo (Reino Unido, Campbell Scientific). Los picos de humedad detectados a 10 cm de profundidad se contrastaron con la información de lluvia, con una resolución de 4 minutos en ambos casos, para determinar los días de riego. La lamina aplicada por día se aproximó con información de caudal y horas de riego determinadas por Miranda (2021) en un estudio realizado en el mismo parcela agrícola.



Figura 6. Sensor SoilVUE™10 marca Campbell Scientific.

#### 4.2.3 Cálculo de la evapotranspiración real por el método CropWat

El cálculo de la ETa se realizó utilizando el software CropWat 8.0 descrito anteriormente. Aunque el fin último del programa es diferente (programar el riego y así asegurar la productividad más alta), este se basa en el cálculo de la evapotranspiración de los cultivos y por tanto, se pueden emplear para inferir las huellas hídricas verde y azul (IICA, 2017). El mismo tiene parámetros de entrada relacionados al clima (con que realiza el cálculo de ET0), precipitación, cultivo, suelo e irrigación, como se observa en la figura 7.

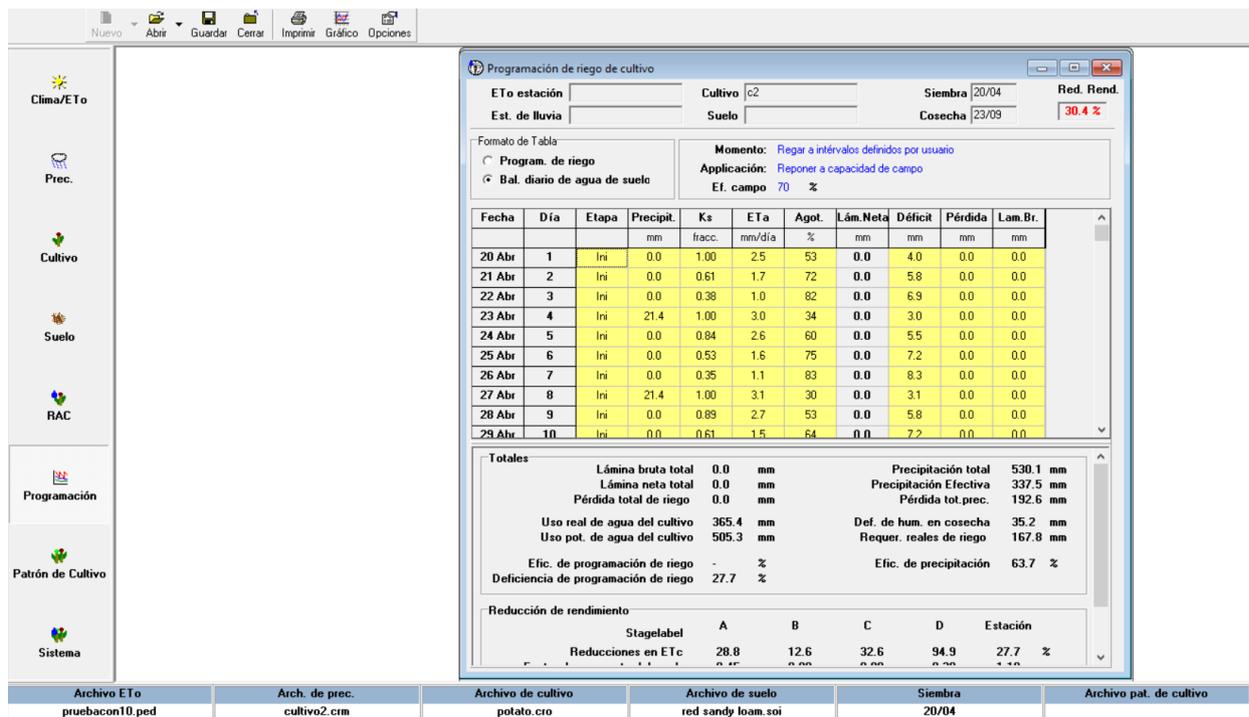


Figura 7. Interfaz de CropWat 8.0 para determinar requerimientos hídricos de la planta.

Los parámetros de clima y precipitación se obtuvieron de la estación meteorológica ubicada en la parcela agrícola para las fechas referentes de ambos cultivos. El cuadro 2 muestra los parámetros utilizados en la sección de cultivo para ambos periodos, los mismo corresponden a duración de cada etapa (FAO, 2006), coeficiente del cultivo (FAO, 1979), profundidad radicular, fracción de agotamiento crítico (FAO, 1979) y factor de respuesta rendimiento (FAO, 2006).

Cuadro 2. Variables de entrada del cultivo para el cálculo de evapotranspiración real, por el método CropWat.

	Inicio	Desarrollo	Medio	Fin	Total
Días cultivo E515	22	50	65	20	157
Días cultivo Alvara	18	35	50	15	118
Kc	0,7	0,85	1,05	0,75	-
Profundidad radicular	0,04 cm	0,12 cm	0,2 cm	0,2 cm	-
Agotamiento crítico (Ac)	0,2	-	0,3	0,3	-
Ky	0,45	0,8	0,8	0,3	1,1

Para completar la sección de información del suelo se utilizó el modelo de la curva de calibración (sección 4.1.2) donde la humedad del suelo disponible total corresponde a la diferencia en el contenido de humedad del suelo entre la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP); y aproximaciones de infiltración a partir de la curva. Los datos utilizados se observan en el cuadro 3.

Cuadro 3. Variables de entrada del suelo para el cálculo de evapotranspiración real, por el método CropWat.

Humedad de suelo disponible total (mm/metro)	180
Tasa máxima de infiltración de la precipitación (mm/día)	200
Profundidad radicular máxima (cm)	30
Agotamiento inicial de humedad de suelo (%)	20

Con estos datos proporcionados al programa CropWat 8.0, se obtuvieron los valores de ETa diaria. El software incluye un enfoque simple para considerar el efecto de las condiciones sub-óptimas de humedad del suelo, por medio del coeficiente de estrés hídrico del cultivo (Ks) y el factor de respuesta del rendimiento (Ky), de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$ETa = ETc * Ks \quad [EC 9]$$

$$Ks = \frac{\text{Agua disponible total} - \text{Agotamiento de la zona radicular}}{\text{Agua disponible total} - \text{Agua fácilmente aprovechable}} \quad [EC 10]$$

Donde el agua fácilmente aprovechable (AFA) se expresa en porcentaje o en mm sobre una cierta profundidad de suelo y es dada por la ecuación 11.

$$AFA = Ac * ADT \quad [EC 11]$$

Donde Ac es la fracción promedio del total de agua disponible total (ADT) en el suelo que puede ser agotada de la zona radicular antes de presentarse estrés.

#### 4.2.4 Cálculo de la evapotranspiración real por el método Saldo hídrico

Este segundo método para el cálculo de la ETa se basa en el balance hídrico del cultivo, por medio de una cuantificación de “Saldo hídrico” de agua que entra o sale diariamente al sistema, siguiendo EC 12, que es un arreglo de la EC 4, discriminando los valores de agua interceptada por las hojas de plantas y agua ascendente por capilaridad:

$$ETa = (P + I) - (E + Dp) - \Delta S \quad [EC 12]$$

Donde (E+Dp) representa el agua extra sin capacidad de ser almacenada en el perfil a 15 cm de profundidad, (P+I) corresponden a la irrigación (mm) aproximada en la sección 4.2.2 y la precipitación (mm) respectivamente. Finalmente  $\Delta S$  corresponde al cambio en el almacenamiento de agua en el suelo.

