

EFICIENCIA EN EL USO DE AGUA DE RIEGO EN PLANTAS DE AJÍ TABASCO (*Capsicum frutescens*) INOCULADAS CON HONGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES.



LUIS GUILLERMO GARCÍA DOMÍNGUEZ

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE
PROGRAMA ACADÉMICA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
SANTIAGO DE CALI
2021**



EFICIENCIA EN EL USO DE AGUA DE RIEGO EN PLANTAS DE AJÍ TABASCO (*Capsicum frutescens*) INOCULADAS CON HONGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES.

LUIS GUILLERMO GARCÍA DOMÍNGUEZ

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero agrícola

DIRECTORA:

MARTHA CONSTANZA DAZA TORRES

**ING AGRÍCOLA, M SC. EN SUELOS Y AGUAS, PH.D EN INGENIERÍA SANITARIA Y
AMBIENTAL**

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

SANTIAGO DE CALI

2021

AGRADECIMIENTOS

Agradezco especialmente a mi madre por su apoyo incondicional y por brindarme la oportunidad de formarme como profesional, a la Universidad del Valle por moldear mi forma de ver el mundo y construir de mí una persona honesta y responsable. De igual manera, agradezco a mi directora de trabajo de grado Martha Constanza y a cada uno de los docentes y educadores que, hasta este punto de mi vida, han inculcado en mi un acumulado de conocimientos y valores que me han permitido culminar el presente trabajo a puertas de graduarme, ofrezco de manera humilde este trabajo a mérito de su esfuerzo en la docencia.

Tabla de Contenido

Introducción	1
1 Justificación	2
2 Objetivos.....	4
2.1.1 Objetivo general	4
2.1.2 Objetivos específicos	4
3 Marco teórico	5
3.1 Generalidades del cultivo de ají Tabasco (<i>Capsicum frutescens</i>)	5
3.1.1 Requerimientos agronómicos	5
3.1.2 Necesidad nutricional	5
3.1.3 Necesidad hídrica	5
3.1.4 Plagas y enfermedades.....	6
3.1.5 Riego	7
3.1.6 Usos	7
3.2 Definición y clasificación de las micorrizas	8
3.2.1 Clasificación de los hongos micorrízicos	8
3.2.2 Factores biofísicos y biológicos que afectan la simbiosis micorrízica arbuscular 10	
3.2.3 Beneficios de la asociación MA en plantas.....	11
3.3 Eficiencia en el uso del agua EUA	12
4 Estado del arte-Investigaciones relacionadas con el uso del agua en plantas inoculadas con HMA	13
5 Metodología	18
5.1 Localización del experimento	18
5.2 Plántulas.....	18
5.3 Suelo.....	19
5.3.1 Densidad aparente	19
5.3.2 Capacidad de campo (CC).....	20
5.3.3 Punto de marchitez permanente (PMP).....	21
5.4 Inóculo MA.....	22
5.5 Maceteros	22
5.6 Diseño experimental.....	23
5.7 Variables agronómicas de respuesta	24

5.8	Riego	24
5.9	Prácticas culturales	26
5.9.1	Trasplante	26
5.9.2	Control de plagas y arvenses	27
5.9.3	Manejo de arvenses	29
5.9.4	Cosecha.....	29
5.10	Eficiencia en el uso del agua (EUA)	30
5.11	Cálculo del ahorro en el uso del agua de riego y reducción en el rendimiento	30
5.12	Análisis estadístico	30
6	Resultados y discusión.....	31
6.1	Propiedades del suelo.....	31
6.2	Riego	31
6.3	Evaluación de la inoculación micorrízica	32
6.4	Efecto de la aplicación de HMA en las variables agronómicas del ají tabasco.....	33
6.4.1	Disminución en el rendimiento total.....	33
6.4.2	Rendimiento total, peso del fruto y cantidad de frutos.....	35
6.4.3	Altura de la planta, grosor del tallo y número de flores	40
6.5	Eficiencia en el uso del agua (EUA) y ahorro en el uso del agua de riego	42
7	Conclusiones.....	46
8	Recomendaciones.....	47
9	Referencias	48
10	Anexos	54

Índice de tablas

Tabla 1. Antecedentes relacionado con la EUA en plantas micorrizadas.	14
Tabla 2. Resultados de las propiedades químicas finales y físicas del suelo usado en el estudio.	31
Tabla 3. Porcentaje de raíz micorrizadas y eficiencia en la colonización de cada tratamiento inoculado.	33
Tabla 4. Reducción del rendimiento en comparación con el tratamiento control T2-MA. ..	33
Tabla 5. Promedio de la eficiencia en el uso del agua (EUA) en kg/m ³ y cantidad de agua aplicada en litros para cada tratamiento.	43

