



# DOCINADE

Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo  
Énfasis en Sistemas de Producción

Tesis de Doctorado

**Determinación de la eficiencia del uso del agua a  
diferentes ámbitos de succión en el suelo para el cultivo  
de cebolla (*Allium cepa*) c.v. Álvara establecido en  
invernadero**

**Adrián Enrique Chavarría Vidal**

**Dr. Mario Alberto Morales Sánchez**  
Director de Tesis

**Dr. Freddy Soto Bravo**  
Asesor de Tesis

**Dr. Asdrúbal Jesús Farías Ramírez**  
Asesor de Tesis

Cartago, Costa Rica, junio 2024.

**MIEMBROS DEL TRIBUNAL EXAMINADOR**  
**(Arial, 12, negrita, centrado todo en mayúscula)**

**Dr. Freddy Muñoz Acosta**  
**Representante del Dirección de Posgrados TEC**

**Dr. David Valverde Barquero**  
**Coordinador del posgrado o su representante**

**Dr. Mario Alberto Morales Sánchez**  
**Director de tesis**

**Dr. Asdrúbal Jesús Farías Ramírez**  
**Miembro del Comité Asesor de Tesis**

**Dr. Freddy Soto Bravo**  
**Miembro del Comité Asesor de tesis**

# Tabla de contenidos

ÍNDICE DE FIGURAS	4
ÍNDICE DE TABLAS	6
DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD	8
AGRADECIMIENTOS	9
DEDICATORIA	10
RESUMEN	11
PALABRAS CLAVES	11
ABSTRACT	12
KEYWORDS	12
JUSTIFICACIÓN	13
1. INTRODUCCIÓN	14
2. OBJETIVOS	20
3. SÍNTESIS	21
4. ARTÍCULO 1	23
5. ARTÍCULO 2	37
6. ARTÍCULO 3	52
7. ARTÍCULO 4	67
8. ARTÍCULO 5	83
9. DISCUSIÓN GLOBAL	95
10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	97
11. REFERENCIAS	99
12. ANEXO	103

## Índice de figuras

Variación de los diferentes Kc calculados para el cultivo de cebolla en invernadero.....	33
Absorción de N según los ámbitos de succión de humedad presente en el suelo en el cultivo de cebolla ( <i>Allium cepa</i> ) c.v. Álvara en invernadero.....	43
Absorción de P según los ámbitos de succión de humedad presente en el suelo en el cultivo de cebolla ( <i>Allium cepa</i> ) c.v. Álvara en invernadero.....	44
Absorción de Ca según los ámbitos de succión de humedad presente en el suelo en el cultivo de cebolla ( <i>Allium cepa</i> ) c.v. Álvara en invernadero.....	45
Absorción de Mg según los ámbitos de succión de humedad presente en el suelo en el cultivo de cebolla ( <i>Allium cepa</i> ) c.v. Álvara en invernadero.....	46
Absorción de K según los ámbitos de succión de humedad presente en el suelo en el cultivo de cebolla ( <i>Allium cepa</i> ) c.v. Álvara en invernadero.....	47
Absorción de S según los ámbitos de succión de humedad presente en el suelo en el cultivo de cebolla ( <i>Allium cepa</i> ) c.v. Álvara en invernadero.....	48
Capacidad del agua de producir cosecha (kg bf m <sup>-3</sup> Ag) en el cultivo de cebolla en invernadero a diferentes ámbitos de succión.....	58
Efecto de la succión del agua en el suelo sobre la capacidad del agua de producir cosecha (kg bf m <sup>-3</sup> Ag) en el cultivo de cebolla en invernadero.....	58
Capacidad del agua de producir biomasa (kg b m <sup>-3</sup> Ag) en el cultivo de cebolla en invernadero a diferentes ámbitos de succión.....	59
Efecto de la succión del agua en el suelo sobre la capacidad del agua para producir biomasa (kg b m <sup>-3</sup> Ag) en el cultivo de cebolla en invernadero.....	60
Efecto de la succión del agua en el suelo sobre la rentabilidad del agua en el cultivo de cebolla en invernadero según variación de precios de venta en los mercados.....	62
Efecto de la succión de agua en el suelo sobre el punto de equilibrio económico en el cultivo de cebolla en invernadero.....	63
Absorción de CO <sub>2</sub> según los ámbitos de succión de humedad presente en el suelo en el cultivo de cebolla ( <i>Allium cepa</i> ) c.v. Álvara en invernadero.....	77
Efecto de la succión del agua en el suelo sobre la absorción CO <sub>2</sub> (tn ha <sup>-1</sup> ) en el cultivo de cebolla en invernadero.....	78
Fotosíntesis gruesa (mantenimiento, crecimiento y biomasa) expresado en producción de glucosa según la succión de agua presente en el suelo para todo el periodo de cultivo de cebolla en	

invernadero.....	79
Efecto de la succión del agua en el suelo sobre la producción de glucosa en la plantación de cebolla en invernadero.....	80
Relación entre fotosíntesis neta (AN: $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) y conductancia estomática ( $\text{gs: mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) en 23 variedades de vid.....	86
Eficiencia del uso del agua para producir bulbo fresco en los diferentes ámbitos de succión de agua en el suelo en el cultivo de cebolla en invernadero.....	88
Eficiencia del uso del agua para producir biomasa según los ámbitos de succión de agua en el suelo en el cultivo de cebolla en invernadero.....	89
Eficiencia del uso del agua para producir glucosa (fotosíntesis gruesa) según los ámbitos de succión de agua en el suelo en el cultivo de cebolla en invernadero.....	90
Eficiencia del uso del agua en absorción de dióxido de carbono según los ámbitos de succión de agua en el suelo en el cultivo de cebolla en invernadero.....	91

## Índice de tablas

Radiación solar en diferentes latitudes para Costa Rica.....	29
Evapotranspiración de referencia del período total del cultivo de cebolla en invernadero para diversos métodos de cálculo.....	32
Evapotranspiración real del periodo total del cultivo de cebolla en invernadero para un ámbito de succión del agua del suelo de 5 a 15 centibares (cb o kPa).....	33
Agrupación de los Kc promedio para el cultivo de cebolla sembrado en invernadero.....	34
Humedad del suelo y succión de agua en el suelo.....	40
Absorción de N ( $\text{kg ha}_{\text{efectiva}}^{-1}$ ) a diferentes ámbitos de succión de agua presente en el suelo por el cultivo de cebolla en invernadero (densidad 623 377 plantas $\text{ha}_{\text{efectiva}}^{-1}$ ).....	42
Absorción de P ( $\text{kg ha}_{\text{efectiva}}^{-1}$ ) a diferentes ámbitos de succión de agua presente en el suelo por el cultivo de cebolla en invernadero (densidad 623 377 plantas $\text{ha}_{\text{efectiva}}^{-1}$ ).....	43
Absorción de Ca ( $\text{kg ha}_{\text{efectiva}}^{-1}$ ) a diferentes ámbitos de succión de agua presente en el suelo por el cultivo de cebolla en invernadero (densidad 623 377 plantas $\text{ha}_{\text{efectiva}}^{-1}$ ).....	45
Absorción de Mg ( $\text{kg ha}_{\text{efectiva}}^{-1}$ ) a diferentes ámbitos de succión de agua presente en el suelo por el cultivo de cebolla en invernadero (densidad 623 377 plantas $\text{ha}_{\text{efectiva}}^{-1}$ ).....	46
Absorción de K ( $\text{kg ha}_{\text{efectiva}}^{-1}$ ) a diferentes ámbitos de succión de agua presente en el suelo por el cultivo de cebolla en invernadero (densidad 623 377 plantas $\text{ha}_{\text{efectiva}}^{-1}$ ).....	47
Absorción de S ( $\text{kg ha}_{\text{efectiva}}^{-1}$ ) a diferentes ámbitos de succión de agua presente en el suelo por el cultivo de cebolla en invernadero (densidad 623 377 plantas $\text{ha}_{\text{efectiva}}^{-1}$ ).....	48
Productividad agrícola del agua en el cultivo de cebolla en invernadero ( $\text{kg bf m}^{-3}\text{Ag}$ ).....	57
Productividad del agua para la formación de biomasa en el cultivo de cebolla ( $\text{kg b m}^{-3}\text{Ag}$ ) en invernadero.....	59
Coefficientes de respiración de mantenimiento para cada uno de los órganos de las plantas.....	74
Absorción de $\text{CO}_2$ ( $\text{tn ha}_{\text{efectiva}}^{-1}$ ) en el cultivo de cebolla en invernadero según la succión de agua presente en el suelo (densidad 623 377 plantas $\text{ha}_{\text{efectiva}}^{-1}$ ).....	77
Fotosíntesis gruesa expresado como producción de glucosa en el cultivo de cebolla ( $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ tn $\text{ha}_{\text{efectiva}}^{-1}$ ) en invernadero según diferentes ámbitos de succión de agua presente en el suelo (densidad 623 377 plantas $\text{ha}_{\text{efectiva}}^{-1}$ ).....	79
Producción de bulbo fresco (bf) por unidad de agua consumida ( $\text{m}^3$ ) en el cultivo de cebolla ( $\text{bf kg (agua m}^3)^{-1} (\text{ha}_{\text{efectiva}})^{-1}$ ) en invernadero en diferentes ámbitos de succión de agua en el suelo (densidad 623 377 plantas $\text{ha}_{\text{efectiva}}^{-1}$ ).....	87

Producción de biomasa (b) por unidad de agua consumida ( $m^3$ ) en el cultivo de cebolla en invernadero ( $b \text{ kg (agua } m^3)^{-1} (ha_{\text{efectiva}})^{-1}$ ) según diferentes ámbitos de succión presentes en el suelo (densidad 623 377 plantas $ha_{\text{efectiva}}^{-1}$ ) .....	88
Producción de glucosa (Gluc) por unidad de agua consumida en el cultivo de cebolla en invernadero ( $tn \text{ Gluc (agua } m^3)^{-1} (ha_{\text{efectiva}})^{-1}$ ) según diferentes ámbitos de succión presentes en el suelo (densidad 623377 plantas $ha_{\text{efectiva}}^{-1}$ ).....	89
Absorción de dióxido de carbono por unidad de agua consumida en el cultivo de cebolla en invernadero ( $CO_2 \text{ tn (agua } m^3)^{-1} (ha_{\text{efectiva}})^{-1}$ ) según diferentes ámbitos de succión presentes en el suelo (densidad 623 377 plantas $ha_{\text{efectiva}}^{-1}$ ).....	91

## Declaración de autenticidad

Yo Adrián Enrique Chavarría Vidal, estudiante del Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo, declaro que la Tesis Doctoral que presento para su exposición y defensa titulada “Determinación de la eficiencia del uso del agua a diferentes ámbitos de succión de agua en el suelo para el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) c.v. Álvara establecido en ambiente protegido” y comité asesor de tesis son el Dr. Mario Alberto Morales Sánchez (director de tesis), Dr. Asdrúbal Jesús Farías Ramírez (asesor) y el Dr. Freddy Soto Bravo (asesor), es original y que todas las fuentes utilizadas para su realización han sido debidamente citadas en el mismo. Este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en esta u otra institución.

Cartago, Costa Rica, 13 de junio del 2024.

Adrián Enrique Chavarría Vidal

## Agradecimientos

- 1- Agradezco a DIOS sobre todas las cosas por SU gracia, misericordia y amor infinitos
- 2- a mi precioso hogar Kattia Moreno Valencia (esposa), Jafet Chavarría Moreno (hijo) Kemuel Chavarría Moreno (hijo)
- 3- a las y los compañeros profesores de la Escuela de Ingeniería Agrícola
- 4- al Instituto Tecnológico de Costa Rica reflejado principalmente en la Oficina de Becas
- 5- al Programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo en todo su conjunto
- 6- al productor Allen Aguilar Chacón y la empresa FROMAK
- 7- a la Comisión para el Ordenamiento y Manejo de la Cuenca del Río Reventazón (COMCURE)
- 8- al Dr. Mario Morales Sánchez por toda su ayuda, comprensión y paciencia como tutor
- 9- a los doctores Freddy Soto Bravo y Asdrúbal Farias Ramírez
- 10- a todos aquellos que en algún momento me apoyaron y/o me ayudaron

## Dedicatoria

A DIOS sobre todas las cosas que en SU SOBERANÍA ABSOLUTA me permitió continuar con vida en una segunda oportunidad para llegar a obtener este logro entre otras cosas y a mi amado y precioso hogar Kattia Moreno Valencia (esposa), Jafet Chavarría Moreno (hijo) Kemuel Chavarría Moreno (hijo) porque fueron mi apoyo incondicional y siempre han estado conmigo.

## Resumen

El cambio climático afecta de manera directa la disponibilidad del recurso hídrico, el cual es finito y según la región geográfica también es escaso.

Por lo anterior se hace necesario entender y cuantificar el impacto sobre los diferentes sistemas de producción agrícola. Una herramienta para ello es la estimación del uso del agua y sus efectos sobre la producción de biomasa, la producción comercial, la absorción de nutrientes minerales, la absorción de CO<sub>2</sub> y la respectiva producción de glucosa y la rentabilidad del sistema productivo.

El objetivo general consistió en valorar el comportamiento del cultivo de cebolla en invernadero ante el déficit hídrico establecido por medio de ámbitos crecientes de succión del agua en el suelo en un intervalo de -5 a -45 kPa.

El sistema de riego utilizado fue por goteo que se aprovechó para aplicar los fertilizantes (fertirriego) . Se emplearon macetas de 44 litros de capacidad y rellenos con un suelo derivado de cenizas volcánicas (Vitrandis).

Se instalaron en las macetas tensiómetros mecánicos y electrónicos para mantener durante el ciclo productivo los ámbitos de succión de agua en el suelo evaluados.

Para el análisis estadístico se aplicó un diseño experimental totalmente aleatorio, además se calcularon los índices de rentabilidad.

En el ámbito de succión de agua en el suelo de -5 a -15 kPa (el menor de los ámbitos evaluados) se hallaron las mayores absorciones de macroelementos, la mayor eficiencia agrícola del agua (21,41 kg bf m<sup>-3</sup> agua) y la mayor producción de glucosa gruesa (20,95 ton m<sup>-3</sup> agua ha<sup>efectiva</sup><sup>-1</sup>).

El uso consuntivo del agua total para el ciclo productivo de la cebolla en invernadero fue de 452,5 mm. Los coeficientes de cultivo (kc) según las formulaciones de Ivanov y de Camargo fueron los que mejor estimaron la evapotranspiración real, con kc de 0,92 y 0,90 respectivamente.

## Palabras claves

Rentabilidad; absorción CO<sub>2</sub>; producción de glucosa; coeficiente del cultivo; absorción nutricional

## Abstract

Climate change directly affects the availability of water resources, which are finite and, depending on the geographic region, also scarce.

Therefore, it is necessary to understand and quantify the impact on the different agricultural production systems. One tool for this is the estimation of water use and its effects on biomass production, commercial production, the absorption of mineral nutrients, the absorption of CO<sub>2</sub> and the respective production of glucose and the profitability of the production system.

The general objective was to assess the behavior of onion cultivation in a greenhouse in the face of water deficit established through increasing levels of water suction in the soil in an interval of -5 to -45 kPa.

The irrigation system used was drip, which was used to apply fertilizers (fertigation). Pots with a capacity of 44 liters and filled with a soil derived from volcanic ash (Vitrand) were used.

Mechanical and electronic tensiometers were installed in the pots to maintain the evaluated soil water suction areas during the production cycle.

For the statistical analysis, a completely randomized experimental design was applied, and profitability indices were also calculated.

In the range of water suction in the soil from -5 to -15 kPa (the lowest of the ranges evaluated) the highest absorptions of macro elements were found, the highest agricultural efficiency of water (21.41 kg bf m<sup>-3</sup> water) and the greatest production of gross glucose (20.95-ton m<sup>-3</sup> water ha<sup>effective</sup> -<sup>1</sup>).

The consumptive use of total water for the onion production cycle in the greenhouse was 452.5 mm. The crop coefficients (kc) according to the Ivanov and Camargo formulations were the ones that best estimated the real evapotranspiration, with kc of 0.92 and 0.90 respectively.

## Keywords

Cost effectiveness; CO<sub>2</sub> absorption; glucose production; crop coefficient; nutritional absorption

## Justificación

En Costa Rica se cultivan entre 800 y 1000 hectáreas de cebolla, con frecuencia de varias cosechas al año, las que generan una producción media anual de 31 500 toneladas métricas con un rendimiento de 25 a 35 toneladas métricas por hectárea. El consumo nacional de este bulbo ronda las 2200 toneladas por mes, mientras que el consumo per-cápita es de alrededor de 7,0 kg año<sup>-1</sup> [1]. Para el 2015 se produjeron 41157 toneladas métricas y de ésto, el 82 % (33750 toneladas métricas) fue producido en la zona norte de la provincia de Cartago en 1366 hectáreas para un rendimiento de 25 toneladas métricas por hectárea [2].

No obstante, su importancia socio económica, existen amenazas sobre el sector cebollero y el agro costarricense en general y dos fundamentales son el cambio climático y las políticas económicas que se han venido estableciendo en nuestro País.

Según el Sistema Nacional de Áreas de Conservación de Costa Rica (SINAC) los sectores más vulnerables al cambio climático son los bosques, la biodiversidad, los recursos hídricos y el sector agropecuario y dentro de éste los horticultores muestran una alta sensibilidad, condición que impulsa aumentos en la tensión económica, política y humanitaria y que conlleva una afectación de las condiciones de vida de los productores [3].

Además de la vulnerabilidad al cambio climático según la propuesta del “The Intergovernmental Panel on Climate Change” (IPCC) existen otras amenazas externas, que están afectando de manera negativa a los productores tanto de cebolla como de otros productos hortícolas, como lo son préstamos bancarios con altos intereses, importación de productos hortícolas no regulados, insumos costosos y abandono político, que han conllevado a efectos negativos sobre la estabilidad del sistema productivo y la seguridad alimentaria [4].

La producción en invernadero permite controlar factores ambientales como plagas y enfermedades, agua utilizada, fuertes vientos y otros. Dentro de los invernaderos se busca la intensificación de la producción, al utilizar más eficientemente los recursos productivos, con la posibilidad de cultivar todo el año y obtener productos fuera de temporada con mayor rentabilidad. Debido a la cada vez más frecuente utilización de esta modalidad de producción y a la muy escasa información en nuestro país sobre el uso eficiente de los recursos hídricos en invernaderos se tomó la decisión de investigar en esta modalidad.

# 1. Introducción

Se entiende por cambio global en el medio ambiente aquellas alteraciones en los sistemas naturales físicos o biológicos que afectan al conjunto de la Tierra. Estos cambios han sido continuos desde la conformación del planeta, pero han sufrido una aceleración en los últimos doscientos años debido a la intervención humana.

Los principales cuatro cambios son la alteración del sistema climático, la reducción del ozono estratosférico, la lluvia ácida y la pérdida de la biodiversidad.

Los cambios externos del sistema climático se deben a procesos que provocan alteraciones en los flujos de energía de las radiaciones solares dentro del sistema planetario. La emisión de los denominados gases de invernadero como resultado de la actividad humana, está alterando las relaciones entre la radiación solar y los componentes de la geósfera y de la biósfera a una velocidad considerable (calentamiento global)

Como elementos mitigadores al cambio climático se citan la posibilidad de la adaptación de cultivos a los nuevos patrones de clima, modelos de simulación de disminuciones de las precipitaciones y sus efectos sobre las principales especies productivas, mejoramiento de las prácticas agrícolas de los cultivos, así como el acceso a la información y servicios de apoyo climáticos, además de un mejoramiento de los sistemas y tecnologías de riego [5].

La eficiencia del uso del agua (EUA) expresa el porcentaje de agua absorbida por los cultivos respecto al agua aportada y la productividad del agua (PA) se refiere a la conversión del agua en alimentos, ambas son índices utilizados para evaluar la buena gestión del agua agrícola. No obstante, aunque los términos no necesariamente significan lo mismo, en el uso actual de la literatura con frecuencia se reemplaza el concepto de eficiencia del uso del agua por productividad del agua y viceversa [6]. Por lo anterior, en el presente trabajo se utilizó indistintamente ambos términos.

Cuando se pretende enfocar el empleo del agua como un componente meramente productivo y económico, se recurre a sustituir la biomasa por el rendimiento (cosecha) en kilogramos (kg) por metro cúbico ( $m^3$ ) (productividad agrícola del agua) o por el ingreso económico del uso del agua (productividad económica del agua).

La eficiencia del uso del agua es afectada por múltiples factores tales como la especie de la planta, el clima, las prácticas de cultivo y el manejo del riego. Para realizar una medición de la eficiencia del uso del agua en la actividad agrícola se requieren herramientas técnicas para cuantificar el volumen y la frecuencia de riego según los requerimientos del cultivo. La eficiencia

del uso del agua se puede mejorar aplicando métodos de programación y control de cuánto y cuándo regar, considerando la interacción suelo/sustrato-planta-atmósfera.

Para la estimación de la eficiencia del uso del agua se necesita medir el consumo real que presenta el cultivo y por ello el concepto de evapotranspiración ( $E_t$ ) para su respectiva estimación se vuelve imprescindible. La evapotranspiración se ve afectada por el clima, las características del cultivo, el manejo agronómico y el medio de desarrollo. El efecto del clima sobre la  $E_t$  se estima a través de parámetros climáticos, siendo los principales la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento [7]. Para el efecto de las características del cultivo y manejo agronómico se incorporó el concepto de coeficiente del cultivo ( $k_c$ ).

La máxima  $E_t$  se estima mediante el concepto introducido en 1948 por C. Thornthwaite de evapotranspiración potencial ( $E_{tp}$ ), que hace referencia a la máxima cantidad de agua evapotranspirada que es capaz de transferir a la atmósfera una superficie de suelo totalmente cubierta de vegetación de porte bajo, que crece en condiciones óptimas y sin limitaciones en el suministro de agua, dependiendo solo de las condiciones atmosféricas prevalecientes en el momento en que se realiza la estimación [8]. También puede utilizarse el concepto de evapotranspiración de referencia ( $E_{to}$ ) introducido a comienzos de los años 80, que corresponde a la estimación en términos de consumo de agua de los efectos de las condiciones climáticas sobre la  $E_t$  que presenta una especie vegetal de 0,08 a 0,15 m de altura uniforme y un albedo de 0,23 tomado como referencia, habitualmente alfalfa o, más comúnmente, una gramínea, que crece disponiendo de toda el agua necesaria y libre de enfermedades [9]. No obstante, aunque se reconoce que los conceptos de  $E_{tp}$  y  $E_{to}$  en estricto sentido son diferentes, ambos indican cantidades máximas de agua perdida a favor del ambiente, y por ello se han considerado equivalentes e intercambiables [9] [10] [11] [12] [13]. Por lo anterior, en el presente trabajo se trabajó indistintamente ambos términos.

El coeficiente del cultivo ( $k_c$ ) es un valor adimensional y describe la variación de agua extraída del suelo realmente por la planta, en todo el periodo de ésta desde la siembra hasta la cosecha por efecto de la evaporación y la transpiración. Por ello es importante establecer las necesidades de agua totales para el desarrollo adecuado de los cultivos y así lograr optimizar el recurso hídrico, porque de lo contrario, puede presentarse el uso irracional del agua en los sistemas de riego, que provoca efectos negativos como saturación de los estratos inferiores y la filtración del agua en estratos permeables [14] [15] [16]. Por otra parte, los factores que inciden en los valores  $K_c$  son las características biológicas que distinguen a un cultivo, como albedo, características de los estomas, forma y fisiología de las hojas de las plantas, área foliar, altura del cultivo, densidad

de las plantas, fecha y época de siembra, el ritmo de desarrollo del cultivo, la duración del periodo vegetativo y expresa la variación de su capacidad en conjunto con la evapotranspiración potencial para extraer el agua del suelo y por ello se utiliza para determinar la demanda hídrica del cultivo [17] [18] [19] [20].

### **El cultivo de cebolla**

La cebolla pertenece al género *Allium*, que cubre cerca de 500 especies, las cuales presentan bulbos que se desarrollan bajo el suelo. La clasificación taxonómica es la siguiente [21]:

- 1) Clase: Liliopsida.
- 2) Subclase: Lilidae.
- 3) Super orden: Liliales.
- 4) Orden: Amarillidales.
- 5) Familia: Alliaceae.
- 6) Subfamilia: Allioideae.
- 7) Tribu: Allieae.
- 8) Género y especie: *Allium cepa* L.

Se considera la segunda hortaliza en importancia en el mundo después del tomate. Los primeros registros del cultivo datan de cerca de 4000 años y fueron encontrados en Egipto, lo que indica que es una de las hortalizas domesticadas más antiguas. Debido a sus características de buena conservación postcosecha la cebolla viene a ser una de las hortalizas de mayor tránsito global [22].

En la zona norte de Cartago, Costa Rica y en muchas zonas productoras del País, el cultivo en ambientes abiertos inicia con una preparación de suelos a 20 cm de profundidad por medio de un labrado del suelo a curvas de nivel [23], donde normalmente la profundidad efectiva de las raíces se encuentra entre 20 cm y 30 cm. Se recomienda realizar uno o dos pasos de rastra para desmenuzar los terrones, es necesario considerar que la profundidad del suelo sea entre 20 y 30 cm para un mejor desarrollo del bulbo [24].

La planta de cebolla puede llegar aproximadamente a 60 cm de altura, la cual presenta hojas tubulares y cerosas, el tallo es un disco comprimido en la base de la planta de donde parten las raíces [25]. Las raíces son tiernas, finas, poco ramificadas y bien provistas de pelos absorbentes en el tercio medio inferior, donde 15 días antes de la bulbificación, la cantidad de raíces se duplica y hasta se triplica en los primeros 20 cm de profundidad, lo cual indica que es un periodo crítico para el suministro de agua [22]. La raíz de la cebolla es de tipo pivotante luego de la emergencia de la radícula; sin embargo, a los pocos días pierde esta dominancia y se convierte en un sistema

de raíces adventicias que emergen de la base del tallo, de grosor uniforme y color blanquecino, poco ramificadas y sin pelos radicales [26].

Los rendimientos en Costa Rica se encuentran en un ámbito de 17,65 a 39,16 tn ha<sup>-1</sup> (toneladas métricas por hectárea), y un promedio de producción de 28,40 tn ha<sup>-1</sup>. El rendimiento promedio mundial fue de 19,00 tn ha<sup>-1</sup> entre los años 2014 y 2018 [27].

La cebolla es una hortaliza sensible al déficit hídrico que necesita una buena disponibilidad de agua en el suelo con riegos frecuentes para un buen desarrollo. No obstante, el exceso de agua aunado a altas temperaturas es perjudicial, pues la incidencia de patógenos reduce el crecimiento y en consecuencia la producción y la calidad de los bulbos. Por ello el manejo correcto del riego es indispensable, donde se debe de ajustar a las condiciones de manejo para cada momento del cultivo [28].

Trabajos desarrollados en Brasil en la región del Norte de Minas Gerais indican un consumo que varía entre 500 y 670 mm durante el ciclo de la cebolla, que corresponde a una lámina de agua entre 4,17 y 5,58 mm d<sup>-1</sup> [29], mientras en Perú se menciona un consumo de 450 mm a 500 mm cuando se utiliza riego por goteo y de 700 a 750 mm de agua cuando se utiliza riego por gravedad [30] y en Chile se reporta un consumo de 556 mm en riego por goteo y de 1111 mm en el caso de riego por gravedad en surcos [31].

### **Invernaderos**

Todo abrigo o encierro de construcción donde el acondicionamiento puede ser controlado y se siembran cultivos hortícolas u ornamentales, puede considerarse como un invernadero. También se dice que es aquella construcción, donde las cubiertas y paredes son transparentes y dejan pasar la luz, que se emplea para cultivar plantas mediante el control del clima en que se desarrollan. Los invernaderos permiten la producción sistemática y fuera de estación de productos horto–frutícolas, convirtiéndose en instrumentos de trabajo que permiten controlar eficazmente los rendimientos en calidad y cantidad [32] [33].

Un aspecto por tomar en cuenta para establecer sistemas de producción sostenible es la disminución gradual del uso de pesticidas, hasta llegar a utilizar controles naturales de plagas. En Costa Rica la presión de plagas y enfermedades es tan alta en cultivos a campo abierto, que obliga al agricultor a hacer uso de los plaguicidas como alternativa unilateral para su control.

En los sistemas de producción en ambientes protegidos se favorece la sostenibilidad y se promueve las prácticas acordes con la agricultura alternativa. La creación de microclimas favorables a la producción de hortalizas puede ser visto como una práctica favorable a favor de la sostenibilidad y un sistema protegido de producción de hortalizas puede hacer una utilización

más eficiente del recurso agua; se puede almacenar agua de lluvia recolectada por las canaletas del invernadero y ser utilizada como agua para riego o fertirriego y utilizar además sistemas de aplicación del agua de tipo localizado que favorecen la eficiencia de su calidad y cantidad [32] [33] [34].

### **Relación suelo agua - Capacidad de Retención de humedad**

Los suelos tienen humedad de acuerdo con sus características físicas y químicas. El agua en el suelo es retenida principalmente por los fenómenos de cohesión y adhesión. En el suelo las partículas minerales retienen el agua de acuerdo con superficie específica de éstas. La fuerza con que las partículas retienen el agua es conocida como potencial mátrico del agua. El término retención de humedad está íntimamente ligado a la disponibilidad de agua para las plantas [35] [36] [37].

Existen tres puntos característicos de humedad en el suelo:

- 1- La humedad de saturación (HSS), es el contenido de humedad cuando el suelo está saturado y en cuyo caso el potencial de agua del suelo es cero. Esta característica es utilizada en los estudios de agua subterránea y drenaje. La saturación depende de la textura, estructura y densidad aparente del suelo y especialmente de la porosidad de este. En la práctica, se considera igual a la porosidad total.
- 2- La capacidad de campo (CC), es el contenido máximo de humedad del suelo en condiciones de buen drenaje. En otras palabras, es el contenido de humedad de un suelo, previamente saturado, luego de la acción de la gravedad. La capacidad de campo puede ser determinada en el campo o en el laboratorio. Para determinarla en el campo se requiere saturar el suelo y luego determinar el contenido de humedad a varios intervalos de tiempo hasta que el contenido de humedad se torne constante, lo cual ocurre al cabo de unas 48 horas. La capacidad de campo determinada en el laboratorio es aquella que corresponde a una succión de  $-0,33 \text{ MPa} \times 10^{-1}$ .
- 3- El punto de marchitez permanente (PMP), representa el contenido de humedad del suelo en el cual las plantas se marchitan permanentemente. Al igual que las otras características, depende altamente de la textura y estructura del suelo. La determinación del punto de marchitez permanente se determina en el laboratorio y corresponde al contenido de humedad a una succión de  $-15 \text{ MPa} \times 10^{-1}$ .

Al contenido de humedad entre saturación y la capacidad de campo se le denomina agua drenable o porosidad drenable y al contenido de humedad entre capacidad de campo y punto de

marchitez permanente se le denomina agua útil o agua aprovechable o agua disponible para las plantas [38] [39] [36] [40].

### **Ámbitos de succión de humedad del suelo para el cultivo de cebolla**

En condiciones de ambiente abierto se ha encontrado que las succiones crecientes de agua en el suelo se relacionan de manera inversa con la masa de los bulbos y de manera directa con las láminas de riego aplicadas y se informa de un máximo de succión de agua en el suelo de -15 kPa [28]. También se afirma que para cultivos hortícolas cuando son irrigadas por medio del riego por goteo, donde solamente se moja una fracción de suelo, el potencial matricial no debe ser menor a -40 kPa [41]. En condiciones de invernadero, con riego por goteo, se recomienda mantener el agua del suelo en succiones no mayores a -40kPa [42].

Campos de cebolla sometidos a déficits hídricos moderados con tensiones entre -70 y -100 kPa pueden tener reducciones de producción de bulbos hasta en un 30% [43] [44]. En cultivos en ambientes protegidos se recomienda que en presencia de enfermedades fungosas y bacterianas y/o nemátodos, mantener el suelo con menor contenido de humedad y, por ende una mayor succión, en ámbitos máximos de -30 a -50 kPa [45].