#### 4.2.5 Huella verde y huella azul

Una vez que se determinó el ETa del cultivo, este se dividió en los componentes azul y verde. Las fórmulas generales utilizadas para la estimación de los componentes verde y azul se describen a continuación (IICA, 2010).

$$\text{Requerimiento de riego} = RAC - \text{Precipitación efectiva} \quad [EC 13]$$

$$ET_{\text{azul}} = \min(\text{Riego neto total}, \text{Requerimiento de riego}) \quad [EC 14]$$

$$ET_{\text{verde}} = \min(\text{Requerimiento hídrico de cultivo}, \text{Precipitación efectiva}) \quad [EC 15]$$

Finalmente, la ETa total para ambos componentes, en unidades de metro, se dividió entre un rendimiento de 40 ton/ha (FAO, 1979) según ecuación 16 y 17.

$$HH_{\text{verde}} \left( \frac{m^3}{\text{ton}} \right) = \frac{Et_{\text{verde}}}{\text{rendimiento}} \quad [EC 16]$$

$$HH_{\text{azul}} \left( \frac{m^3}{\text{ton}} \right) = \frac{Et_{\text{azul}}}{\text{rendimiento}} \quad [EC 17]$$

#### 4.2.6 Calibración de sensores CS650 y determinación de agua superflua

Se utilizaron dos sensores CS650 de Campbell Scientific instalados en el cultivo a 30 cm de profundidad, que es un sensor inteligente de oscilador de línea de transmisión que utiliza dos varillas paralelas, cada una de 12 cm de longitud y 3,2 mm de diámetro separadas por 32 mm, para formar una línea de transmisión (Caldwell et al., 2018). La frecuencia de oscilación medida o el tiempo de viaje en los dos sentidos se multiplica por 128 para obtener el período promedio que está inversamente relacionado con la permitividad dieléctrica relativa (Ka).

Se realizó la calibración en el laboratorio para conocer la relación entre la lectura de permitividad y la humedad contenida en el suelo, por medio de un modelo semi empírico de tres parámetros de ajuste. El procedimiento seguido se describe en el anexo 1, donde se tomaron

6 puntos (la figura 8 muestra la medición del punto saturado) con su respectiva replica, por duplicado.



Figura 8. Determinación punto de saturación para el modelo de calibración de los sensores de humedad.

Finalmente, el modelo empírico utilizado se describe en la ecuación 18.

$$\theta = m * Ka^{\alpha} - \beta \quad [EC 18]$$

Donde  $\theta$  es la humedad presente en el suelo ( $m^3/m^3$ ),  $Ka$  es la permitividad leída en el sensor y  $m$ ,  $\beta$  y  $\alpha$  son parámetros de ajuste.

#### 4.2.7 Cálculo huella gris

El cálculo de la huella gris de los cultivos se realizó según la ecuación 19.

$$HH_{gris} \left( \frac{m^3}{ton} \right) = \frac{\text{carga de contaminante (L)}}{\text{concentracion natural de } NO_3 - \text{concentracion maxima } NO_3} * \frac{1}{\text{rendimiento}} \quad [EC 19]$$

Para determinar la carga de contaminante (L) se utilizó la ecuación 20, donde la concentración máxima corresponde a 50 mg/L según el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales N° 33601 vigente para Costa Rica y la concentración natural es de 10 mg/L (Solano, 2011).

$$L = \text{agua lixiviada} * \text{concentracion de } NO_3 * \text{area} \quad [EC 20]$$

El valor del agua lixiviada (mm) se determinó a partir de la información diaria de los sensores colocados en el campo a 30 cm de profundidad, contrastada con la capacidad de campo

determinada en la sección 4.1.2. La concentración de nitrato utilizada fue de 100 mg/L, utilizando con la referencia el trabajo de Miranda, A. (2020), en que se determinaron concentraciones de distintos contaminantes para este mismo campo agrícola. Finalmente, el área utilizada fue correspondiente a la media hectárea del cultivo.

## 5. Resultados y discusión

### 5.1 Caracterización del sitio, suelo y variables climatológicas

#### 5.1.1 Información climatológica y evapotranspiración real

El procesamiento de los datos obtenidos de la estación meteorológica permitió obtener información de entradas (P + I) de agua al sistema para los dos periodos de cultivo (Figura 9 y 10). Además, a partir de esta información meteorológica, se obtuvieron los valores de ET<sub>0</sub> y posteriormente de ET<sub>a</sub> por el método CropWat y el balance de Saldo hídrico, obteniendo resultados promedios de 3,2 mm diarios para el cultivo E515, por ambos métodos, y 3,2 mm y 3,4 mm para el Alvara, respectivamente. Estos resultados son congruentes con otro estudio que cuantificó la ET<sub>a</sub> en la zona norte de Cartago (Quesada, 2017), en que se obtuvo un valor de 3,6 mm/día para el cultivo de cebolla.

Aunque la ET<sub>a</sub> señala un valor similar para ambos, el valor potencial (ET<sub>0</sub>) sí mostro ser mayor para el cultivo de Alvara. Los factores meteorológicos que determinan la evapotranspiración son los componentes del tiempo que proporcionan energía para la vaporización (FAO, 2006), por lo que este resultado es congruente con las mayores temperaturas, de hasta 18,2 °C, y mayores picos de radiación solar experimentadas por este cultivo. Posteriormente, el ajuste a ET<sub>a</sub> toma en cuenta las condiciones reales de agua disponible en el suelo, por lo que aumenta el valor para el cultivo de E515 debido a mayores entradas de agua, contrario a lo que sucedió en el Alvara, como se explica a continuación.

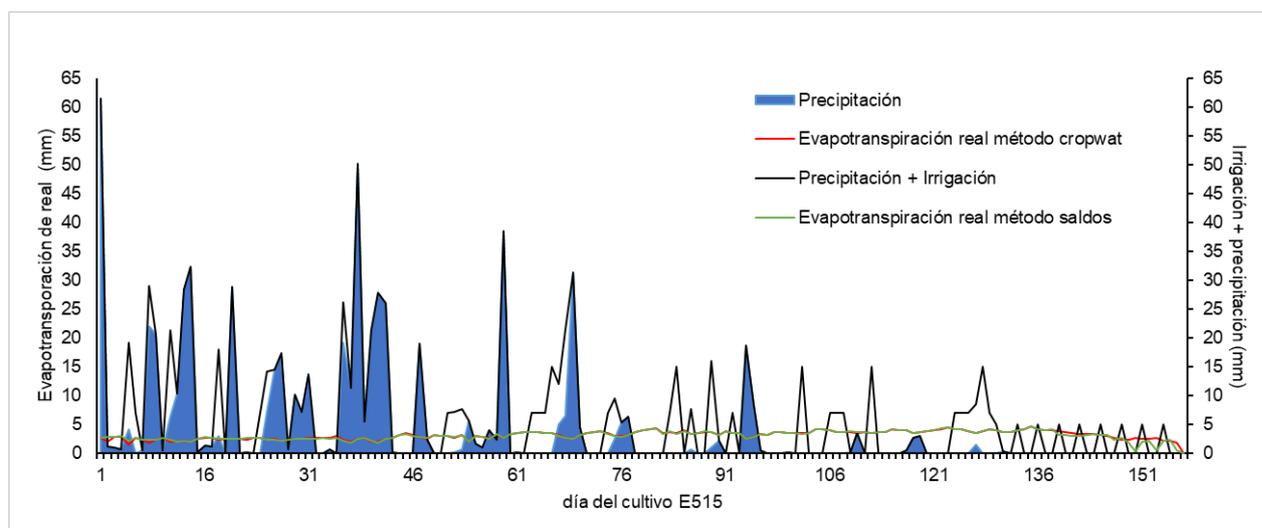


Figura 9. Datos meteorológicos del cultivo E515 en mm/día.

Como se observa en la figura 9, la cebolla E515 inició con días de lluvia de hasta 61 mm/día, debido a que este se desarrolló en la época de transición a temporada seca, que para la Región Central Oriental inicia generalmente en diciembre (Manso, Stolz, & Fallas, 2005). Para este mes, corresponde aproximadamente al día 68 de 157 del cultivo, lo que muestra la transición en la mitad del cultivo, desarrollándose así la primera mitad en meses lluviosos la segunda mitad en época seca.

Con el descenso de las lluvias se dio el aumento en el riego para satisfacer las necesidades del cultivo. Las estimaciones realizadas apuntan a una aplicación promediada de 17 mm de agua semanales, con un total de 44 riegos detectados.

Para todo el cultivo se obtuvo un balance de 641,4 mm de lluvia y 370 mm de agua de riego, de los cuales 493, mm y 500,6 mm corresponden a los valores de ETa para los métodos de Saldo hídrico y CropWat respectivamente.