Índice de figuras

Figura 1. Curva coeficiente de cultivo (Kc) obtenida en lisímetro para plantas de ají Tabasco en condiciones edafoclimáticas del Valle del Cauca (Tomado de Herrera, 2015).....	6
Figura 2. Ilustración de las estructuras de colonización de la raíz en las interacciones ectomicorrícicas (azul) y micorrícicas arbusculares (rosa). El hongo ectomicorrícico rodea la punta de la raíz con un manto grueso de hifas, mientras que la red Hartig se desarrolla alrededor de las células epidérmicas (verde). En el caso de las micorrizas arbusculares, la punta de la raíz generalmente no está colonizada. Las hifas se pueden desarrollar a partir de una espora. La colonización de la raíz procede tanto intra como intercelularmente y culmina con la formación de arbusculos, pequeños árboles fúngicos, dentro de las células corticales internas (marrón) (Tomado de Bonfante & Genre, 2010).	9
Figura 3. Arbúsculo maduro de HMA dentro de una célula cortical de Puerro. El arbúsculo ha crecido a partir de una hifa intercelular bien desarrollada (flecha) (Tomado de Brundrett et al. 1984 citado por Smith & Read, 2002).	10
Figura 4. Localización del estudio en la terraza de un tercer piso perteneciente a una vivienda del barrio Mariano Ramos al oriente de la ciudad Santiago de Cali - Valle del Cauca - Colombia.	18
Figura 5. Plántulas de ají Tabasco con 25 días en semillero aportadas por la empresa Hugo Restrepo & Cía.	19
Figura 6. (De izquierda a derecha) excavación del agujero, impermeabilización del agujero y extracción del agua agregada.	20
Figura 7. (De izquierda a derecha) aplicación de 10 litros de agua para saturar el suelo, recipiente con suelo saturado tapado, muestra tomada y pesada tres días después.	21
Figura 8. Plantas de frijol marchitas sembradas en el suelo del estudio y ejemplo de una de las tres muestras extraídas y pesadas.	22
Figura 9. (De izquierda a derecha) Inoculante biológico MA usado en el estudio, raicillas colonizadas presentes en el sustrato y sustrato con esporas.	22
Figura 10. (De izquierda a derecha) Recipiente con agujeros en el fondo, recipiente con malla, recipiente con capa de grava 3/4 y macetero final vista lateral.	23
Figura 11. Disposición final de cada unidad experimental.	24
Figura 12. Disposición final del tanque evaporímetro y el pluviómetro en el lugar del experimento.	25
Figura 13. Trasplante a maceteros de las plántulas de ají tabasco, se realizó la operación con la ayuda de una espátula y se adiciono el producto inoculante, para los tratamientos correspondientes, con la ayuda de una cuchara.	27
Figura 14. (De izquierda a derecha) Recipiente pintado de amarillo usado como trampa para plagas, trampas dispuestas en el lugar del estudio al lado de las plantas.	28
Figura 15. (De izquierda a derecha) gusano cornudo del tomate de 3 cm de longitud sobre un fruto de ají, especímenes de cornudo del tomate extraídos de forma manual del cultivo, producto comercial concentrado de <i>Bacillus Thuringiensis</i> usado en el cultivo y atomizador para su aplicación.	28

Figura 16. Especímenes de mariquitas presentes en el cultivo y producto comercial de jabón potásico, ambos utilizados para el control de plagas, se pesó 6 gramos de jabón potásico como se puede ver en la figura para cada aplicación junto con un litro de agua.....	29
Figura 17. Frutos de cada unidad experimental cosechados en la primera jornada de cosecha.	30
Figura 18. Agua aplicada acumulada en milímetros durante todo el experimento para cada uno de los 5 regímenes de riego. T1=kc 115%, T2=kc 100%, T3=kc 90%, T4=kc 70% y T5=kc 50%	32
Figura 19 Reducción del rendimiento total en gramos para cada uno de los 10 tratamientos evaluados comparados con el tratamiento control T2-MA. Números negativos representan aumento y negativos reducción Letras distintas sobre las barras indican diferencias estadísticas según la prueba Tukey ($p<0.01$).	34
Figura 20. Plantas con un mismo régimen de riego T4, donde la planta sin HMA muestras signos de estrés hídrico, como hojas decaídas y amarillentas, mientras la planta con HMA no muestra signos de estrés hídrico.	35
Figura 21. Rendimiento total promedio en gramos para cada uno de los 10 tratamientos evaluados. Letras distintas sobre las barras indican diferencias estadísticas según la prueba Tukey ($p<0.01$).	36
Figura 22. Promedio de número total de frutos cosechados para cada uno de los 10 tratamientos evaluados. Letras iguales sobre las barras indican que son estadísticamente iguales (Tukey $p<0.05$).	37
Figura 23. Peso promedio por fruto para cada uno de los 10 tratamientos evaluados. Letras iguales sobre las barras indican que son estadísticamente iguales (Tukey $p<0.05$). CV en porcentaje para cada tratamiento de izquierda a derecha 9.6, 1.5, 2.8, 2.8, 5.4, 2.1, 6.3, 5.8, 7.8 y 7.9%.....	38
Figura 24. Frutos de ají pequeños y deformados (derecha) en comparación con frutos normales (izquierda).....	38
Figura 25. Rama sin hojas producto de insectos defoliadores y hojas caídas por efecto de hongos.	39
Figura 26. Altura promedio para cada uno de los 10 tratamientos evaluados. Letras iguales sobre las barras indican que son estadísticamente iguales (Tukey $p<0.05$). CV en porcentaje para cada tratamiento de izquierda a derecha 7.2, 4.3, 2.3, 3.4, 5.6, 3.3, 2.3, 5.5, 3.7, y 3.4%.	40
Figura 27. Grosor del tallo promedio para cada uno de los 10 tratamientos evaluados. Letras iguales sobre las barras indican que son estadísticamente iguales (Tukey $p<0.05$). CV en porcentaje para cada tratamiento de izquierda a derecha 6.6, 3.3, 8.3, 3.8, 6.2, 11.7, 4.9, 4.1, 4.3 y 6.0%.....	41
Figura 28. Distancia corta entre nudos, engrosamiento e inclinación del tallo producto del viento.	41
Figura 29. Número acumulado de flores promedio para cada uno de los 10 tratamientos evaluados. Letras iguales sobre las barras indican que son estadísticamente iguales (Tukey $p<0.05$). CV en porcentaje para cada tratamiento de izquierda a derecha 13.71, 17.5, 6.4, 15.3, 7.7, 21.6, 26.1, 11.6, 1.5 y 25.2%.....	42