## 2. Objetivos

### 2.1. Objetivo general

Evaluar el comportamiento del cultivo de cebolla (*Allium cepa*) c.v. Álvara ante un déficit hídrico creciente inducido por medio de diferentes ámbitos de succión de agua en el suelo, establecido en invernadero con respecto al rendimiento, absorción nutricional, biomasa, captura CO<sub>2</sub> y de transformación de este último en glucosa.

### 2.2. Objetivos específicos

1. Determinar para el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) c.v. Álvara el efecto del déficit hídrico creciente sobre la producción de bulbos frescos, la producción de biomasa de los distintos órganos y la asimilación de nutrimentos principales establecido en invernadero.
2. Cuantificar para el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) c.v. Álvara el efecto del déficit hídrico creciente sobre la captura de CO<sub>2</sub> y la producción y partición de la glucosa producida establecido en invernadero.
3. Determinar cuáles son los ámbitos de succión de agua en el suelo más recomendables para el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) c.v. Álvara que maximicen la eficiencia del uso del agua.
4. Cuantificar para el cultivo de cebolla (*Allium cepa* L) c.v. Álvara establecido en invernadero la evapotranspiración real del ciclo productivo y los coeficientes de cultivo (kc) para 6 diferentes formulaciones propuestas para la estimación de la evapotranspiración potencial

### 3. Síntesis

La presente propuesta de investigación está orientada hacia generar conocimiento en el uso eficiente del agua aplicado en el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) c.v. Álvara en condiciones de invernadero, a través de la determinación del requerimiento hídrico óptimo.

El cultivo de cebolla se estableció en un invernadero, en Pacayas, Cartago, Costa Rica, que presentó durante el periodo de investigación una temperatura media de 22 °C, humedad relativa media del 80% y radiación solar media de 4,16 mm d<sup>-1</sup> (118 W m<sup>-2</sup>); se establecieron en el suelo, contenido en macetas de 44 litros, potenciales matriciales crecientes en un ámbito de -5 a -45 kPa.

La respuesta del cultivo se midió en términos de biomasa total, cosecha, absorción de nutrientes, CO<sub>2</sub> asimilado y partición de la glucosa producida.

Para establecer los ámbitos crecientes de succión de agua en el suelo se instalaron tensiómetros electrónicos y mecánicos a una profundidad máxima de 15 cm en el suelo, que es donde se encuentra la mayor concentración de raíces del cultivo de cebolla. Se hicieron pre-experimentos, donde se midió tiempos de riego, cantidad de agua aplicada y succiones de humedad alcanzados, para ajustar la manera de operar el sistema de riego.

Se utilizó un suelo volcánico (Vitrandis) de textura franco-arenosa (68,4% arena, 11,2% arcilla y 20,4% limos) y densidad aparente de 0,88 g l<sup>-1</sup>, mezclado con un 15% de gravilla fina (2-5 mm de diámetro). El suelo mostró contenidos de Ca 8,5 cmol (+) l<sup>-1</sup>; de Mg 3,2 cmol (+) l<sup>-1</sup>; de K 0,83 cmol (+) l<sup>-1</sup>; con pH 5,7 y acidez de 0,15 cmol(+) l<sup>-1</sup>. Se aplicaron sales hidrosolubles por medio del sistema de riego por goteo, en cantidades de 200 kg ha<sup>-1</sup> de N, 100 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 150 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, 80 kg ha<sup>-1</sup> de CaO, 60 kg ha<sup>-1</sup> de MgO y 50 kg ha<sup>-1</sup> de S que corresponde a la fertilización recomendada para este cultivo en la región.

Para la presente investigación se utilizó un diseño experimental irrestricto al azar, ya que las unidades experimentales fueron homogéneas al estar dentro de un invernadero y además, este diseño experimental es robusto cuando se presenta un número diferente de repeticiones entre los tratamientos. Se calcularon los análisis de variación (ANDEVA) para cada una de las variables evaluadas y para algunas se realizaron análisis de regresión y correlación.

De la investigación se logró escribir los siguientes artículos:

- 1- Evapotranspiración de referencia, evapotranspiración real y el coeficiente de cultivo para el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) c.v. Álvara promedio en invernadero. (Tecnología en

Marcha:

[https://www.researchgate.net/publication/372048587\\_Evapotranspiracion\\_de\\_referencia\\_evapotranspiracion\\_real\\_y\\_el\\_coeficiente\\_de\\_cultivo\\_para\\_el\\_cultivo\\_de\\_cebolla\\_Allium\\_cepae\\_cv\\_Alvara\\_promedio\\_en\\_invernadero](https://www.researchgate.net/publication/372048587_Evapotranspiracion_de_referencia_evapotranspiracion_real_y_el_coeficiente_de_cultivo_para_el_cultivo_de_cebolla_Allium_cepae_cv_Alvara_promedio_en_invernadero)

- 2- Efecto de diferentes tensiones del agua en el suelo sobre la absorción nutricional de macronutrientes en el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) c.v. Álvaro en invernadero. (Tecnología en Marcha: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9273879>)
- 3- Efecto de la succión del agua en el suelo sobre la productividad agrícola y rentabilidad del agua en el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) c.v. Álvaro cultivado en invernadero (aceptado para publicación)
- 4- Efecto de diferentes succiones del agua en el suelo sobre la absorción de CO<sub>2</sub> y la producción de glucosa en el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) c.v. Álvaro en invernadero (propuesto y en evaluación para publicación)
- 5- Efecto de diferentes succiones del agua en el suelo sobre la eficiencia de uso del agua en el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) c.v. Álvaro en invernadero (propuesto y en evaluación para publicación)

El objetivo específico 1 se desarrolló en los artículos 2, 3 y 5; el objetivo específico 2 se desarrolló en los artículos 4 y 5 y el objetivo específico 3 se desarrolló en los artículos 1, 3 y 5.

## 4. Artículo 1

**Evapotranspiración de referencia, evapotranspiración real y el coeficiente de cultivo para el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) c.v. Álvara promedio en invernadero (Tecnología en Marcha Vol. (36), No. 3, Julio-Setiembre, 2023)**

**Reference evapotranspiration, actual evapotranspiration and crop coefficient for onion (*Allium cepa*) c.v. Alvara average in greenhouse.**

M.Sc. Adrián Enrique Chavarría Vidal

adchavarria@itcr.ac.cr

Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Universidad Nacional – Universidad Estatal a Distancia

iD: <http://orcid.org/0000-0003-1647-8212>

Dr. Mario Morales Sánchez

Profesor Jubilado

mario.morales@ucr.ac.cr

Dr. Freddy Soto Bravo Autor

freddy.sotobravo@ucr.ac.cr

Universidad de Costa Rica, Estación Experimental

Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica.

iD: <http://orcid.org/0000-0003-1959-9597>

### Resumen

La necesidad de conocer el consumo de agua que un cultivo tiene en el transcurso de su periodo vegetativo sea este anual o perenne, es fundamental debido al cambio climático en desarrollo el cual manifiesta tanto una baja en la cantidad de agua precipitada en diferentes zonas de nuestro país Costa Rica como una concentración de estas precipitaciones. Además, es necesario ser eficiente y eficaz en el uso del recurso hídrico para riego en la agricultura tanto en ambientes abiertos como protegidos y por medio de ello, procurar el desarrollo sostenible. Para lograr esto, es menester conocer los valores de evapotranspiración de referencia, evapotranspiración real y el coeficiente del cultivo con el fin de estimar y proyectar aplicaciones de agua por medio de sistemas de riego lo más ajustadas a la realidad posible.

Por generaciones se ha utilizado valores del coeficiente del cultivo independientemente del método matemático de estimación de la evapotranspiración de referencia, sin conocer si existen diferencias o no en los resultados obtenidos en los consumos de agua estimados. No obstante, por medio de métodos

matemáticos de estimación de la evapotranspiración de referencia, utilizando datos de la humedad relativa, temperatura y radiación solar dentro de un invernadero, se encontró diferencia significativa en los valores del coeficiente del cultivo. En las metodologías de Ivanov y Camargo no se encontró diferencia significativa entre ellos pero si se encontró diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) con respecto a las metodologías de Benavidez, Linacre, Hargreaves y Turc; las metodologías de Benavidez y Linacre presentaron diferencias significativa ( $p < 0,05$ ) tanto entre ellos, como con respecto a las metodologías de Ivanov, Camargo, Hargreaves y Turc; Hargreaves y Turc no presentaron diferencia significativa entre ellos pero si se encontró diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) con respecto a las metodologías de Ivanov, Camargo, Benavidez y Linacre.

### **Palabras Claves**

Evapotranspiración de referencia, Consumo de agua, Evapotranspiración real, Cebolla, Invernadero, Recurso hídrico, coeficiente del cultivo.

### **Abstract**

The need to know the water consumption that a crop has during its vegetative period, whether annual or perennial, is essential due to the developing climate change, which manifests both a decrease in the amount of precipitated water in different areas of our country Costa Rica as a concentration of these precipitations. Furthermore, it is necessary to be efficient and effective in the use of water resources for irrigation in agriculture, both in open and protected environments, and through this, seek sustainable development. To achieve this, it is necessary to know the reference evapotranspiration values, real evapotranspiration and the crop coefficient in order to estimate and project water applications through irrigation systems as closely adjusted to reality as possible.

For generations, values of the crop coefficient have been used independently of the mathematical method of estimating the reference evapotranspiration, without knowing whether or not there are differences in the results obtained in the estimated water consumption. However, through mathematical methods for estimating reference evapotranspiration, using data on relative humidity, temperature and solar radiation inside a greenhouse, a significant difference was found in the crop coefficient values. In the methodologies of Ivanov and Camargo, no significant difference was found between them, but significant differences were found ( $p < 0.05$ ) with respect to the methodologies of Benavidez, Linacre, Hargreaves and Turc; The Benavidez and Linacre methodologies presented significant differences ( $p < 0.05$ ) both between them and

with respect to the Ivanov, Camargo, Hargreaves and Turc methodologies; Hargreaves and Turc did not present a significant difference between them, but significant differences were found ( $p < 0.05$ ) with respect to the methodologies of Ivanov, Camargo, Benavidez and Linacre.

## Keywords

Reference evapotranspiration, water consumption, actual evapotranspiration, Onion, Greenhouse, Hidric resource, crop coefficient.

## Introducción

Ante el cambio climático que manifiesta para nuestro país disminución de las precipitaciones anuales en algunas áreas juntamente con concentración de dichas precipitaciones, de lo cual se esperan impactos económicos, se hace menester en la producción agrícola un manejo de recurso hídrico de manera eficiente, eficaz, racional y en armonía con el ambiente. No obstante, el sector agrícola es el segundo mayor consumidor de agua principalmente para la producción de alimentos [1]. Lo anterior nos conlleva a la necesidad de aplicar el agua que realmente necesitan los cultivos, sin desperdicio ni falta de dicho recurso y para lograr este objetivo se necesita medir el consumo.

Usualmente para la estimación de los consumos de agua de los siembros se utiliza la evapotranspiración del cultivo (Etc) en los diseños y operación de sistemas de riego y aplicaciones de la estimación del recurso hídrico en general. Ésta se calcula mediante el producto de la evapotranspiración de referencia (Eto) la cual se estima a través de diferentes ecuaciones o modelos matemáticos y variables ambientales que se multiplica por un coeficiente del cultivo (Kc) normalmente tomado de informaciones teóricas provenientes de diferentes latitudes, suelos, climas, regiones y otros, con respecto a nuestra localidad [2]. Ante esta situación, no se sabe si los resultados obtenidos son correctos. Como tal, se necesita conocer si existe diferencia en los resultados de estimación de los consumos de agua y en el caso de ser positivo, nos indicaría que el procedimiento realizado para dichas estimaciones debe ser corregido.

La evapotranspiración de referencia (Eto) es la tasa de evapotranspiración de una extensa superficie de grama en crecimiento activo, cubriendo totalmente el suelo, con una altura de entre 8 y 15 cm de altura, con índice de área foliar de alrededor de 3, sin restricciones hídricas y con un amplio borde para evitar la advección de calor sensible de áreas adyacentes. La evapotranspiración en estas condiciones depende principalmente de las variables meteorológicas, por lo que la Eto es un parámetro meteorológico que expresa el potencial de evapotranspiración para las condiciones meteorológicas vigentes [3]. Por ello para

la estimación de la evapotranspiración de referencia se usan principalmente variables ambientales como radiación solar, temperaturas máximas, mínimas, medias y amplitud de éstas, humedad del aire, viento, presión atmosférica y otros.

Evapotranspiración del cultivo Etc es la que se presenta en el crecimiento y desarrollo de éste sin restricciones hídricas, en condiciones óptimas de crecimiento con un borde ampliado para evitar una advección de calor sensible proveniente de áreas adyacentes. Como es el resultado del producto de la evapotranspiración de referencia y el coeficiente del cultivo, es una estimación de un consumo de agua la cual no necesariamente se ajustada a la realidad del consumo de agua [4].

Evapotranspiración real (Etr) es la que se presenta en las mismas condiciones que la evapotranspiración potencial en un cultivo específico, pero con o sin restricciones hídricas la cual, viene a ser lo que realmente se consume de agua por parte de éste debido a la suma de los dos efectos que son la evaporación y la transpiración [5]. Esta no se estima, sino que se mide por algún método directo o indirecto y en términos de riego eficiente para la producción, se procede a regresar únicamente lo que se consumió de agua. Para lograr una medida de manera correcta se parte de un suelo que se encuentra a capacidad de campo real donde las plantas se encontrarán siempre en el rango de agua fácilmente disponible [6].

El coeficiente del cultivo ( $K_c$ ) depende del cultivo, la fase de crecimiento, el estado de crecimiento y las condiciones climáticas predominantes. Representa la evapotranspiración para condiciones de cultivo óptimas de forma de que estos logren su potencial productivo y que estén sometidos a un manejo agronómico apropiado a las condiciones del medio a un manejo del agua que evite el estrés [7]. Además, el  $K_c$  debe ser determinado para las condiciones locales en las cuales será utilizado [8].

## Metodología

Para el desarrollo de la investigación sobre la existencia o no de diferencias significativas entre los diferentes  $k_c$  provenientes de métodos de estimación de la  $E_{to}$  según las variables meteorológicas que se usen, se escogió el cultivo de cebolla en ambiente protegido. Éste cultivo, es de ciclo corto y alta densidad de siembra que necesita un grosor de suelo cómo mínimo de 20 cm de profundidad donde las raíces son tiernas, finas, poco ramificadas y bien provistas de pelos absorbentes en tercio medio inferior donde, usualmente 15 días antes de la bulbificación la cantidad de raíces se duplica y hasta se triplica en los primeros 20 cm de profundidad, lo cual indica que es un periodo crítico para el suministro de agua donde se procura una buena producción de bulbos [9]. También se reporta que el cultivo de cebolla tiene su profundidad de raíces efectivas de los 10 cm a los 20 cm [10].

La investigación se llevó a cabo en el cantón de Alvarado, distrito Pacayas, de la provincia de Cartago; específicamente en un ambiente protegido ubicado en Patalillo (Barrio Fátima) con una altura de 1600 msnm, precipitación de 2299,8 mm al año en promedio, temperatura promedio de 16,5 °C, brillo solar promedio de 4,3 horas al día y humedad relativa promedio del 88 % [11].

No se sembró en el suelo del invernadero de manera directa debido a que se encontraba protegido con “cover” de color negro y por ello se utilizaron canastas de 35,0 cm de ancho; 55,0 cm de largo y 20,0 cm de alto llenas con suelo franco de origen volcánico (Vitrand) mezclado con 15% grava fina y arena muy gruesa con origen calcáreo (un tipo de sustrato). En las canastas se logró una altura de suelo total de 20,00 – 23,00 cm para un total máximo de 44,00 l de suelo. El riego se realizó con un sistema por goteo el cual dotó de 7,80 l h<sup>-1</sup> a cada canasta que contó con 12 plantas sembradas. Estos 7,80 l h<sup>-1</sup> se aplicó por medio de 6 goteros donde cada una de ella corresponde a un gotero de 1,30 l h<sup>-1</sup> distribuidas uniformemente en cada una de las canastas. Se sembró el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) c.v. Álvara para establecer el experimento con 4,50 meses de periodo del cultivo; se contó con 4 tratamientos, a saber 4 diferentes rangos de succión de humedad del suelo (partiendo al inicio cuando se realiza el trasplante del cultivo de cebolla) del punto de capacidad de campo de la siguiente manera:

- 1- Tratamiento 1, con 4 repeticiones: rango de succión de agua en el suelo de -5 a -15 kPa
- 2- Tratamiento 2 con 3 repeticiones: rango de succión de agua en el suelo de -15 a -25 kPa
- 3- Tratamiento 3 con 4 repeticiones: rango de succión de agua en el suelo de -25 a -35 kPa
- 4- Tratamiento 4 con 3 repeticiones: rango de succión de agua en el suelo de -35 a -45 kPa

El invernadero tiene 30,00 m de largo y 11, 50 m de ancho para un área total de 345 m<sup>2</sup>. Se establecieron camas por medio de la unión de canastas en la disposición espacial de 4 canastas a lo ancho y 16 canastas a lo largo de cada cama, para un total de 64 canastas por cama. A lo largo del invernadero se establecieron 14 camas donde se presentó un gran total de 896 canastas dentro del invernadero. El número total de plantas fue de 10752 como máximo.

Cada canasta tenía rendijas grandes en las paredes y en el fondo por lo que se necesitó “cover” perforado para no perder el suelo, pero con orificios para el drenaje y la aireación de esta. No obstante, el suelo estuvo siempre en succión según los tratamientos y en estas condiciones no existió drenaje.

Se colocó un tensiómetro mecánico por tratamiento para tener el control del riego bajo succión juntamente con tensiómetros eléctricos en todas las repeticiones de los tratamientos. Se tomaron datos temperatura, humedad relativa y radiación fotosintéticamente activa (PAR) con el objetivo de estimar la evapotranspiración de referencia por diferentes métodos conforme los datos obtenidos lo permitieron.

Existen varias unidades de radiación las cuales se relacionan entre sí y se pueden proporcionar constantes de conversión y fórmulas. La conversión de unidades es relativamente simple el cual es un proceso

matemático, sin embargo, cuando se usan estos factores de conversión, contiene error tanto de conversión como de medición donde la incertidumbre asociada con la conversión de unidades de radiación de fuentes de tipo genérico utilizando los factores de conversión es menos del 10%. La conversión de PAR a radiación solar (Rs) utiliza los fotones a diferentes longitudes de onda que tienen diferentes energías, por lo que se debe saber tanto el número de fotones por unidad de longitud de onda en cada longitud de onda y la energía por fotón en cada longitud de onda para calcular la energía total. Este es un proceso complejo que se ha simplificado a la división por una constante conocida [12].

$$Rs \left( \frac{W}{m^2} \right) = \frac{PAR \left( \frac{\mu mol}{m^2 * s} \right)}{4,98} \dots \dots \dots ec 1$$

$$Rs \left( \frac{mm}{d} \right) = 0,0353 * Rs \left( \frac{W}{m^2} \right) \dots \dots \dots ec 2$$

$$PAR \left( \frac{Mj}{m^2 * d} \right) = \frac{PAR \left( \frac{\mu mol}{m^2 * s} \right) * t \left( \frac{s}{d} \right)}{1000000} \dots \dots \dots ec 3$$

[13]

Donde:

Rs: radiación solar

PAR: radiación fotosintéticamente activa

La radiación solar en el tope de la atmósfera por unidad de área y tiempo tiene un valor promedio de 1367 W (m<sup>2</sup>)<sup>-1</sup>, la cual se define como la constante solar y tiene una variación alrededor del 1,5% a través del año [14].

La evapotranspiración potencial se estimó por diferentes métodos como se muestran a continuación:

El método de Hargreaves y Samani [15] requiere de menor cantidad de parámetros de entrada para estimar la evapotranspiración potencial permitiendo obtener la evapotranspiración potencial de una manera más simple.

$$Eto = 0,408 * \left[ 0,0023 * Ra * (Tmed + 17,8) * \sqrt{(Tmax - Tmin)} \right] \dots \dots \dots ec 4$$

donde:

Eto = Evapotranspiración potencial (mm d<sup>-1</sup>)

Tmax = temperatura máxima diaria del aire (°C)

Tmin = temperatura a mínima diaria del aire (°C)

Tmed = temperatura media diaria del aire (°C)

$Ra$  = radiación en el tope de la atmósfera ( $MJ (m^2*d)^{-1}$ )

También puede utilizarse la siguiente expresión variando las unidades de  $Ra$  [16]:

$$Eto = 0,0023 * Ra * (Tmed + 17,8) * \sqrt{(Tmax - Tmin)} \dots \dots \dots ec 5$$

donde:

$Ra$  = radiación en el tope de la atmósfera ( $mm d^{-1}$ )

Cuadro 1: Radiación solar en diferentes latitudes para Costa Rica

**Radiación extraterrestre (Ra) de latitud norte expresado en milímetros equivalentes por día (mm/d) tabulado por mes**

LAT	Ene.	Feb.	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
12	12.8	13.9	15.1	15.7	15.7	15.5	15.5	15.6	15.2	14.4	13.3	12.5
10	13.2	14.2	15.3	15.7	15.3	15.3	15.3	15.5	15.3	14.7	13.6	12.9
8	13.6	14.5	15.3	15.6	15.0	15.0	15.1	15.4	15.3	14.8	13.9	13.3
6	13.9	14.8	15.4	15.4	14.7	14.7	14.9	15.2	15.3	15.0	14.2	13.7

**Radiación solar extraterrestre Ra latitud Norte en  $MJ/(m^2*d)$**

Latitud norte	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
12	30,9	33,8	36,5	38	38	37,6	37,6	37,8	36,9	34,5	31,5	30
10	31,9	34,5	36,9	37,9	37,6	37	37,1	37,5	37,1	35,1	32,4	31
8	32,8	35,2	37,2	37,8	37,1	36,3	36,5	37,2	37,2	35,6	33,3	32
6	33,7	35,8	37,4	37,6	36,6	35,7	35,9	36,9	37,3	36,1	34,1	32,9

Tomado de [17]

Equivalencias de conversión de unidades:

$$\# \left( \frac{mm}{d} \right) = 0,408 * \# \left( \frac{MJ}{m^2*d} \right) \quad \text{o} \quad \# \left( \frac{mm}{h} \right) = 0,001469 * \# \left( \frac{W}{m^2} \right) \quad \text{o} \quad \# \left( \frac{MJ}{m^2*d} \right) = 2,45 * \# \left( \frac{mm}{d} \right)$$

$$\# \left( \frac{mm}{d} \right) = 8,64 * \# \left( \frac{l}{s*ha} \right) \quad \text{o} \quad \# \left( \frac{l}{s*ha} \right) = 0,1157 * \# \left( \frac{mm}{d} \right)$$

$$\# \left( \frac{mm}{d} \right) = 0,1 * \# \left( \frac{m^3}{ha*d} \right) \quad \text{o} \quad \# \left( \frac{m^3}{ha*d} \right) = 10 * \# \left( \frac{mm}{d} \right)$$

$$\frac{MJ}{m^2*d} = 0,0864 * \# \left( \frac{W}{m^2} \right) \quad \text{o} \quad \frac{MJ}{m^2*h} = 0,0036 * \# \left( \frac{W}{m^2} \right)$$

$$\frac{W}{m^2} = 11,5741 * \# \left( \frac{MJ}{m^2*d} \right) \quad \text{o} \quad \frac{W}{m^2} = 27,7778 * \# \left( \frac{MJ}{m^2*h} \right)$$

$$1 \frac{l}{s} = 1 W$$

El método de Benavidez y López relaciona la evapotranspiración de referencia con la humedad relativa y la temperatura con la siguiente ecuación [18]:

$$Eto = 1,21 * 10^{\left( \frac{7,45*t}{234,7+t} \right)} * (1 - 0,01 * HR) + 0,21 * t - 2,30 \dots \dots \dots ec 6$$

Donde:

T = temperatura ( $^{\circ}C$ )

HR = Humedad relativa (%)

EL método de Camargo fue desarrollado analizando los resultados de la ecuación de Thornthwaite proponiendo una fórmula más simple, pero con la misma eficiencia en la evapotranspiración de referencia en periodos de 10 a 30 días. Este método utiliza la siguiente ecuación para estimar la Eto [19]:

$$Eto = 0,01 * Qo * T \dots \dots \dots ec 7$$

donde:

$Qo$  = radiación solar global extraterrestre según el mes (mm evaporación equivalente día<sup>-1</sup>)

$T$  = Temperatura media del aire (°C)

$ND$  = Número de días del período considerado

El método de Linacre utiliza la temperatura promedio del día, el porcentaje de humedad relativa, la elevación de la ubicación del estudio y la latitud en grados [20]

$$To = \frac{237,7 \left( \frac{17,27 * Tmed}{237,7 + Tmed} + \ln \left( \frac{\%HR}{100} \right) \right)}{17,27 - \left( \frac{17,27 * Tmed}{237,7 + Tmed} + \ln \left( \frac{\%HR}{100} \right) \right)} \dots \dots \dots ec 8$$

$$Eto = \frac{700 * \frac{(Tmed + 0,006 * Z)}{(100 - L)} + 15 * (Tmed - To)}{80 - Tmed} \dots \dots \dots ec 9$$

donde:

$Eto$  = evapotranspiración (mm d<sup>-1</sup>)

$Tmed$  = temperatura promedio (°C)

$To$  = temperatura punto de rocío (°C)

$Z$  = altura (msnm)

$L$  = latitud (°)

$\%HR$  = porcentaje de la humedad relativa

El método de Turc para humedad relativa menores al 50% se utiliza la siguiente ecuación [21]:

$$Eto = 0,013 * \left( \frac{Tmed}{Tmed + 15} \right) * (Rs * 23,8846 + 50) * \left( 1 + \frac{50 - \%HR}{70} \right) \dots \dots \dots ec 10$$

Para humedad relativa mayores al 50% se utiliza la siguiente ecuación:

$$Eto = 0,013 * \left( \frac{Tmed}{Tmed + 15} \right) * (Rs * 23,8846 + 50) \dots \dots \dots ec 11$$

donde:

$Eto$  = evapotranspiración (mm d<sup>-1</sup>)

$T_{med}$  = temperatura promedio ( $^{\circ}\text{C}$ )

$R_s$  = radiación solar ( $\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}$ )

El método de Ivanov utiliza la temperatura media y el porcentaje de humedad relativa para estimar la evapotranspiración de referencia [20]:

$$E_{to} = 0,006 * (25 + T_{med})^2 * \left(1 - \frac{\%HR}{100}\right) \dots \dots \dots ec 12$$

donde:

$E_{to}$  = evapotranspiración ( $\text{mm d}^{-1}$ )

$T_{med}$  = temperatura promedio ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\%HR$  = porcentaje de humedad relativa

La evapotranspiración real se mide con base en la ecuación del balance hídrico se tiene [22]:

$$E_{tr} = \text{Agua entra} - \text{agua sale} \pm \text{agua en el suelo} \dots \dots \dots ec 13$$

donde:

Agua que entra: es el agua de lluvia o de riego o de capas superiores que llegan al área de estudio sea de manera superficial o subsuperficial ( $\text{mm}$  de agua) en un periodo de tiempo

Agua que sale: es la que se pierde del suelo por percolación o por drenaje natural o por drenaje artificial y también la que sale por evapotranspiración ( $\text{mm}$  de agua) en un periodo de tiempo

Agua en el suelo: es la variación del agua que queda en el suelo ( $\text{mm}$  de agua) en un periodo de tiempo

Como el experimento se estableció en un ambiente protegido con un sistema de riego por goteo, se le dio un manejo al contenido de agua en el suelo que se suministró bajo un régimen de succión, donde no se presentó salidas de agua por drenaje y si se presentó la variación del contenido de agua en el suelo donde la ecuación del balance hídrico utilizada queda de la siguiente manera:

$$E_{tr} = \text{Agua entra} \pm \text{agua en el suelo} \dots \dots \dots ec 14$$

$$E_{tr} = I - \Delta S \dots \dots \dots ec 15$$

donde:

$E_{tr}$  = T(transpiración) + E(evaporación), es la evapotranspiración real del cultivo ( $\text{mm}$ ) en un periodo de tiempo

$I$  = dosis de riego ( $\text{mm}$ ) en un periodo de tiempo

$\Delta S$  = cambio de humedad del suelo ( $\text{mm}$ ) en un periodo de tiempo

La evapotranspiración real se midió en las parcelas del tratamiento 1 (T1) donde se tuvieron las mejores condiciones de humedad fácilmente disponible presentes para el cultivo, donde se mantuvo una succión de agua en el suelo en el ámbito de 5 - 15 centibares

Coefficiente del cultivo

Este está definido por la relación matemática que existe entre la evapotranspiración de referencia y la evapotranspiración real

$$Kc = \frac{Etr}{Eto} \dots \dots \dots ec 16$$

$Etr$  = evapotranspiración real (mm d<sup>-1</sup>)

$Eto$  = Evapotranspiración de referencia (mm d<sup>-1</sup>)

$Kc$  = coeficiente del cultivo (adimencional)

## Resultados

La estimación de la evapotranspiración de referencia muestra (cuadro 2) una variabilidad en la estimación del consumo del recurso hídrico total del periodo del cultivo, debido fundamentalmente a las variables atmosféricas. Se presentó que los métodos de Turc y Hargreaves fueron los valores más altos y los métodos de Ivanov y de Camargo valores más bajos.

Cuadro 2: Evapotranspiración de referencia del período total del cultivo de cebolla en invernadero para diversos métodos de cálculo

<b>Metodología</b>	<b>Consumo agua estimado en todo el periodo del cultivo (mm)</b>
Hargreaves y Samani	1007,53
Benavidez y López	539,67
Camargo	504,89
Linacre	822,30
Turc	1097,14
Ivanov	487,33

Del cuadro 3 se puede observar que la evapotranspiración real que se presentó en todo el periodo del cultivo de cebolla es menor a todos los métodos utilizados en la estimación de la evapotranspiración de referencia. No obstante, el método que más se acercó es el de Linacre.

Cuadro 3: Evapotranspiración real del período total del cultivo de cebolla en invernadero para un ámbito de succión del agua del suelo de -5 a -15 kPa

Etr = EvapoTranspiración Real	
	EtrT1(mmTot)
R1	451,5610
R2	432,7515
R3	471,7507
R4	453,9293

La evapotranspiración real como se muestra en el cuadro 3 presentó en los datos obtenidos un promedio de 452,5 mm, varianza de 254,51 y un coeficiente de variación del 3,53 % juntamente con un comportamiento normal. En contraste con los datos estimados de la evapotranspiración de referencia como se muestra en el cuadro 2, presentó un promedio de 743 mm, varianza de 73017 y un coeficiente de variación del 36,36 %. Podemos observar que a pesar de que los métodos de estimación utilizan variables meteorológicas semejantes, los resultados presentan variaciones importantes, posiblemente a que cada método fue establecido y calibrado en zonas diferentes en términos físico-atmosférico.

El coeficiente de cultivo promedio de toda la fase productiva de la cebolla (Fig. 1) sembrada en invernadero para los diferentes métodos de estimación de la evapotranspiración de referencia mostró diferencia altamente significativa ( $P\text{-value} < 0,01$ ).