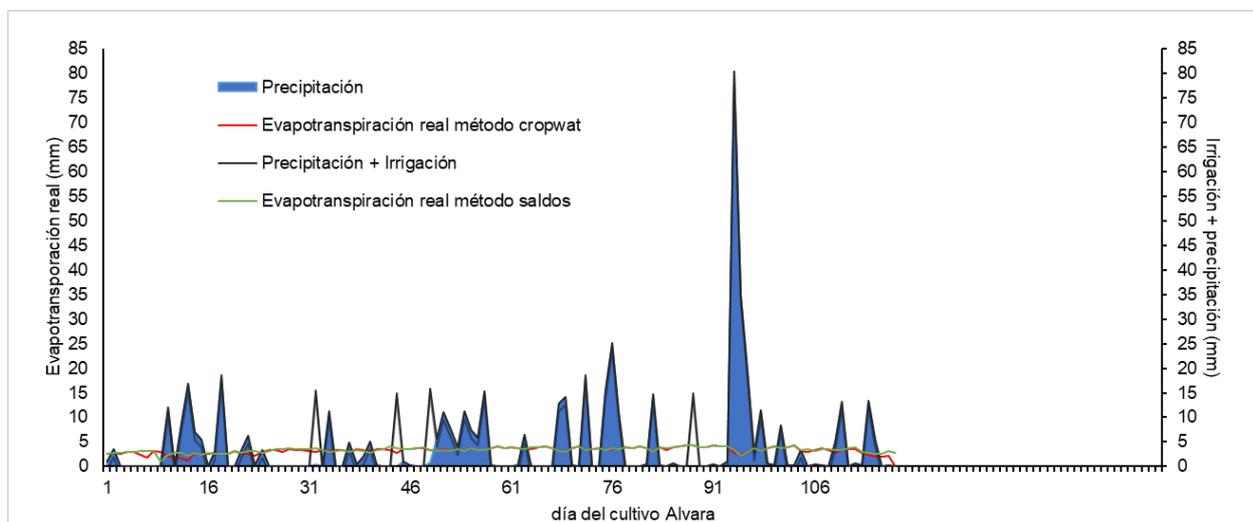


Figura 10. Datos meteorológicos del cultivo Alvara.

Para el caso de la cebolla Alvara (figura 10) las entradas de agua se deben mayormente a las precipitaciones, siendo las mayores de hasta 80,4 mm en el día 94 y de 34,8 mm en el 95. Esto debido a que se desarrolló en los meses de abril a agosto (2021), siendo mayo el inicio de la época lluviosa (Manso et al., 2005). Se obtuvo que el total de precipitaciones durante los meses de cultivo fue de 504,6 mm, mientras que la estimación del riego señaló únicamente 4 aplicaciones de aproximadamente 15 mm, para un total de solamente 60 mm de agua irrigada. Esto indica un total de entradas de 564 mm, lo que corresponde a aproximadamente la mitad en comparación a las entradas observadas para el cultivo E515, que llegaron hasta los 1011

mm de agua. El total de ETa del cultivo Alvara fue de 398,6 mm por método de Saldo hídrico y 382,4 por método CropWat.

Si comparamos la ETa de ambos cultivos, el E515 tuvo un promedio de 497 mm/cultivo mientras que Alvara de 390 mm/cultivo. Que E515 fuera superior por 107 mm es un resultado esperado, debido a la mayor duración de tiempo de desarrollo del cultivo que genera una mayor demanda del recurso y a una mayor cantidad de entradas de agua, en que el promedio diario de P+I supera por casi 2 mm al cultivo de Alvara.

### 5.1.2 Caracterización del suelo

Los resultados obtenidos para el modelo de la curva característica de retención de agua (cuadro 4) muestran que la densidad aparente del suelo aumentó, pasando de 1,15 a 1,36 al final del cultivo.

Cuadro 4. Parámetros obtenidos para el modelo de la curva de retención de Campbell (1974).

		Da (g/cm <sup>3</sup> )	$\theta_s$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	b	$\Psi_b$
Rango		1,08 – 1,23	53,70 – 59,18		
Día	Promedio	1,15	56,44	-5,24	2,7
57	Desviación estándar	0,07	2,79		
Rango		1,19 – 1,35	49,03 – 55,12		
Día	Promedio	1,27	52,08	-3,67	12,3
61	Desviación estándar	0,08	3,10		
Rango		1,26 – 1,45	45,08 – 52,29		
Día	Promedio	1,36	48,69	-8,07	13,1
118	Desviación estándar	0,09	3,68		

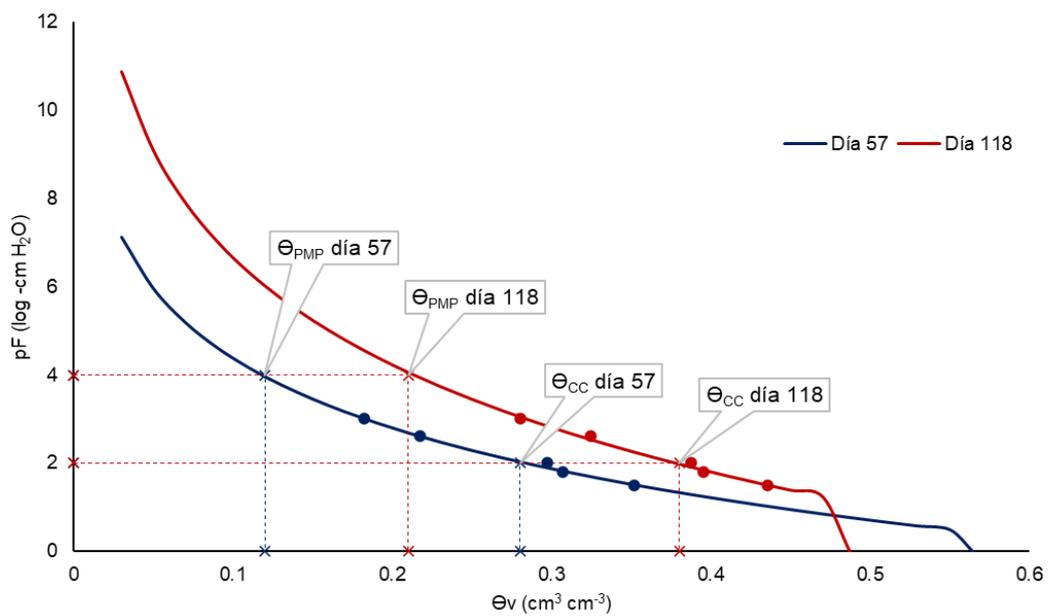
$\Psi_b$ : presión de entrada de aire, Da: densidad aparente,  $\theta_s$ : contenido de agua volumétrico saturado, b: parámetro de ajuste relacionado a la distribución de tamaño de poro.

El valor de  $\Psi_b$  también aumentó con el tiempo, lo que señala un efecto de unión y reducción de poros (Eyo et al., 2022). Esto retoma el concepto de entrada de aire como el valor de succión

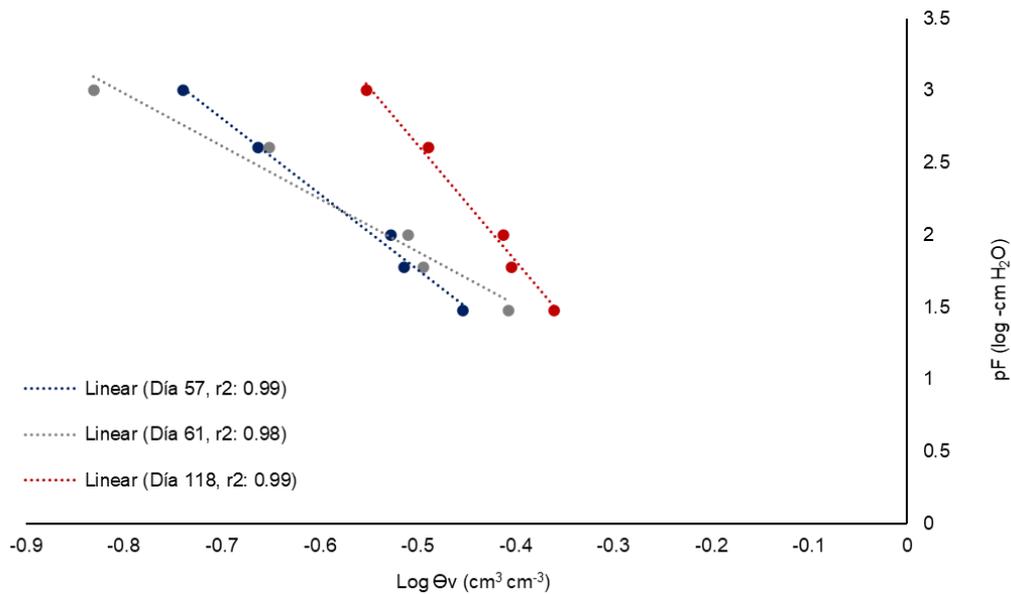
en el cual el aire comienza a ingresar a los vacíos más grandes del suelo, siendo necesaria una mayor succión cuando se trata de poros de menor tamaño ejerciendo fuerzas de adhesión.