Figura 30. EUA en kg/m³ para cada uno de los 10 tratamientos evaluados. Letras iguales sobre las barras indican que son estadísticamente iguales (Tukey $p < 0.05$). CV en porcentaje para cada tratamiento de izquierda a derecha 2.5, 10.1, 5.3, 10.7, 9.0, 4.3, 6.6, 10.2, 11.5, y 3.7%. 43

Figura 31. Plantas para el régimen de riego T5, tratamientos con HMA en la parte de arriba y sin estos en la parte de abajo, se puede observar que la cantidad de frutos en las plantas con HMA dos semanas después de terminado el experimento es mayor que las plantas sin HMA. 45

Resumen

La simbiosis entre los hongos micorrícicos arbusculares (HMA) y las plantas puede generar un conjunto de beneficios que han sido aprovechados durante las últimas décadas en el sector agrícola, como lo es el aumento de la eficiencia en el uso del agua (EUA). La presente investigación tiene como finalidad evaluar el efecto de la inoculación artificial con HMA en la EUA de plantas de ají tabasco, cultivar agrícola de gran importancia para el Valle del Cauca-Colombia. El estudio se llevó a cabo a cielo abierto en maceteros ubicados sobre la azotea de una vivienda ubicada en la ciudad de Santiago de Cali – Colombia, donde se realizó un diseño experimental completamente al azar compuesto por 10 tratamientos, cada uno con 3 repeticiones. Los tratamientos consistieron en 5 regímenes de riego basados en un porcentaje del Kc del cultivo con HMA y los mismos 5 sin HMA, (T1=kc115%, T2=kc100%, T3=kc90, T4=kc70% y T5=kc50%). En los regímenes de riego T5 y T4 respectivamente, se presentó un aumento del 11.1% y 2.8% de la EUA en las plantas inoculadas con HMA frente a las plantas no inoculadas. De igual forma, estos tratamientos presentaron un aumento en el rendimiento de 7.2% y 4.6% respectivamente, en contraste con sus homólogos sin HMA. El tratamiento con HMA del régimen de riego T5 no obtuvo diferencias fuertemente significativas ($p < 0.01$) con el tratamiento sin HMA del régimen testigo T2, a pesar de que el primero presentó un déficit de riego de 50% respecto al otro, lo que supone un posible ahorro en el uso del agua (AUA) del 50%.

Palabras Claves: ají, ají tabasco, eficiencia en el uso del agua, hongos micorrícicos arbusculares, micorrizas, EUA, HMA.



Introducción

La seguridad y soberanía alimentaria del mundo se encuentra en un alto grado de vulnerabilidad frente a la incertidumbre de la variabilidad climática causada por el cambio climático, por ello, es de suma importancia generar tecnologías que permitan un uso eficiente del agua en el sector agrícola y que, además, beneficien al productor y generen un mayor rango de utilidades en su empresa.

En Colombia, específicamente en el Valle geográfico del Rio Cauca se ha presentado un decrecimiento en la disponibilidad del agua para uso agrícola hasta en un 70% (Cruz, 2015), lo que ha provocado un panorama futuro de incertidumbre que afecta el potencial agrícola de la región y, sobre todo, a los pequeños campesinos, que, en su mayoría no cuentan con la capacidad de afrontar periodos de sequía prolongados en sus parcelas.

El cultivo de ají Tabasco en el Valle del Cauca representa una gran oportunidad de empresa para el campesinado de la región, con un gran impacto social, ya que, más del 70% de su costo corresponde a la mano de obra utilizada principalmente para cosechar. Nombrado el café de la tierra caliente, el ají Tabasco ha logrado hacerse con una importante agroindustria en la región, donde la mayor parte de la materia prima es exportada al exterior.

En las últimas décadas, se ha incrementado el interés por investigar y desarrollar actividades agrícolas que mitiguen las consecuencias del cambio climático y disminuyan el impacto ambiental del sector. Es así como han surgido investigaciones que han descubierto que algunas especies de hongos del suelo pueden llegar a generar beneficios de gran impacto en algunos tipos de plantas como el aumento de la eficiencia en el uso del agua y fertilizantes.

Por ello, este trabajo de investigación presenta el efecto de la aplicación de hongos micorrízicos arbusculares en la eficiencia del uso del agua en un cultivo de ají Tabasco, con el fin de evaluar la mitigación sobre los efectos de la sequía en el cultivo o la posible disminución de la cantidad de agua aplicada en el riego. El estudio se llevó a cabo en la azotea de una vivienda ubicada en la ciudad de Santiago de Cali – Colombia, donde se realizó un diseño experimental completamente al azar con 30 unidades experimentales. Las condiciones fueron llevadas a cabo de esta manera debido a que fue realizada bajo las restricciones que ocasionó la pandemia por la COVID 19 en el año 2020 y lo que va del 2021.

Este documento se divide en diez capítulos. Los primeros dos capítulos corresponden a la justificación de la investigación y los objetivos de esta, en el tercero se plantea el marco teórico donde se definen las cualidades de los hongos micorrízicos arbusculares y el cultivo de ají Tabasco, además de la relación simbiótica hongo-planta, el cuarto capítulo enmarca investigaciones y experiencias del uso de los hongos micorrízicos arbusculares en ají y otros cultivos. El capítulo cinco presenta la metodología, procesos y materiales usados en el desarrollo de la investigación que derivan en la obtención de resultados y su consecuente discusión en el capítulo seis. Finalmente, en el capítulo siete se presentan las conclusiones,



las recomendaciones para futuros trabajos relacionados en el capítulo ocho y en los capítulos nueve y diez se presenta la bibliografía utilizada y los anexos de la investigación.