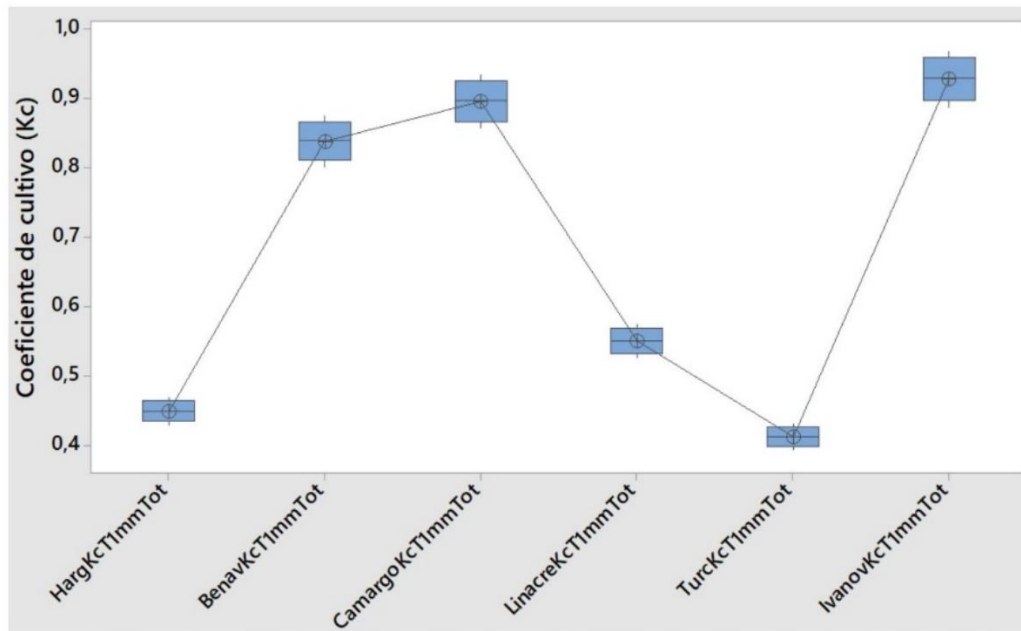


Fig. 1: Variación de los diferentes Kc calculados para el cultivo de cebolla en invernadero

Como se muestra en el cuadro 4 con respecto a los valores de Kc y las diferentes ecuaciones para estimar la Eto, los métodos de Ivanov y Camargo no mostraron diferencia significativa entre ellos, pero si mostraron diferencia significativa (P-value <0,05) con respecto a Benavides, Linacre, Hargreaves y Turc. Los métodos de Hargreaves y Turc no mostraron diferencia significativa entre ellos, pero si mostraron diferencia significativa (P-value <0,05) respecto a Ivanov, Camargo, Benavides y Linacre. Los métodos de Benavides y Linacre mostraron diferencia significativa (P-value <0,05) entre ellos y también con los métodos Ivanov, Camargo Hargreaves y Turc.

Cuadro 4: Agrupación de los Kc promedio para el cultivo de cebolla sembrado en invernadero

Factor	N	Media	95% CI	Grupo
IvanovKcTlmmTot	4	0,9285	(0,9022 - 0,9549)	A
CamargoKcTlmmTot	4	0,8962	(0,8699 - 0,9226)	A
BenavKcTlmmTot	4	0,8385	(0,8121 - 0,8648)	B
LinacreKcTlmmTot	4	0,55028	(0,52391 - 0,57666)	C
HargKcTlmmTot	4	0,44912	(0,42274 - 0,47549)	D
TurcKcTlmmTot	4	0,41244	(0,38606 - 0,43881)	D

Medias con diferentes letras presentan diferencias significativas

## Conclusiones

Existe diferencia significativa en los valores del Kc para el cultivo de cebolla sembrado en invernadero según el método que se utilice para estimar la evapotranspiración de referencia. Esto nos indica que los valores de Kc se deben de medir según el cultivo, las metodologías utilizadas para estimar la evapotranspiración de referencia y de las condiciones ambientales del sistema productivo. No obstante, estas diferencias se presentaron a pesar de que las metodologías utilizadas emplean semejantes variables meteorológicas. Sin embargo, existen metodologías que muestran que el valor de la Eto es semejante a la Etc son aquellas donde el Kc se acerca al valor de uno.

Lo anterior muestra que no existe método mejor o peor en la estimación del consumo del recurso hídrico para un cultivo específico, sino que se deben de utilizar los Kc debidamente medidos y calibrados según el método de estimación de la Eto utilizado. No obstante, esto nos conduce a obtener los mejores ajustes a la metodología utilizada para estimar la Etc y como tal; lograr un uso del recurso hídrico eficiente y eficaz en términos de desarrollo sostenible con respecto al cambio climático.

Por otra parte, expone que no se debe utilizar indiscriminadamente cualquier valor de Kc encontrado en información de diferente procedencia tanto a nivel geográfico como de condiciones del sistema productivo

para estimar los consumos del recurso hídrico de los cultivos, en la operación y diseño de sistemas de riego; sino que, se deben de utilizar los valores de Kc correspondientes para cada metodología de estimación de la Eto empleada según sea el caso.

## Bibliografía

- [1] Ministerio de Ambiente , Energía y Telecomunicaciones Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica, *Escenarios de cambio climático regionalizados para Costa Rica*, San José, 2012, p. 1060.
- [2] H. P. Gomes, *Sistemas de Irrigação: Eficiência Energética*, João Pessoa, Paraíba, 2013, p. 281.
- [3] L. R. Angelocci y P. C. Sentelhas, *Meteorologia Agrícola: Evapotranspiração Definições e Conceitos (Aula # 8)*, Piracicaba, São Paulo, 2012, p. 47.
- [4] Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Departamento de Engenharia e Biosistemas, *Micrometeorologia de Sistemas Agrícolas: Evapotranspiração*, Piracicaba, São Paulo, S.f., p. 32.
- [5] A. . L. Profeta, *Estimativa da evapotranspiração real em área de relevo acidentado utilizando o SEBAL(Dissertação Programa de Pós-Graduação, Universidade Federal de Minas Gerais)*, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2017, p. 80.
- [6] Universidad Autónoma de San Luis de Potosi. Centro de investigación y estudios de posgrad y área agrogeodésica., *Apuntes de la materia de riego y drenaje*, San Luis de Potosí, 2003, p. 164.
- [7] L. Santos Pereira, *Necessidades de água e de rega das culturas: uso de modelos*, Lisboa, Sf., p. 18.
- [8] O. D. Lopes, M. K. Kobayashi, F. G. Oliveira, I. C. A. Alvarenga, E. R. Martins y C. E. Corsato, «Determinação do coeficiente de cultura (Kc) e eficiência do uso de água do alecrim-pimenta irrigado,» *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 15, nº 6, p. 6, 15 marzo 2011.
- [9] Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), *Agrometeorología dos cultivos: O fator meteorológico na produção agrícola*, Brasília - DF, 2009, p. 530.
- [10] R. Testezlaf, *Universidade Estadual de Campinas: Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola.*, São Paulo, Sf..
- [11] E. d. J. Montenegro-Hernández, Cartago, Cartago, 2018, p. 507.

- [12] R. W. Thimijan y R. D. Heins , «Photometric, Radiometric, and Quantum Light Units of Measure: A Review of Procedures for Interconversion,» *American Society for Horticultural Science: HortScienc*, vol. 18, nº 6, pp. 818 - 820, 12 1983.
- [13] A. Rio, R. N. R. Sibaldelli, L. G. T. Crusiol, J. F. C. Carvalho, L. C. Ferreira, W. Neiverth, S. Procopio, A. Almeida, N. Neumaier, A. Nepomuceno y J. R. B. Farias, *VIII Jornada Acadêmica da Embrapa Soja: Resumos expandidos*, P. Saiz-Melo, Ed., São Paulo, São Paulo: Embrapa, 2013, p. 217.
- [14] E. Dias de Freitas, *Universidade de São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico, Departamento de Ciências Atmosféricas, Agrometeorologia*, São Paulo: Departamento de Ciências Atmosféricas do IAG-USP, 2005, p. 153.
- [15] M. G. Da Silva, I. d. S. Oliveira, F. F. Do Carmo, E. R. F. Lêdo y J. A. Da Silva Filho, «Estimativa da Evapotranspiração de Referência Pela Equação de Hargreaves-Samani no Estado do Ceará, Brasil,» *Brazilian Journal of Biosystems Engineering*, vol. 9, nº 2, pp. 132 -141, 8 6 2015.
- [16] G. Arcanjo Reis y M. Moreira de Souza, *Universidade Federal da Grande Dourados: Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal da Grande Dourados*, Dourados, Mato Grosso do Sul, 2019, p. 35.
- [17] A. E. Chavarría Vidal, *Apuntes de clases de Relación Suelo Agua Planta*, Cartago, Cartago, 2012, p. 203.
- [18] W. de Oliveira Santos, B. D. de Oliveira Batista, J. pinheiro de Assis, W. Martins Rodrigues y J. Espínola Sobrinho, «Métodos de Estimativa da Evapotranspiração de Referência (ETO) para a Região de Mossoró-RN,» *Revista Verde (Mossoró – RN – Brasil)*, vol. 5, nº 5, pp. 210 - 221, 12 2010.
- [19] A. R. Pereira, L. R. Angelocci y P. C. Sentelhas, *Meteorología Agrícola*, 3era ed., Piracicaba, São Paulo, 2000, p. 180.
- [20] P. A. L. de Castro, G. O. Santos y R. G. Diniz, «Models for Estimating Reference Evapotranspiration in Different Periods in Rio Verde, Goiás, Brazil,» *Journal of Agricultural Science*, vol. 11, nº 18, pp. 63 - 75, 2019.
- [21] L. da Costa Santos, G. H. Terra Cruz, F. Freire Capuchinho, J. Vieira José y E. F. dos Reis, «Assessment of empirical methods for estimation of reference evapotranspiration in the Brazilian Savannah,» *Australian Journal of Crop Science*, vol. 13, nº 07, pp. 1094 - 1104, 24 07 2019.
- [22] . S. Martínez y M. Garbi, *Climatología y Fenología Agrícola; Evapotranspiración y balance hidrológico del suelo*, La Plata, 2020, p. 18.

## 5. Artículo 2

**Efecto de diferentes tensiones del agua en el suelo sobre la absorción nutricional de macroelementos en el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) c.v. Álvara en ambiente protegido (Tecnología en Marcha Vol. (37), No. 1, Enero-Marzo, 2024)**

**Effect of different water tensions in the soil on the nutritional absorption of macroelements in the cultivation onion (*Allium cepa*) c.v. Álvara in a protected environment**

M.Sc. Adrián Enrique Chavarría Vidal

adchavarría@itcr.ac.cr

Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Universidad Nacional – Universidad Estatal a Distancia

iD: <http://orcid.org/0000-0003-1647-8212>

Dr. Mario Morales Sánchez

Profesor Jubilado

mario.morales@ucr.ac.cr

Dr. Freddy Soto Bravo Autor

freddy.sotobravo@ucr.ac.cr

Universidad de Costa Rica, Estación Experimental

Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica.

iD: <http://orcid.org/0000-0003-1959-9597>

Dr. Asdrúbal Jesús Farías Ramírez

ajfara@gmail.com

Facultad PECEGE. Piracicaba, Sao Paulo, Brasil.

iD: <http://orcid.org/0000-0003-1544-8759>

### Resumen

La humedad en el suelo se puede estudiar de varias maneras, pero una forma fundamental es la succión con que el agua es retenida. La retención que ejerce el suelo o sustrato de suelo en su espacio poroso sobre la humedad es una representación de la cantidad de succión que debe ejercer la planta por medio de sus raíces para poder absorber el agua que se encuentra en el mismo. Si esta magnitud de succión es alta, entonces puede llegar a ser restrictiva para el crecimiento de la planta. El agua que se encuentra en el espacio poroso

llamada usualmente solución del suelo, no se encuentra en estado puro, sino que se encuentra normalmente en disolución y posee elementos químicos que puede o no necesitar la planta para su crecimiento y desarrollo, donde al absorber dicha agua, acarrea también los elementos químicos en disolución. Por estas razones se establecieron 4 tratamientos que consistieron en mantener el suelo en ámbitos de -5 a -15 kPa (kilo Pascales), -15 a -25 kPa, -25 a -35 kPa y de -35 a -45 kPa de succión de agua.

Con respecto a la absorción nutricional que se presentó en el sustrato de suelo, el nitrógeno (N) y el fósforo (P) mostraron diferencia significativa ( $p_{\text{value}} < 0,05$ ) en los ámbitos de succión de agua en el suelo de -5 a -15 kPa, -15 a -25 kPa, -25 a -35 kPa y de -35 a -45 kPa y el Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg) y Azufre (S) mostraron diferencia significativa ( $p_{\text{value}} < 0,05$ ) en los ámbitos de -5 a -15 kPa, -15 a -25 kPa, -25 a -35 kPa, pero no mostraron diferencia significativa ( $p_{\text{value}} > 0,05$ ) en los ámbitos de -25 a -35 kPa y -35 a -45 kPa. Por lo anterior, se concluyó que si existe un efecto inverso del aumento de la succión de agua en el suelo en la disminución de la capacidad de absorción nutricional.

## Palabras Claves

Absorción mineral, retención de humedad, cebolla, riego.

## Abstract

Moisture in the soil can be studied in several ways, but a fundamental way is the suction with which water is retained. The retention that the soil or soil substrate exerts in its pore space on humidity is a representation of the amount of suction that the plant must exert through its roots to be able to absorb the water found in it. If this magnitude of suction is high, then it can become restrictive for plant growth. The water found in the pore space, usually called soil solution, is not found in a pure state, but is normally found in solution and has chemical elements that the plant may or may not need for its growth and development, where by absorbing said Water also carries chemical elements in solution. For these reasons, 4 treatments were established that consisted of maintaining the soil in ranges of -5 to -15 kPa (kilo Pascals), -15 to -25 kPa, -25 to -35 kPa and -35 to -45 kPa suction. of water.

With respect to the nutritional absorption that occurred in the soil substrate, nitrogen (N) and phosphorus (P) showed a significant difference ( $p_{\text{value}} < 0.05$ ) in the ranges of water suction in the soil from -5 to -15 kPa, -15 to -25 kPa, -25 to -35 kPa and -35 to -45 kPa and Potassium (K), Calcium (Ca), Magnesium (Mg) and Sulfur (S) showed a significant difference ( $p_{\text{value}} < 0.05$ ) in the ranges from -5 to -15 kPa, -15 to -25 kPa, -25 to -35 kPa, but did not show a significant difference ( $p_{\text{value}} > 0.05$ ) in the ranges from -25 to -35

kPa and -35 to -45 kPa. From the above, it was concluded that there is an inverse effect of the increase in water suction in the soil on the decrease in nutritional absorption capacity.

## Keywords

Nutrient absorption, moisture retention, onion, irrigation.

## Introducción

Los suelos retienen agua de acuerdo con sus propiedades físicas y químicas y a esta característica se le llama usualmente “Capacidad de Retención de Humedad”. El agua en el suelo es retenida principalmente por los fenómenos de adhesión, cohesión, la tensión superficial y las partículas retienen el agua de acuerdo con su área específica. La fuerza resultante con que estas partículas retienen el agua se denomina potencial mátrico del agua en el suelo y se expresa en  $\text{MPa} \cdot 10^{-1}$  (megapascales). El término retención de humedad o retención de agua en el suelo está íntimamente ligado a la disponibilidad de agua para las plantas [1] [2] [3].

Se han supuesto puntos característicos de retención de humedad en el suelo (Cuadro 1) los cuales son los siguientes:

- 1- Capacidad de campo: la capacidad de campo real (CCr), es el contenido máximo de humedad que un suelo puede retener en contra de la fuerza de la gravedad y la capacidad de campo equivalente (CCe) se determina en el laboratorio y corresponde a la humedad remanente después de haber sido sometido el suelo a una succión de  $-0,33 \text{ MPa} \cdot 10^{-1}$ .
- 2- Punto de marchitez permanente: el punto de marchitez permanente real (PMPr) representa el contenido de humedad del suelo en el cual las plantas se marchitan irreversiblemente, aunque se le aplique agua a la planta; y el punto de marchitez permanente equivalente (PMPe) se determina en el laboratorio y corresponde al contenido de humedad remanente después de haber sido sometido el suelo a una succión de  $-15 \text{ MPa} \cdot 10^{-1}$ .
- 3- Al ámbito del contenido de humedad entre capacidad de campo real y punto de marchitez permanente real se denomina agua útil o agua aprovechable máxima (AUm) y es aquella que pueden utilizar las plantas, y el agua útil actual (AUa) es aquella correspondiente a la diferencia entre la humedad actual y el punto de marchitez permanente [2] [4] [5] [6].

Cuadro 1: Humedad del suelo y succión de agua en el suelo

<b>Tensión del agua en el suelo en términos de la altura de agua (cm)</b>	<b>Tensión del agua del suelo (MPa x10<sup>-1</sup>)</b>	<b>Constantes de humedad</b>
1	1/1000	Humedad de saturación
346	1/3	Capacidad de campo equivalente
15849	15	Punto de marchitez permanente equivalente

Tomado de: [3]

En condiciones de campo abierto se ha encontrado que la masa promedio de los bulbos de cebolla se relacionan de manera inversa con las mayores tensiones de agua en el suelo y de manera directa con las mayores láminas de riego aplicadas y se informa de un máximo de succión de agua posible en el suelo de -15 kPa [7]. También se afirma que para cultivos hortícolas cuando son irrigadas por medio del riego por goteo donde solamente se moja una fracción de suelo, el potencial matricial no debe ser menor a -40 kPa en el bulbo de riego [8].

Campos de cebolla sometidos a déficits hídricos moderados con tensiones entre -70 y -100 kPa reducen su producción de bulbos hasta un 30% y se recomienda realizar los riegos entre -7 y -15 kPa de tensión para suelos arenosos y de entre -20 y -40 kPa para suelos de texturas medias y finas [9][10][11]. Por otra parte, se recomienda para el cultivo de cebolla cuando se usa riego por goteo un ámbito de succión de -10 a -20 kPa donde se tiene un suelo con una condición de humedad y aireación adecuada para hortalizas altamente sensibles al déficit de agua a excepción de suelos livianos como los arenosos [12].

Sin embargo, en cultivos bajo protección de plástico se recomienda, para evitar la presencia de enfermedades fungosas y bacterianas y/o nemátodos, mantener el suelo con menor contenido de humedad y, por ende una mayor succión del agua en el suelo con tensiones máximas de -30 a -50 kPa para hortalizas sensibles [13]

La absorción de nutrientes puede ocurrir todos los días durante casi todo el ciclo de la planta o los diferentes procesos metabólicos que requieren de diferentes nutrientes tanto cualitativa como cuantitativamente en los diferentes tejidos y órganos y en las diferentes etapas de desarrollo [14][15].

Los macroelementos más absorbidos por las plantas desde la solución del suelo son N, P, K, Ca, Mg y S y ante el cambio climático es necesario conocer el impacto que tiene la retención de agua sobre la absorción nutricional del cultivo de cebolla. Las cantidades de macronutrientes absorbidos por el cultivo de cebolla en todo su ciclo productivo son variables, donde el N es de 55,6 a 154 kg ha<sup>-1</sup>; P de 9,4 a 22 kg ha<sup>-1</sup>; K de

78,9 a 177 kg ha<sup>-1</sup>; Ca de 7,5 a 18 kg ha<sup>-1</sup>; Mg de 6,3 a 18 kg ha<sup>-1</sup> y S de 34 a 48 kg ha<sup>-1</sup> [16]. Según los mismos autores manifiestan que esta variabilidad se presenta según la productividad, la variedad, tipo de suelo, luz, temperatura, presencia o disponibilidad de nutrimentos, densidad de plantas sembradas y disponibilidad de agua en el suelo.

Para una población de 320 000 plantas ha<sup>-1</sup> y una productividad de 78,9 ton ha<sup>-1</sup>, al final del ciclo del cultivo 148 días después de la siembra (DDS) la cebolla cultivar ‘Aquarius’ extrajo 157,2 kg ha<sup>-1</sup> de N; 29,1 kg ha<sup>-1</sup> de P; 256,2 kg ha<sup>-1</sup> de K; 83,6 kg ha<sup>-1</sup> de Ca; 15,4 kg ha<sup>-1</sup> de Mg; 53,2 kg ha<sup>-1</sup> de S [17]. Para una población de 420 000 plantas ha<sup>-1</sup> y una productividad de 72 ton ha<sup>-1</sup> el híbrido de cebolla ‘Optima’ extrajo, al final del ciclo del cultivo (150 DDS): 61,22 kg ha<sup>-1</sup> de N; 8,74 kg ha<sup>-1</sup> de P; 106,18 kg ha<sup>-1</sup> de K; 59,45 kg ha<sup>-1</sup> de Ca; 11,56 kg ha<sup>-1</sup> de Mg y 31,55 kg ha<sup>-1</sup> de S [18].

## Metodología

La metodología de esta investigación se describe con mayor amplitud en el artículo científico “Evapotranspiración de referencia, evapotranspiración real y el coeficiente de cultivo para el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) c.v. Álvara promedio en invernadero” (en proceso de publicación en la revista Tecnología en Marcha).

La investigación se llevó a cabo en el cantón de Alvarado, distrito Pacayas, de la provincia de Cartago; específicamente en un invernadero ubicado en Patalillo (Barrio Fátima) con una altura de 1600 msnm, precipitación de 2299,8 mm al año en promedio, temperatura promedio de 16,5 °C, brillo solar promedio de 4,3 horas al día y humedad relativa promedio del 88 %. Se sembró en suelo que se colocó en canastas de 35,0 cm de ancho; 55,0 cm de largo y 20,0 cm de alto y se llenaron con suelo franco de origen volcánico (Vitrand) mezclado en un 15% con grava fina y arena con origen calcáreo. En las canastas se logró una altura de 20,00 a 23,00 cm para un volumen total de sustrato de 44,00 l. El riego se realizó con un sistema por goteo el cual dotó de 7,80 l h<sup>-1</sup> a cada canasta que contó con 12 plantas sembradas. Estos 7,80 l h<sup>-1</sup> se aplicó por medio de 6 goteros donde cada una de ella corresponde a un gotero de 1,30 l h<sup>-1</sup> distribuidas uniformemente en cada una de las canastas. Se sembró el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) c.v. Álvara para establecer el experimento de 4,50 meses de periodo del cultivo; se contó con 4 tratamientos, a saber 4 diferentes ámbitos de succión de humedad del suelo (partiendo al inicio cuando se realiza el trasplante del cultivo de cebolla) del punto de capacidad de campo de la siguiente manera:

- 1- Tratamiento 1 (con 4 repeticiones): mantenido en un ámbito de succión de 5 a 15 kilo Pascales (kPa).
- 2- Tratamiento 2 (con 3 repeticiones): mantenido en un ámbito de succión de 15 a 25 kilo Pascales (kPa).
- 3- Tratamiento 3 (con 4 repeticiones): mantenido en un ámbito de succión de 25 a 35 kilo Pascales (kPa).

4- Tratamiento 4 (con 3 repeticiones): mantenido en un ámbito de succión de 35 a 45 kilo Pascales (kPa). Para el análisis de la absorción nutricional ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), al final del periodo del cultivo se llevaron las muestras de cada una de las repeticiones de cada tratamiento al laboratorio “Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica” para la estimación de las concentraciones nutricionales del cultivo de cebolla en los tejidos de hojas, raíces y bulbos.

## Resultados

Los ámbitos de succión de agua en el suelo crecientes produjeron diferencias significativas ( $P\text{-value}<0,05$ ) en la absorción nutricional de N como se observa en el Cuadro 2.

Los valores de las medias poblacionales de absorción de N (Fig. 1) se encontraron en los siguientes ámbitos, T1 (5-15) kPa de 117,46 a 140,69  $\text{kg ha}^{-1}$ , T2 (15-25) kPa de 70,85 a 97,68  $\text{kg ha}^{-1}$ , T3 (25-35) kPa de 40,73 a 63,96  $\text{kg ha}^{-1}$  y T4 (35-45) kPa de 9,53 a 36,36  $\text{kg ha}^{-1}$ .

Cuadro 2: Absorción de N ( $\text{kg ha}_{\text{efectiva}}^{-1}$ ) a diferentes ámbitos de succión de agua presente en el suelo por el cultivo de cebolla en invernadero (densidad 623 377 plantas  $\text{ha}_{\text{efectiva}}^{-1}$ )

Factor	Repeticiones	Media muestral	StDev	Significancia	%CV
T1 (5-15) kPa	4	129,08	13,19	A	10,22
T2 (15-25) kPa	3	84,26	12,37	B	14,68
T3 (25-35) kPa	4	52,34	8,87	C	16,95
T4 (35-45) kPa	3	22,94	3,39	D	14,78

Medias que no presentan igual letra muestran diferencias significativas ( $P\text{-value}<0,05$ )

La absorción del N presentó un descenso continuo conforme aumenta la succión de agua en el suelo (Fig. 1) donde T2 (15-25) kPa descendió 34,72 % respecto al T1 (5-15) kPa, el T3 (25-35) kPa 37,88% respecto a T2 (15-25) kPa y el T4 (35-45) kPa 56,17% respecto al T3 (25-35) kPa.

Los ámbitos de succión de agua en el suelo crecientes mostraron diferencias significativas ( $P\text{-value}<0,05$ ) en la absorción nutricional de P como se muestra en el cuadro 3.

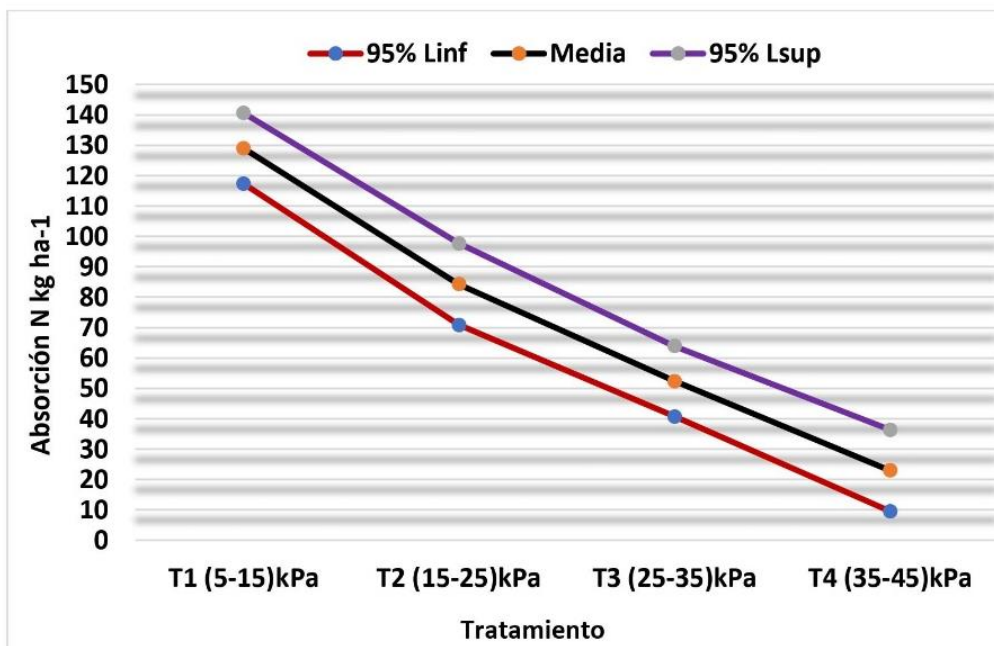


Figura 1: Absorción de N según los ámbitos de succión de humedad presente en el suelo en el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) c.v. Álvara en invernadero

Los valores de las medias poblacionales de absorción de P (Fig. 2) se encontraron en los siguientes ámbitos, T1 (5-15) kPa de 16,10 a 19,90 kg ha<sup>-1</sup>, T2 (15-25) kPa de 9,45 a 13,84 kg ha<sup>-1</sup>, T3 (25-35) kPa de 5,43 a 9,23 kg ha<sup>-1</sup> y T4 (35-45) kPa de 0,48 a 4,87 kg ha<sup>-1</sup>.

Cuadro 3: Absorción de P (kg ha<sub>efectiva</sub><sup>-1</sup>) a diferentes ámbitos de succión de agua presente en el suelo por el cultivo de cebolla en invernadero (densidad 623 377 plantas ha<sub>efectiva</sub><sup>-1</sup>)

Factor	Repeticiones	Media muestral	StDev	Significancia	%CV
T1 (5-15) kPa	4	18	2,82	A	15,67
T2 (15-25) kPa	3	11,643	0,491	B	4,22
T3 (25-35) kPa	4	7,329	1,252	C	17,08
T4 (35-45) kPa	3	2,671	0,225	D	8,42

Medias que no presentan igual letra muestran diferencias significativas (P-value<0,05)

La absorción del P presentó un descenso continuo conforme aumenta la succión de agua en el suelo (Fig. 2) donde T2 (15-25) kPa descendió 35,32 % respecto al T1 (5-15) kPa, el T3 (25-35) kPa 37,05% respecto a T2 (15-25) kPa y el T4 (35-45) kPa 63,56% respecto al T3 (25-35) kPa.

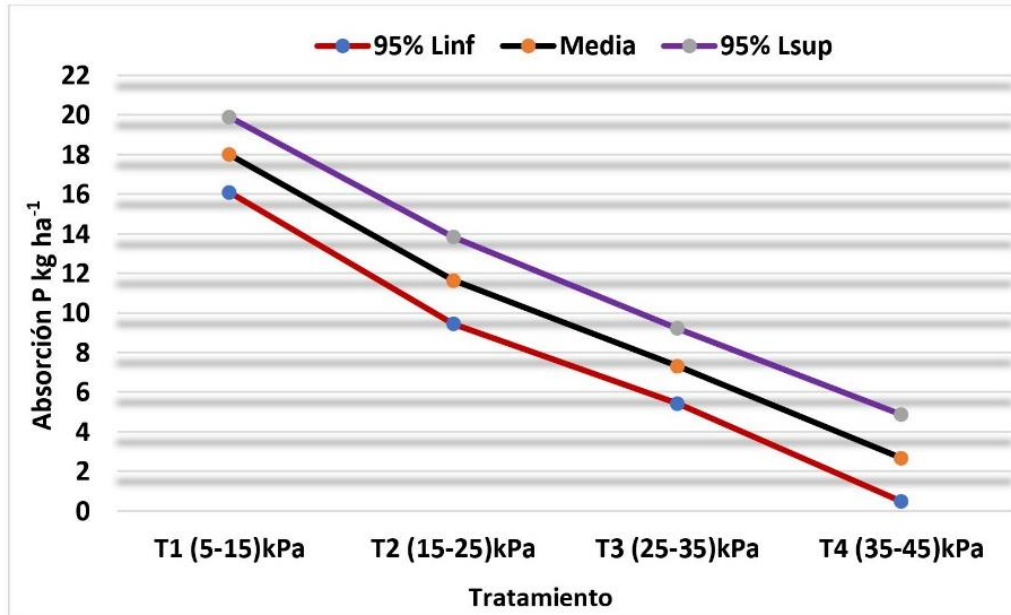


Figura 2: Absorción de P según los ámbitos de succión de humedad presente en el suelo en el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) c.v. *Álvara* en invernadero

Los ámbitos de succión de agua en el suelo crecientes mostraron diferencias significativas ( $P\text{-value} < 0,05$ ) en la absorción nutricional del Ca como se muestra en el Cuadro 4.

Los valores de las medias poblacionales de absorción de Ca (Fig. 3) se encontraron en los siguientes ámbitos, T1 (5-15) kPa de 49,80 a 58,23 kg ha<sup>-1</sup>, T2 (15-25) kPa de 28,07 a 37,81 kg ha<sup>-1</sup>, T3 (25-35) kPa de 10,13 a 18,57 kg ha<sup>-1</sup> y T4 (35-45) kPa de 4,79 a 14,53 kg ha<sup>-1</sup>.

La absorción del Ca presentó un descenso continuo conforme aumenta la succión de agua en el suelo (Fig. 3) donde T2 (15-25) kPa descendió 39,01 % respecto al T1 (5-15) kPa, el T3 (25-35) kPa 56,43% respecto a T2 (15-25) kPa y el T4 (35-45) kPa 32,68% respecto al T3 (25-35) kPa.