El valor de la pendiente  $-b$  corresponde al parámetro empírico de retención de agua del suelo, el cual varió entre 3,67- 8,07, lo cual coincide con un suelo franco arenoso, relacionado a un valor de 4,9 y a un  $\theta_s$  de 43,5  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ , según (Clapp & Hornberger, 1978).

En la Figura 11 se detalla la curva característica linealizada (a) y graficada en su forma semilogarítmica (b), donde es posible visualizar los cambios en cuanto a la retención de humedad en el suelo, comparando el día 57 con el 118.



a)



b)

Figura 11. a) y b) Curva característica de retención de agua.

En la figura 11a se observa que el  $\theta_{CC}$  aumenta a lo largo del cultivo, iniciando con un valor de  $0,28 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  para el día 57 y terminando con  $0,38 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  para el 118. Lo mismo en el caso de  $\theta_{PMP}$  en que pasa de  $0,12 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  a  $0,21 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ . Así, el valor de agua disponible total se mantuvo alrededor de  $0,165$  a lo largo de desarrollo del cultivo.

Sin embargo, sí hay un cambio en la distribución del espacio poroso, que provoca que se retenga el agua con distinta energía. Al final del cultivo se requería de  $0,1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  más de humedad en suelo para que las fuerzas de succión de la raíz superaran las fuerzas de adhesión a la superficie, debido al mayor contacto del espacio poroso, en comparación con el día 57. La mayor dispersión de las partículas y su mayor superficie de contacto, característica de los poros de tamaño menor a  $0,2 \mu\text{m}$ , favorecen que el suelo capte agua adherida a la partícula por adhesión superficial, que la convierte en agua no disponible para las plantas (Rucks, García, Kaplán, Ponde de León, & Hill, 2004).

En síntesis, estos resultados señalan que al final del cultivo el suelo tiene una mayor densidad aparente y por lo tanto menor macroporosidad. El aumento en la densidad puede deberse a la compactación posterior al arado del suelo, conocida como “pie de arado”. Esta es una práctica agrícola común en que el paso recurrente del instrumento a lo largo de los días va creando una capa dura de 25 a 35 cm (Redagrícola, 2017). Esto, según A. Alvarado & Forsythe (2005), podría afectar negativamente el desarrollo del sistema radical de los cultivos y reducir la velocidad de infiltración, con el consecuente incremento en la tasa de erosión del suelo.

En el cuadro 5 se observan los resultados obtenidos a partir de las pruebas de infiltración. Se observa como el valor promedio de infiltración base (Ib) promedio disminuye a lo largo del cultivo hasta llegar a  $0,82 \pm 0,14$  mm/min con 95% de confianza.

Cuadro 5. Parámetros obtenidos a partir de la curva de infiltración.

		a	$\mu$	Ib (mm/min)
Día 61	Rango	70,44-104,65	-0,35- -0,19	0,78-1,56
	Promedio	87,55	-0,27	1,12
	Desviación estándar	15,12	0,07	0,30
Día 78	Rango	49,77-85,57	-0,34- -0,23	0,55- 1,15
	Promedio	67,67	-0,29	0,85
	Desviación estándar	18,27	0,05	0,31
Día 118	Rango	52,43 – 83,49	-0,31 - -0,27	0,66 – 0,99
	Promedio	67,96	-0,29	0,82
	Desviación estándar	15,53	0,20	0,14

a: Parámetro empírico de ajuste vinculado a la humedad inicial del suelo,  $\mu$ : Parámetro empírico de ajuste relacionado a la estructura del suelo, Ib: infiltración básica.

La velocidad de la infiltración indica el tiempo necesario para la incorporación de la lámina en el suelo, así el modelo de infiltración permite conocer los mm de agua excedentes (Assan & Gorosito, 2010). Estos promedios de Ib indican que lluvias o riegos de una intensidad mayor a 0,82 mm/min no generaba escorrentía en el día 61, mientras que para el final del cultivo es probable que sí.

La disminución del parámetro  $\mu$ , del día 118 en comparación al 61, está relacionado con una pendiente cada vez más decreciente conforme se desarrolló la cebolla. Esto indica menor capacidad de infiltración para un mismo tiempo (Weber & Apestegui, 2016). La Figura 12 muestra un análisis elaborado a partir de los parámetros de infiltración obtenidos para el día 61 y 118.

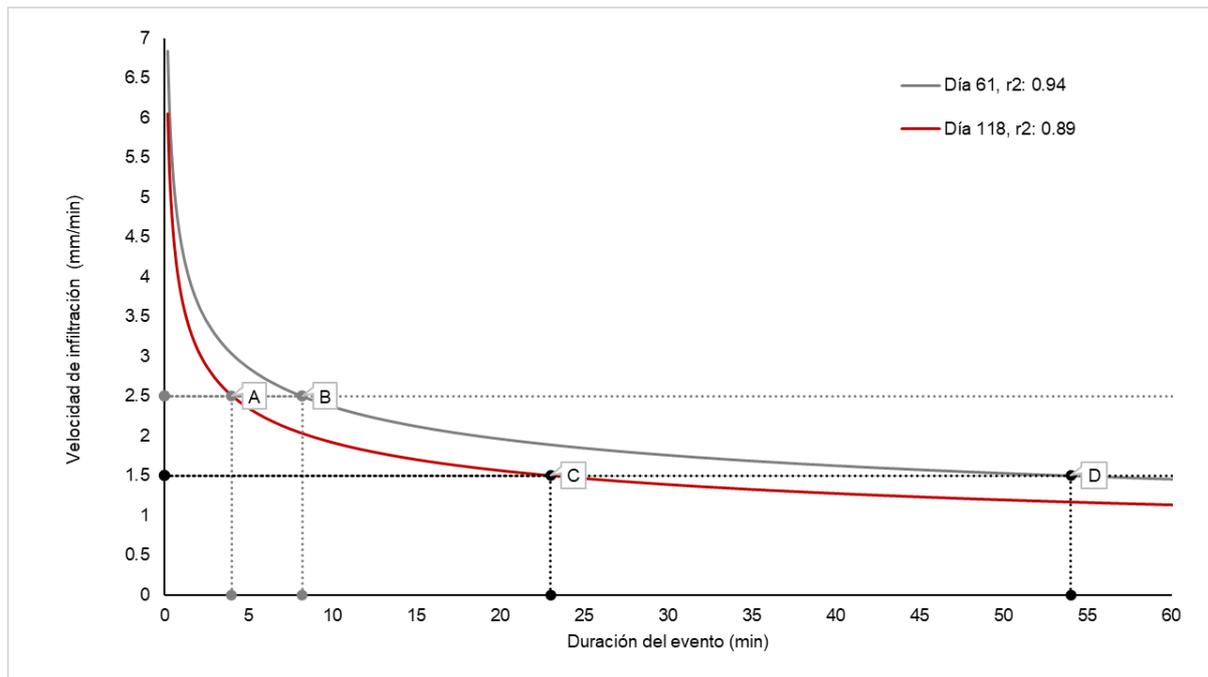


Figura 12. Curva de infiltración y análisis de eventos supuestos.

Del gráfico se interpreta que para inicios del cultivo (día 61) se requería de un evento (B) de 8,2 minutos con una precipitación de 2,5 mm para sobrepasar la capacidad de infiltración y tener procesos de escorrentía. Mientras que para el final del cultivo (día 118) un evento (B) de la misma intensidad llega a su máxima capacidad de infiltración al haber transcurrido la mitad del tiempo (4 minutos). Esta es una consecuencia esperada, debido a que uno de los factores que influyen en la infiltración del suelo, y que cambió a lo largo del cultivo, es la estructura (Assan & Gorosito, 2010). Una estructura favorable se relaciona a suelos arenosos gruesos, mientras que los suelos arcillosos densos suelen tener infiltración lenta (Fischer, Tischer, Roscher, & Eisenhauer, 2014). Así, la infiltración tiene una relación directa con la estabilidad estructural (Ball, 2011), la cual se vio afectada por compactación.

El contraste de la infiltración a lo largo del cultivo aumenta conforme crece la duración del evento, como se observa en los puntos C y D, en que para una intensidad de 1,5 mm/min de lluvia inician a generar escorrentía hasta una duración de 55 minutos, pero tarda solo 23 minutos al final del cultivo (día 118).