1 Justificación

El agua es fundamental para la supervivencia del ser humano y la vida en el planeta, siendo el núcleo del desarrollo socioeconómico de la humanidad. Sus principales usos radican en el sector industrial, la generación de energía, el saneamiento, la conservación de ecosistemas, el consumo humano y la agricultura. En la actualidad, debido al cambio climático y al aumento de la competencia entre los diferentes sectores por el uso de los recursos hídricos, se presentan problemas de calidad, disponibilidad y acceso al agua en gran parte del mundo.

El desarrollo sostenible y la gestión integral de los recursos hídricos han tomado un papel importante en el marco de acciones internacionales y la preocupación latente se ha materializado en una serie de esfuerzos a nivel mundial. Uno de ellos, son las recomendaciones del consejo de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), las cuales sugieren, entre otros aspectos, la gestión de la demanda y la promoción del uso eficiente del agua en sectores como la agricultura (OCDE, 2017).

En Colombia, específicamente en el valle geográfico del río Cauca, se ha presentado un decrecimiento entre el 40 y 70% en la disponibilidad del agua debido al deterioro de las cuencas hídricas y al incremento en la demanda de agua para usos municipales, industriales y agrícolas (Cruz, 2015). Lo anterior, sumado a las condiciones climáticas extremas generadas por el cambio climático en la región, ha afectado la calidad y disponibilidad del agua, generando escasez del recurso hídrico.

Actualmente en el Valle del Cauca, el cultivo de ají tiene un alto potencial agroindustrial que ubica al departamento como líder en producción por hectárea de ají y como influyente exportador a nivel nacional de productos derivados del ají, con la empresa Hugo Restrepo & Cía. S.A. como principal productora de pasta de ají que exporta a mercados en Europa, Estados Unidos y Medio Oriente. Algunas de las variedades de ají que se producen en la región son: Tabasco, Habanero y Cayena (Hugo Restrepo & CIA S.A, 2018).

Según cifras recientes, en el año 2017 se cosecharon 193 hectáreas de ají en el Valle del Cauca, las cuales produjeron 4221 toneladas de fruto; aunque el departamento contó con solo el 6,8% del área cosechada a nivel nacional, se situó como el tercero en producción de ají, con una participación del 19%, por debajo de departamentos como Magdalena y Bolívar, cada uno con un 21% de la producción nacional y un área cosechada de 22,1% y 21,2% respectivamente (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2017).

Gran parte de la investigación en la agricultura en los últimos años ha estado dirigida al manejo eficiente del agua en los cultivos. Estas investigaciones han generado estrategias en la optimización del manejo del agua, como el uso de sistemas de riego por goteo y microaspersión, cultivos bajo cubiertas, uso de polímeros capaces de retener el agua en el suelo, entre otras más, incluyendo las biotecnológicas.



Al respecto, en las últimas décadas se ha ampliado el campo de investigación referente al suelo y su microbiología. El descubrimiento de diversas interacciones entre las plantas y organismos del suelo, como las rizobacterias o las micorrizas, han abierto nuevas ramas de estudio, puesto que algunas de estas asociaciones traen consigo beneficios para la planta como la accesibilidad a nutrientes y agua, beneficios de interés para el desarrollo de tecnologías limpias y sostenibles que permitan incrementar la eficiencia en las diversas labores agrícolas como el riego

Micorriza significa “hongo de raíz”, este término fue propuesto por AB Frank en 1885. Micorriza es el nombre que se da a la interacción simbiótica entre un hongo y la raíz de una planta; en esta relación mutualista, el hongo provee a la planta de nutrientes y agua, mientras que este a cambio recibe fotoasimilados que no puede producir por sí solo. Las endomicorrizas son el tipo de micorriza más común y de mayor interés agrícola (Blasco & Burbano, 2015).

Hoy en día, la investigación vinculada a los hongos micorrízicos ha demostrado los beneficios que puede generar la asociación entre estos y múltiples especies de plantas de interés agrícola, entre ellas el ají. El aumento de la tolerancia al estrés por sequía y salinidad, incremento de la producción y la disminución de la vulnerabilidad a patógenos, son algunos de los beneficios que se han podido descubrir entre la simbiosis de diversos hongos y varias especies de *Capsicum* (Al-Amri, 2019; Krishna et al., 2018; Abdel Latef & Chaoxing, 2014; Burbano, 1989).

Se ha sugerido que tanto la expansión de hifas extra radicales como el aumento de la ramificación de las raíces de la planta pueden permitir exploración de un mayor volumen de suelo aledaño a la planta, lo que da al sistema micorrícico mayor acceso al agua disponible en el suelo (Ruiz-Lozano & Aroca, 2010). De esta manera, es posible que se pueda generar un conjunto de beneficios que sean aprovechados para disminuir la cantidad de agua suministrada mediante riego a un cultivo.

Por lo anterior, el presente trabajo busca cuantificar y evaluar la eficiencia en el uso del agua de riego en un cultivo de ají Tabasco (*Capsicum frutescens*) inoculado con micorrizas arbusculares, que permita estudiar la posibilidad de mitigación sobre los efectos en el cultivo de la sequía o la disminución de la cantidad de agua aplicada en el riego.



2 Objetivos

2.1.1 Objetivo general

- Evaluar el efecto de la inoculación de plantas de ají Tabasco con hongos micorrízicos arbusculares en la eficiencia del uso del agua por el cultivo.

2.1.2 Objetivos específicos

- Cuantificar el efecto de la inoculación de plantas de ají Tabasco con hongos micorrízicos arbusculares en la cantidad de agua de riego aplicada.
- Evaluar variables agronómicas de plantas de ají Tabasco inoculadas con hongos micorrízicos arbusculares.
- Determinar la eficiencia en el uso del agua en la producción de ají Tabasco inoculado con hongos micorrízicos arbusculares.