Cuadro 4: Absorción de Ca ( $\text{kg ha}_{\text{efectiva}}^{-1}$ ) a diferentes ámbitos de succión de agua presente en el suelo por el cultivo de cebolla en invernadero (densidad 623 377 plantas  $\text{ha}_{\text{efectiva}}^{-1}$ )

Factor	Repeticiones	Media muestral	StDev	Significancia	%CV
T1 (5-15) kPa	4	54,01	5,61	A	10,39
T2 (15-25) kPa	3	32,94	4,16	B	12,63
T3 (25-35) kPa	4	14,35	1,732	C	12,07
T4 (35-45) kPa	3	9,66	1,626	C	16,83

Medias que no presentan igual letra muestran diferencias significativas ( $P\text{-value} < 0,05$ )

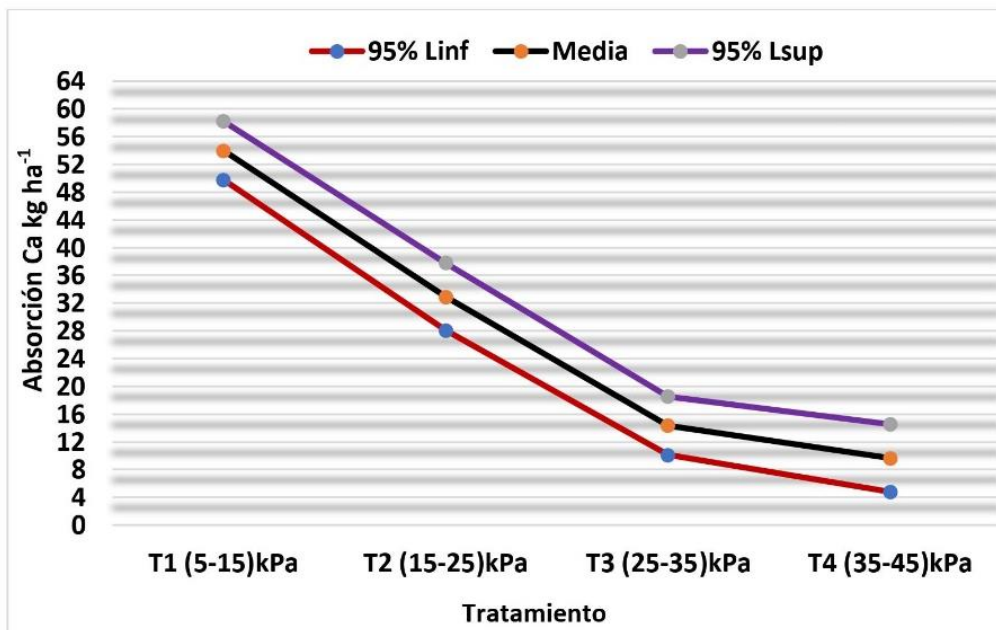


Figura 3: Absorción de Ca según los ámbitos de succión de humedad presente en el suelo en el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) c.v. *Álvara* en invernadero

Los ámbitos de succión de agua en el suelo crecientes mostraron diferencias significativas en la absorción nutricional del Mg como se muestra en el Cuadro 5.

Los valores de las medias poblacionales de absorción de Mg (Fig. 4) se encontraron en los siguientes ámbitos, T1 (5-15) kPa de 11,38 a 14,21  $\text{kg ha}^{-1}$ , T2 (15-25) kPa de 6,38 a 9,64  $\text{kg ha}^{-1}$ , T3 (25-35) kPa de 2,90 a 5,73  $\text{kg ha}^{-1}$  y T4 (35-45) kPa de 0,58 a 3,54  $\text{kg ha}^{-1}$ .

Cuadro 5: Absorción de Mg ( $\text{kg ha}_{\text{efectiva}}^{-1}$ ) a diferentes ámbitos de succión de agua presente en el suelo por el cultivo de cebolla en invernadero (densidad  $623\ 377$  plantas  $\text{ha}_{\text{efectiva}}^{-1}$ )

Factor	Repeticiones	Media muestral	StDev	Significancia	%CV
T1 (5-15) kPa	4	12,75	2,03	A	15,92
T2 (15-25) kPa	3	8,013	1,146	B	14,30
T3 (25-35) kPa	4	4,314	0,495	C	11,47
T4 (35-45) kPa	3	2,208	0,408	C	18,48

Medias que no presentan igual letra muestran diferencias significativas ( $P\text{-value} < 0,05$ )

La absorción del Mg presentó un descenso continuo conforme aumenta la succión de agua en el suelo (Fig. 4) donde T2 (15-25) kPa descendió 37,15 % respecto al T1 (5-15) kPa, el T3 (25-35) kPa 46,16% respecto a T2 (15-25) kPa y el T4 (35-45) kPa 48,82% respecto al T3 (25-35) kPa.

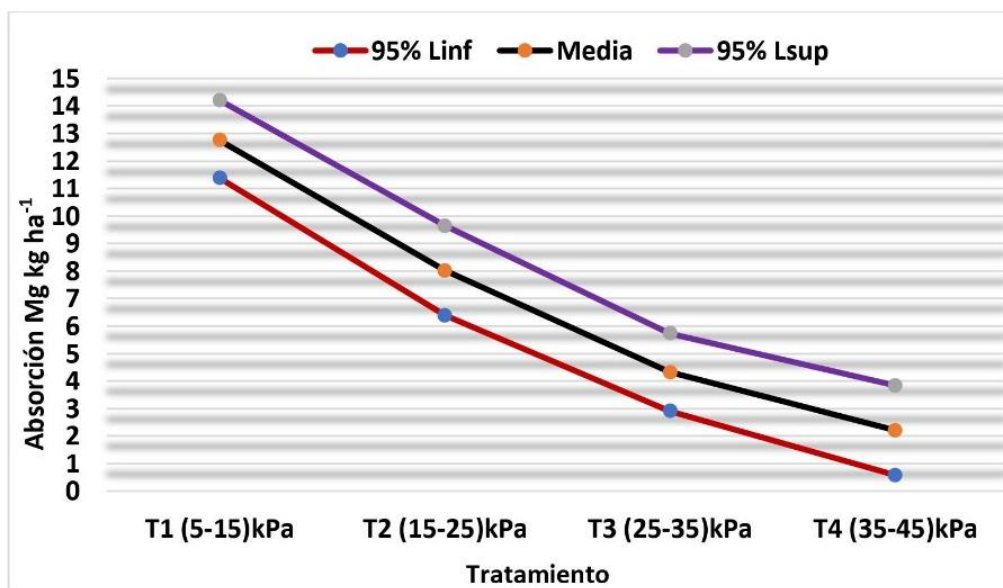


Figura 4: Absorción de Mg según los ámbitos de succión de humedad presente en el suelo en el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) c.v. *Álvara* en invernadero

Los ámbitos de succión de agua en el suelo crecientes mostraron diferencias significativas ( $P\text{-value} < 0,05$ ) en la absorción nutricional del K como se muestra en el Cuadro 6. Los valores de las medias poblacionales de absorción de K (Fig. 5) se encontraron en los siguientes ámbitos, T1 (5-15) kPa de 133,30 a 164,4 kg

ha<sup>-1</sup>, T2 (15-25) kPa de 73,71 a 109,61 kg ha<sup>-1</sup>, T3 (25-35) kPa de 41,02 a 72,12 kg ha<sup>-1</sup> y T4 (35-45) kPa de 8,30 a 44,20 kg ha<sup>-1</sup>.

La absorción del K presentó un descenso continuo conforme aumenta la succión de agua en el suelo (Fig. 5) donde T2 (15-25) kPa descendió 38,40 % respecto al T1 (5-15) kPa, el T3 (25-35) kPa 38,28% respecto a T2 (15-25) kPa y el T4 (35-45) kPa 53,59% respecto al T3 (25-35) kPa.

Los ámbitos de succión de agua en el suelo crecientes mostraron diferencias significativas (P-value<0,05) en la absorción nutricional del S como se muestra en el Cuadro 7.

Cuadro 6: Absorción de K (kg ha<sup>efectiva</sup><sup>-1</sup>) a diferentes ámbitos de succión de agua presente en el suelo por el cultivo de cebolla en invernadero (densidad 623 377 plantas ha<sup>efectiva</sup><sup>-1</sup>)

Factor	Repeticiones	Media muestral	StDev	Significancia	%CV
T1 (5-15) kPa	4	148,8	20,6	A	13,84
T2 (15-25) kPa	3	91,66	16,24	B	17,72
T3 (25-35) kPa	4	56,57	6,1	C	10,78
T4 (35-45) kPa	3	26,25	4,02	C	15,31

Medias que no presentan igual letra muestran diferencias significativas (P-value<0,05)

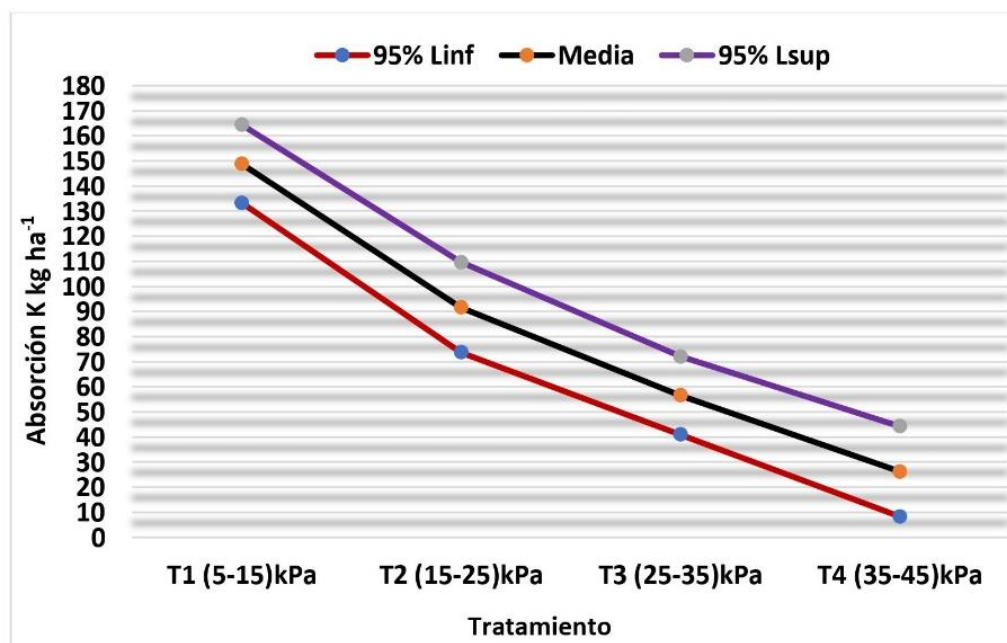


Figura 5: Absorción de K según los ámbitos de succión de humedad presente en el suelo en el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) c.v. *Álvara* en invernadero

Cuadro 7: Absorción de S (kg ha<sub>efectiva</sub><sup>-1</sup>) a diferentes ámbitos de succión de agua presente en el suelo por el cultivo de cebolla en invernadero (densidad 623 377 plantas ha<sub>efectiva</sub><sup>-1</sup>)

Factor	Repeticiones	Media muestral	StDev	Significancia	%CV
T1 (5-15) kPa	4	22,68	2,32	A	10,23
T2 (15-25) kPa	3	13,24	3,07	B	23,19
T3 (25-35) kPa	4	7,78	1,53	C	19,67
T4 (35-45) kPa	3	3,61	0,674	C	18,67

Medias que no presentan igual letra muestran diferencias significativas (P-value<0,05)

La absorción del S presentó un descenso continuo conforme aumenta la succión de agua en el suelo (Fig. 6) donde T2 (15-25) kPa descendió 41,62 % respecto al T1 (5-15) kPa, el T3 (25-35) kPa 41,24% respecto a T2 (15-25) kPa y el T4 (35-45) kPa 53,60% respecto al T3 (25-35) kPa.

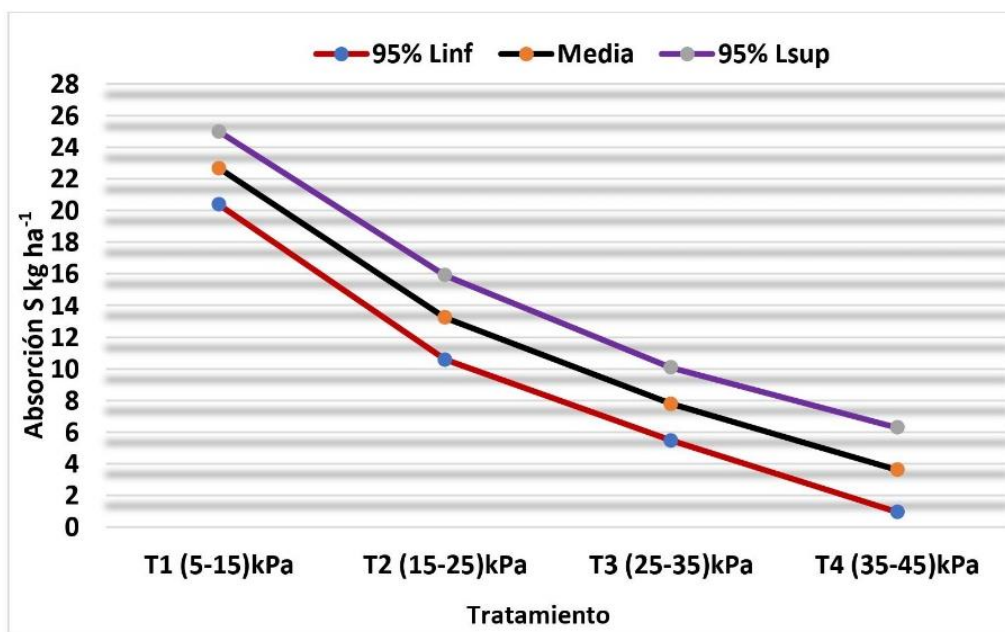


Figura 6: Absorción de S según los ámbitos de succión de humedad presente en el suelo en el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) c.v. Álvara en invernadero

Los valores de las medias poblacionales de absorción de S (Fig. 6) se encontraron en los siguientes ámbitos, T1 (5-15) kPa de 20,37 a 24,99 kg ha<sup>-1</sup>, T2 (15-25) kPa de 10,58 a 15,91 kg ha<sup>-1</sup>, T3 (25-35) kPa de 5,47 a 10,09 kg ha<sup>-1</sup> y T4 (35-45) kPa de 0,95 a 6,28 kg ha<sup>-1</sup>.

La desviación con respecto a su promedio en la absorción de N, Ca, Mg y K que puede absorber el cultivo de cebolla mostró un descenso constante conforme aumentó la succión de agua en el suelo lo cual indica que a mayor succión la amplitud de la absorción de N, Ca, Mg y K para cada tratamiento es menor debido posiblemente a que el factor tensión de humedad se va haciendo cada vez más restrictivo conforme aumenta respecto a todos los demás factores que generan variabilidad.

Los resultados reportados por Fernandes y otros (2007) [16], sobre los ámbitos de macronutrientes absorbidos por el cultivo de cebolla con respecto a los resultados de la presente investigación, mostró que el N, P, K y el Mg se encuentran dentro de dichos ámbitos en los valores más bajos. El Ca fue mayor, el S fue menor a los ámbitos mencionados tomando en cuenta el número de plantas por área establecida. Respetando al tratamiento T1 (-5 a -15) kPa que mostró mayor absorción de N, P, K, Ca, Mg y S, los resultados de Moraes y otros [17], se encontró menor absorción de N en 29,61% y el P en 27,93 % y se absorbió en mayor cantidad el K en 5,91%, Ca en 63,37%, el Mg en 34,57% y el S en 106,47%. Además, respecto a los resultados de Pôrto y otros [18], el tratamiento 1 absorbió en mayor cantidad todos los macroelementos donde la absorción N fue en 137,24%, el P en 214,94%, el K en 235,41%, el Ca en 201,53%, el Mg en 135,29% y el S en 356,95% mayor.

En general la absorción nutricional disminuyó por el efecto creciente de la retención de humedad en el suelo, ésto insinúa con una alta posibilidad que la tasa de transpiración disminuyó y como tal, como un efecto directo en consecuencia y también con una alta posibilidad, la tasa de fotosíntesis también disminuyó. No obstante, los ámbitos de succión de agua en el suelo de 5 – 35 kPa usualmente se han considerado como “no restrictivos” para la absorción de agua del suelo para las plantas, pero en la presente investigación se encontró que la cebolla sembrada en el sustrato dentro de las canastas como si presentó restricciones en estos ámbitos de succión de agua en el suelo.

## Conclusiones

La absorción de N, P, K, Ca, Mg y S en el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) c.v. Álvaro disminuyó, debido al aumento de la succión con que es retinada el agua en el suelo (P-value < 0,05).

El tratamiento con el ámbito de menor succión T1 (5-15) kPa presentó la mayor productividad y concuerda con los valores encontrados en Brasil por la Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) [11]. Capacidad de campo equivalente (Cuadro 1) está ubicado en la presente investigación en el ámbito de succión de 25 – 35 kPa donde en todos los casos de los macro nutrientes, la absorción disminuyó (P-value < 0,05) respecto al tratamiento que presentó el ámbito de menor succión T1 (5 - 15) kPa, lo cual indica que se debe de ajustar la tensión de agua en el suelo para procurar las mayores producciones según tipo de suelo o sustratos, variables ambientales sean estas controladas o abiertas y la variedad o hibridación del cultivo.

## Agradecimientos

Se agradece a las siguientes personas físicas y jurídicas por sus aportes al desarrollo de la presente investigación.

- 1- Comisión de Manejo y Ordenamiento de la Cuenca Alta Río Reventazón (COMCURE) (<https://sites.google.com/site/comcurecr/Home>)
- 2- Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) (<https://www.tec.ac.cr/>)
- 3- Productor Allen Aguilar Chacón
- 4- Fromak S. A.

## Bibliografía

- [1] L. Rossato, *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais: Dissertação de Mestrado em Meteorologia orientada pela Dra Regina Célia dos Santos*, São José dos Campos, 2001, p. 147.
- [2] R. Rojas, «Las relaciones Agua Suelo Planta Atmósfera en planificación, diseño y manejo de proyectos de aguas y tierras,» (sf). [En línea]. Available: <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/rojas.r/RASPA.PDF>. [Último acceso: 24 07 2016].
- [3] A. Chavarría, *Manual de prácticas del curso Relación Suelo Agua Planta*, Cartago, Cartago, 2013.
- [4] E. J. De Souza, F. França da Cunha, F. Fanger Magalhães, T. Ramos da Silva, M. C. Rezende Zuffo Borges y C. Garcia Roque, «Métodos para Estimativa da Umidade do Solo na Capacidade de Campo,» *Revista de Ciências Agro- Revista de Ciências Agro-Ambientais, Alta Floresta Ambientais, Alta Floresta Ambientais, Alta Floresta-MT*, vol. 11, nº 1, pp. 43 - 50, 2013.
- [5] A. . C. Saraiva da Costa, M. R. Nanni y E. Jeske, «Determinação da Umidade na Capacidade de Campo e Ponto de Murchamento Permanente por Diferentes Metodologias,» *UNIMAR*, vol. 19, nº 3, pp. 827 - 844, 22 08 1997.
- [6] L. Santos , J. Valero, M. Picornell y J. Tarjuelo, *El riego y sus tecnologías*, Albacete: Europa-América, 2010.

- [7] R. Vilas Boas, G. Pereira, R. de Sousa y R. Consoni, «Desempenho de cultivares de cebola em função do manejo da irrigação por gotejamento,» *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 15, nº 2, pp. 117 - 124, 27 04 2011.
- [8] G. Libório, S. Oliveira, C. Aragao, N. Duarte y C. Fernandes, «Desempenho Agronômica de Cultivares de Cebola Sob Diferentes Manejos de irrigação no Submédio São Francisco,» *Irriga*, vol. 18, nº 1, pp. 73 - 84, janeiro-março 2013.
- [9] Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), «Embrapa Hortaliças,» [En línea]. Available: <https://www.embrapa.br/hortaliças/cebola/como-plantar>. [Último acceso: 24 12 2019].
- [10] Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), *Agrometeorologia dos Cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola*, 1ra ed., Brasília, 2009, p. 530.
- [11] Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), *Sistemas de produção, 3: Cultivo da cebola no Nordeste*, G. M. d. R. Nivaldo Duarte Costa, Ed., 2007, p. 90.
- [12] Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Brasil, «Embrapa hortaliças: Circular técnica 57,» 2008.
- [13] Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro Nacional de Pesquisa de Hortaliças, «Circular técnica de Embrapa hortaliças,» 1997.
- [14] Azofeifa, A.; Moreira, M., *Agronomía Costarricense*, vol. 29, San José,, 2005, pp. 77 - 84.
- [15] Azofeifa, A.; Moreira, M., *Agronomía Costarricense*, vol. 31, San José, , 2008, pp. 19 - 29.
- [16] E. Fernandes, D. Fernandes, J. Silva y T. Bull, *XXXI Congreso Brasileiro de Ciência do Solo*, Río Grande del Sur, 2007, p. 4.
- [17] C. Moraes, H. de Araujo, T. Factor y L. Purquerio, «Fenologia e acumulação de nutrientes por cebola de dia curto em sementeira direta (Phenology and nutrient accumulation by short-day onion in direct seeding),» *Sociedad de Ciências Agrárias de Portugal*, vol. 39, nº 2, pp. 281 - 290, Setiembre 2016.
- [18] D. Pôrto, A. Cecílio, A. May y J. Barbosa, «Acúmulo de macronutrientes pela cebola 'Optima' estabelecida por sementeira direta,» *Horticultura Brasileira*, vol. 24, nº 4, pp. 470 - 475, Octubre - Diciembre 2006.

## 6. Artículo 3

### Efecto de la succión de agua en el suelo sobre la productividad agrícola y rentabilidad del agua en el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) c.v. Álvara cultivado en invernadero

M.Sc. Adrián Enrique Chavarría Vidal

adchavarría@itcr.ac.cr

Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Universidad Nacional – Universidad Estatal a Distancia

iD: <http://orcid.org/0000-0003-1647-8212>

Dr. Mario Morales Sánchez

Profesor Jubilado

mario.morales@ucr.ac.cr

Dr. Freddy Soto Bravo Autor

freddy.sotobravo@ucr.ac.cr

Universidad de Costa Rica, Estación Experimental

Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica.

iD: <http://orcid.org/0000-0003-1959-9597>

Dr. Asdrúbal Jesús Farías Ramírez

ajfara@gmail.com

Facultad PECEGE. Piracicaba, Sao Paulo, Brasil.

iD: <http://orcid.org/0000-0003-1544-8759>

#### Resumen

Un sistema productivo en un ambiente protegido usualmente incrementa la eficiencia del uso del agua, creando un microclima para mejorar la fotosíntesis e incrementar los rendimientos de las plantas. Usualmente, las aplicaciones de agua de los cultivos bajo ambientes protegidos tienden a ser menores respecto a ambientes abiertos. Por lo anterior y ante el cambio climático, se hace necesario medir la productividad del agua y su rentabilidad en la producción agrícola en ambientes protegidos. Los tratamientos T1(5 – 15) kPa y T2(15 – 25) kPa no mostraron diferencia significativa ( $P_{value}>0,05$ ) en la productividad del agua en la formación de bulbos frescos y de biomasa. Pero estos si mostraron diferencia

significativa respecto a T3(25 – 35) kPa y a T4(35 – 45) kPa y a su vez, los tratamientos T3(25 – 35) kPa y a T4(35 – 45) kPa mostraron diferencias significativas ( $P_{\text{value}} > 0,05$ ) entre sí.

### **Palabras Claves**

Productividad, Rentabilidad, Cebolla.

### **Abstract**

A productive system in a protected environment usually increases water use efficiency, creating a microclimate to improve photosynthesis and increase plant yields. Usually, water applications for crops under protected environments tend to be lower compared to open environments. Due to the above and in the face of climate change, it is necessary to measure the productivity of water and its profitability in agricultural production in protected environments. The treatments T1(5 – 15) kPa and T2(15 – 25) kPa showed no significant difference ( $P_{\text{value}} > 0.05$ ) in water productivity in the formation of fresh bulbs and biomass. But these did show a significant difference with respect to T3(25 – 35) kPa and T4(35 – 45) kPa and in turn, the treatments T3(25 – 35) kPa and T4(35 – 45) kPa showed significant differences ( $P_{\text{value}} > 0.05$ ) with each other.

### **Keywords**

Productivity, Profitability, Onion.

### **Introducción**

El cultivo de cebolla pertenece al género *Allium*, que cubre cerca de 500 especies, las cuales presentan bulbos que se desarrollan bajo el suelo [1].

Se considera la segunda hortaliza en importancia en el mundo después del tomate. Los primeros registros del cultivo datan de cerca de 4000 años y fueron encontrados en Egipto, lo que la domesticación del cultivo de cebolla se inició mucho tiempo atrás, siendo una de las hortalizas más antiguas. Debido a sus características de buena conservación pos-cosecha la cebolla viene a ser una de las hortalizas de mayor tránsito global y está envuelta en las transacciones comerciales entre los países de todos los continentes [2].

En Costa Rica se cultivan entre 800 y 1000 hectáreas por año (a menudo varias cosechas al año) las que generan un rendimiento promedio de 30 ton ha<sup>-1</sup>. El consumo nacional de este bulbo ronda las 2 200 toneladas por mes, mientras que el consumo *per-cápita* es de 7,0 kg año<sup>-1</sup> [3]. Para el 2015 se produjeron 41 157 toneladas métricas y de esto, el 82 % fue producido en la zona norte de Cartago en 1366 hectáreas [4], [5] y [6].

La planta de cebolla es una planta que puede llegar aproximadamente a 60 cm de altura [7]. Las raíces son finas, poco ramificadas y bien provistas de pelos absorbentes en los primeros 20 cm de profundidad [2]. También se reporta que el cultivo de cebolla tiene su profundidad de raíces efectivas de los 10 cm a los 20 cm [8].

El cultivo de cebolla es una hortaliza sensible al déficit hídrico que necesita una buena disponibilidad de agua en el suelo con riegos frecuentes para un buen desarrollo. No obstante, el exceso de agua conjuntamente con altas temperaturas es perjudicial pues, favorece la incidencia de patógenos que reducen el crecimiento y en consecuencia, la producción y la calidad de los bulbos. Por ello el manejo correcto y exacto del riego es indispensable el cual, se debe de ajustar a las condiciones de cada momento del cultivo [9].

Trabajos desarrollados en Brasil e la región del Norte de Minas Gerais indican un consumo medio de agua entre 500 y 670 mm durante el ciclo de la cebolla, que corresponde a una lámina de agua entre 4 a 5 mm/d [10].

En condiciones de ambientes abiertos se ha encontrado que las succiones y la masa promedio de los bulbos se relacionan de manera inversa con la tensión de agua en el suelo y de manera directa con las láminas de riego aplicadas y se informa de un máximo de succión de agua en el suelo de -15 kPa [9]. También se afirma que para cultivos hortícolas cuando son irrigadas por medio del riego por goteo donde solamente se moja una fracción de suelo sin mojar la parte aérea, el potencial matricial no debe ser menor a -40 kPa [11]. Campos de cebolla sometidos a déficits hídricos moderados con tensiones entre 70 y 100 kPa pueden tener reducciones de producción de bulbos hasta un 30%; se recomienda realizar los riegos entre -7 y -15 kPa para suelos arenosos, y de entre -20 y -40 kPa para suelos de texturas medias y finas [12], [13], [14] y [15]. Sin embargo, en cultivos bajo protección de plástico se recomienda que en presencia de enfermedades fungosas y bacterianas y/o nemátodos, mantener el suelo con menor contenido de humedad y por ende, una mayor succión para las cuales se deben de tener succiones máximas de -30 a -50 kPa para hortalizas sensibles y así dificultar el desarrollo de microorganismos no deseables [16]

El manejo eficiente del agua en los sistemas de riego se define como aquel que logra la menor cantidad posible de aplicación de agua que promueva una buena producción y conservación del suelo y que garantice la sustentabilidad de los recursos naturales [17].

El término productividad del agua o productividad agronómica del agua se estableció como una medida sólida para determinar la capacidad de los sistemas agrícolas para convertir el agua en alimento, pero este concepto en la práctica se utiliza como herramienta de diagnóstico, para valorar la eficiencia del uso del agua en los sistemas agrícolas [18] [19]. La eficiencia del uso del agua (EUA) o productividad del agua (PA) es la relación existente entre la biomasa presente en un cultivo por unidad de agua utilizada por éste en un determinado momento. Cuando se pretende enfocar el empleo del agua como un componente meramente productivo y económico, se recurre a sustituir la biomasa por el rendimiento en kilogramos de producto por cada metro cúbico de agua utilizada, o a sustituir la cosecha por el ingreso neto llamado rentabilidad del agua [20].

La productividad agronómica del agua para cebolla se reporta entre 3,76 a 16,6 kilogramos de rendimiento por cada metro cúbico de agua aplicada por el sistema de riego [21].

Las ecuaciones para el cálculo son las siguientes:

$$EUAp\left(\frac{kg}{m^3}\right) = \frac{Producción\left(\frac{kg}{ha}\right)}{Agua\ Utilizada\left(\frac{m^3}{ha}\right)}$$

$$EUAb\left(\frac{kg}{m^3}\right) = \frac{Biomasa\left(\frac{kg}{ha}\right)}{Agua\ Utilizada\left(\frac{m^3}{ha}\right)}$$

donde:

EUAp = eficiencia del uso del agua en la producción fresco

EUAb = eficiencia del uso del agua en la producción de biomasa

Para estimar la rentabilidad del agua se realiza mediante el siguiente proceso [22]:

- 1- Cálculo del costo de producción
- 2- Cálculo de la rentabilidad neta del cultivo:

$$Rentnc = Y * P - C$$

donde

$$Rentnc = \text{rentabilidad neta} \left(\frac{\$}{ha}\right)$$

$Y$  = producción ( $\frac{kg}{ha}$ )

$P$  = precio por unidad de producción ( $\frac{\$}{kg}$ )

$Y * P$  = rentabilidad bruta de la producción ( $\frac{\$}{ha}$ )

$C$  = costos totales (fijos + variables) de producción ( $\frac{\$}{ha}$ )

3- Cálculo de la rentabilidad del agua:

$$RentAg = \frac{Rentnc \left(\frac{\$}{ha}\right)}{cantidad\ de\ agua\ utilizada\ (m^3)}$$

donde:

$Rentag$  = rentabilidad del agua ( $\frac{\$}{m^3 * ha}$ )

El objetivo de la investigación es estimar la productividad del agua tanto en términos productivos como en términos económicos.

## Metodología

La investigación se llevó a cabo en el cantón de Alvarado, distrito Pacayas, de la provincia de Cartago Costa Rica; específicamente en un invernadero ubicado en Patalillo (Barrio Fátima) con una altura de 1600 msnm, precipitación de 2299,8 mm al año en promedio, temperatura promedio de 16,5 °C, brillo solar promedio de 4,3 horas al día y humedad relativa promedio del 88 %. Se sembró en suelo (Vitrand) derivado de cenizas volcánicas con textura franca mezclado con 15% de grava fina y se colocó en canastas de 35,0 cm de ancho; 55,0 cm de largo y 20,0 cm de alto para un total de 44,00 l de suelo. El riego se realizó con un sistema por goteo el cual dotó de 7,80 l h<sup>-1</sup> a cada canasta que contó con 12 plantas sembradas. Estos 7,80 l h<sup>-1</sup> se aplicó por medio de 6 goteros donde cada uno de ellos corresponde a un gotero de 1,30 l h<sup>-1</sup> distribuidas uniformemente en cada una de las canastas. Se sembró el cultivar Álvara (*A. cepa*) para establecer el experimento con duración de 4,50 meses. Se establecieron 4 tratamientos, a saber 4 diferentes ámbitos de succión de humedad del suelo (partiendo al inicio cuando se realiza el trasplante del cultivo de cebolla) del punto de capacidad de campo de la siguiente manera:

- 1- Tratamiento 1 (con 4 repeticiones): mantenido una succión en un ámbito de 5 a 15 centibares (kPa).
- 2- Tratamiento 2 (con 3 repeticiones): mantenido una succión en un ámbito de 15 a 25 centibares (kPa).
- 3- Tratamiento 3 (con 4 repeticiones): mantenido una succión en un ámbito de 25 a 35 centibares (kPa).
- 4- Tratamiento 4 (con 3 repeticiones): mantenido una succión en un ámbito de 35 a 45 centibares (kPa).

## Resultados y discusión

No se encontraron diferencias significativas ( $P\text{-value}>0,05$ ) en la productividad del agua en términos de bulbo fresco en los ámbitos de succión de agua en el suelo entre T1(5 – 15) kPa y T2(15 – 25) kPa como se muestra en el cuadro 2, pero si se encontraron diferencias significativas ( $P\text{-value}<0,05$ ) entre los anteriores tratamientos con respecto a T3(25 – 35) kPa y a T4(35 – 45) kPa y a su vez, también entre estos dos últimos. No obstante, en el promedio general de los tratamientos T1(5 – 15) kPa y T2(15 – 25) kPa se presentó una disminución del 18,50% de  $\text{kgbf m}^{-3}\text{Ag}$  del segundo respecto al primero.