## 5.2 Cuantificación de las huellas hídricas

### 5.2.1 Estimación ETa por componente azul y verde

A partir de los datos obtenidos de características de suelo y clima, se calculó la ETa (figura 9 y 10) por medio de CropWat y del balance de Saldo hídrico. Posteriormente, según la ecuación

13 y 14 se estimaron los componente azul y verde que conforman los valores de ETa totales. Los resultados obtenidos se muestran en el cuadro 6.

Cuadro 6. Resultados evapotranspiración real métodos CropWat y Saldo hídrico.

	Método CropWat		Método Saldo hídrico	
	E515	Alvara	E515	Alvara
ETa verde (mm/cultivo)	156,8	295,6	241,6	370,5
ETa azul (mm/cultivo)	280,4	60,0	246,0	60,0
ETa total (mm/cultivo)	437,2	355,6	487,6	430,5

Se obtuvo valores mayores de ETa verde para cultivo de Alvara, lo cual se espera al haberse desarrollado en época lluviosa (Romero et al., 2016). La precipitación efectiva logró abastecer la mayoría del requerimiento hídrico de la planta, donde el componente verde comprendió más del 83% del total en ambos métodos.

Consecuente a esto, se obtuvo un mayor porcentaje de ETa azul para el cultivo E515. Este cultivo tuvo la incorporación de una mayor lamina de riego neto, correspondiente a 280 y 246 mm de agua, según el método CropWat y Saldo Hídrico respectivamente. La fuente de este riego, según información aportada por los agricultores, corresponde a un pozo (extracción de agua subterránea).

### 5.2.2 Cálculo huella verde y huella azul

Al traducir los valores de ETa a huellas hídricas (según ecuaciones 15 y 16) se obtuvo un valor promedio de ambos métodos para huella azul + verde de 115,6 m<sup>3</sup>/tonelada de cebolla E515 y 98,3 m<sup>3</sup>/tonelada de cebolla Alvara. Los valores individuales por huella y métodos se presentan en la figura 13.

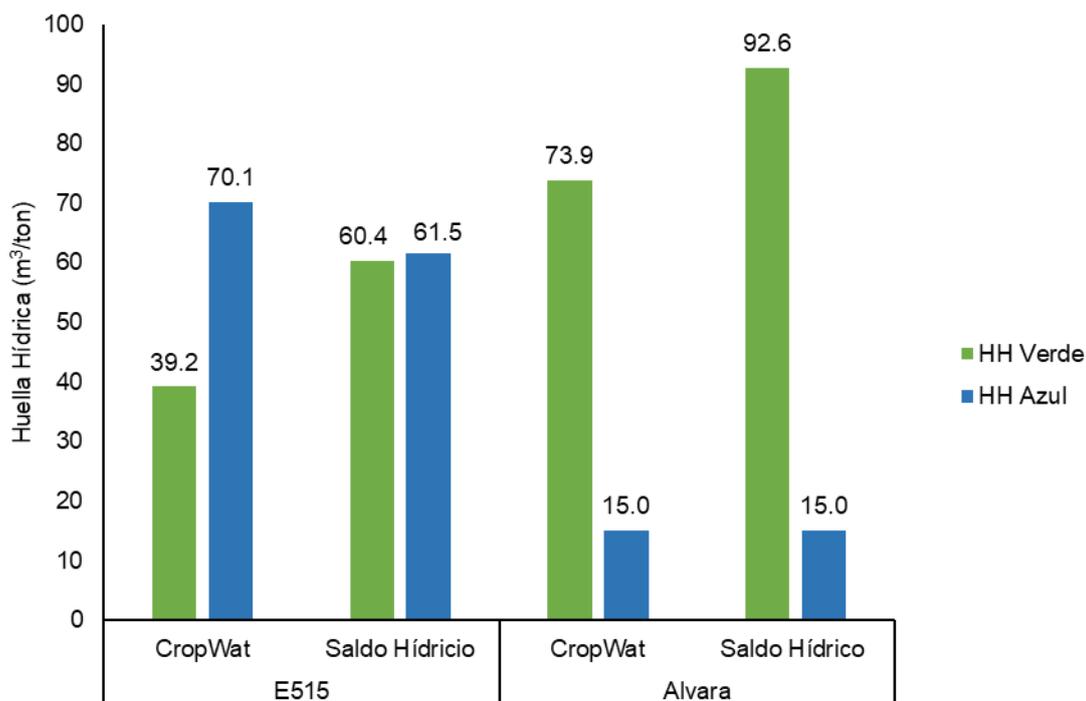


Figura 13. Resultados huella hídrica verde y azul para cultivo E515 y Alvara, por ambos métodos.

Estos resultados tienen coherencia y respaldo de otros datos reportados en el mundo para cultivos de cebolla. Un estudio que cuantificó la huella hídrica de un cultivo de cebolla en Perú en un suelo franco arenoso (Cáceres, 2018), muestra valores de huella hídrica azul + verde de aproximadamente  $77 \text{ m}^3/\text{ton}$ , mientras que, otro realizado en Irán (Esmaeilzadeh, Reza, & Khoshnevisan, 2020) señaló valores de  $154 \text{ m}^3/\text{ton}$  de cebolla.

En esta figura se visualiza cómo ambos métodos difieren mayormente, para un mismo cultivo, en el valor de la huella verde, siendo Saldo hídrico el método con valores mayores. Esto puede deberse a que toda la diferencia del cálculo se traslada al componente verde, ya que el azul está determinado por la lámina neta aplicada, según el IICA (2017), y el resto del requerimiento hídrico se asume es satisfecho por las lluvias.

### 5.2.3 Cálculo de la huella gris

Por último, se realizó la estimación de drenaje profundo por medio de los sensores de humedad CS650. Los resultados de la calibración de los sensores se muestran en el cuadro 7 y la figura 14.

Cuadro 7. Parámetros empíricos obtenidos para la modelación de la curva de calibración de los sensores de humedad CS650 (Campbell Scientific), EC 17.

	$\alpha$	n	$\beta$
Rango	0,047 – 0,051	2,886 – 2,904	2,971 – 2,989
Promedio	0,049	2,895	2,980
Desviación estándar	0,001	0,006	0,006

$\alpha$ , n,  $\beta$ : Parámetros de ajuste empírico del modelo de calibración.

Se obtuvieron los parámetros de ajuste de la ecuación 17,  $\alpha$  de 0,05, n de 2,89 y  $\beta$  de 2,98, con un 95% de confianza. El valor estadístico mínimo de  $K_a$  para el modelo fue de 1,8, donde el promedio de los datos obtenidos en el campo fue de  $K_a = 12,8$  y el máximo fue de  $K_a = 25,3$ .

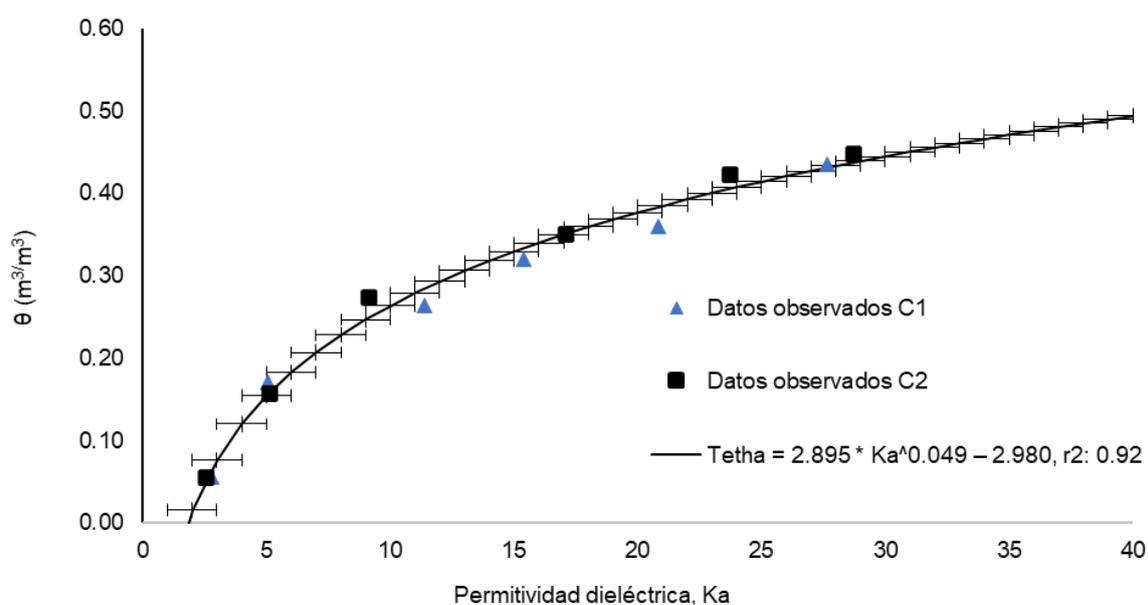


Figura 14. Curva de calibración sensores de humedad.