3 Marco teórico

3.1 Generalidades del cultivo de ají Tabasco (*Capsicum frutescens*)

El ají es una planta que pertenece al género *Capsicum* de la familia de las *Solanáceas*. Es un arbusto perenne, nativo de la región amazónica, que se diseminó por toda América y produce frutos picantes agrupados en racimo. Los principales países productores son la India, Tailandia, Indonesia, Japón, México, Kenia, Sudan, Uganda y Nigeria. El cultivo está adaptado a condiciones tropicales, sus frutos son variables en tamaño y color, las cuales dependen de su estado de maduración (Cardona et al., 2008).

El ciclo del cultivo del ají Tabasco comienza con la germinación de las semillas entre 15 y 17 días después de la siembra en bandeja, el trasplante se realiza entre los 45 y 60 días y la floración ocurre entre los 60 a 120 días después del trasplante, dependiendo de las condiciones agroecológicas y de la variedad; posteriormente, la cosecha se realiza entre los 80 a los 100 días. El trasplante se debe realizar cuando las plántulas alcancen 15 cm de altura y posean de 4 a 5 folíolos (Asohofrúcol, 2013).

3.1.1 Requerimientos agronómicos

El cultivo de ají Tabasco requiere de suelos profundos y bien drenados, con textura franca arcillosa o franca arenosa. La planta manifiesta mediana sensibilidad a la acidez y a la alcalinidad, por lo tanto, se debe establecer en un suelo con pH neutro entre 5,8 y 7. El desarrollo óptimo del cultivo se presenta entre 0-1000 msnm, con una humedad relativa entre 55-90 % y un rango de temperatura óptimo entre 20 y 28 °C. Aunque se puede desarrollar a una temperatura mínima de 16 °C y máxima de 30 °C (Asohofrúcol, 2013).

3.1.2 Necesidad nutricional

Los requisitos de fertilizantes para el cultivo de ají deben basarse en las características químicas del suelo, el tipo de riego utilizado y la productividad esperada (Pinto et al., 2016). A menudo, la cantidad de fertilizante que se aplica está basado en información recopilada acerca de la variedad cultivada más común, el pimentón (*Capsicum annuum*).

La dosis utilizada para la fertilización de cultivos de ají en el Centro Experimental de la Universidad Nacional de Colombia (CEUNP), corresponden en kg ha⁻¹, a: N: 150, P₂O₅: 100 y K₂O: 300, coincidiendo con el manejo nutricional de los agricultores en diferentes lugares de Colombia (Romero-Lozada et al., 2017). Sin embargo, bajo ciertas condiciones, se puede llegar a aumentar el rendimiento del cultivo de ají Tabasco aplicando el doble de la dosis recomendada por el CEUNP, (Romero-Lozada et al., 2017)

3.1.3 Necesidad hídrica

La exigencia total de agua en cultivos de ají pueden oscilar entre 500 y 800 mm, dependiendo de las condiciones climáticas y la variedad (Pinto et al., 2016). Sin embargo, la necesidad hídrica del ají Tabasco bajo las condiciones edafoclimáticas del Valle del Cauca es aproximadamente de 631 mm de agua después del trasplante, con una distribución de coeficiente de cultivo (Kc) como se muestra en la Figura 1 (Herrera, 2015). El requerimiento



de agua bajo invernadero, puede reducir drásticamente, incluso, llegar a la tercera parte de toda la necesidad hídrica de un cultivo en medio natural (Valnir Júnior et al., 2015).

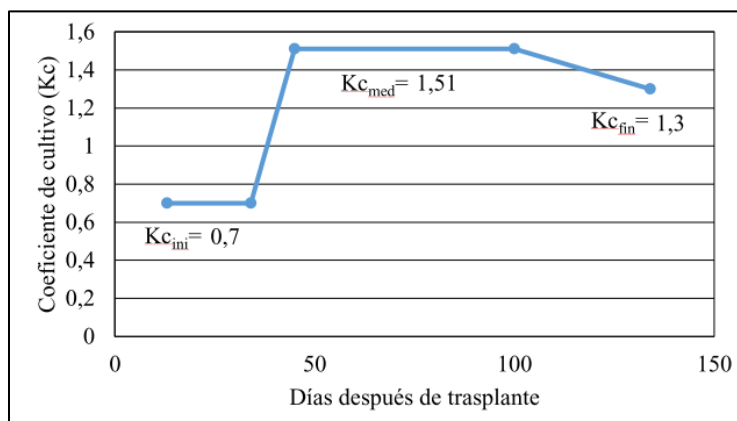


Figura 1. Curva coeficiente de cultivo (Kc) obtenida en lisímetro para plantas de ají Tabasco en condiciones edafoclimáticas del Valle del Cauca (Tomado de Herrera, 2015).

El manejo del agua en el cultivo de ají debe ser adecuado, especialmente durante el trasplante, floración y cuajado del fruto, de lo contrario, la deficiencia de agua puede provocar el aborto de flores, frutos, reducción de tamaño de frutos (Nuez Viñals et al. 1996, citado por Pinto et al., 2016)) y favorecer la ocurrencia de pudrición en flor (Bosland y Votava 1999, citado por Pinto et al., 2016). Por otra parte, el riego excesivo favorece una mayor aparición de enfermedades y un aumento de la lixiviación de nutrientes (Pinto et al., 2016).

En la región amazónica, de donde es nativo el ají, han evolucionado complejas relaciones entre microorganismos y comunidades vegetales que favorecen el desarrollo y aportan un amplio conjunto de beneficios a las plantas. Una de estas asociaciones son las relaciones simbióticas entre plantas y hongos micorrízicos arbusculares (HMA), llamada micorriza, la cual ocurre en el 99% de las plantas vasculares de la región amazónica (Peña et al., 2006).