Cuadro 2: Productividad agrícola del agua en el cultivo de cebolla en invernadero ( $\text{kg bf m}^{-3}\text{Ag}$ )

Factor	Repeticiones	Media muestral	StDev	Significancia	%CV
T1(5 – 15) kPa	4	21,41	2,13	A	9,95
T2(15 – 25) kPa	3	17,45	3,05	A	17,48
T3(25 – 35) kPa	4	10,285	0,596	B	5,79
T4(35 – 45) kPa	3	5,25	1,019	C	19,41

Promedios con diferentes letras presentan diferencias significativas ( $P\text{-value}<0,05$ )

Como se muestra en la figura 1 se observó un descenso continuo en la productividad agrícola del agua respecto a la cosecha donde se encontraron en los siguientes ámbitos, para el T1(5 – 15) kPa de 19,32 a 23,51  $\text{kgbf m}^{-3}\text{Ag}$ , para el T2(15 – 25) kPa de 15,03 a 19,86  $\text{kgbf m}^{-3}\text{Ag}$ , para el T3(25 – 35) kPa de 8,19 a 12,38  $\text{kgbf m}^{-3}\text{Ag}$  y para el T4(35 – 45) kPa de 2,84 a 7,67  $\text{kgbf m}^{-3}\text{Ag}$ .

Se cuantificó mediante un modelo polinómico de grado 2 la magnitud del efecto de la succión de agua en el suelo sobre la productividad del agua en términos de bulbo fresco en el cultivo de cebolla como se muestra en la figura 2. En el ámbito de la investigación se encontró que la variable de cosecha de bulbo fresco es explicada en un 99% por la succión conforme el modelo.

No se encontraron diferencias significativas ( $P\text{-value}>0,05$ ) en la productividad del agua en términos de biomasa en los ámbitos de succión de agua en el suelo crecientes entre T1(5 – 15) kPa y T2(15 – 25) kPa como se muestra en el cuadro 3, pero si se encontraron diferencias significativas ( $P\text{-value}<0,05$ ) entre los anteriores tratamientos con respecto a T3(25 – 35) kPa y a T4(35 – 45) kPa y a su vez entre estos dos últimos.

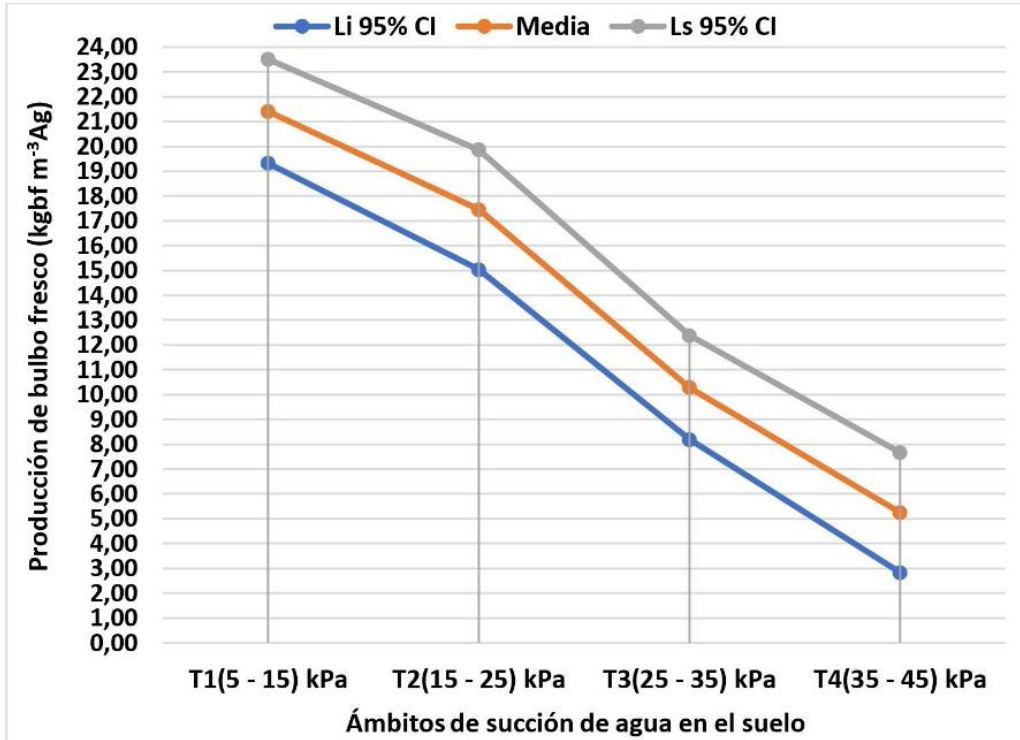


Figura 1: Capacidad del agua de producir de cosecha (kg bf m<sup>-3</sup> Ag) en el cultivo de cebolla en invernadero a diferentes ámbitos de succión

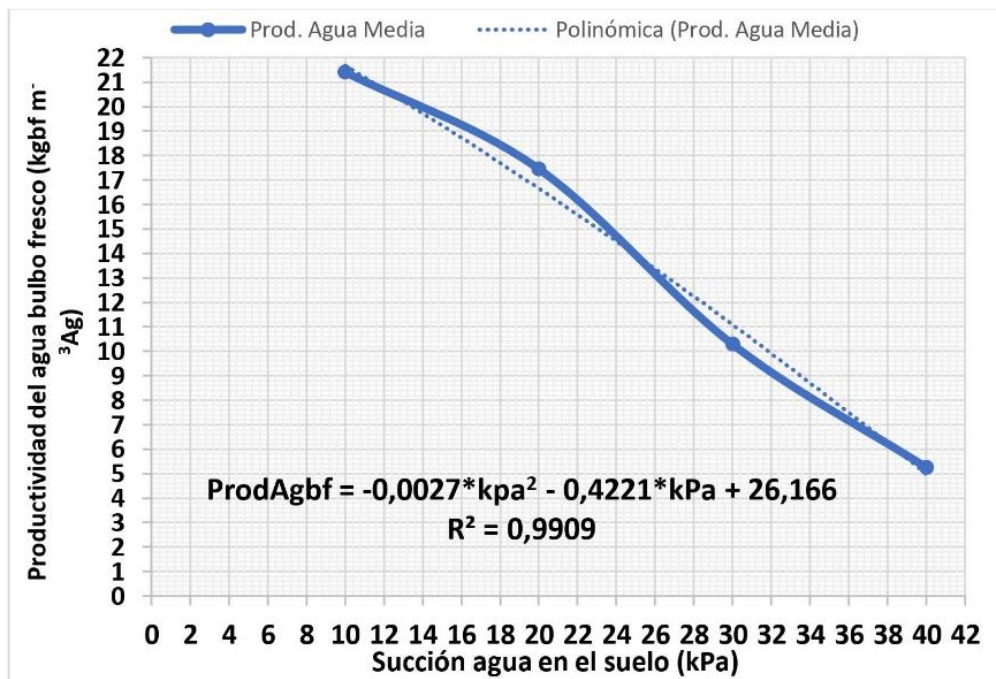


Figura 2: Efecto de la succión del agua en el suelo sobre la capacidad del agua de producir cosecha (kg bf m<sup>-3</sup> Ag) en el cultivo de cebolla en invernadero

Cuadro 3: Productividad del agua para la formación de biomasa en el cultivo de cebolla ( $\text{kg b m}^{-3}\text{Ag}$ ) en invernadero

Factor	Repeticiones	Media muestral	StDev	Significancia	%CV
T1(5 – 15) kPa	4	1,693	0,246	A	14,53
T2(15 – 25) kPa	3	1,465	0,243	A	16,58
T3(25 – 35) kPa	4	0,8371	0,059	B	7,05
T4(35 – 45) kPa	3	0,4091	0,079	C	19,31

Promedios con diferentes letras presentan diferencias significativas ( $P\text{-value}<0,05$ )

Como se muestra en la figura 3 se observó un descenso continuo en la productividad del agua respecto a la biomasa donde se encontraron en los siguientes ámbitos, para el T1(5 – 15) kPa de 1,49 a 1,89  $\text{kgb m}^{-3}\text{Ag}$ , para el T2(15 – 25) kPa de 1,23 a 1,70  $\text{kgb m}^{-3}\text{Ag}$ , para el T3(25 – 35) kPa de 0,64 a 1,04  $\text{kgb m}^{-3}\text{Ag}$  y para el T4(35 – 45) kPa de 0,18 a 0,64  $\text{kgb m}^{-3}\text{Ag}$ .

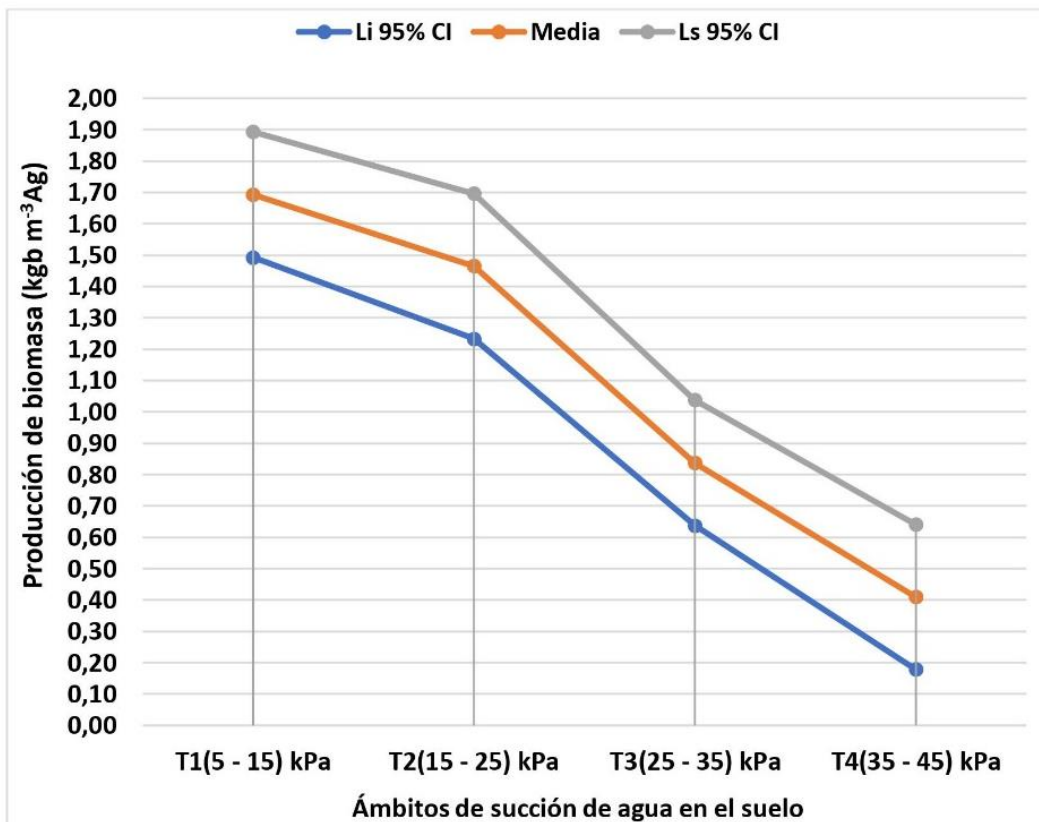


Figura 3: Capacidad del agua de producir biomasa ( $\text{kg b m}^{-3}\text{Ag}$ ) en el cultivo de cebolla en invernadero a diferentes ámbitos de succión

Se logró cuantificar mediante un modelo polinómico de grado 2 la magnitud el efecto de la succión de agua en el suelo sobre la productividad del agua en términos de biomasa en el cultivo de cebolla como se muestra en la figura 4. En el ámbito de la investigación se encontró que la variable de biomasa es explicada en un 98% por la succión conforme el modelo ( $P_{\text{valuc}} < 0,05$ ).

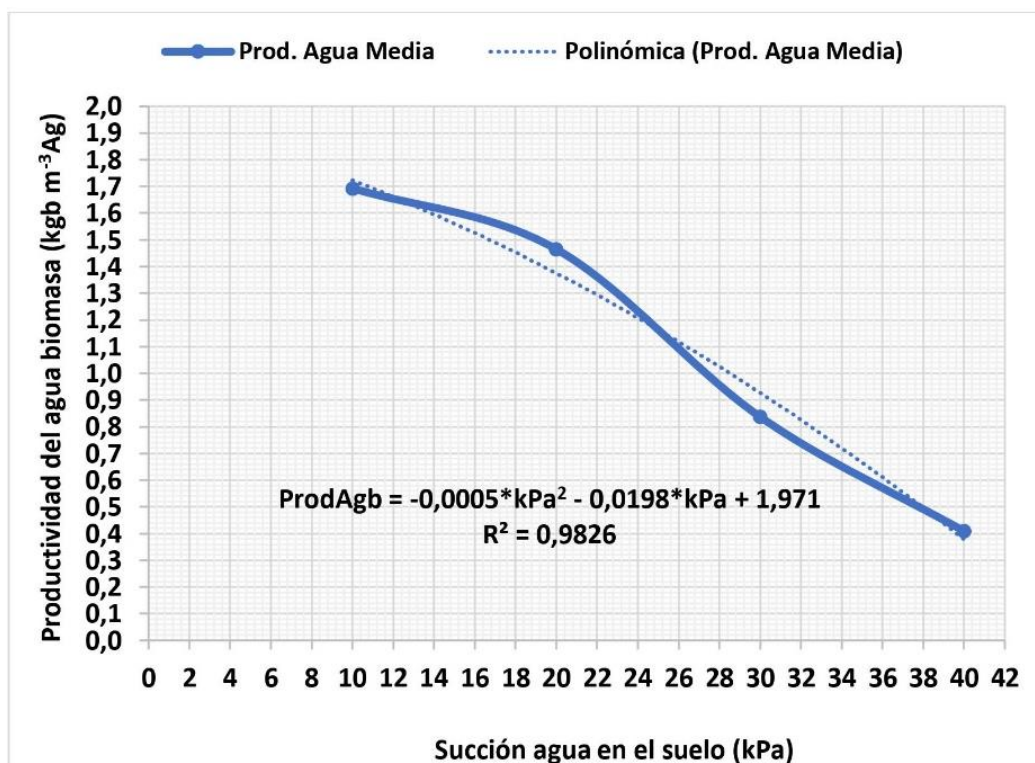


Fig. 4: Efecto de la succión del agua en el suelo sobre la capacidad del agua para producir biomasa ( $kg b m^{-3} Ag$ ) en el cultivo de cebolla en invernadero

Se encontró un efecto de la succión de agua en el suelo sobre la rentabilidad del agua donde a mayor succión se presentó un descenso continuo en la rentabilidad como se muestra en las figuras 5. No obstante, la variabilidad de los precios de mercado que usualmente se presentan a través del tiempo también tiene un efecto sobre la rentabilidad.

Se halló para cada ámbito de succión el efecto de la variación de los precios de mercado expresado en ecuaciones lineales como se muestra en la figura 5, las cuales mostraron que a mayor succión se va dificultando de manera creciente lograr rentabilidad en el cultivo de cebolla, a pesar de que se presenten aumentos en los precios de venta en los mercados, ya que la pendiente positiva de cada curva es menor. No

obstante, a pesar de que un supuesto precio de mercado alcance un valor alto inusual de 1400 Col kg<sup>-1</sup> el T4(35 – 45) kPa el mayor ámbito de succión no alcanzaría rentabilidad positiva del agua que se aplica.

La rentabilidad del agua cuando toma el valor de cero muestra el “punto de equilibrio económico”, donde para el tratamiento T1(5 – 15) kPa se logró cuando el precio de cebolla es de 297,58 Col kg<sup>-1</sup>, para el T2(15 – 25) kPa fue de 498,81 Col kg<sup>-1</sup>, para T3(25 – 35) kPa fue de 848,67 Col kg<sup>-1</sup> y para el T4(35 – 45) kPa fue de 2007,23 Col kg<sup>-1</sup>.

La succión de agua en el suelo conforme fue mayor, mostró un efecto de disminución sobre la rentabilidad del agua en el cultivo de cebolla, y un incremento del punto de equilibrio económico. Ésto muestra que se debe de tener conocimiento y control sobre cuáles son los mejores ámbitos de succión de agua en el suelo para lograr las mayores productividades en procura de las mayores rentabilidades del agua.

No obstante, la rentabilidad del agua también manifestó dependencia de los precios de mercado que se encuentren presentes al vender la cosecha, pero de estos no se tiene control. Sin embargo, se puede programar para realizar las cosechas en los tiempos que se presentan los mejores precios con mayor probabilidad.

El punto de equilibrio económico se expresó en dependencia de la succión de agua en el suelo en la ecuación de tipo polinómica de grado 3 como se muestra en la figura 6. Esta ecuación mostró que a mayor succión de agua en el suelo y para un mismo tipo de precio en el mercado es más difícil alcanzar el punto de equilibrio.

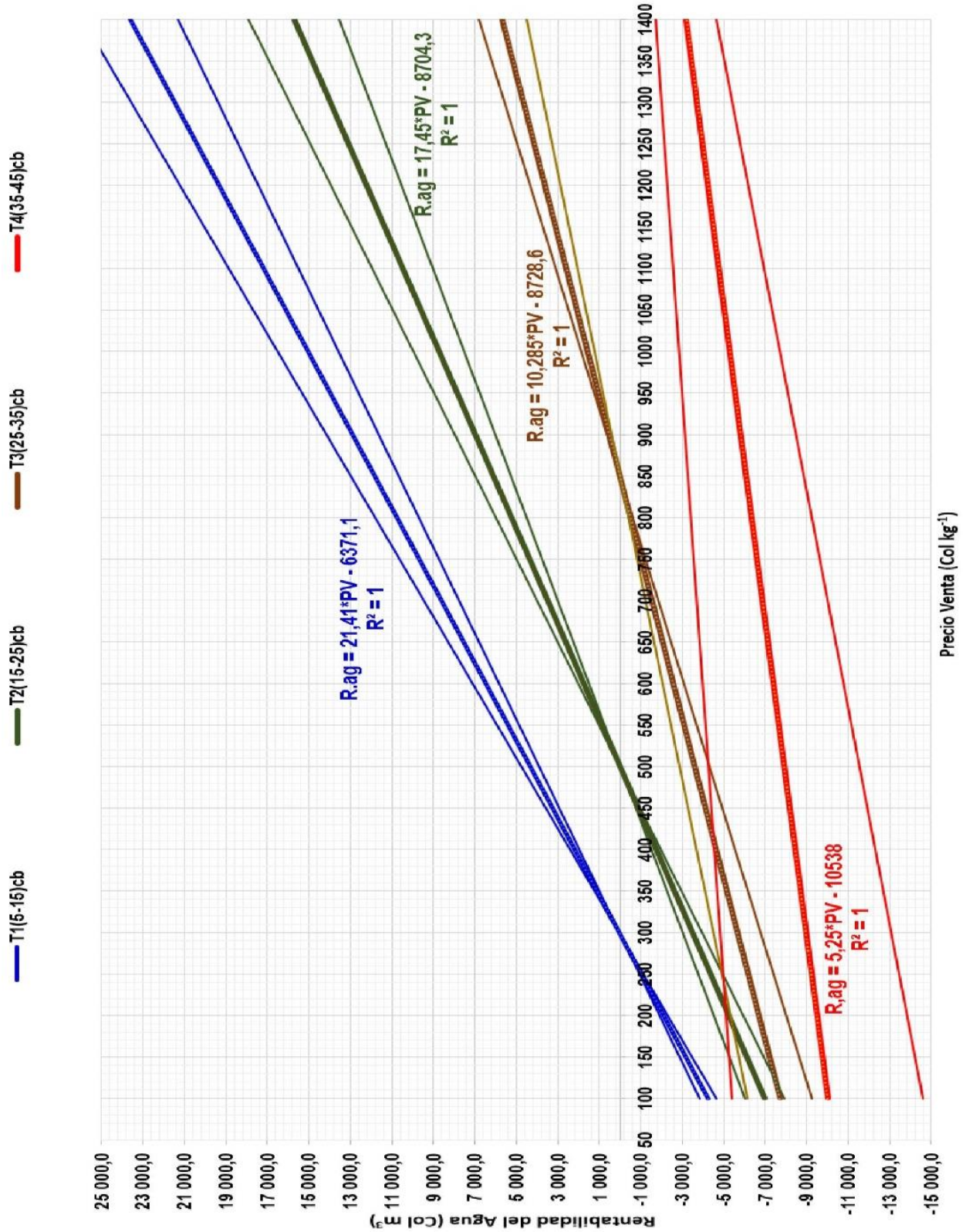


Fig. 5: Efecto de la succión del agua en el suelo sobre la rentabilidad del agua en el cultivo de cebolla en invernadero según variación de precios de venta en los mercados

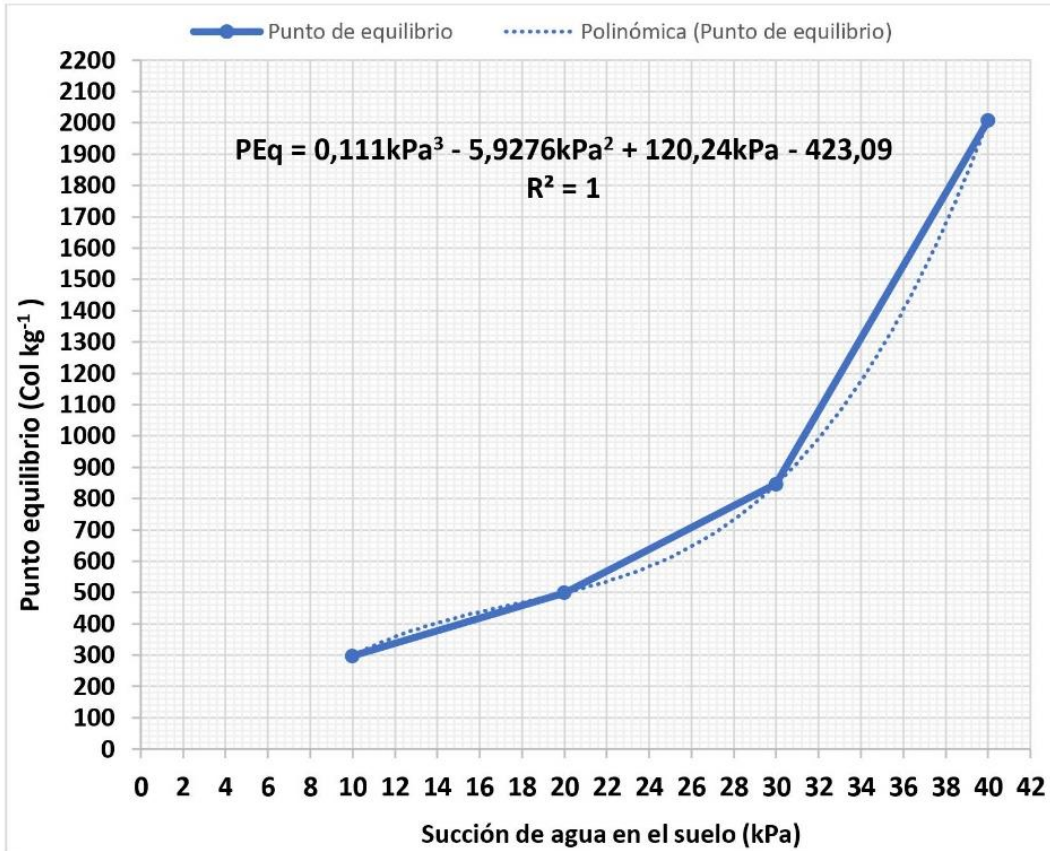


Fig. 6: Efecto de la succión del agua en el suelo sobre el punto de equilibrio económico en el cultivo de cebolla en invernadero

El efecto encontrado sobre la disminución de la capacidad de producción de biomasa debido al aumento de la succión de agua en el suelo se puede entender por medio del proceso de la fotosíntesis y la producción de glucosa. Dentro de los diferentes usos de la glucosa o asimilados que se obtienen, se encuentra la producción de biomasa y al presentarse menor cantidad de esta última indica con una alta probabilidad, que conforme aumentó el ámbito de succión de agua en el suelo, se presentó una menor producción de asimilados debido a que a mayor succión menor absorción de agua.

No obstante, al presentarse la disminución de producción de biomasa, fotosíntesis y consumo de agua ante el aumento de la succión de agua en el suelo, entonces conllevó de manera directa a la disminución de la productividad del agua debido a la menor cantidad de cosecha de bulbos frescos de cebolla.

## Conclusiones

El aumento de la succión de agua en el suelo en los ámbitos estudiados presentó un efecto de disminución constante en la rentabilidad del agua y de la capacidad de producción del agua, en términos tanto de biomasa como de cosecha de bulbos frescos.

El punto de equilibrio económico del cultivo de cebolla y la rentabilidad del agua se ve afectada de manera negativa conforme aumenta la succión de agua en el suelo.

Conforme aumentan los precios de mercado, aumenta la probabilidad de alcanzar el punto de equilibrio en el cultivo de cebolla, lo cual es más demostrable en los bajos ámbitos de succión de agua en el suelo.

## Agradecimientos

Se agradece a las siguientes personas físicas y jurídicas por sus aportes al desarrollo de la presente investigación.

- 1- Comisión de Manejo y Ordenamiento de la Cuenca Alta Río Reventazón (COMCURE)  
[s\(https://sites.google.com/site/comcurecr/Home\)](https://sites.google.com/site/comcurecr/Home)
- 2- Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) (<https://www.tec.ac.cr/>)
- 3- Productor Allen Aguilar Chacón
- 4- Fromak S. A.

## Bibliografía

- [1] Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), Orígen e evolução de plantas cultivadas, 1ra ed., R. Barbieri y E. Tempel, Edits., Brasilia, 2008, p. 991.
- [2] Instituto Nacional de Meteorología (INMET), Agrometeorología dos cultivos: O fator meteorológico na produção agrícola, Brasília - DF, 2009, p. 530.
- [3] I. P. Bejarano, *Práctica dirigida presentada para optar al grado académico de Licenciatura en Ingeniería Agronómica con énfasis en Fitotécnia*, San José, San José, 2013, p. 87.
- [4] Consejo Nacional de Producción. Costa Rica, «Sistema de información agroalimentaria: Boletín No. 1: Análisis de mercados, Cebollas,» 2015.

- [5] C. Kurtz, D. Rogério Schmitt, É. Zunino Sgrott, G. Henrique Wamser, H. Werner, I. A. dos Santos, J. Volni Costa, P. A. de Souza Gonçalves, S. Dias Lannes y V. Carré-Missio, *SISTEMAS DE PRODUÇÃO No 46*, Primeira edição (4a revisão) ed., 2013, p. 106.
- [6] H. Mata Vázquez, J. Patishtán Pérez, E. Vázquez Garcia y M. Ramírez Meraz, Primera ed., D.F., 2011, p. 185.
- [7] B. Bez Birolo, *Relatório de Estágio apresentado ao Curso de Agronomia da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheira Agrônoma*, Santa Catarina, 2011, p. 73.
- [8] R. Testezlaf, *Universidade Estadual de Campinas: Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola.*, São Paulo, Sf..
- [9] R. Vilas Boas, G. Pereira, R. de Sousa y R. Consoni, «Desempenho de cultivares de cebola em função do manejo da irrigação por gotejamento,» *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 15, nº 2, pp. 117 - 124, 27 04 2011.
- [10] H. B. FERREIRA BARRETO, *Tese (doutorado)–Universidade Federal de Lavras*, Lavras, 2015, p. 78.
- [11] G. Libório, S. Oliveira, C. Arago, N. Duarte y C. Fernandes, «Desempenho Agrônômica de Cultivares de Cebola Sob Diferentes Manejos de irrigação no Submédio São Francisco,» *Irriga*, vol. 18, nº 1, pp. 73 - 84, janeiro-março 2013.
- [12] Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), *Sistemas de produção, 3: Cultivo da cebola no Nordeste*, G. M. d. R. Nivaldo Duarte Costa, Ed., 2007, p. 90.
- [13] Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), «Embrapa Hortaliças,» [En línea]. Available: <https://www.embrapa.br/hortaliças/cebola/como-plantar>. [Último acceso: 24 12 2019].
- [14] Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), *Agrometeorologia dos Cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola*, 1ra ed., Brasília, 2009, p. 530.
- [15] Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento, «Embrapa hortaliças: Circular técnica 57,» 2008.
- [16] Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro Nacional de Pesquisa de Hortaliças, «Circular técnica de Embrapa hortaliças,» 1997.
- [17] R. da Costa Ferreira, *Universidade Federal de Campina Grande: Programa de Pós-graduação em Meteorologia*, Campina Grande, Paraíba, 2014.
- [18] J. L. Ríos-Flores, M. Torres-Moreno, M. A. Torres-Moreno y J. E. Cantú Brito, «Eficiencia y productividad del cultivo de frijoles en un sistema de por bombeo en Zacatecas, México,» *Ciencia Naturales y Agropecuarias*, vol. 24, nº 2, pp. 152 - 163, 10 2017.

- [19] G. Rocca da Cunha, A. Santi, A. Pasinato, G. A. Dalmago, J. L. Fernandes Pires y J. A. de Gouvêa, «Gestão da produtividade da água em agricultura: o desafio de elevar o rendimento dos cultivos em ambientes com restrição hídrica,» *Plantio Direto*, vol. 144, pp. 27 - 31, S.f.
- [20] R. Salazar-Moreno, A. Rojano-Aguilar y I. López-Cruz, «La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada,» *Tecnología y Ciencias del agua*, vol. 1, n° 2, pp. 177 - 183, 04 2014.
- [21] F. González Robaina, J. Herrera Puebla, T. López Seijas y G. Cid Lazo, «Productividad del agua en algunos cultivos agrícolas en Cuba,» *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 23, n° 4, pp. 21 - 27, 12 2014.
- [22] V. P. da S. Paz, J. A. Frizzone, T. A. Botrel y M. V. Folegatti, «Otimização do uso da água em sistemas de irrigação por aspersão,» *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 6, n° 3, pp. 404 - 408, 2002.

## 7. Artículo 4

### Efecto de diferentes succiones del agua en el suelo sobre la absorción de CO<sub>2</sub> y la producción de glucosa en el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) c.v. Álvara en invernadero

M.Sc. Adrián Enrique Chavarría Vidal

adchavarría@itcr.ac.cr

Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Universidad Nacional – Universidad Estatal a Distancia

iD: <http://orcid.org/0000-0003-1647-8212>

Dr. Mario Morales Sánchez

Profesor Jubilado

mario.morales@ucr.ac.cr

Dr. Freddy Soto Bravo Autor

freddy.sotobravo@ucr.ac.cr

Universidad de Costa Rica, Estación Experimental

Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica.

iD: <http://orcid.org/0000-0003-1959-9597>

Dr. Asdrúbal Jesús Farías Ramírez

ajfara@gmail.com

Facultad PECEGE. Piracicaba, Sao Paulo, Brasil.

iD: <http://orcid.org/0000-0003-1544-8759>

### Resumen

La absorción de carbono es fundamental para las plantas debido a la necesidad de producción de asimilados por medio de la fotosíntesis. Éstos a su vez las plantas los utilizan para la formación de tejidos, para su metabolismo y para su mantenimiento. Identificar y cuantificar factores que afecten este proceso es menester para procurar un mejoramiento continuo en la productividad.

El objetivo principal de esta investigación fue identificar y cuantificar el efecto de la succión de agua en el suelo sobre la absorción de dióxido de carbono y la producción de glucosa en el cultivo de cebolla, que es una hortaliza de alta importancia en Costa Rica, donde gran cantidad de pequeños productores se dedican a la siembra de éste.

Para el experimento de cebolla se sembró en un invernadero en canastas plásticas perforadas con 44,0 litros de suelo derivado de cenizas volcánicas (Vitrandis) donde se aplicaron diferentes ámbitos de succión de agua. Para suplir el agua se utilizó un sistema de riego por goteo con goteros de 1,0 l h<sup>-1</sup>.

Se encontraron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) tanto en la absorción de dióxido de carbono como en la producción de glucosa para los diferentes ámbitos de succión de agua; el ámbito de menor succión a saber, de -5 a -15 kPa mostró estadísticamente la mayor absorción de CO<sub>2</sub> y la mayor producción de glucosa.

### **Palabras Claves**

Fotosíntesis, dióxido de carbono, succión de agua, cebolla.

### **Abstract**

Carbon absorption is essential for plants due to the need to produce assimilates through photosynthesis. These, in turn, are used by plants for the formation of tissues, for their metabolism and for their maintenance. Identifying and quantifying factors that affect this process is necessary to seek continuous improvement in productivity.