El modelo descrito en la figura 14 se obtuvo con un coeficiente de determinación ( $r^2$ ) de 0,92, que indica un buen ajuste de la regresión, donde la variable  $K_a$  (X) es capaz de explicar buena parte de la variable de humedad en el suelo (Y) (Novales, 2010).

A partir del modelo obtenido y de los valores de  $K_a$  registrados por los sensores CS650 durante ambos periodos de cultivo, se calcularon los valores de  $\theta$  diarios en el suelo. Este dato, contrastado con la información de capacidad de campo a lo largo del cultivo, permitió estimar la lámina de agua que entró a 30 cm de profundidad y que superaba la capacidad de almacenamiento del suelo. Esta condición provoca que se mueva horizontal y verticalmente transportando la carga de nitrato ( $\text{NO}_3$ ) a otros cuerpos de agua.

Esta carga calculada y otros datos referentes a la concentración de nitratos, utilizados para el cálculo de la huella gris, se encuentran en el cuadro 8.

Cuadro 8. Datos obtenidos a partir de los sensores para el cálculo de huella gris en ambos cultivos.

	Sensor	Tiempo (semanas)	L (cm/sem)	Concentración de NO <sub>3</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Concentración máxima NO <sub>3</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Concentración natural de NO <sub>3</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	HH gris (m <sup>3</sup> /ton)
E515	S.1	22,4	2,15	0,1	0,05	0,01	301,4
	S.2		1,66				236,5
Alvara	S.1	16,9	1,65	0,1	0,05	0,01	173,4
	S.2		0,17				17,7

L: Carga de contaminante, HH: huella hídrica.

Así, se obtuvo que la huella gris del cultivo de E515 es en promedio 268,95 m<sup>3</sup>/ton y de 95,5 m<sup>3</sup>/ton de cebolla Alvara, que representan valores del 70% y 49% del total de la huella hídrica de los cultivos, respectivamente. La mayor cantidad de agua necesaria para diluir la carga del cultivo E515 se relaciona con una mayor cantidad de días de desarrollo, que consecuentemente indica una mayor aplicación del químico.

Pero a esto se suman las entradas de agua que experimentaron ambos periodos de desarrollo, que cumplen la función de transportar el soluto (Turkeltaub, Kurtzman, Russak, & Dahan, 2015), y que fueron mucho mayores para la cebolla E515. Esto ya que el agua en exceso suministrada al cultivo (P o I) se empieza a drenar al superar el punto de saturación o capacidad de campo (Ball, 2011) recargando los cuerpos de agua subterráneos, hasta que superen la capacidad de infiltración del suelo y empiecen a generar escorrentía.

Este resultado permite interpretar que, al aplicar cantidades mayores a las necesarias de riego o experimentar eventos fuertes de lluvia (como se observó en el análisis realizado en la figura 12, en que se sobrepasa la capacidad de infiltración) y sumarlo a cantidades excesivas de fertilizantes, el componente gris puede convertirse en el mayor porcentaje de la huella hídrica de la cebolla. Esto tendría repercusiones directas en cuerpos de agua subterráneos o incluso superficiales que se encuentren a una menor altura (Grigg, Southwick, Fouss, & Kornecki, 2003) (Elrashidi, Mays, Fares, Seybold, & Harder, 2005).

Un estudio realizado en un campo de producción de cebolla en Colombia (Higuera, 2019) también encontró como resultado de la cuantificación de la huella hídrica del cultivo que el componente gris tuvo mayor incidencia sobre el total. Higuera (2019) lo relacionó con las prácticas agrícolas poco sostenibles y uso excesivo de productos de control fitosanitario y fertilizantes que posteriormente son arrastrados por escorrentía a los ríos y aguas subterráneas. Entre las principales consecuencias ambientales relacionadas a estos procesos se destacan la eutrofización de fuentes superficiales y la contaminación hídrica de reservorios subterráneos, teniendo así posibles efectos en la salud y los ecosistemas.

Estos resultados muestran como la agricultura no solo es el sector que mayor agua demanda en mundo, si no que a su vez podría constituir uno de los grandes contaminantes de cuerpos de agua, por lo que debe darse la importancia ambiental y de salud humana que representa. Así, se reconoce como una herramienta útil para contrarrestar esta problemática, el conocimiento de propiedades físicas y el uso de modelos de cálculo de huella hídrica para un mejor manejo del recurso hídrico, que son capaces de propiciar un aumento de la eficiencia de uso del agua y de fertilizantes nitrogenados, lo que a su vez protegerá las aguas subterráneas de contaminantes (Chartuni, Carvalho, Francisco De Assis Marcal, & Ruz, 2007).

## 6. Conclusiones

- ✓ Las propiedades físicas del suelo variaron a medida que el cultivo Alvara se desarrolló y al ser sometido a prácticas agrícolas, propiciando un aumento en la densidad aparente y una menor tasa de infiltración en la etapa final.
- ✓ La huella hídrica total obtenida para el cultivo E515 fue de 378,25 m<sup>3</sup>/ton por el método de CropWat y 390 m<sup>3</sup>/ton por el método de Saldo hídrico, mientras que para la cebolla Alvara fue de 184 m<sup>3</sup>/ton y 203,1 m<sup>3</sup>/ton respectivamente, siendo en ambos casos mayor el dato por Saldo.
- ✓ Además, se observa que la huella hídrica total de cultivo Alvara en comparación con la E515 fue mayor por casi el doble de m<sup>3</sup> de agua por tonelada, debido a que tuvo una duración mayor (39 días más), por ende, una mayor aplicación de fertilizantes, y a que se desarrolló mayormente en el período seco, haciendo uso de una mayor cantidad de agua irrigada.
- ✓ El uso de sensores permitió estimar el agua de drenaje profundo, correspondiente a la lámina de la huella gris, señalando resultados de carga contaminante de 1,9 cm/semana para el cultivo de cebolla E515 y 0,9 cm/semana para el caso de Alvara.
- ✓ Los eventos de lluvia que superen la capacidad de infiltración del suelo y las entradas que excedan su capacidad de almacenamiento provocan que la carga de contaminante se traslade a otros cuerpos de agua.
- ✓ Por último, se señala la importancia ambiental de la cuantificación del componente gris, al representar valores del 70% y 49% del total de la huella hídrica de los cultivos estudiados, que representa una potencial fuente de contaminación al no gestionar correctamente las entradas de agua en relación con la infiltración base del suelo.

## 7. Recomendaciones

- Se recomienda continuar estudios que, como este, utilicen datos reales tomados en el campo, haciendo uso de tecnologías como lo son los sensores de humedad en el suelo. Para una mayor precisión en los resultados, en base a esta experiencia, se sugiere:
  - Tomar una mayor cantidad de pruebas de infiltración a lo largo del cultivo, con un mínimo de 4 repeticiones cada una.
  - Contar con registros de riego y caudales exactos aplicados al cultivo que estimen valores de ETa más cercanos a la realidad.
  - Colocar sensores en todo el perfil, que permita estudiar el movimiento del agua en las diferentes profundidades.
  - Medir, por medio de toma de muestras en sitio, la concentración de nitratos que se lixivian.
- Al tener los registros de lámina real aplicada por el agricultor, resulta de interés realizar una comparación con la estimación calculada a partir de sensores de humedad, que permita conocer la exactitud del dato.
- El resultado de la huella hídrica gris de este estudio solo toma en cuenta uno (el mayor) de los componentes químicos de los fertilizantes aplicados a los cultivos. Sin embargo, si se cuenta con registros de aplicación e información sobre su composición, se recomienda realizar la cuantificación de cada uno individualmente y sumarlos.
- Para futuras investigaciones, es importante complementar evaluando la variabilidad espaciotemporal de la disponibilidad de agua azul y determinar cantidades aptas para un consumo sostenible en una determinada cuenca, sin afectar negativamente al ecosistema.
- A partir de esta y otras investigaciones desarrolladas en la zona de Tierra Blanca, realizar un análisis que plantee acciones para una mejor gestión del agua, tomando en cuenta prácticas como programación de riego y dosificación de fertilizantes, así como el uso de tecnología de irrigación.
- Proveer a los agricultores de acompañamiento y capacitación, de manera que conozcan las cantidades apropiadas de fertilizante a aplicar, de acuerdo con las características de su parcela.