El ají, como especie nativa de la Amazonía, se encuentra incluido en el grupo de especies que generan este tipo de asociación y debido a la frecuencia con la que se encuentra relacionada a HMA, en su entorno natural, se podría considerar una planta micorriza-dependiente (Cardona et al., 2008).

3.1.4 Plagas y enfermedades

Las enfermedades y desordenes abióticos más importantes y con mayor distribución que afectan al cultivo de las solanáceas en los climas cálidos de Colombia, en especial al ají, son la pudrición por *Phytophthora* (*Phytophthora capsici*), la pudrición por *Sclerotium* (*Sclerotium rolfsii*), la mancha bacterial (*Xanthomonas campestris* pv. *vesicatoria*) y los disturbios causados por virus (Tamayo & Jaramillo, 2013).

De igual forma, la marchitez vascular (*Fusarium oxysporum*), el moho blanco (*Sclerotinia sclerotiorum*), el moho gris (*Botrytis cinerea*), la pudrición del fruto (*Colletotrichum gloeosporioides*) y las enfermedades foliares causadas por *Cercospora capsici*, *Phoma* sp.,



Alternaria spp. y *Oidiopsis* sp., son frecuentes y de importancia en todas las zonas productoras por su difícil manejo, el cual debe ser integrado y asociarse con medidas de prevención (Tamayo & Jaramillo, 2013).

Entre las principales plagas del cultivo de ají se encuentran perforadores de frutos y comedores de hojas como el picudo del ají y larvas de lepidópteros, al igual que los ácaros, pulgones (*áfidos*), trips (*tisanopteros*), chinches (*pentatómidos*) y mosca blanca (*aleuródidos*) los cuales representan un fuerte impacto en la productividad del cultivo, además de propiciar enfermedades si no son controlados adecuadamente.

3.1.5 Riego

El ají Tabasco es susceptible al ataque de hongos que proliferan cuando el entorno de la planta se ve afectado por exceso de agua, por ello, se recomienda cultivarlo en suelos bien drenados y bajo un sistema de riego por goteo o de alta frecuencia que permita un mayor control del volumen de agua aplicada en irrigación. La empresa Hugo Restrepo & Cía. S.A. recomienda la implementación de sistemas de riego por goteo en las parcelas productoras de ají. Este sistema es un método efectivo para la reducción de aplicación de agua y fertilizantes, y ha demostrado un aumento en el rendimiento de los cultivos de ají Tabasco y ají Cayena en un 50 y 30%, respectivamente (Hugo Restrepo & CIA S.A, 2018).

3.1.6 Usos

El ají Tabasco es empleado en la fabricación de las salsas de la marca TABASCO™ elaborados por McIlhenny Company. Las salsas Tabasco son mundialmente reconocidas y se fabrican desde 1868 en Luisiana, Estados Unidos. En el Valle del Cauca, la empresa Hugo Restrepo y Cia producen esta variedad de ají exclusivamente para la marca estadounidense.

La capsaicina es el compuesto químico activo de los ajíes o pimientos picantes del género *Capsicum*, es un compuesto irritante causante de una sensación de ardor dependiendo de su pungencia; este compuesto también es usado como elemento principal en insecticidas y aerosoles para defensa personal.



3.2 Definición y clasificación de las micorrizas

Micorriza es el término que se le otorga a la simbiosis mutualista, permanente e íntima establecida entre determinados hongos micorrízicos, denominando así, la relación de los hongos formadores de micorrizas y las raíces de plantas superiores presentes en el suelo; más del 90% de las plantas terrestres cuentan con este tipo de asociación (Strack et al, 2003; Blasco & Burbano, 2015). Una sola planta puede llegar a relacionarse con más de un hongo a la vez, lo que permite establecer numerosos tipos de micorrizas; sin embargo, en algunas especies de plantas, esta asociación está limitada por la poca dependencia que poseen raíces finas a la simbiosis micorrízica (Blasco & Burbano, 2015).

El término “micorriza” que significa “raíz de hongo” fue descrito por A. B. Frank a finales del siglo XIX. Sin embargo, registros fósiles sugieren la existencia de hongos micorrízicos desde hace 370 millones de años, lo que indica que esta simbiosis es tan antigua como las mismas plantas (Blasco & Burbano, 2015). La supervivencia de los hongos micorrízicos depende de su simbiosis con las plantas, es por ello que son biotrofos obligados (Strack et al., 2003). Estos cumplen un papel importante en la nutrición vegetal y la fertilidad del suelo, pues son capaces de transferir nutrientes y agua a la planta anfitriona a través de micelios extra radicales, que se extienden por el suelo (Ruiz-Lozano & Aroca, 2010; Smith & Read, 2002).

3.2.1 Clasificación de los hongos micorrízicos

Existen dos grandes grupos de hongos micorrízicos con relevante importancia en la industria agrícola, las ectomicorrizas y las endomicorrizas (Blasco & Burbano, 2015). Estos grupos se diferencian entre sí por su morfología y la relación existente entre las hifas del hongo huésped, y la raíz de la planta hospedera.

3.2.1.1 *Ectomicorrizas*

Las Ectomicorrizas se encuentran generalmente en regiones templadas, subárticas y en menor frecuencia en zonas tropicales. Durante el proceso de colonización, los hongos ectomicorrízicos del suelo reciben el estímulo de metabolitos de las raíces para crecer en dirección a ellas. Una vez las hifas del hongo interceptan alguna raíz, empiezan a aglomerarse alrededor de esta y penetran la epidermis de la corteza de la raíz, dando lugar a una estructura llamada red de Hartig (Figura 2). La red de Hartig es una especie de vaina o manto fúngico que rodea la raíz de la planta, en donde las hifas penetran entre las células de la raíz. Las raíces de plantas que forman ectomicorrizas se caracterizan por dejar de crecer y adquirir forma de garrote (Blasco & Burbano, 2015).