The main objective of this research was to identify and quantify the effect of soil water suction on carbon dioxide absorption and glucose production in onion cultivation. However, it is a highly important crop in Costa Rica, where a large number of small producers are dedicated to planting this crop.

The onion crop was planted in a protected environment in baskets with 44,0 liters of substrate-soil where the different areas of water suction in the soil were applied. To supply the water, a drip irrigation system with drippers of 1,0 l h<sup>-1</sup> was used.

Significant differences ( $p < 0,05$ ) were found both in the absorption of carbon dioxide and in the production of glucose for different areas of water suction in the substrate-soil, among which, the one with the highest absorption of carbon dioxide and The highest production of assimilates was the range from 5 to 15 kPa.

## Keywords

Photosynthesis, carbon dioxide, water suction, onion.

## Introducción

La producción de biomasa por los cultivos está definida por la cantidad de radiación fotosintéticamente activa interceptada y absorbida por las hojas, así como la eficiencia con que estas convierten la energía radiante en energía química por la fotosíntesis [1] [2]. No obstante, estreses ambientales como déficit hídrico, bajas y altas temperaturas, disminución de radiación solar y otros, alteran la estructura y metabolismo de las plantas y por ello afectan su crecimiento y su absorción de dióxido de carbono. Por lo anterior, el flujo de agua a través de una planta debe ser suficiente para mantener la nutrición y la absorción de dióxido de carbono [3] [4] [5].

El agua se transporta desde las zonas de mayor potencial (menos negativo) hacia las zonas de menor potencial (más negativo). La interacción del agua con los solutos disueltos produce un efecto sobre el potencial del agua del suelo en términos de una menor disponibilidad de agua libre [6].

Los productos de la fotosíntesis son tanto glucosa como el oxígeno liberado a la atmósfera, que proviene de la combinación química inicial del dióxido de carbono y el agua en presencia de luz [7]. La glucosa puede ser convertida posteriormente por las plantas en carbohidratos más complejos, en almidón para almacenamiento o pueden ser combinados con otras moléculas de azúcares para formar carbohidratos especializados como la celulosa y también pueden ser combinados con otros nutrientes tales como el nitrógeno o fósforo para formar moléculas complejas como proteínas y ácidos nucleicos. Una porción de la energía obtenida de la fotosíntesis es utilizada por las plantas en el proceso de respiración que provee de energía necesaria para su metabolismo. Si la fotosíntesis total se le resta la energía tanto de respiración como la del metabolismo, se obtiene la fotosíntesis que se ocupa en la producción de biomasa [8].

Del total de radiación solar recibida por la superficie de la tierra, solamente el 44% de la radiación incidente de onda corta tiene longitudes de onda útiles para la fotosíntesis llamada radiación fotosintéticamente activa (PAR: expresado en  $\frac{\mu\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$ ) [8].

El cultivo de cebolla no es excepción y la producción de biomasa está relacionada con la interacción de la temperatura y del conjunto de procesos que permiten a las plantas regular sus funciones biológicas mediante la radiación recibida que hay a lo largo de todo el periodo del cultivo. No obstante, cuando no se satisfacen las exigencias del cultivo no hay una bulbificación correcta, presencia de bulbos pequeños o la no bulbificación, que vienen a ser plantas improductivas. En el caso de la temperatura debe de encontrarse en

un rango de 15,5 a 21,1 °C, pero si las temperaturas son mayores a 30 °C pueden provocar bulbificación prematura indeseable y si las temperaturas son menores a 10 °C por periodos prolongados se puede inducir florecimiento prematuro que también es altamente indeseable [9]. El cultivo de cebolla es exigente en agua, pero que puede sobrevivir en condiciones de estrés hídrico; no obstante, las altas productividades y máximas tasas de crecimiento depende del buen suministro de agua [10].

Iniciada la fase de crecimiento del bulbo, el crecimiento de las hojas se detiene y por eso el tamaño del bulbo en la cosecha es influenciado por el tamaño y por el número de hojas en la planta [11].

## Metodología

La investigación se llevó a cabo en el cantón de Alvarado, distrito Pacayas, de la provincia de Cartago Costa Rica; específicamente en un invernadero ubicado en Patalillo (Barrio Fátima) con una altura de 1600 msnm, precipitación de 2299,8 mm al año en promedio, temperatura promedio de 16,5 °C, brillo solar promedio de 4,3 horas al día y humedad relativa promedio del 88%. Se sembró en suelo derivado de cenizas volcánicas (Vitrandis) con textura franca mezclado con 15% de grava fina y se colocó en canastas de 35,0 cm de ancho; 55,0 cm de largo y 20,0 cm de alto para un total de 44,00 l de suelo. El riego se realizó con un sistema por goteo el cual dotó de 7,80 l h<sup>-1</sup> a cada canasta que contó con 12 plantas sembradas. Estos 7,80 l h<sup>-1</sup> se aplicó por medio de 6 goteros donde cada uno de ellos corresponde a un gotero de 1,30 l h<sup>-1</sup> distribuidas uniformemente en cada una de las canastas. Se sembró el cultivar Álvara (A. cepa) para establecer el experimento con duración de 4,50 meses. Se establecieron 4 tratamientos, a saber 4 diferentes ámbitos de succión de humedad del suelo (partiendo al inicio cuando se realiza el trasplante del cultivo de cebolla) del punto de capacidad de campo de la siguiente manera:

- 1- Tratamiento 1 (Testigo con 4 repeticiones): mantenido con una succión de agua en un rango de 5 a 15 kilopascales (kPa)
- 2- Tratamiento 2 con 3 repeticiones: mantenido con una succión de agua en un rango de 15 a 25 (kPa)
- 3- Tratamiento 3 con 4 repeticiones: mantenido con una succión de agua en un rango de 25 a 35 (kPa)
- 4- Tratamiento 4 con 3 repeticiones: mantenido con una succión de agua en un rango de 35 a 45 (kPa)

El invernadero tiene 30,00 m de largo y 11,50 m de ancho para un área total de 345 m<sup>2</sup>. Se establecieron camas de 4 canastas a lo ancho de cada una de ellas (simulando eras sobre el nivel del terreno) y 16 canastas a lo largo de cada cama, para un total de 14 camas a lo largo del invernadero y contabilizando 64 canastas por cama donde se logró un gran total dentro del invernadero de 896 canastas. Cada canasta tuvo 12 plantas donde se sembró 10752 plantas en total.

Cada canasta tiene internamente “cover” en todo su alrededor para no perder el suelo, pero con orificios en el fondo para el drenaje en el caso de necesitarse y la aireación de esta. Lo anterior, exclusivamente para la calibración inicial, ya que el fundamento es mantener el suelo como máximo a capacidad de campo y con menor humedad porque el suelo va a estar en succión según los tratamientos y en estas condiciones no existe drenaje.

Para las líneas de riego por goteo en todas las unidades experimentales se instalaron las válvulas de paso solenoides con medidores de volumen de agua para control y cuantificación del agua aplicada para cada tratamiento. Se colocó tensiómetros mecánicos y electrónicos por tratamiento para tener el control del riego y mantener el suelo en las succiones propuestas.

Para la estimación de la cuantificación de glucosa y dióxido de carbono necesaria para la producción se utilizó la información de análisis bioquímicos (materia seca, contenido de carbono, contenido de nitrógeno y residuos de ceniza). Todas las ecuaciones para la estimación de la glucosa requerida para el desarrollo del cultivo de cebolla bajo condiciones de diferentes ámbitos de succión de agua en el suelo se tomaron de las siguientes tres referencias Fernández N. [12], Teh C. [13] y Penning F. [14].

Para el contenido de glucosa ( $C_6H_{12}O_6$ ) (CRG) y el dióxido de carbono  $CO_2$  (CPG) capturado para generación de nuevos tejidos para el crecimiento se utilizó la biomasa del cultivo, fundamentado en el método de la caracterización de la composición bioquímica de la misma utilizando análisis químicos de los tejidos para lo cual, se determinó el contenido de carbono en la materia seca (C: g  $kg^{-1}$ ), el contenido de nitrógeno en la materia seca (N: g  $kg^{-1}$ ) y contenido de cenizas (A: g  $kg^{-1}$ ). La cuantificación se efectuó mediante las siguientes ecuaciones:

Contenido de glucosa en los tejidos de las plantas

$$CRGi \left( \frac{g(\text{glucosa})}{g(\text{materia seca})} \right) = \frac{\left[ 5,39 * Ci \left( \frac{g(\text{carbono})}{kg(\text{materia seca})} \right) + 0,8 * Ai \left( \frac{g(\text{ceniza})}{kg(\text{materia seca})} \right) + 5,64 * Ni \left( \frac{g(\text{nitrógeno})}{kg(\text{materia seca})} \right) - 1191 \right] * 1,053}{1000}$$

$$CRGii \left( \frac{g(C_6H_{12}O_6)}{m^2 \text{ terreno} * \text{ día}} \right) = \frac{CRGi \left( \frac{g(C_6H_{12}O_6)}{g(\text{materia seca})} * g(\text{materia seca}) \right)}{\frac{\text{número de días}}{m^2 \text{ terreno}}}$$

$$CRG \left( \frac{g(C_6H_{12}O_6)}{m^2 \text{ terreno} * \text{día}} \right) = \sum_{i=1}^4 CRGi$$

donde

*i*: cada parte individual de la planta (1 = hojas, 2 = tallo, 3 = raíz y 4 = sumideros)

*CRGi*: fotosíntesis neta expresada en cantidad de glucosa utilizada para la constitución de materia seca en cada órgano de la planta

*CRGii*: fotosíntesis neta utilizada diariamente por metro cuadrado de siembra expresado en cantidad de glucosa para cada órgano de la planta

*CRG*: total de fotosíntesis neta utilizada diariamente por metro cuadrado de siembra expresado en cantidad de glucosa

Para el contenido de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) capturado durante el crecimiento se estimó según las siguientes ecuaciones

$$CPGi \left( \frac{g(CO_2)}{g(\text{materia seca})} \right) = \frac{\left[ 4,24 * Ci \left( \frac{g(\text{carbono})}{kg(\text{materia seca})} \right) + 1,17 * Ai \left( \frac{g(\text{ceniza})}{kg(\text{materia seca})} \right) + 8,28 * Ni \left( \frac{g(\text{nitrógeno})}{kg(\text{materia seca})} \right) - 1744 + CRGi \left( \frac{g(\text{glucosa})}{g(\text{materia seca})} \right) * 77,7 \right]}{1000}$$

$$CPGii \left( \frac{g(CO_2)}{m^2 \text{ terreno} * \text{día}} \right) = \frac{CPGi \left( \frac{g(CO_2)}{g(\text{materia seca})} * g(\text{materia seca}) \right)}{\frac{\text{número de días}}{m^2 \text{ terreno}}}$$

$$CPG \left( \frac{g(CO_2)}{m^2 \text{ terreno} * \text{día}} \right) = \sum_{i=1}^4 CPGii$$

donde

*i*: cada parte individual de la planta (1 = hojas, 2 = tallo, 3 = raíz y 4 = sumideros)

*CPGi*: dióxido de carbono utilizado para la constitución de materia seca para cada órgano de la planta

*CPGii*: dióxido de carbono utilizado diariamente por metro cuadrado de siembra para cada órgano de la planta

CPG: total de dióxido de carbono utilizado en la fotosíntesis neta diariamente por metro cuadrado de siembra

El contenido de glucosa empleado en la respiración de mantenimiento ( $Rm$ :  $C_6H_{12}O_6$  g  $m^{-2}$  día $^{-1}$ ) se estimó con base a una proporción al peso de la planta o al peso de un tejido de la planta y se encuentra expresado de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 Rmi \left( \frac{g(\text{glucosa})}{m^2 \text{ terreno} * \text{día}} \right) &= km(\text{hojas}) \left( \frac{g C_6H_{12}O_6}{g \text{ materia seca} * \text{día}} \right) * W(\text{hojas}) \left( \frac{g(\text{materia secas})}{m^2 \text{ terreno}} \right) \\
 &+ km(\text{tallo}) \left( \frac{g C_6H_{12}O_6}{g \text{ materia seca} * \text{día}} \right) * W(\text{tallo}) \left( \frac{g(\text{materia seca})}{m^2 \text{ terreno}} \right) \\
 &+ km(\text{raíces}) \left( \frac{g C_6H_{12}O_6}{g \text{ materia seca} * \text{día}} \right) * W(\text{raíces}) \left( \frac{g(\text{materia seca})}{m^2 \text{ terreno}} \right) \\
 &+ km(\text{almacenamiento}) \left( \frac{g C_6H_{12}O_6}{g \text{ materia seca} * \text{día}} \right) \\
 &* W(\text{almacenamiento}) \left( \frac{g(\text{materia seca})}{m^2 \text{ terreno}} \right) \\
 \\
 Rmii \left( \frac{g(\text{glucosa})}{m^2 \text{ de terreno} * \text{día}} \right) &= Rmi * \frac{W(\text{hojas verdes}) \left( \frac{g(\text{materia secas})}{m^2 \text{ suelo}} \right)}{W(\text{hojas verdes} + \text{hojas muertas}) \left( \frac{g(\text{materia secas})}{m^2 \text{ suelo}} \right)} \\
 \\
 Rm \left( \frac{g(\text{glucosa})}{m^2 \text{ de terreno} * \text{día}} \right) &= \sum_{i=1}^4 Rmii
 \end{aligned}$$

donde:

$i$ : cada parte individual de la planta (1 = hojas, 2 = tallo, 3 = raíz y 4 = sumideros)

$Rmi$ : respiración de mantenimiento debida a la materia vegetal para cada órgano de la planta

$Kmi$ : coeficiente de mantenimiento de cada órgano de la planta (cuadro 1)

$Wi$ : peso de la materia seca de cada órgano de la planta

$Rmii$ : respiración de mantenimiento corregida debida al material vegetal para cada órgano de la planta

$Rm$ : glucosa empleada en la respiración de mantenimiento

El contenido de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) presente en la respiración de mantenimiento se utilizaron las leyes de conservación de la energía y materia por medio de las ecuaciones químicas ajustadas y cálculos estequiométricos ( $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O$ ) y se encuentra expresado de la siguiente manera:

$$mi(CO_2)Rm = \frac{vi}{vd} * \frac{Mi}{Md} * Rm$$

donde:

$mi(CO_2)Rm$  = cantidad de sustancia incógnita (mismas unidades de  $Rm$ )

$vi$  = número estequiométrico de sustancia incógnita ( $CO_2 = 6$ )

$vd$  = número estequiométrico de sustancia conocida ( $C_6H_{12}O_6 = 1$ )

$Mi$  = masa molar de la sustancia incógnita ( $CO_2 = 44,01 \text{ g mol}^{-1}$ )

$Md$  = masa molar de la sustancia conocida ( $C_6H_{12}O_6 = 180,18 \text{ g mol}^{-1}$ )

$Rm$  = cantidad de respiración de mantenimiento (sustancia conocida  $C_6H_{12}O_6$ )

Cuadro 1: Coeficientes de respiración de mantenimiento para cada uno de los órganos de las plantas

Órganos de la planta	Coeficiente $Kmi \left( \frac{\frac{g(\text{glucosa})}{g(\text{materia seca})}}{\text{día}} \right)$
Hojas verdes	0,030
Tallo	0,015
Raíces	0,015
Órganos de almacenamiento	0,010

Tomado de: [13]

El requerimiento de glucosa para la síntesis de nuevo material de las partes de las plantas llamado comúnmente como respiración de crecimiento ( $g C_6H_{12}O_6 / g$  materia seca) se expresó en las siguientes ecuaciones para su cálculo:

$$Gi \left( \frac{g(\text{glucosa})}{g(\text{materia seca})} \right) = 3,736 * Ci \left( \frac{g(\text{carbono})}{kg(\text{materia seca})} \right) + 6,136 * Ni \left( \frac{g(\text{nitrógeno})}{kg(\text{materia seca})} \right) - 0,251$$

$$G_{ii} \left( \frac{g(\text{glucosa})}{m^2 \text{ de terreno} * \text{día}} \right) = \frac{\left( G_i \left( \frac{g(\text{glucosa})}{g(\text{materia seca})} \right) * g(\text{materia seca}) \right)}{m^2 \text{ de terreno} * \text{número de días}}$$

$$G \left( \frac{g(\text{glucosa})}{m^2 \text{ de terreno} * \text{día}} \right) = \sum_1^4 G_{ii}$$

donde

*i*: cada parte individual de la planta (1 = hojas, 2 = tallo, 3 = raíz y 4 = sumideros)

*C<sub>i</sub>*: contenido de carbono

*N<sub>i</sub>*: contenido de nitrógeno

*G<sub>i</sub>*: glucosa requerida para el crecimiento o síntesis de nuevo material (g C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub> / g materia seca)

*G<sub>ii</sub>*: glucosa requerida para el crecimiento síntesis de nuevo material empleada por cada metro cuadrado por cada día

*G*: total de glucosa requerida para la respiración de crecimiento total empleada en toda la planta para la síntesis de nuevo material

Para la estimación del contenido de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) presente en la respiración de crecimiento se utilizaron las leyes de la conservación de la energía-materia por medio de las ecuaciones químicas ajustadas y cálculos estequiométricos (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>+6O<sub>2</sub>→6CO<sub>2</sub>+6H<sub>2</sub>O) y se encuentra expresado de la siguiente manera:

$$mi(CO_2)G = \frac{vi}{vd} * \frac{Mi}{Md} * G(C_6H_{12}O_6)$$

donde:

*mi(CO<sub>2</sub>)G* = cantidad de sustancia incógnita (g)

*vi* = número estequiométrico de sustancia incógnita (CO<sub>2</sub> = 6)

*vd* = número estequiométrico de sustancia conocida (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub> = 1)

*Mi* = masa molar de la sustancia incógnita (CO<sub>2</sub> = 44,01 g mol<sup>-1</sup>)

*Md* = masa molar de la sustancia conocida (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub> = 180,18 g mol<sup>-1</sup>)

*G* = total de glucosa requerida para la respiración de crecimiento empleada en toda la planta (sustancia conocida)

La fotosíntesis gruesa (FG) llamada también total o bruta, consistió en la suma de las tres necesidades de glucosa de la planta previamente establecidas en las ecuaciones anteriores.

$$FG = CRG \left( \frac{g(\text{glucosa})}{m^2 \text{ terreno} * \text{día}} \right) + Rm \left( \frac{g(\text{glucosa})}{m^2 \text{ de terreno} * \text{día}} \right) + G \left( \frac{g(\text{glucosa})}{m^2 \text{ de terreno} * \text{día}} \right)$$

Para el caso del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) total utilizado se empleó la suma de las tres necesidades previamente establecidas en las ecuaciones anteriores.

$$\begin{aligned} Total\ CO_2 = & CPG \left( \frac{g(CO_2)}{m^2 \text{ terreno} * \text{día}} \right) + mi(CO_2)Rm \left( \frac{g(CO_2)}{m^2 \text{ terreno} * \text{día}} \right) \\ & + mi(CO_2)G \left( \frac{g(CO_2)}{m^2 \text{ terreno} * \text{día}} \right) \end{aligned}$$

Con la información del área total de siembra y el número de día se puede obtener el total de fotosíntesis y dióxido de carbono consumido en peso por cosecha.

## Resultados y discusión

Los ámbitos de succión de agua crecientes en el suelo produjeron diferencias significativas (p-value<0,05) en la absorción de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub> tn ha<sub>efectiva</sub><sup>-1</sup>) de la planta de cebolla, a excepción de los tratamientos T3 y T4 que no mostraron diferencias entre sí (Cuadro 2).

La absorción de CO<sub>2</sub> en la planta de cebolla presentó un descenso continuo conforme aumentó la succión de agua en el sustrato de suelo (Fig. 1) donde T2 (15-25 kPa) descendió 38,43 % respecto al T1 (5-15 kPa), el T3 (25-35 kPa) 48,31% respecto a T2 (15-25 kPa) y el T4 (35-45 kPa) 53,12% respecto al T3 (25-35 kPa).

Cuadro 2: Absorción de CO<sub>2</sub> (tn ha<sub>efectiva</sub><sup>-1</sup>) en el cultivo de cebolla en invernadero según la succión de agua presente en el suelo (densidad 623 377 plantas ha<sub>efectiva</sub><sup>-1</sup>)

Factor	Repeticiones	Absorción media CO <sub>2</sub> (tn ha <sub>efectiva</sub> <sup>-1</sup> )	StDev	Significancia	%CV
T1 (5-15) kPa	4	30,70	3,94	A	12,83
T2 (15-25) kPa	3	18,90	13,13	B	16,56
T3 (25-35) kPa	4	9,77	0,70	C	7,11
T4 (35-45) kPa	3	4,58	0,91	C	19,86

Promedios con diferentes letras presentan diferencias significativas (P-value<0,05)

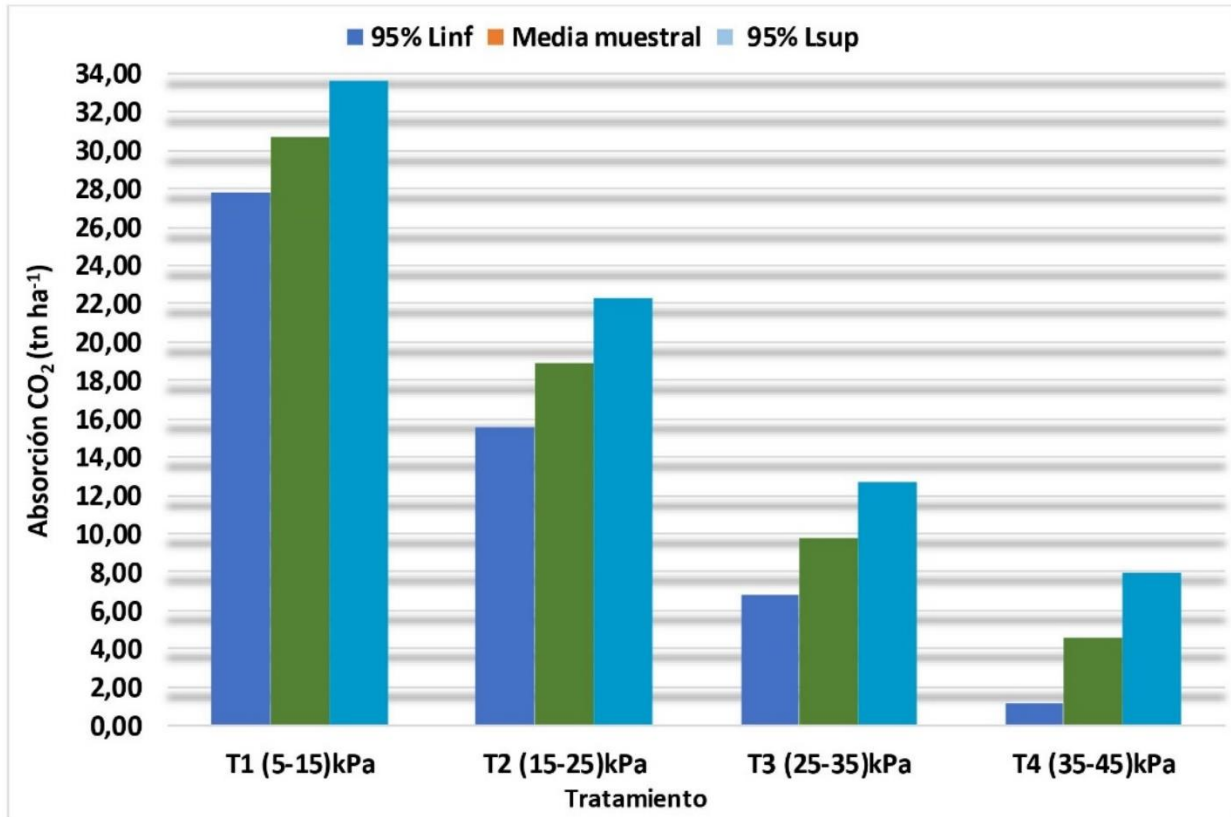


Fig 1: Absorción de CO<sub>2</sub> según los ámbitos de succión de humedad presente en el suelo en el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) c.v. *Álvara* en invernadero

En concordancia con lo anterior se obtuvo para la relación de la succión del agua del suelo y la absorción de CO<sub>2</sub> para el cultivo de cebolla un modelo matemático cuadrático con un coeficiente de determinación estadísticamente significativo de carácter inverso.

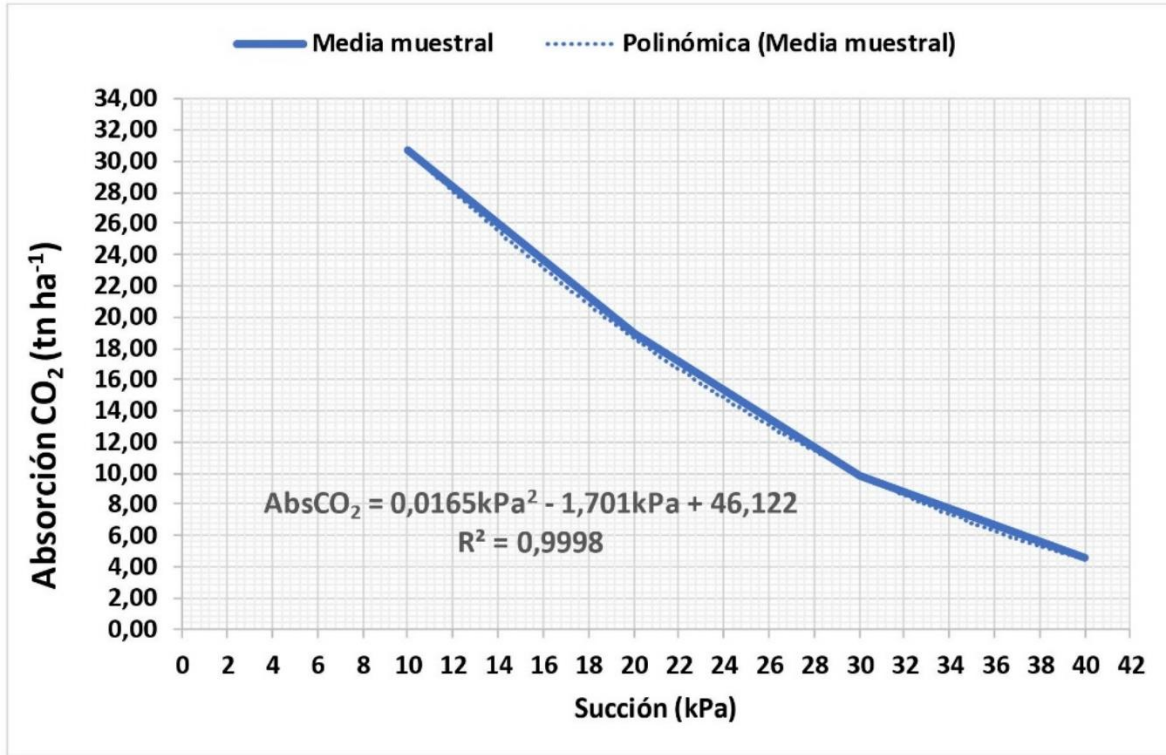


Fig 2: Efecto de la succión del agua en el suelo sobre la absorción CO<sub>2</sub> (tn ha<sup>-1</sup>) en el cultivo de cebolla en invernadero

En adición, los ámbitos de succión de agua crecientes en el suelo produjeron diferencias significativas ( $p$ -value < 0,05) en la fotosíntesis gruesa (fotosíntesis de: mantenimiento + crecimiento + biomasa) expresado en producción de glucosa en las plantas de cebolla, a excepción de los tratamientos T3 y T4.

El mayor valor de fotosíntesis gruesa se observó en el ámbito de menor succión de succión de agua en el suelo evaluado (T1), seguido en orden por los tratamientos 2, 3 y 4 donde estos dos últimos no presentaron variación estadística (Cuadro 3).

Cuadro 3: Fotosíntesis gruesa expresado como producción de glucosa en el cultivo de cebolla ( $C_6H_{12}O_6$  tn  $ha_{efectiva}^{-1}$ ) en invernadero según diferentes ámbitos de succión de agua presente en el suelo (densidad 623377 plantas  $ha_{efectiva}^{-1}$ )

Factor	Repeticiones	Glucosa media (tn $ha_{efectiva}^{-1}$ )	StDev	Significancia	%CV
T1 (5-15) kPa	4	20,95	2,69	A	12,84
T2 (15-25) kPa	3	12,90	2,14	B	16,59
T3 (25-35) kPa	4	6,67	0,47	C	7,11
T4 (35-45) kPa	3	3,12	0,62	C	19,87

Promedios con diferentes letras presentan diferencias significativas (P-value<0,05)

La producción de glucosa en la planta de cebolla presentó un descenso continuo conforme aumentó la succión de agua en el suelo (Fig. 3) donde T2 (15-25) kPa descendió 38,42 % respecto al T1 (5-15) kPa, el T3 (25-35) kPa 48,29% respecto a T2 (15-25) kPa y el T4 (35-45) kPa 53,22% respecto al T3 (25-35) kPa.

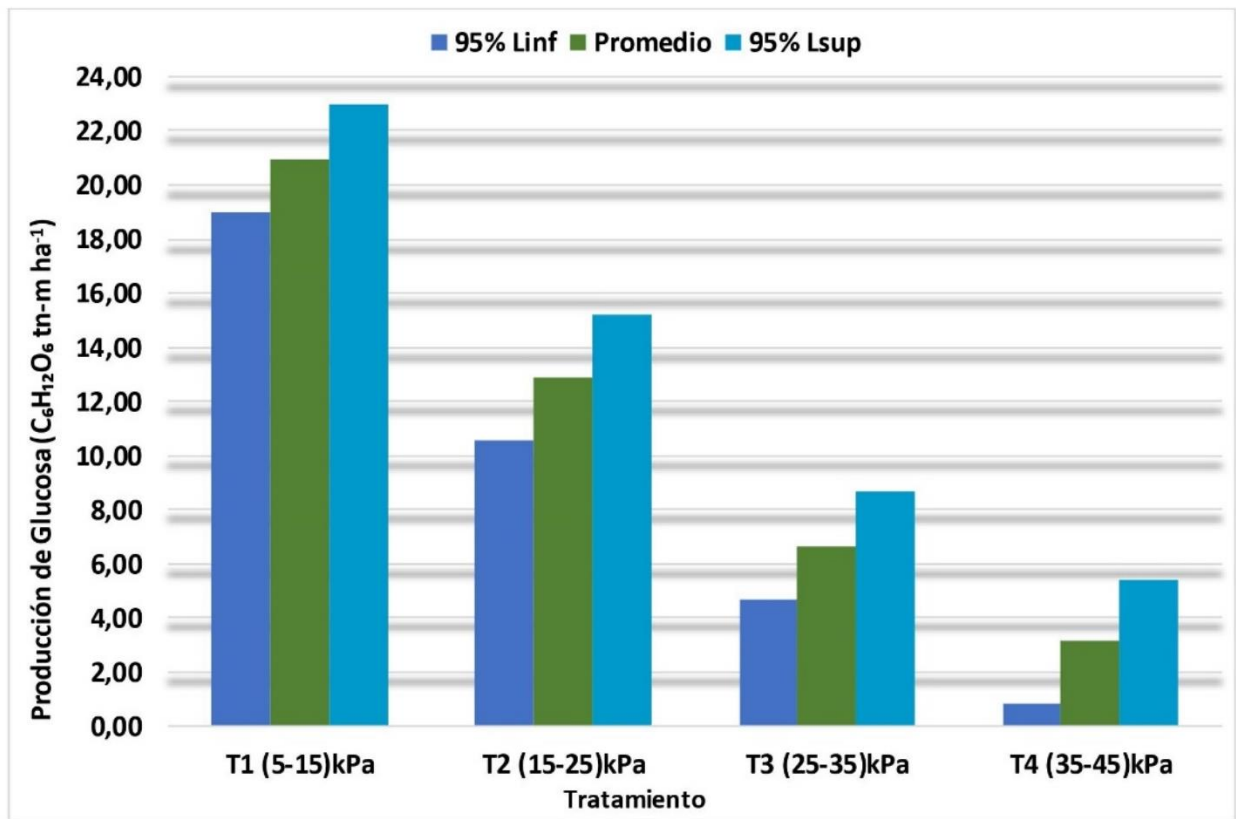


Fig 3: Fotosíntesis gruesa (mantenimiento, crecimiento y biomasa) expresado en producción de glucosa según la succión de agua presente en el suelo para todo el periodo del cultivo de cebolla en invernadero

Se encontró para la relación de la succión del agua en el suelo y la producción de glucosa por parte del cultivo de cebolla un modelo matemático cuadrático con un coeficiente de determinación estadísticamente significativo ( $p\text{value} < 0,01$ ) de carácter inverso (Fig. 4).