## 8. Referencias

- Alejandro, M. (2021). *Estimación del balance hídrico, de nitrógeno y su lixiviación en un suelo volcánico de uso agrícola, Cartago, Costa Rica*. Tecnológico de Costa Rica.
- Alvarado, A., & Forsythe, W. (2005). Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 29(1), 85–94.
- Alvarado, D. (2003). Primeros 100 años de marco legal costarricense sobre recursos hídricos, 1–24.
- Angella, G., Frías, C., & Salgado, R. (2016). *Conceptos Básicos de las Relaciones Agua-Suelo-Planta*.
- Arias, O. (2005). Retos para la agricultura en Costa Rica.
- Assan, M., & Gorosito, S. (2010). *Serie didáctica N°2 Catedra de Riego y Drenaje: Relación agua suelo planta*.
- Azofeifa, E. (2004). Informe Final sobre el abastecimiento de agua de la ciudad de Cartago. *Municipalidad de Cartago*.
- Ball, J. (2011). Soil and Water Relationships, 40–42. Retrieved from <https://kbsgk12project.kbs.msu.edu/wp-content/uploads/2011/09/Soil-and-Water-Relationships.pdf>
- Barquero, M. (2019, March 12). Sequía causa pérdidas de hasta 50% en hortalizas. Retrieved from <https://www.nacion.com/economia/agro/sequia-causa-perdidas-de-hasta-50-en-hortalizas/KW3EGBHXLBETZMDDOVX5HB7JJE/story/>
- Bonan, G. (2019). Soil Moisture. In *Climate Change and Terrestrial Ecosystem Modeling* (pp. 115–133). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781107339217.009>
- Cáceres, G. (2018). *Determinación de la huella hídrica del cultivo de cebolla, de la Comisión de Usuarios Pucchun del distrito de Mariscal*. Universidad Nacional de San Agustín.
- Caldwell, T. G., Bongiovanni, T., Cosh, M. H., Halley, C., & Young, M. H. (2018). Field and Laboratory Evaluation of the CS655 Soil Water Content Sensor, (April). <https://doi.org/10.2136/vzj2017.12.0214>
- Camacho, E., García, J., Gonzalez, R., & Fernandez, I. (2015). La huella hídrica de los productos agrícolas como herramienta de gestión del agua de riego, (October).
- Campbell, G. . (1974). A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture

- retention data. *Soil Sci.*
- Campbell Scientific. (2019). SoilVUE10 TDR Soil Moisture Profile sensor.
- Carnero, E., & Carnero, G. (2018). Análisis numérico de infiltración de agua en un suelo residual no saturado utilizando la curva de retención de agua. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 20(4), 439–450.
- Cascante, R., Castro, C., & Moreira, D. (2017). *Evaluación de la huella hídrica en cuencas hidrográficas: experiencias piloto en Latinoamérica.*
- Chartuni, E., Carvalho, Francisco De Assis Marcal, D., & Ruz, E. (2007). Agricultura de precisión: Nuevas herramientas para mejorar la gestión tecnológica en la empresa agropecuaria. *COMUNICA*, 24–31.
- Chavarría, F. (2011). *Edafología I*. Managua, Nicaragua.
- CIMS. (2010). Estudio de competitividad del cultivo de la cebolla en Costa Rica, (02), 0–352.
- Clapp, R. B., & Hornberger, G. M. (1978). Empirical Equations for Some Soil Hydraulic Properties. *Water Resources Research*, 14(4).
- CNP. (2015). *Análisis mercado Cebolla.*
- Elpaís.cr. (2021). Sequías, tormentas e inundaciones: el agua y el cambio climático dominan la lista de desastres. Retrieved from <https://www.elpais.cr/2021/07/22/sequias-tormentas-e-inundaciones-el-agua-y-el-cambio-climatico-dominan-la-lista-de-desastres/>
- Elrashidi, M. A., Mays, M. D., Fares, A., Seybold, C. A., & Harder, J. L. (2005). Loss of nitrate-nitrogen by runoff and leaching for agricultural watersheds. *USDA-ARS/UNL Faculty.*
- Esmailzadeh, S., Reza, M., & Khoshnevisan, B. (2020). Water footprint and life cycle assessment of edible onion production - A case study in Iran. *Scientia Horticulturae*, 261(September 2019), 108925. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108925>
- Eyo, E. U., Ngambi, S., & Abbey, S. J. (2022). An overview of soil – water characteristic curves of stabilised soils and their influential factors. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 34(1), 31–45. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.07.013>
- FAO. (1979). FAO Irrigation and drainage paper 33: yield response to water. Rome.
- FAO. (2003). *Descubrir el Potencial del Agua para la Agricultura.*
- FAO. (2006). *Estudio FAO riego y drenaje 56: Evapotranspiración del cultivo.* Roma.
- FAO. (2009). Cropwat 8.0. Retrieved from <https://www.fao.org/land-water/databases-and->

software/cropwat/es/

- FAO. (2019). Expertos del sector agropecuario y ambiente analizan las oportunidades nacionales para una gestión más eficiente del agua. Retrieved from <http://www.fao.org/costarica/noticias/detail-events/en/c/1196208/>
- FAO, & Smith, M. (1992). *CropWat: A computer program for irrigation planning and management*. Rome, Italy.
- Feng, B., Zhuo, L., Xie, D., Mao, Y., Gao, J., Xie, P., & Wu, P. (2020). A quantitative review of water footprint accounting and simulation for crop production based on publications during 2002 – 2018. *Ecological Indicators*, 120(August 2019), 106962. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106962>
- Fischer, C., Tischer, J., Roscher, C., & Eisenhauer, N. (2014). Plant species diversity affects infiltration capacity in an experimental grassland through changes in soil properties. *Plant Soil*, (iDiv). <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2373-5>
- Fournier, L., & Di Stéfano, J. (2004). Variaciones climáticas entre 1988 y 2001, y sus posibles efectos sobre la fenología de varias especies leñosas y el manejo de un cafetal con sombra en Ciudad Colón de Mora, Costa Rica.
- Grigg, B. C., Southwick, L. M., Fouss, J. L., & Kornecki, T. S. (2003). Drainage System Impacts on Surface Runoff, Nitrate Loss, and Crop Yield on a Southern Alluvial Soil. *USDA*, 46(1979), 1531–1537.
- Higuera, C. (2019). *Evaluación de indicadores de huella hídrica en la producción de un cultivo de cebolla de bulbo y papa en los municipios de Duitama y Samaca, Boyacá*. Universidad Católica de Colombia.
- Hoekstra, A., Chapagain, A., Aldaya, M., & Mekonnen, M. (2011). *The Water Footprint Assessment Manual*.
- Hoekstra, A. Y., & Hung, P. Q. (2002). Virtual water trade, (11).
- IICA. (2010). La Agricultura de Costa Rica: Situación al 2010, su Evolución y Prospectiva.
- IICA. (2016). Huella hídrica, agricultura y cambio climático. Retrieved from <https://www.iica.int/es/prensa/eventos/huella-hidrica-agricultura-y-cambio-climatico>
- IICA. (2017). *Guía metodológica para la evaluación de la huella hídrica en una cuenca hidrográfica*.
- IMN. (2019). *Boletín del ENOS N° 118*.
- Instituto Meteorológico Nacional. (2019). *Boletín Meteorológico Mensual: abril 2019*. Costa Rica.