3.2.1.2 *Endomicorrizas*

Las endomicorrizas son el tipo de micorriza más común, sobre todo en el trópico. Las hifas de los hongos endomicorrízicos pueden penetrar intercelular e intracelularmente en las raíces de las plantas; además, no tienden a aglomerarse alrededor de las raíces en redes de Hartig, sino por el contrario, se extienden y exploran el suelo circundante. A este grupo de hongos micorrízicos pertenecen los hongos micorrízicos arbusculares (HMA), precursores de la asociación micorrízica arbuscular (MA) (Smith & Read, 2002).

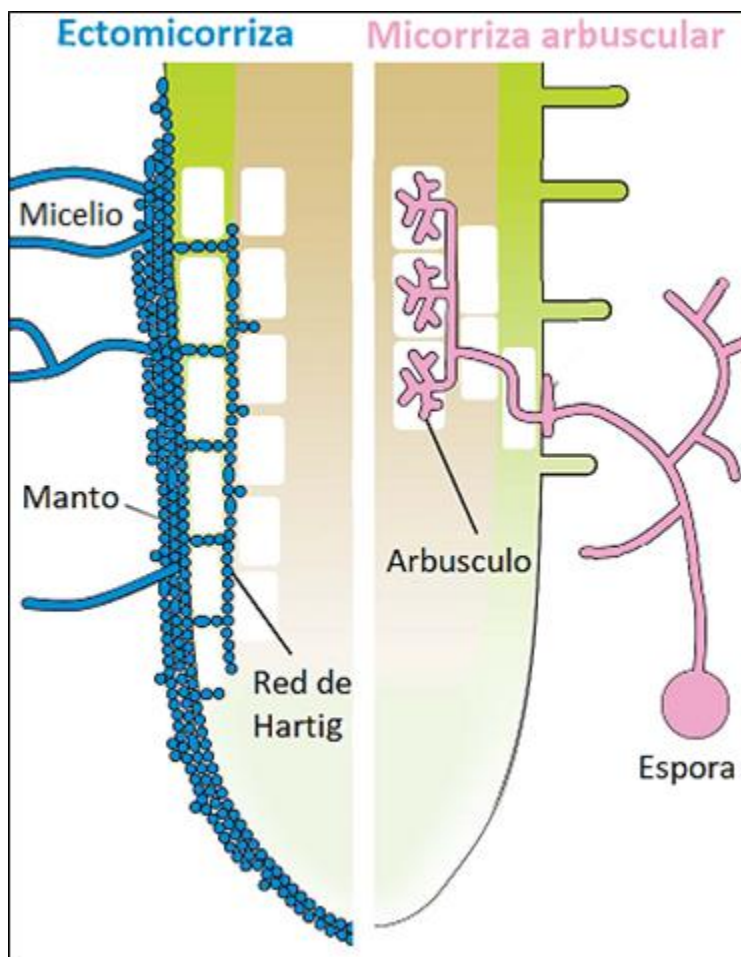


Figura 2. Ilustración de las estructuras de colonización de la raíz en las interacciones ectomicorrícicas (azul) y micorrícicas arbusculares (rosa). El hongo ectomicorrícico rodea la punta de la raíz con un manto grueso de hifas, mientras que la red Hartig se desarrolla alrededor de las células epidérmicas (verde). En el caso de las micorrizas arbusculares, la punta de la raíz generalmente no está colonizada. Las hifas se pueden desarrollar a partir de una espora. La colonización de la raíz procede tanto intra como intercelularmente y culmina con la formación de arbuscúlos, pequeños árboles fúngicos, dentro de las células corticales internas (marrón) (Tomado de Bonfante & Genre, 2010).

Los HMA pueden llegar a colonizar las raíces de las plantas por medio de tres tipos de inóculos o propágulos: esporas, fragmentos de raíces infectadas e hifas. Los inóculos colonizan las raíces de las plantas mediante hifas, más específicamente por medio de apresorios, que son extremos de hifas modificadas, especializadas en penetrar la epidermis de la raíz de la planta (Smith & Read, 2002).

El proceso de colonización de raíces por HMA comienza con la interceptación de las hifas y la raíz, si el proceso ocurre mediante esporas primero deben germinar y desarrollar hifas; posteriormente, el hongo penetra mediante apresorios en la superficie de la raíz y se extiende por el espacio intercelular del córtex; tanto las células del hongo como las células de la raíz de la planta cambian su morfología durante la colonización. Una vez las hifas penetran en las paredes celulares de la raíz, se desarrollan dentro de las células de la corteza



estructuras de forma arbórea, llamadas arbuscúlos (Figura 3), por su ramificación dicotómica repetida. Los arbuscúlos son los responsables del intercambio de nutrientes entre el hongo y la planta y además, es la principal característica de los HMA que deben su nombre a estos (Strack et al., 2003).

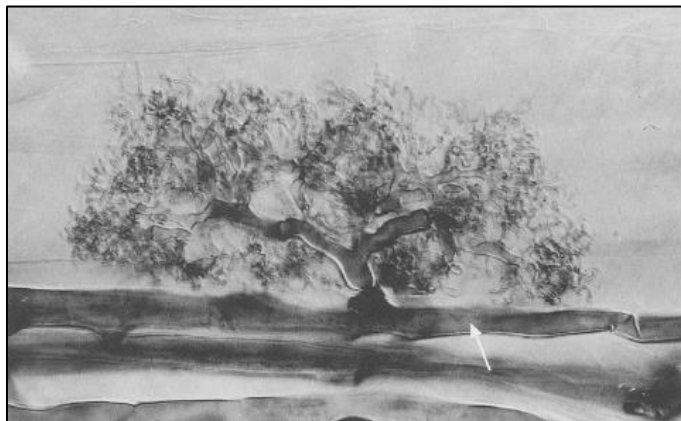


Figura 3. Arbúsculo maduro de HMA dentro de una célula cortical de Puerro. El arbúsculo ha crecido a partir de una hifa intercelular bien desarrollada (flecha) (Tomado de Brundrett et al. 1984 citado por Smith & Read, 2002).