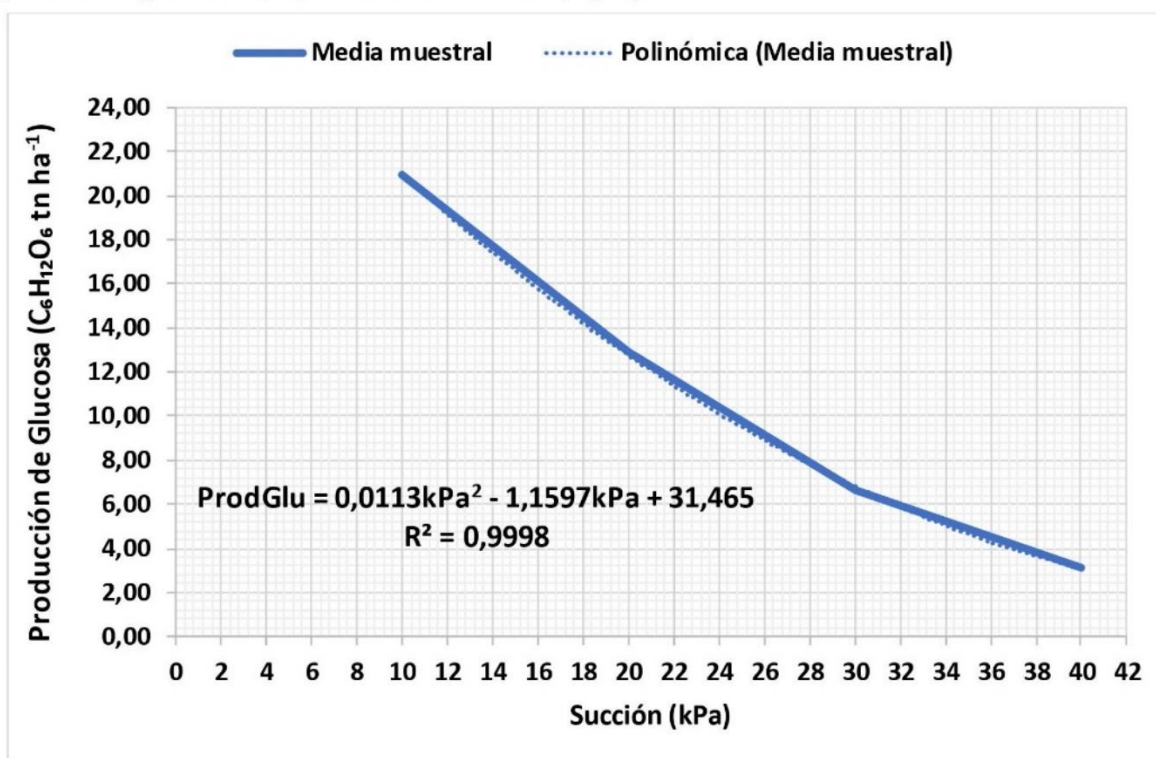


Fig 4: Efecto de la succión del agua en el suelo sobre la producción de glucosa en la plantación de cebolla en invernadero

## Conclusiones

Los diferentes ámbitos de succión de agua en el suelo produjeron un efecto directo tanto en la absorción de  $CO_2$  total como en la producción de glucosa total en el cultivo de cebolla.

A mayor succión de agua en el suelo se presentó un comportamiento descendente tanto en la absorción de dióxido de carbono, como en la producción de glucosa.

La mayor producción de glucosa total se observó en el ámbito de succión del agua del suelo de -5 a -15 kPa.

La metodología de estimación del  $CO_2$  absorbido y de la glucosa total producida propuestos por los autores Fernández N., Teh C. y Penning F. es una opción válida para el estudio del efecto del déficit hídrico sobre estas.

## Agradecimientos

Se agradece a las siguientes personas físicas y jurídicas por sus aportes al desarrollo de la presente investigación.

- 1- Comisión de Manejo y Ordenamiento de la Cuenca Alta Río Reventazón (COMCURE)  
(<https://sites.google.com/site/comcurecr/Home>)
- 2- Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) (<https://www.tec.ac.cr/>)
- 3- Productor Allen Aguilar Chacón
- 4- Fromak S. A.

## Bibliografía

- [1] R. W. Thimijan y R. D. Heins , «Photometric, Radiometric, and Quantum Light Units of Measure: A Review of Procedures for Interconversion,» *American Society for Horticultural Science: HortScienc*, vol. 18, nº 6, pp. 818 - 820, 12 1983.
- [2] P. Gardner, B. Pearce y L. Mitchel, *Physiology of Crop Plants*, 2000, pp. 31 - 57.
- [3] B. Kimball, «Crop responses to elevated CO<sub>2</sub> and interactions with H<sub>2</sub>O, N, and temperature,» *Current Opinion in Plant Biology*, vol. 31, pp. 36 - 43, 2016.
- [4] B. Kimball, «Carbon Dioxide and Agricultural Yield: An Assemblage and Analysis of 430 Prior Observations,» *Agronomy Journal*, vol. 75, pp. 779 - 788, Set - Oct 1983.
- [5] C. Mota Cadenas, Murcia, 2011, p. 217.
- [6] L. Patricia Moreno, «Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico,» *Agronomía Colombiana*, vol. 27, nº 2, pp. 179 - 191, 2009.
- [7] A. Trindade Almeida, E. Rayssa Oliveira, J. da Silvia dos Santos, M. Pinto Peixoto, V. de Carli Poelking y C. Pereira Peixoto, *Principios de fisiología vegetal: Teoría y práctica*, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: PoD, 2020, p. 257.
- [8] E. Dias de Freitas, *Universidade de São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico, Departamento de Ciências Atmosféricas, Agrometeorologia*, São Paulo: Departamento de Ciências Atmosféricas do IAG-USP, 2005, p. 153.

- [9] Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), Sistemas de produção, 3: Cultivo da cebola no Nordeste, G. M. d. R. Nivaldo Duarte Costa, Ed., 2007, p. 90.
- [10] Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), «Embrapa Hortaliças».
- [11] Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA, Agrometeorologia dos Cultivos: O fator meteorológico na produção agrícola, 1ª ed., Brasília-DF, 2009, p. 530.
- [12] N. Fernandes Lopes y M. d. G. De Souza Lima, Fisiologia da produção, Viçosa, Minas Gerais: Universidade Federal de Viçosa, 2015, p. 494.
- [13] C. Teh, Introduction to mathematical modeling oh crop growth, Serdang, Selangor: Universiti Putra Malaysia, 2006, p. 256.
- [14] F. Penning de Vries, D. Jansen, H. ten Berge y A. Bakema, Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops, Wageningen: Centre for Agricultural Publishing and Documentation (Pudoc), Wageningen, the Netherlands, 1989, p. 279.

## 8. Artículo 5

### Efecto de diferentes succiones del agua en el suelo sobre la eficiencia de uso del agua en el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) c.v. Álvara en invernadero

M.Sc. Adrián Enrique Chavarría Vidal

adchavarría@itcr.ac.cr

Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Universidad Nacional – Universidad Estatal a Distancia

iD: <http://orcid.org/0000-0003-1647-8212>

Dr. Mario Morales Sánchez

Profesor Jubilado

mario.morales@ucr.ac.cr

Dr. Freddy Soto Bravo Autor

freddy.sotobravo@ucr.ac.cr

Universidad de Costa Rica, Estación Experimental

Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica.

iD: <http://orcid.org/0000-0003-1959-9597>

Dr. Asdrúbal Jesús Farías Ramírez

ajfara@gmail.com

Facultad PECEGE. Piracicaba, Sao Paulo, Brasil.

iD: <http://orcid.org/0000-0003-1544-8759>

### Resumen

La eficiencia del uso del agua debe de estimarse para dimensionar y concientizar el impacto del sistema productivo con respecto al recurso hídrico y permitir la búsqueda de alternativas para disminuir el consumo de agua.

El presente estudio estimó la eficiencia del uso del agua en cebolla cultivada en invernadero desde las perspectivas de producción comercial de bulbos, producción de biomasa total, la absorción de dióxido de carbono y la producción de glucosa.

El ámbito donde se halló la mayor eficiencia del uso del agua encontrado en el cultivo de cebolla fue de -5 a -15 kPa con valores de 21,41 (kg bf (agua m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup> (ha<sub>efectiva</sub>)<sup>-1</sup>), 1,69 (kg biomasa (agua m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup> (ha<sub>efectiva</sub>)<sup>-1</sup>), 4,63 (tn glucosa (agua m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup> (ha<sub>efectiva</sub>)<sup>-1</sup>) y 6,79 (tn CO<sub>2</sub> (agua m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup> (ha<sub>efectiva</sub>)<sup>-1</sup>).

## Palabras Claves

Fotosíntesis, dióxido de carbono, succión de agua, cebolla.

## Abstract

The efficiency of water use must be estimated to size and raise awareness of the impact of the productive system with respect to water resources and allow the search for alternatives to reduce water consumption in agricultural production.

The present study estimated the water use efficiency of greenhouse-grown onion from the perspectives of commercial bulb production, total biomass production, carbon dioxide uptake, and glucose production. The range of greatest efficiency of water use found in onion cultivation was 5 – 15 kPa where 21.41 (bf kg (water m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup> (ha<sub>effective</sub>)<sup>-1</sup>), 1.69 (Bio kg ( water m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup> (ha<sub>effective</sub>)<sup>-1</sup>), 4.63 (Gluc tn (water m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup> (ha<sub>effective</sub>)<sup>-1</sup>) and 6.79 (CO<sub>2</sub> tn (water m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup> (ha<sub>effective</sub>)<sup>-1</sup>).

## Keywords

Photosynthesis, carbon dioxide, water suction, onion.

## Introducción

La mayor parte del agua absorbida por las raíces de las plantas se evapora de la superficie de las hojas por transpiración, mientras que una pequeña parte permanece en la planta para satisfacer las demandas de crecimiento y otros procesos metabólicos [1]. La eficiencia en el uso del agua (EUA) de una determinada especie vegetal expresa la capacidad de fijar el dióxido de carbono mientras transpira. También se mencionan que la eficiencia en el uso del agua (EUA) se puede expresar de varias formas [1]:

- 1- EUA de la hoja, es la relación entre la ganancia de carbono unitario fijado por fotosíntesis por unidad de agua transpirada para una reducción de 1 kPa de déficit de presión de vapor.
- 2- EUA de la planta, corresponde a la relación entre la biomasa seca producida y la lámina de agua transpirada o por unidad de agua transpirada.
- 3- EUA agronómica, es la relación entre la producción unitaria de cosecha (kg) por unidad de agua transpirada.

La biomasa vegetal es producida a partir de la fijación de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) atmosférico, utilizando la radiación solar como fuente de energía, más específicamente, la radiación fotosintéticamente activa (PAR). La Productividad Primaria Líquida es usualmente expresada en unidad de materia orgánica seca por unidad de área por unidad de tiempo (por ejemplo:  $\text{g (m}^2 \text{ día)}^{-1}$ ,  $\text{kg (ha mes)}^{-1}$  o  $\text{kg (ha año)}^{-1}$  [2].

El proceso base de la producción de nueva biomasa (fotosíntesis) y el del gasto de agua (transpiración) se producen a la vez y la entrada del dióxido de carbono y la salida del agua utilizan la misma vía, los estomas en las hojas. Cuanto más tiempo permanezcan abiertos, más absorción de  $\text{CO}_2$  ocurre, pero también más agua es transpirada. El precio en la cantidad de agua gastada para la producción biomasa, es por tanto inevitable y alto. La producción de biomasa sin agua es imposible para las plantas [3]. Esto se puede observar en la figura 1.

La eficiencia del uso del agua en la producción depende tanto de la cantidad de agua utilizada por el cultivo, como de la cosecha obtenida. Dependiendo de la duración del período de estrés hídrico y su magnitud, puede causar pérdidas en el rendimiento de 20 a 100 % en el cultivo de cebolla [4]. También se indica que el estrés por sequía es el factor abiótico que afecta en mayor grado la producción mundial de cultivos y en consecuencia de alimentos.

Para cebolla se informa de eficiencias del uso del agua de 6,93 a 19,4 kg bf ( $\text{agua m}^3$ )<sup>-1</sup> (kilogramos de bulbo fresco por metro cúbico de agua)[5]. En Caatinga (Brasil) se observó una disminución en la eficiencia del uso del agua de 10,75 a 2,51 kgbf ha<sup>-1</sup> m<sup>-3</sup> a medida que las succiones de agua del suelo aumentaron de -20 a -50 kPa, respectivamente [6]. En Curitiba (Brasil) se tuvo una máxima eficiencia del uso del agua de 4,24 kgbf ha<sup>-1</sup> m<sup>-3</sup> para aplicaciones de 6000 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> en todo el periodo del cultivo [7]. No obstante, los mismos autores [7] citan que en Lavras – Minas Gerais se hallaron eficiencias de uso del agua de comportamiento lineal creciente, cuando se evaluaron succiones de agua en el suelo de -15 kPa hasta -75 kPa, con un valor máximo de eficiencia del uso del agua de 10,51 kgbf m<sup>3</sup> a una succión de -75 kPa, que fue la menor lámina de agua aplicada (2770 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>), en total discrepancia de los resultados hallados por la mayoría de los autores.

En Botucatu (Brasil) en un estudio de seis diferentes succiones de agua en el suelo sobre la producción de bulbos comerciales y la masa media de los bulbos se encontraron los mayores valores cuando se regó en torno a los -15 kPa a una profundidad de 0,15 m [8].

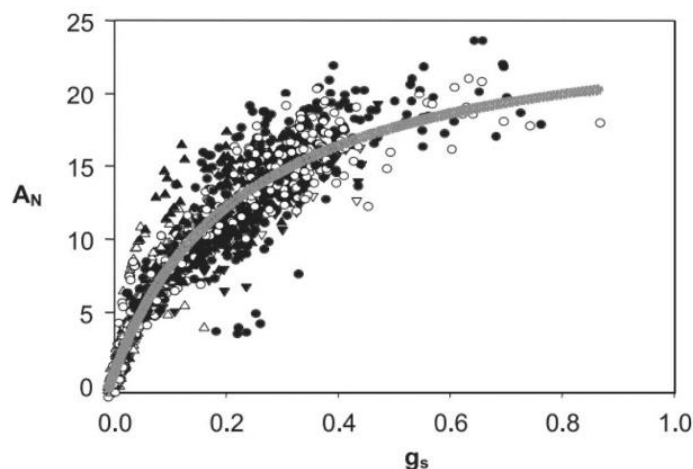


Figura 1: Tomado de [3]. *Relación entre fotosíntesis neta ( $A_N$ :  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) y conductancia estomática ( $g_s$ :  $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) en 23 variedades de vid.*

## Metodología

La investigación se llevó a cabo en el cantón de Alvarado, distrito Pacayas, de la provincia de Cartago Costa Rica; específicamente en un invernadero ubicado en Patalillo (Barrio Fátima) con una altura de 1600 msnm, precipitación de 2299,8 mm al año en promedio, temperatura promedio de 16,5 °C, brillo solar promedio de 4,3 horas al día y humedad relativa promedio del 88%. Se sembró en suelo derivado de cenizas volcánicas (Vitrand) con textura franca mezclado con 15% de grava fina y se colocó en canastas de 35,0 cm de ancho; 55,0 cm de largo y 20,0 cm de alto para un total de 44,00 l de suelo. El riego se realizó con un sistema por goteo el cual dotó de 7,80 l h<sup>-1</sup> a cada canasta que contó con 12 plantas sembradas. Estos 7,80 l h<sup>-1</sup> se aplicó por medio de 6 goteros donde cada uno de ellos corresponde a un gotero de 1,30 l h<sup>-1</sup> distribuidas uniformemente en cada una de las canastas. Se sembró el cultivar Álvara (A. cepa) para establecer el experimento con duración de 4,50 meses. Se establecieron 4 tratamientos, a saber 4 diferentes ámbitos de succión de humedad del suelo (partiendo al inicio cuando se realiza el trasplante del cultivo de cebolla) del punto de capacidad de campo de la siguiente manera:

- 1- Tratamiento 1 (Testigo con 4 repeticiones): mantenido con una succión de agua en un rango de 5 a 15 kilopascales (kPa)

- 2- Tratamiento 2 con 3 repeticiones: mantenido con una succión de agua en un rango de 15 a 25 (kPa)
- 3- Tratamiento 3 con 4 repeticiones: mantenido con una succión de agua en un rango de 25 a 35 (kPa)
- 4- Tratamiento 4 con 3 repeticiones: mantenido con una succión de agua en un rango de 35 a 45 (kPa)

El invernadero tiene 30,00 m de largo y 11,50 m de ancho para un área total de 345 m<sup>2</sup>. Se establecieron camas de 4 canastas a lo ancho de cada una de ellas (simulando eras sobre el nivel del terreno) y 16 canastas a lo largo de cada cama, para un total de 14 camas a lo largo del invernadero y contabilizando 64 canastas por cama donde se logró un gran total dentro del invernadero de 896 canastas. Cada canasta tuvo 12 plantas, para un total de 10752 plantas sembradas.

Cada canasta tenía internamente “cover” en todo su alrededor para no perder suelo, pero con orificios en el fondo para el drenaje en el caso de necesitarse y la aireación de esta. Lo anterior, exclusivamente para establecer la calibración inicial, ya que el principio fue mantener el suelo como máximo a capacidad de campo y en estas condiciones no existe drenaje.

Para las líneas de riego por goteo, en todas las unidades experimentales se instalaron las válvulas de paso solenoides con medidores de volumen de agua para control y cuantificación del agua aplicada para cada tratamiento. Se colocaron tensiómetros mecánicos y tensiómetros electrónicos en las canastas de los tratamientos para garantizar el mantenimiento de los ámbitos de succión del agua.

## Resultados y discusión

Los ámbitos de succión de agua crecientes en el suelo produjeron diferencias significativas (P-value<0,05) en la eficiencia agrícola del uso del agua, a excepción de los tratamientos T1 y T2 que no mostraron diferencia entre si (Cuadro 1).

Cuadro 1: Producción de bulbo fresco (bf) por unidad de agua consumida (m<sup>3</sup>) en el cultivo de cebolla (bf kg (agua m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup> (ha efectiva)<sup>-1</sup>) en invernadero en diferentes ámbitos de succión de agua en el suelo (densidad 623 377 plantas ha<sub>efectiva</sub><sup>-1</sup>)

Factor	Repeticiones	EUA (bf kg (agua m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup> (ha <sub>efectiva</sub> ) <sup>-1</sup> )	StDev	Significancia	%CV
T1 (5-15) kPa	4	21,41	2,13	A	9,95
T2 (15-25) kPa	3	17,45	3,05	A	17,48
T3 (25-35) kPa	4	10,285	0,596	B	5,79
T4 (35-45) kPa	3	5,25	1,019	C	19,41

Promedios con diferentes letras presentan diferencias significativas (P-value<0,05)

Los diferentes ámbitos de succión de agua en el suelo también produjeron diferencias significativas ( $P$ -value $<0,05$ ) en la eficiencia del uso del agua para la producción de biomasa total de cebolla. Los tratamientos T1 y T2 no se diferencian entre sí, pero se diferenciaron estadísticamente de los tratamientos T3 y T4 que no mostraron diferencias entre sí (Cuadro 2).

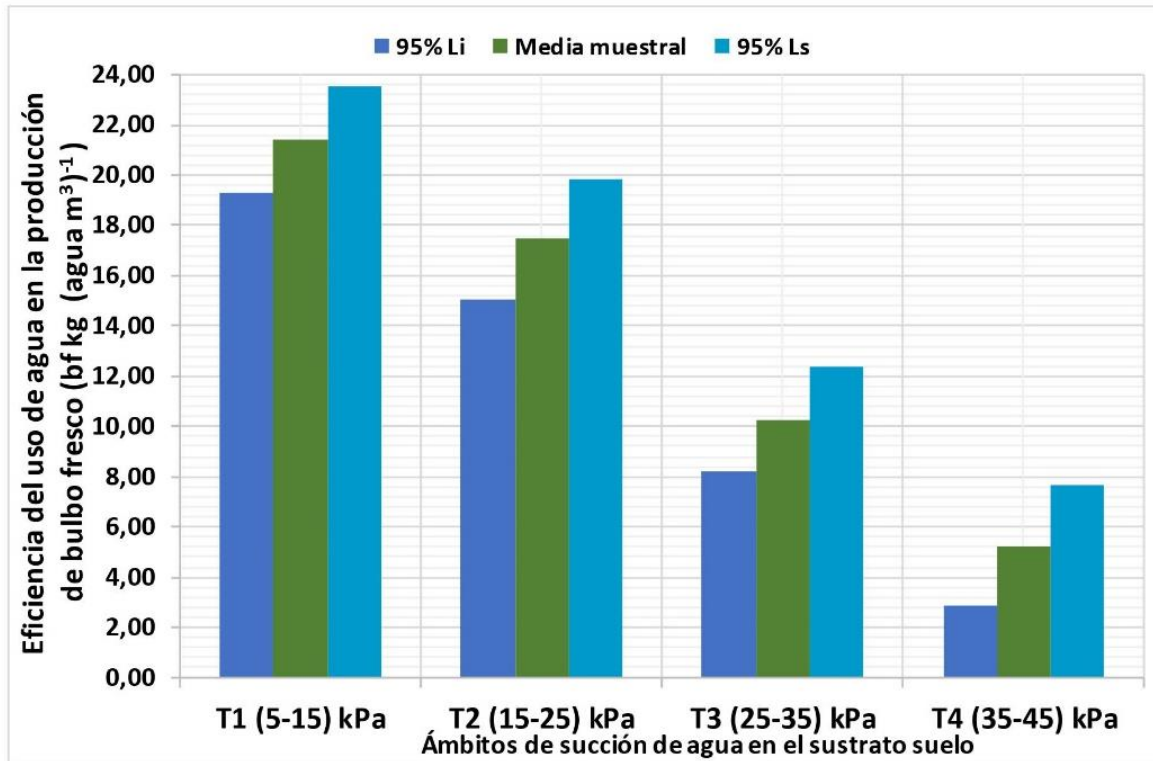


Fig. 2: Eficiencia del uso del agua para producir bulbo fresco en los diferentes ámbitos de succión de agua en el suelo en el cultivo de cebolla en invernadero

Cuadro 2: Producción de biomasa (b) por unidad de agua consumida ( $m^3$ ) en el cultivo de cebolla en invernadero ( $b \text{ kg (agua } m^3)^{-1} (\text{ha}_{\text{efectiva}})^{-1}$ ) según diferentes ámbitos de succión presentes en el suelo (densidad 623 377 plantas  $\text{ha}_{\text{efectiva}}^{-1}$ )

Factor	Repeticiones	EUA ( $b \text{ kg (agua } m^3)^{-1} (\text{ha}_{\text{efectiva}})^{-1}$ )	StDev	Significancia	%CV
T1 (5-15) kPa	4	1,693	0,246	A	14,53
T2 (15-25) kPa	3	1,465	0,243	A	16,59
T3 (25-35) kPa	4	0,8371	0,0594	B	7,10
T4 (35-45) kPa	3	0,4091	0,0794	B	19,41

Promedios con diferentes letras presentan diferencias significativas ( $P$ -value $<0,05$ )

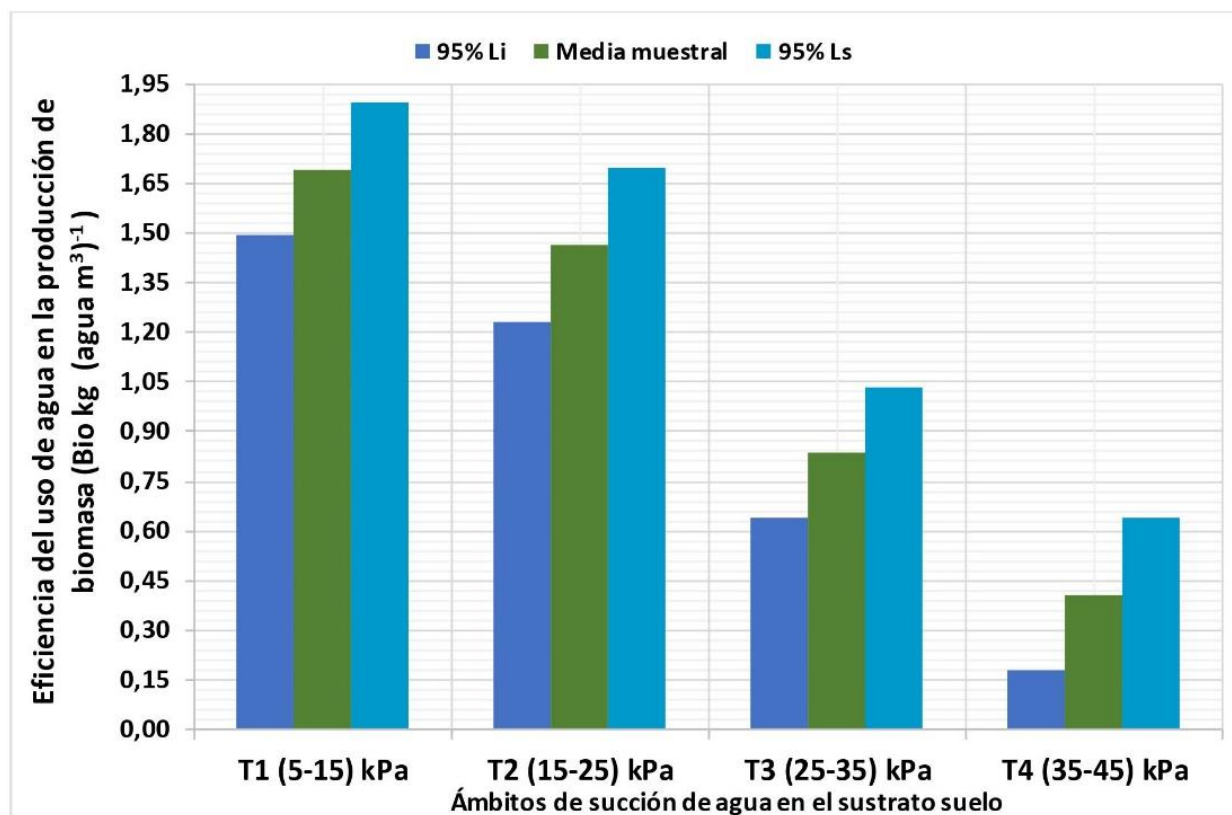


Fig. 3: Eficiencia del uso del agua para producir biomasa según los ámbitos de succión de agua en el suelo en el cultivo de cebolla en invernadero

Por otra parte, los ámbitos de succión de agua crecientes en el suelo produjeron diferencias significativas ( $p\text{-value} < 0,05$ ) en la eficiencia del uso del agua para la producción de glucosa total (fotosíntesis gruesa: respiración de mantenimiento + metabolismo de crecimiento + biomasa) en la planta de cebolla.

Cuadro 3: Producción de glucosa (Gluc) por unidad de agua consumida en el cultivo de cebolla en invernadero ( $\text{tn Gluc (agua m}^3\text{)}^{-1} (\text{ha}_{\text{efectiva}})^{-1}$ ) según diferentes ámbitos de succión presentes en el suelo (densidad 623377 plantas  $\text{ha}_{\text{efectiva}}^{-1}$ )

Factor	Repeticiones	EUA (Gluc kg (agua m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup> (ha <sub>efectiva</sub> ) <sup>-1</sup> )	StDev	Significancia	%CV
T1 (5-15) kPa	4	4,631	0,595	A	12,85
T2 (15-25) kPa	3	3,853	0,635	A	16,48
T3 (25-35) kPa	4	2,0317	0,1367	B	6,73
T4 (35-45) kPa	3	1,122	0,215	B	19,16

Los valores de eficiencia del uso del agua en el cultivo de cebolla (Fig. 4) para la producción de glucosa total (fotosíntesis gruesa: respiración de mantenimiento + metabolismo de crecimiento + biomasa) se encontraron en los siguientes ámbitos, T1 (5-15) kPa de 4,13 a 5,13 Gluc kg (agua m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup> ha<sub>efectiva</sub><sup>-1</sup>, T2 (15-25) kPa de 3,28 a 4,43 Gluc kg ((agua m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup> ha<sub>efectiva</sub><sup>-1</sup>, T3 (25-35) kPa de 1,53 a 2,53 Gluc kg ((agua m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup> ha<sub>efectiva</sub><sup>-1</sup> y T4 (35-45) kPa de 0,55 a 1,70 Gluc kg ((agua m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup> ha<sub>efectiva</sub><sup>-1</sup>.

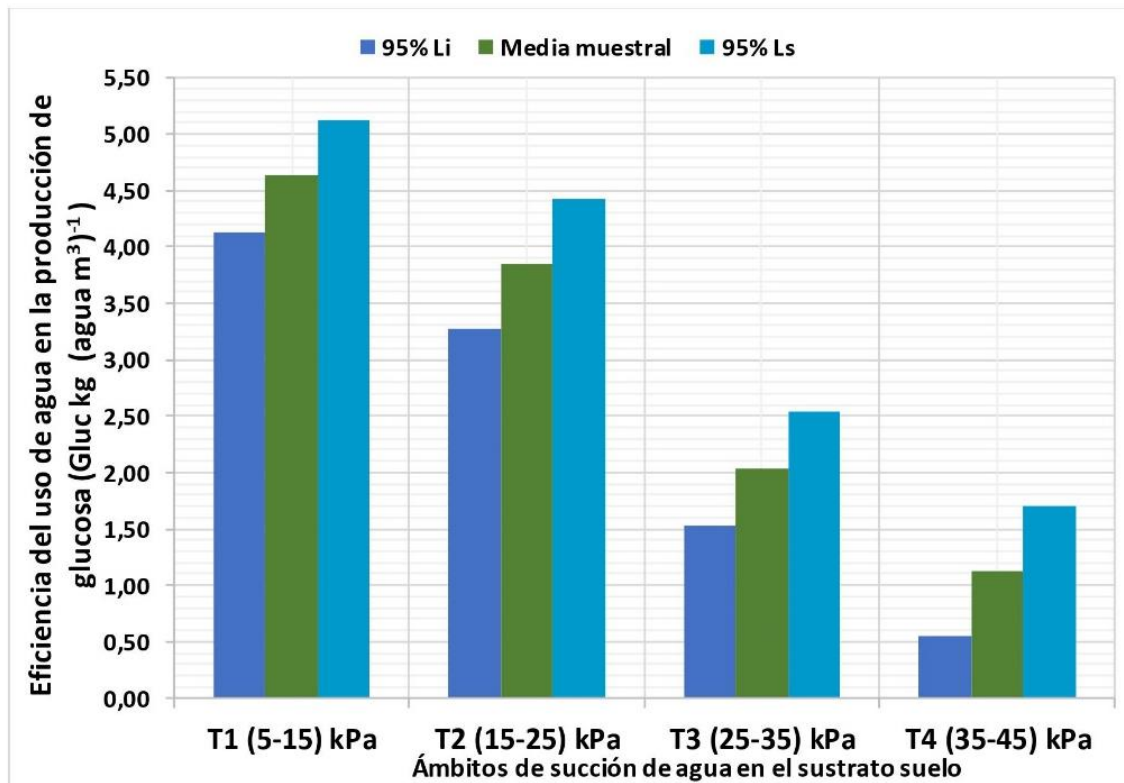


Fig. 4: Eficiencia del uso del agua para producir glucosa (fotosíntesis gruesa) según los ámbitos de succión de agua en el suelo en el cultivo de cebolla en invernadero

Además, los ámbitos de succión de agua crecientes en el suelo produjeron diferencias significativas (P-value<0,05) en la eficiencia del uso del agua para la absorción de dióxido de carbono en la planta de cebolla. Los tratamientos T1 y T2 no se diferencian entre sí, pero se diferenciaron estadísticamente de los tratamientos T3 y T4 que a su vez no mostraron diferencias entre sí (Cuadro 4).