- International Organization for Standardization. Draft International Standard ISO/DIS 14046: Water Footprint-Principles, Requirements and Guidelines (2014).
- Kostiakov, A. . (1932). On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity of studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. *Transactions Congress International Society for Soil Science*.
- MAG:DRCO. (2016). *Informe 2015 A.E.A. Tierra Blanca*.
- Manso, P., Stolz, W., & Fallas, J. C. (2005). El régimen de la precipitación en Costa Rica. *UNA*, 7–8.
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). *National Water Footprint Accounts: the green, blue and grey water footprint of production and consumption* (Vol. 1).
- MINAE. (2021). Costa Rica inicia actualización de Política Hídrica y Plan Nacional para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos que considera variabilidad climática. Retrieved from <https://minae.go.cr/noticias-minae/comunicados/208-crew>
- Morales, D. (2013). Recurso Hídrico en Costa Rica.
- Novales, A. (2010). *Análisis de Regresión*. Departamento de Economía Cuantitativa, Universidad Complutense.
- O’neal, K. (2019). Costa Rica enfrentó 134 conflictos por el agua en una década. Retrieved from <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2019/03/27/costa-rica-enfrento-134-conflictos-por-el-agua-en-una-decada.html#:~:text=Problemas de escasez%2C desabastecimiento y,el agua en el país.>
- Ordaz, J. L., Ramírez, D., Mora, J., Acosta, A., & Serna, B. (2010). *Costa Rica: efectos del cambio climático sobre la agricultura*. México, D.F.: CEPAL.
- Organizacion de las Naciones Unidas. (2015). *Agua para un mundo sostenible*.
- Organización Meteorológica Mundial. (2021). *Atlas de la OMM sobre mortalidad y pérdidas económicas debidas a fenómenos meteorológicos, climáticos e hidrológicos extremos (1970–2019)*.
- Orjuela, H. M., Rubiano, Y., & Camacho, J. (2010). Comportamiento de la infiltración en un oxisol, 31–39.
- Pomareda, C., & López, G. (2010). *Análisis de Prioridades de Políticas y Organizaciones para la Agricultura de Costa Rica, 2006-2010*.
- Quesada, J. (2017). *Determinación de los requerimientos de agua para diferentes cultivos de la Zona Norte Cartago*. Tecnológico de Costa Rica.

- Redagícola. (2017). Compactación: En muchos casos, enemigo número uno del rendimiento en maíz. Retrieved from <https://www.redagricola.com/cl/compactacion-muchos-casos-enemigo-numero-uno-del-rendimiento-maiz/>
- Ritchie, J. (1998). Soil water balance and plant water stress. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-3624-4>
- Rodriguez, C. I., Galarreta, V. A. R. De, & Kruse, E. E. (2014). Analysis of water footprint of potato production in the pampean region of Argentina. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.075>
- Romero, M., Quintero, M., & Monserrate, F. (2016). *Elementos Técnicos para la Medición de Huella Hídrica en Sistemas Agrícolas*. CIAT.
- RStudio Team. (2020). RStudio: Integrated Development for R. Boston. Retrieved from <http://www.rstudio.com/>
- Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponde de León, J., & Hill, M. (2004). *Propiedades físicas del suelo*. Montevideo, Uruguay: Facultad de Agronomía, Universidad de la Republica.
- Salgado, H., Romay, C., Zabala, S., & Génova, L. (2012). Calibración de campo de un sensor dieléctrico para suelos en la Provincia de Buenos Aires. *Riego y Drenaje, Facultad de Agronomía de Buenos Aires*.
- Sample, D. J., Fields, J. S., & Owen, J. (2016). *Understanding Soil Moisture Sensors : A Fact Sheet for Irrigation Professionals in Virginia*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33633.51048>
- Sepssa. (2018). *Informe de Gestión del Sector Agropecuario y Rural*.
- Solano, M. (2011). *Impacto ambiental por aguas residuales y residuos sólidos en la calidad del agua de la parte media- alta de la microcuenca del río Damas y propuesta de manejo*. Universidad Nacional.
- Suelos, E. N., Cuenca, D. E. L. A., & Lago, D. E. L. (2011). Funciones de pedotransferencia para estimar la retención de humedad en suelos de la cuenca del lago de valencia, (August).
- Thaler, S., Gobin, A., & Eitzinger, J. (2017). Water Footprint of main crops in Austria, (1). <https://doi.org/10.1515/boku-2017-0001>
- Turkeltaub, T., Kurtzman, D., Russak, E., & Dahan, O. (2015). Impact of switching crop type on water and solute fluxes in deep vadose zone. *Agupublications*, 9828–9842. <https://doi.org/10.1002/2015WR017612>. Received
- Varela, I. (2007). *Estudio de la gestión municipal del agua: enfoque de gestión de la demanda del*

*agua en Costa Rica y en países con mayor grado de gestión del recurso hídrico.*

Weber, J., & Apestegui, L. (2016). Relaciones entre parámetros de los modelos de infiltración de Kostiakov y Lewis-Kostiakov, Córdoba, Argentina. *Tecnología y Ciencia Del Agua, VII*, 115–136.

Weiler, M., & McDonnell, J. (2004). Water Storage and Movement. In *Soil development and properties* (pp. 1253–1260). Elsevier.

Zotarelli, L., Dukes, M. D., & Morgan, K. T. (2022). Interpretación del Contenido de la Humedad del Suelo para Determinar Capacidad de Campo y Evitar Riego Excesivo en Suelos Arenosos Utilizando Sensores de Humedad, 1–4.

## **9. Anexos**

### Anexo 1

#### **Protocolo Calibración sensores de humedad**

Elaborado por: Melany Díaz

#### **Preparación del suelo**

1. Tamizar el suelo a utilizar durante el procedimiento, aproximadamente 5 kilos, en un tamiz de 2 mm.



**Fig 1.** Tamiz

2. A partir de la densidad a la que se debe trabajar, se calcula la cantidad de suelo requerido para llenar cada cilindro (masa de suelo).

**Tabla 1.** Cálculo de la masa de suelo requerida por cilindro.

Volumen del cilindro	$\pi*(A/2)^2*B$	cm <sup>3</sup>
Diámetro	A	cm
Alto	B	cm
Densidad aparente deseada	C	g/cm <sup>3</sup>
<b>Masa de suelo</b>	Volumen del cilindro *C	g

### Preparación de cilindros y capsulas

Se requiere utilizar un cilindro empacado con suelo y dos capsulas de metal para cada punto de la curva a elaborar. Por cada cilindro:

3. Coloque una cubierta de tela con una liga en la parte inferior del cilindro, según se muestra en la figura 2.
4. Anote el peso del cilindro con la “ropa” (cubierta de tela y liga).
5. Anote el peso de dos capsulas metálicas (se necesitan dos para cada cilindro).
6. Conecte el sensor al software para realizar las lecturas.
7. Llene los cilindros con la cantidad de suelo calculada en el punto 2.
8. Anote el peso (cilindro + ropa + suelo).
9. Cada cilindro se va a volver a empaacar con distintas humedades, en la tabla 2 se observa un ejemplo.

**Tabla 2.** Cálculo de la cantidad de agua en gramos a agregar a cada cilindro.

Tetha	W (contenido de humedad)	Cantidad de agua (g)
Tetha deseado	Tetha/densidad del suelo	W*masa de suelo

Para esto, se coloca el suelo del cilindro en una bandeja, se agrega la cantidad de agua correspondiente y se homogeniza.

10. Una vez que el agua se ha distribuido por todo el suelo de manera homogénea, volver a empaacar dentro del cilindro.

### Medición

Para este punto se deben tener todos los cilindros empaquetados con las distintas humedades.

11. El primer punto es el suelo seco al aire, coloque el sensor dentro del suelo del cilindro y espere que se estabilice la medición.
12. Anote la medición (voltaje o permitividad según el sensor).
13. Seguidamente tome dos muestras de aproximadamente 5 g de suelo del interior del cilindro y colóquelas en las capsulas metálicas previamente pesadas (para el airdry puede tomar la muestra del suelo tamizado y dejar el cilindro intacto para su uso en el punto 16).

14. Anote el peso (masa de la capsula + suelo) y colóquelas rápidamente a la estufa a 105 °C.
15. Repita los puntos del 11 al 14 para cada cilindro.

### **Punto de saturación**

El último punto es el suelo saturado, para este se utiliza el cilindro del punto airdry.

16. Colocar el cilindro en un recipiente, colocar el sensor e iniciar el llenado del recipiente con agua como se observa en la figura 3.



**Fig 3.** Punto de saturación

17. Una vez que el agua llega unos dos 2 cm por debajo de la altura del cilindro, retirar del agua y esperar a que la medida se estabilice.

**Lectura de muestras en el horno (esperar a que hayan perdido la humedad, llegado a peso constante, para realizar estas lecturas).**

18. Pesar las capsulas del horno hasta peso constante y anotar.