Los valores de eficiencia del uso del agua en el cultivo de cebolla (Fig. 5) para la absorción de dióxido de carbono se encontraron en los siguientes ámbitos, T1 (5-15) kPa de 6,05 a 7,52 CO<sub>2</sub> kg (agua m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup> ha<sub>efectiva</sub><sup>-1</sup>, T2 (15-25) kPa de 4,80 a 6,49 CO<sub>2</sub> kg ((agua m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup> ha<sub>efectiva</sub><sup>-1</sup>, T3 (25-35) kPa de 2,24 a 3,71 CO<sub>2</sub> kg ((agua m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup> ha<sub>efectiva</sub><sup>-1</sup> y T4 (35-45) kPa de 0,80 a 2,49 CO<sub>2</sub> kg ((agua m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup> ha<sub>efectiva</sub><sup>-1</sup>.

Cuadro 4: Absorción de dióxido de carbono por unidad de agua consumida en el cultivo de cebolla en invernadero ( $\text{tn CO}_2 (\text{agua m}^3)^{-1} (\text{ha}_{\text{efectiva}})^{-1}$ ) según diferentes ámbitos de succión presentes en el suelo (densidad 623 377 plantas  $\text{ha}_{\text{efectiva}}^{-1}$ )

Factor	Repeticiones	EUA ( $\text{CO}_2 \text{ kg } (\text{agua m}^3)^{-1} (\text{ha}_{\text{efectiva}})^{-1}$ )	StDev	Significancia	%CV
T1 (5-15) kPa	4	6,79	0,87	A	12,85
T2 (15-25) kPa	3	5,65	0,93	A	16,49
T3 (25-35) kPa	4	2,98	0,20	B	6,72
T4 (35-45) kPa	3	1,65	0,31	B	19,09

Promedios con diferentes letras presentan diferencias significativas ( $P\text{-value} < 0,05$ )

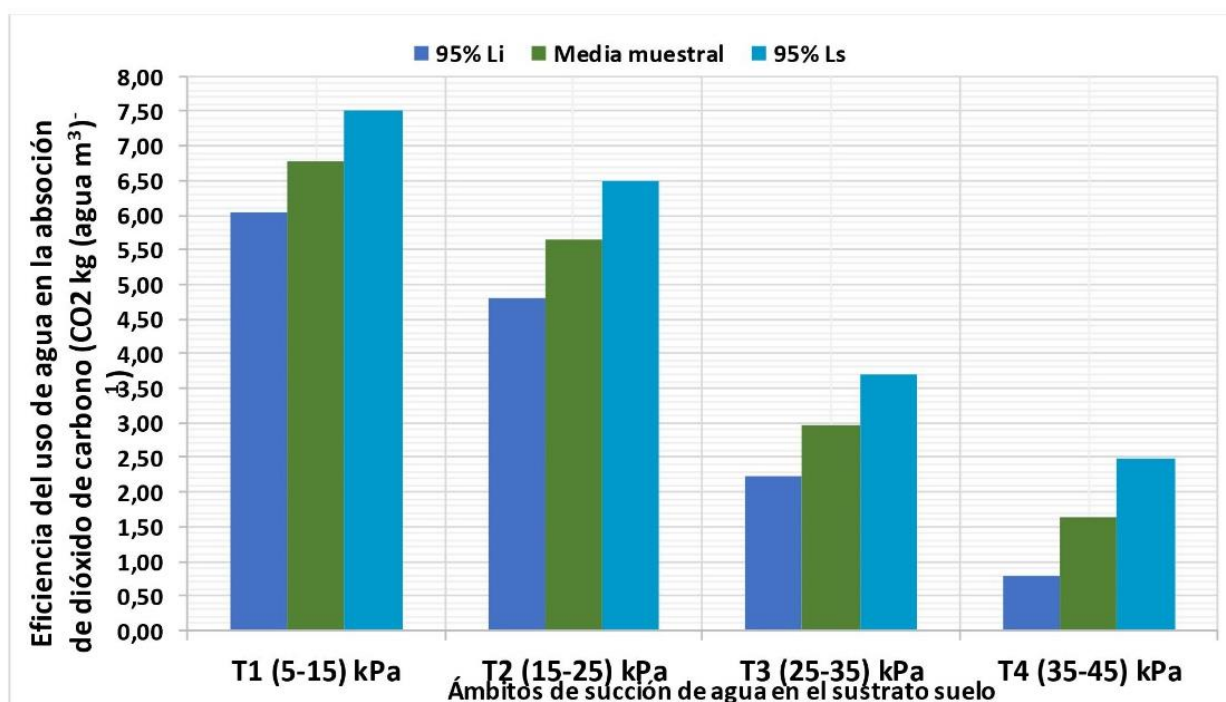


Fig. 5: Eficiencia del uso del agua en absorción de dióxido de carbono según los ámbitos de succión de agua en el suelo en el cultivo de cebolla en invernadero

El ámbito de succión del agua del suelo con la mayor eficiencia del uso del agua fue de -5 a -15 kPa, lo cual coincide completamente con lo encontrado y recomendado en Brasil, donde para maximizar el rendimiento de producción de bulbos los riegos son realizados cuando la tensión de agua en el suelo es de -7 a -15 kPa para los suelos arenosos y de -20 a -40 kPa para los suelos de texturas medias y finas, pero se recomienda que para el riego por goteo el ámbito de tensión es de -7 a -15 kPa [9].

El promedio más alto de eficiencia del uso del agua en el ámbito de -5 a -15 kPa en términos de producción de bulbos frescos encontrado fue de 21,41 kg bf (agua m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup> ha<sub>efectiva</sub><sup>-1</sup>. Este valor es muy semejante al promedio de la eficiencia del uso del agua encontrado en el Sur de Tamaulipas en México que fue de 19,40 kg bf (agua m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup> ha<sub>efectiva</sub><sup>-1</sup>, los cuales son considerablemente mayores respecto a los encontrados en Caatinga (10,75 ffkg (agua m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup> ha<sub>efectiva</sub><sup>-1</sup>), Curitiba (4,24 ffkg (agua m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup> ha<sub>efectiva</sub><sup>-1</sup>) y Lavras (10,71 ffkg (agua m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup> ha<sub>efectiva</sub><sup>-1</sup>) en Brasil.

El comportamiento de los valores de las eficiencias del uso del agua en términos productivos según los ámbitos de succión de agua en el suelo fue semejante en la eficiencia del uso del agua en términos de producción de biomasa, producción de glucosa y absorción de dióxido de carbono. Al respecto en Mosul, Iraq se encontró que las plantas de cebolla son sensibles al estrés hídrico severo que conduce a un decrecimiento sustancial y una reducción del rendimiento debido a la disminución de absorción de CO<sub>2</sub> al mesófilo de la hoja, que a su vez conduce a espacios intercelulares sustancialmente reducidos, aumento de la viscosidad del citoplasma y distorsiones de las células del mesófilo que sirve como barrera para la fijación de CO<sub>2</sub> y translocaciones de asimilados [10] [11]. Al presentarse una menor absorción de agua del suelo se presenta una menor evapotranspiración que a su vez, conlleva a una menor absorción de CO<sub>2</sub>. Al tener menor absorción de CO<sub>2</sub> disminuye la producción de compuestos orgánicos que conlleva a menores producciones de glucosa, tejidos y órganos (biomasa y producción). Lo anterior se puede confirmar por medio de la relación entre fotosíntesis y la conductancia estomática donde es común que a mayor conductancia estomática se tiene una mayor fotosíntesis [3].

## Conclusiones

El estado de succión de agua en el suelo tiene un efecto directo sobre la eficiencia del agua para la producción de bulbos de cebolla. El efecto encontrado fue inversamente proporcional donde a mayor succión de agua en el suelo se presentó una menor eficiencia agrícola del agua.

El ámbito de -5 a -15 kPa de succión de agua en el suelo presentó las mayores eficiencias en el uso del agua en términos de producción de bulbos y biomasa, además con la absorción de CO<sub>2</sub> y de producción de glucosa.

## Agradecimientos

Se agradece a las siguientes personas físicas y jurídicas por sus aportes al desarrollo de la presente investigación.

- 1- Comisión de Manejo y Ordenamiento de la Cuenca Alta Río Reventazón (COMCURE) (<https://sites.google.com/site/comcurecr/Home>)
- 2- Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) (<https://www.tec.ac.cr/>)
- 3- Productor Allen Aguilar Chacón
- 4- Fromak S. A.

## Bibliografía

- [1] S. Rodrigues-Donato, E. Ferreira-Coelho, P. Rocha-Marques, A. de Magalhães-Arantes, M. Rocha dos Santos y P. Mara de Oliveira, *XX Reunião Internacional da Associação para a Cooperação em Pesquisa e Desenvolvimento Integral das Musáceas (Bananas e Plátanos), 9 a 13 de setembro de 2013 – Fortaleza, CE, Fortaleza, 2013*, pp. 58 - 72.
- [2] R. Rosa y E. Eyji-Sano, «Determinação da produtividade primária líquida (NPP) de pastagens na bacia do rio,» *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica Paranaíba, usando imagens Modis*, nº 13-1, pp. 367 - 395, 2013.
- [3] H. Medrano, J. Bota, J. Cifre, J. Flexas, M. Ribas y J. Gullías, «Eficiencia en el uso del agua por las plantas,» *Investigaciones Geográficas*, nº 43, pp. 63 - 84, 2007.
- [4] W. Estrada-Prado, E. Lescay-Batista, A. Álvarez-Fonseca y Y. Macco-Ramos, *Cultivos Tropicales*, vol. 36, 2015, pp. 75 - 81.
- [5] H. Mata-Vázquez, J. Patishtán-Pérez, E. Vázquez-García y M. Ramírez-Meraz, *Libro técnico No. 5*, Distrito Federal, 2011, p. 185.
- [6] W. de Melo Massaranduba, R. Rodrigues Gomes Filho, M. Barbosa Brito, C. Moura de Carvalho, R. Rocha de Araújo y T. Santos Oliveira, «Production and Yield of Onion Under Different Water and Nutrition ManagementS 1,» *Rev. Caatinga*, vol. 35, nº 2, pp. 402 - 411, Abr-Jun 2022.
- [7] V. Santos Andrade, R. Rodrigues Gomes Filho, R. Rocha de Araújo, W. Gonzaga do Vale, A. Machado Enes, S. Rodrigues, D. Andrade Pereira y E. dos Santos, «Lâminas de irrigação e doses de potássio na produção e eficiência do uso da água no cultivo da cebola,» *Brazilian Journal of Development*, vol. 8, nº 9, pp. 62700 - 62726, Setiembre 2022.
- [8] R. Vilas Boas, G. Magela Pereira, J. Lima Junior, C. Oliveira Neto y A. Pereira Silva, «Produção e Pós-Colheita de Duas Cultivares de Cebola em Função da Agua no Solo,» *Irriga*, vol. 21, nº 4, pp. 697 - 710, Outubro - dezembro 2016.
- [9] Empresa Brasileira de Investigación Agropecuaria (Embrapa), *Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças*, Brasília, DF: Embrapa, 2011, p. 772.

- [10] C. Abdel y A. Al-Juboori, «Response of Three Onion (*Allium cepa* L.) Cultivars Grown Under Irrigated and Non-Irrigated Cultivation to Polyethylene Mulching 2- Production of Dry Onion Bulbs in Fall Season,» *Mesopotamia J. of Agric.*, vol. 34, n° 2, p. 8, 2006.
- [11] A. Yepes y M. Silveira Buckeridge , «Respuestas de las plantas ante los factores ambientales del cambio climático global – revisión,» *Colombia Foresta*, vol. 14, n° 2, pp. 213 - 232, Julio - Diciembre 2011.

## 9. Discusión global

La succión de agua en el suelo en el ámbito de -5 a -45 kPa tuvo un efecto significativo e inverso sobre la producción de biomasa total y sobre la producción de bulbos frescos de cebolla cultivada en invernadero. Así el rendimiento mayor se obtuvo en el menor intervalo evaluado, a saber, de -5 a -15 kPa, lo que coincide con los trabajos realizados en Brasil [46] [22]. La cosecha de bulbos frescos en el ámbito de succión antes mencionado fue de 96,98 toneladas métricas por hectárea, un rendimiento mayor a la media general de producción de Costa Rica (30 toneladas métricas por hectárea) y a la media mundial (19 toneladas métricas por hectárea).

El alto rendimiento obtenido se debe al “efecto de parcela experimental”, donde la densidad de plantas es mayor y más homogénea, pero también a un mejor control de plagas y enfermedades y de la nutrición respecto a las condiciones de cultivo comercial. No obstante, la condición de humedad óptima en el suelo debió haber influido, como lo muestran los menores rendimientos obtenidos en los tratamientos de mayor succión del agua en el suelo. Cabe señalar que cosechas similares se han obtenido en cosechas comerciales, cuando el riego fue regido por tensiómetros electrónicos en el ámbito de -5 a -15 kPa de succión de agua (datos no publicados por el autor). La evapotranspiración real del cultivo fue de 452,5 mm de agua, lo que se asemeja a la información proveniente de Brasil (585,0 mm) [29] [47], de Perú (475,0 mm) [30] y de Chile (556,0 mm) [31] en condiciones similares a esta investigación.

Con los rendimientos obtenidos y la evapotranspiración real determinada, se calculó la eficiencia agronómica del agua siendo esta de 21,41 kilogramos de bulbo fresco por cada metro cúbico de agua consumida en el ámbito de succión de agua en el suelo de -5 a -15 kPa y de 17,45 kilogramos de bulbo fresco por cada metro cúbico de agua consumida en el ámbito de succión de agua en el suelo de -15 a -25 kPa no diferenciándose estadísticamente entre sí, pero la cosecha del intervalo menor fue menor en 3,96 kilogramos de bulbo fresco por cada metro cúbico de agua respecto al segundo intervalo. Un efecto similar se obtuvo cuando la eficiencia del uso del agua se calculó en términos de biomasa total.

En concordancia con lo anotado, la mayor absorción total de macroelementos se determinó en el tratamiento de -5 a -15 kPa de succión de agua, diferenciándose estadísticamente de los otros estados de succión. Debe indicarse que las cantidades de macroelementos absorbidos determinados en la presente investigación son similares a los informados para el cultivar Acuarios [48] y el cultivar Óptima [49], con rendimientos semejantes al obtenido en la presente investigación.

Un aspecto medular en la presente investigación fue la estimación del CO<sub>2</sub> absorbido y la producción de glucosa respectiva. El comportamiento de estos parámetros fue muy similar a la producción de biomasa y al rendimiento de bulbos frescos, se determinó un efecto significativo e inverso respecto a los ámbitos crecientes de succión del agua del suelo. La mayor absorción de CO<sub>2</sub> y la mayor producción de glucosa total ocurrió en el menor ámbito de succión evaluado, esto es de -5 a -15 kPa. Es altamente probable que este ámbito de humedad haya permitido una apertura de estomas más prolongada que favoreció el intercambio gaseoso y por ende una fotosíntesis más eficiente.

Por otro lado, la eficiencia económica del agua fue mayor estadísticamente en el menor ámbito de succión del agua evaluada, lo que maximizó la rentabilidad del cultivo, incluso con los menores valores de venta simulados en el modelo económico.

En adición y como complemento de la investigación se determinaron los coeficientes de cultivo (kc) para seis propuestas de cálculo, que se adaptan a la condición de invernadero. Las formulaciones de Ivanov y Camargo fueron las que mejor estimaron la evapotranspiración real con valores de kc de 0,93 y 0.90. Los valores de kc hallados difieren estadísticamente entre sí, con excepción de los citados anteriormente, lo que fortalece el argumento de que los kc deben utilizarse con la misma formulación con que se estimó la evapotranspiración potencial y en condiciones climáticas y de cultivo similares a las propias. La estimación de la evapotranspiración potencial y del kc respectivo permiten calcular la evapotranspiración total del cultivo durante su ciclo productivo y así conocer la demanda de agua que tendrá un sistema de producción determinado, pero además dado que los datos arrojados por la presente investigación indican que el ámbito óptimo de humedad del suelo se halla por debajo de capacidad de campo equivalente (-33 kPa) y muy cercano al estado de saturación (-5 a -15 kPa), los conceptos de riego convencionales, esto es volumen de agua disponible y su agotamiento permitido, no son aplicables, una alternativa es el cálculo de la evapotranspiración real diaria considerando el tiempo de cultivo y la reposición de la misma.

Claro está la tecnificación de la producción, que en el caso del agua a aplicar conlleva la medición constante del agua del suelo y de la evapotranspiración, la inclusión de sensores de humedad del suelo y la estimación de la Et a través de parámetros energéticos es la mejor opción.

## 10. Conclusiones y recomendaciones

1. La absorción de CO<sub>2</sub> y la producción de glucosa gruesa de las plantas de cebolla c.v. Álvara cultivado en invernadero, mostraron valores decrecientes significativos al aumentar la succión de agua en el suelo en el ámbito de -5 a -45 kPa.
2. Consecuentemente, la absorción de macroelementos, la producción de biomasa total y la producción de bulbo fresco de cebolla c.v. Álvara cultivada en invernadero, mostraron valores decrecientes significativos al aumentar la succión de agua en el suelo en el ámbito de -5 a -45 kPa.
3. En el ámbito de succión de agua en el suelo de -5 a -15 kPa (menor ámbito evaluado) se maximizó la producción de bulbo fresco (bf), además se maximizó la eficiencia de uso del agua, a saber (21,41 kg bf m<sup>3</sup> agua) y la eficiencia económica del agua que expresada como punto de equilibrio de la función de rentabilidad mostró un valor de 297,58 colones por metro cúbico de agua (0,6 us\$ m<sup>3</sup> agua al tipo de cambio de la fecha, 30 de marzo del 2024).
4. El uso consuntivo de la cebolla var. Álvara cultivada en invernadero para el ámbito de succión de -5 a -15 kPa fue de 452,5 mm para el total del ciclo productivo (135 días).
5. Los valores del coeficiente del cultivo (kc) calculados para seis diferentes formulaciones empleadas en estudios de invernadero, dieron valores entre 0,41 y 0,93; que difirieron estadísticamente entre sí. Lo anterior fortalece el argumento de que, para la estimación de la evapotranspiración del cultivo, los kc deben utilizarse con la misma formulación con que se estimó la evapotranspiración potencial y en condiciones climáticas y de cultivo similares a la propia.
6. Las formulaciones para estimar la evapotranspiración potencial que mayormente se asemejaron a la evapotranspiración del cultivo en las condiciones de la investigación fueron las de Ivanov y de Camargo.

### Recomendaciones

1. La mejor opción para optimizar el uso del agua en el cultivo de cebolla en invernadero, es la tecnificación del sistema de producción, que en este caso conlleva la medición constante del agua del suelo y de la evapotranspiración mediante sensores electrónicos.
2. Dado que en la presente investigación se halló que el ámbito óptimo de la succión del agua en el suelo para el cultivo de cebolla en invernadero (-5 a -15 kpa) se ubica por debajo del punto

de capacidad de campo equivalente (-33 kPa), la aplicación usual del kc no es posible. Entonces surge la alternativa de la estimación de la evapotranspiración del cultivo, a través de la evapotranspiración potencial y el kc respectivo y considerando el tiempo de cultivo para la reposición diaria del agua utilizada.

3. Un aspecto importante son las investigaciones sobre el requisito real de agua de los principales cultivos hortícolas cultivados en invernadero, con la finalidad de lograr un uso más eficiente del agua

## 11. Referencias generales

- [1] I. P. Bejarano, *Práctica dirigida presentada para optar al grado académico de Licenciatura en Ingeniería Agronómica con énfasis en Fitotécnia*, San José, San José, 2013, p. 87.
- [2] Consejo Nacional de Producción. Costa Rica, «Sistema de información agroalimentaria: Boletín No. 1: Análisis de mercados, Cebollas,» 2015.
- [3] Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC), «Sistema Nacional de Áreas de Conservación,» S.f.. [En línea]. Available: <https://www.sinac.go.cr/ES/conozca/Paginas/default.aspx>. [Último acceso: Noviembre 2022].
- [4] L. Molina, «Abandono político condena a los agricultores a la ruina y los empuja a su extinción,» *Semanario Universidad*, 30 noviembre 2022.
- [5] C. Álvarez-Vergnani, *Estrategia de adaptación climática en Costa Rica. Bases para la gestión estatal e institucional*, San José, 2015, p. 34.
- [6] D. B. Kilemo, «The Review of Water Use Efficiency and Water Productivity Metrics and Their Role in Sustainable Water Resources Management,» *Open Access Library Jour*, vol. 9, nº e7075, pp. 1 - 21, 28 Enero 2022.
- [7] O. Llanes-Cárdenas, M. Norzagaray-Campos y N. Muñoz-Sevilla, «Determinación de la evapotranspiración potencial (ETP) y de referencia (ETO) como indicador del balance hídrico del corazón agrícola de México,» *Juyyaania*, vol. 2, nº 1, pp. 119-129, Enero-Junio 2014.
- [8] O. Caballero-Casuriaga y R. Franco-Ibars, «Comparación de la evapotranspiración del cultivo de referencia mediante cinco métodos, propuestos por la FAO,» *Investigación Agraria*, vol. 8, nº 2, pp. 58-65, 2006.
- [9] M. Sánchez Martínez y L. Carvacho Bart, «Comparación de ecuaciones empíricas para el cálculo de la evapotranspiración de referencia en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile,» *Revista de Geografía Norte Grande*, vol. 50, pp. 171-186, 2011.
- [10] F. J. Sánchez San Román, *Evapotranspiración*, Salamanca, Sf., p. 9.
- [11] Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), *Boletín INIA No. 415*, Santiago, 2019, p. 106.
- [12] J. Navejas-Jiménez, A. Nieto-Garibay, H. Fraga-Palomino, E. Rueda-Puente y N. Ávila-Serrano, «Comparación de métodos para estimar la evapotranspiración en una zona árida citricola del noreste de México,» *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, vol. 13, nº 2, pp. 147-155, 2011.

- [13] C. Martín-Clemente, J. Sosa-Ramírez, M. Maass-Moreno, J. Luna-Ruiz, A. Meráz-Jiménez y E. Flores-Ancira, «Comparación de métodos para estimar disponibilidad hídrica en cuencas forestales,» *Terra Latinoamericana*, vol. 1, nº 33, pp. 17-26, 2015.
- [14] J. Arapa-Carcasi, «El coeficiente de cultivo (kc) en la investigación y aplicación en los cultivos andinos en el Perú,» *Revista Científica I+D Aswan Science*, vol. 2, nº 1, pp. 30 - 34, 2022.
- [15] T. A. Rocalla-Chacón, *Repositorio de tesis de la Universidad Católica de Santa María*, Arequipa, 2018, p. 90.
- [16] J. E. Chavarría-Párraga, M. Ugando-Peñate, Á. R. Sabando-García, J. P. Muñoz-Párraga, R. X. Bravo-Ferrín y A. Villalón-Peñate, «Necesidades hídricas del frijol caupí (*Vigna unguiculata* L. Walp) calculadas con el coeficiente de cultivo utilizando lisímetro de drenaje,» *Ciencia y Agricultura (Pontificia Universidad Católica del Ecuador)*, vol. 17, nº 3, pp. 111 - 121, Setiembre 2019.
- [17] J. Arapa-Carcasi, «El coeficiente de cultivo (kc) en la investigación y aplicación en los cultivos andinos en el Perú,» *Revista Científica I+D Aswan Science*, vol. 2, nº 1, pp. 30-34, Diciembre 2021.
- [18] T. Roncalla-Chacón, *Tesis presentada para optar el Título Profesional de Ingeniero Agrónomo*, Arequipa, 2018, p. 90.
- [19] Servicio de programación y optimización del uso del agua de riego (SEPOR), *Boletín Informativo S106*, Sf., p. 7.
- [20] Food and Agriculture Organization (FAO), *Estudio FAO riego y drenaje 56*, Sf., p. 322.
- [21] Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), *Origem e evolução de plantas cultivadas*, 1ra ed., R. Barbieri y E. Tempel, Edits., Brasília, 2008, p. 991.
- [22] Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), *Agrometeorología dos cultivos: O fator meteorológico na produção agrícola*, Brasília - DF, 2009, p. 530.
- [23] C. Kurtz, D. Rogério Schmitt, É. Zunino Sgrott, G. Henrique Wamser, H. Werner, I. A. dos Santos, J. Volni Costa, P. A. de Souza Gonçalves, S. Dias Lannes y V. Carré-Missio, *SISTEMAS DE PRODUÇÃO No 46*, Primeira edição (4a revisão) ed., 2013, p. 106.
- [24] H. Mata Vázquez, J. Patishtán Pérez, E. Vázquez Garcia y M. Ramírez Meraz, Primera ed., D.F., 2011, p. 185.
- [25] B. Bez Birolo, *Relatório de Estágio apresentado ao Curso de Agronomia da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheira Agrônoma*, Santa Catarina, 2011, p. 73.

- [26] M. D. M. Granados, *Problemas fitosanitarios de la Cebolla en Costa Rica*, San José, San José: Editorial Universidad de Costa Rica, 2011, p. 108.
- [27] Ministerio de Desarrollo Productivo y Económico Rural, Informe estadístico de cebolla, La Paz, 2020, p. 9.
- [28] R. Vilas Boas, G. Pereira, R. de Sousa y R. Consoni, «Desempenho de cultivares de cebola em função do manejo da irrigação por gotejamento,» *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 15, nº 2, pp. 117 - 124, 27 04 2011.
- [29] H. B. Ferreira Barreto, *Tese (doutorado)–Universidade Federal de Lavras*, Lavras, 2015, p. 78.
- [30] Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, Lima, Sf., p. 2.
- [31] Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Santiago, 2017, p. 105.
- [32] B. Abrahão Silva, A. Rodrigues da Silva y L. Gui Pagiuca, *Hortifruti Brasil*, 2014, p. 9.
- [33] Pindorama, *Programa Viver Fora do Sistema: Curso de Gestão de Empreendimentos Sustentáveis*, sf, p. 16.
- [34] C. Ramírez y J. Nienhuis, «Cultivo protegido de hortalizas en Costa Rica,» *Tecnología en Marcha*, vol. 25, nº 2, pp. 10 - 12, Abril - Junio 2012.
- [35] L. Rossato, *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais: Dissertação de Mestrado em Meteorologia orientada pela Dra Regina Célia dos Santos*, São José dos Campos, 2001, p. 147.
- [36] R. Rojas, «Las relaciones Agua Suelo Planta Atmósfera en planificación, diseño y manejo de proyectos de aguas y tierras,» (sf). [En línea]. Available: <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/rojas.r/RASPA.PDF>. [Último acceso: 24 07 2016].
- [37] A. Chavarría, *Manual de prácticas del curso Relación Suelo Agua Planta*, Cartago, Cartago, 2013.
- [38] E. J. De Souza, F. França da Cunha, F. Fanger Magalhães, T. Ramos da Silva, M. C. Rezende Zuffo Borges y C. Garcia Roque, «Métodos para Estimativa da Umidade do Solo na Capacidade de Campo,» *Revista de Ciências Agro- Revista de Ciências Agro-Ambientais, Alta Floresta Ambientais, Alta Floresta Ambientais, Alta Floresta-MT*, vol. 11, nº 1, pp. 43 - 50, 2013.
- [39] A. . C. Saraiva da Costa, M. R. Nanni y E. Jeske, «Determinação da Umidade na Capacidade de Campo e Ponto de Murchamento Permanente por Diferentes Metodologias,» *UNIMAR*, vol. 19, nº 3, pp. 827 - 844, 22 08 1997.
- [40] L. Santos , J. Valero, M. Picornell y J. Tarjuelo, *El riego y sus tecnologías*, Albacete: Europa-América, 2010.

- [41] G. Libório, S. Oliveira, C. Aragao, N. Duarte y C. Fernandes, «Desempenho Agronômica de Cultivares de Cebola Sob Diferentes Manejos de irrigação no Submédio São Francisco,» *Irriga*, vol. 18, nº 1, pp. 73 - 84, janeiro-março 2013.
- [42] Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento, «Embrapa hortaliças: Circular técnica 57,» 2008.
- [43] Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), «Embrapa Hortaliças,» [En línea]. Available: <https://www.embrapa.br/hortalicas/cebola/como-plantar>. [Último acceso: 24 12 2019].
- [44] Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), *Agrometeorologia dos Cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola*, 1ra ed., Brasília, 2009, p. 530.
- [45] Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro Nacional de Pesquisa de Hortaliças, «Circular técnica de Embrapa hortaliças,» 1997.
- [46] Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), «Embrapa Hortaliças».
- [47] H. B. FERREIRA BARRETO, *Tese (doutorado)–Universidade Federal de Lavras*, Lavras, 2015, p. 78.
- [48] C. Moraes, H. de Araujo, T. Factor y L. Purquerio, «Fenologia e acumulação de nutrientes por cebola de dia curto em semeadura direta (Phenology and nutrient accumulation by short-day onion in direct seeding),» *Sociedade de Ciências Agrárias de Portugal*, vol. 39, nº 2, pp. 281 - 290, Setiembre 2016.
- [49] D. Pôrto, A. Cecílio, A. May y J. Barbosa, «Acúmulo de macronutrientes pela cebola ‘Optima’ estabelecida por semeadura direta,» *Horticultura Brasileira*, vol. 24, nº 4, pp. 470 - 475, Octubre - Diciembre 2006.

## 9. Anexos

### Anexo de imágenes



Imagen A1: Pruebas anticipadas al montaje del experimento para el desarrollo de la investigación



Imagen A2: Invernadero del desarrollo de la investigación



Imagen A3: Lavado del techo del invernadero para el montaje del experimento y desarrollo correcto de la investigación



Imagen A4: Resultado del lavado del techo del invernadero para el montaje del experimento y desarrollo correcto de la investigación

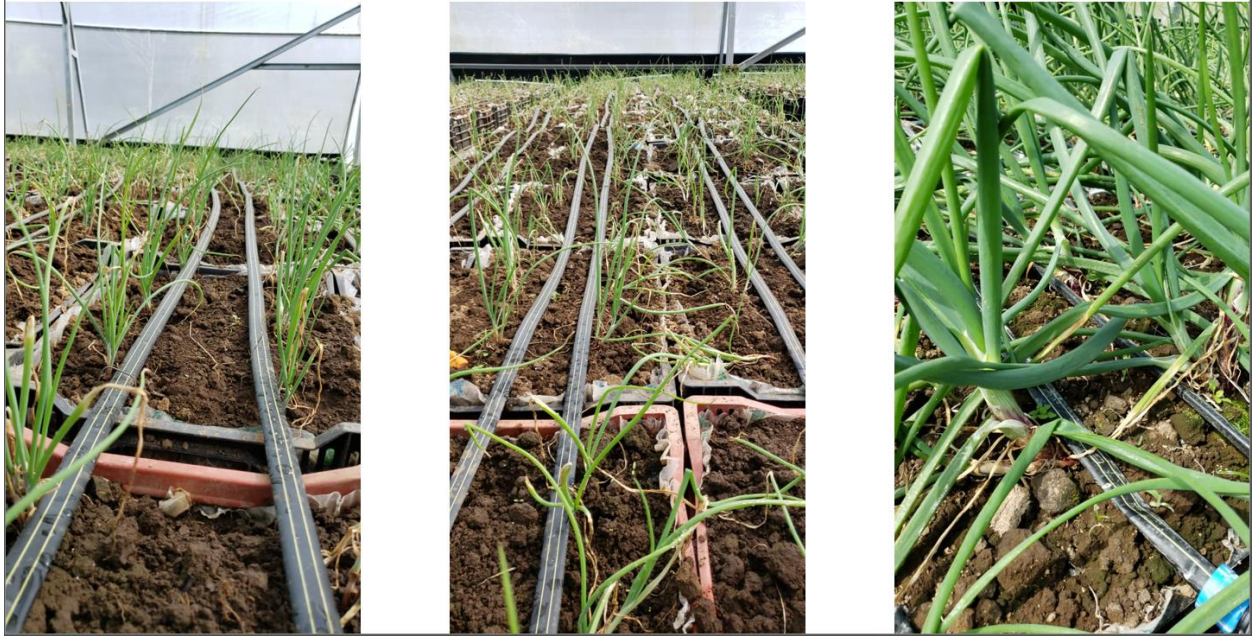


Imagen A5: Sistema de fertiriego por goteo dentro de la plantación de la investigación

## Metodología general



Imagen A6: Investigación recién establecida