Solo en algunos casos durante la simbiosis, los HMA pueden llegar a formar órganos de almacenamiento intercelulares como vesículas. En consecuencia, este tipo se denomina, “hongos micorrízicos vesiculares-arbusculares”. Por lo tanto, este nombre no puede generalizarse, pues no todas las endomicorizas de este tipo desarrollan vesículas, pero, si, todas forman arbuscúlos (Strack et al., 2003).

3.2.2 Factores biofísicos y biológicos que afectan la simbiosis micorrízica arbuscular

Aunque existen diversidad de especies de HMA que se adaptan a condiciones bióticas y abióticas totalmente diferentes, ya que han sido registrados en ecosistemas naturales como desiertos, dunas de arena, selvas tropicales, suelos salinos y sistemas manejados como praderas, huertos y cultivos agrícolas (Brundrett, 1991 citado por Moreira et al., 2012), se han encontrado algunos limitantes en condiciones ambientales tropicales.

El establecimiento y desarrollo de la simbiosis MA está influenciado por factores como la acidez del suelo, aunque los HMA son tolerantes a la alta acidez, estos se pueden beneficiar de valores de pH ligeramente neutros. Por lo general, la vida en el suelo está fuertemente relacionada con el pH de este, encontrándose que el valor limitante de la vida del suelo está alrededor de 3,0 (Peña et al., 2006). Un estudio realizado en la amazonia colombiana reportó que la mayoría de los géneros de HMA se aislaron en un rango de pH entre 4,0 y 5,0, siendo este su pH natural para desarrollar la simbiosis, establecerse en el suelo y esporular (Peña et al., 2006).

De la misma forma, los HMA se ven afectados por la concentración de fósforo P presente en el suelo. Bajas concentraciones de este elemento tienden a generar simbiosis MA más efectivas, lo cual incrementa la colonización radicular del hongo (Douds & Schenck, 1990),



posiblemente por la dependencia micorrízica de las plantas en entornos de escasez. Niveles superiores a 10 ppm de P pueden ser contraproducentes para el desarrollo de simbiosis MA en suelos de la región amazónica, donde se halló que la concentración de P en el suelo es inversamente proporcional a la colonización radicular y la presencia de arbuscúlos. Se debe asegurar niveles bajos de P en el suelo para favorecer una simbiosis MA eficiente (Peña et al., 2006).

El factor físico del suelo que más influye en la asociación MA es la textura, aunque depende de la especie de hongo, existe una mayor sensibilidad de estos a suelos arcillosos, probablemente por la poca disponibilidad de oxígeno y bajo drenaje en este tipo de suelos, afectando la viabilidad de propágulos por la promoción de ambientes anaeróbicos. Por otro lado, la cobertura también juega un papel importante en esta asociación, coberturas de suelo altamente diversas indican simbiosis micorrízica efectivas y con mayor porcentaje de colonización en comparación con coberturas agrícolas como monocultivos (Peña et al., 2006).

Otros factores que también pueden generar afectaciones al desarrollo de las MA son las prácticas culturales como la fumigación intensiva, quemas de cobertura vegetal, establecimiento de barbechos, monocultivos permanentes, invertir los horizontes del suelo como sucede en algunas prácticas con maquinaria agrícola y aplicaciones intensas de fertilizantes fosfóricos al suelo (Jaramillo, 2014). Además, cabe aclarar que en una relación MA cualquier factor adverso que afecte a la planta afectará también al HMA.

3.2.3 Beneficios de la asociación MA en plantas

Indirectamente, las plantas asociadas a HMA pueden ser beneficiadas por la posible influencia que tienen este tipo de hongos en la formación de agregados en el suelo mediante bioestructuras generadas por la agrupación mecánica de partículas producida por las hifas, la posible exudación de proteínas floculantes (Glomalina) y el aumento de macro y microorganismos benéficos en el suelo (Rillig & Mummey, 2006). El mejoramiento de la estructura del suelo incrementa la disponibilidad de agua, el buen drenaje y puede favorecer el incremento de microorganismos aeróbicos, factores que pueden beneficiar a la planta hospedera.

La red del micelio de los HMA conectada a las raíces micorrizadas aumenta considerablemente el volumen de suelo que puede ser explorado por la planta lo que posibilita el acceso a nutrientes, sobre todo a elementos poco móviles como el fósforo (P). De esta manera, se puede aumentar la eficiencia en la absorción de P, y así reducir la fertilización fosfatada, minimizando impactos ambientales y económicos (Gianinazzi et al., 2010). Además, puede proveer también de otros elementos poco móviles del suelo como zinc, azufre, calcio, molibdeno y boro (Burbano, 1989). La absorción de P es uno de los beneficios más importantes y estudiados de los HMA.

Se ha demostrado que la asociación MA aumenta la tolerancia de las plantas al estrés biótico causado por patógenos del suelo (Gianinazzi et al., 2010; Pozo & Azcón-Aguilar, 2007) y al estrés abiótico producido por la escasez de minerales, presencia de metales pesados, altas temperaturas y el déficit hídrico causado por la sequía y la salinidad del suelo



(Gianinazzi et al., 2010; Pagano, 2014; Ruiz-Lozano & Aroca, 2010). En plantas de ají, la asociación con HMA puede mejorar la tolerancia de estas a la escasez de agua; también, aumenta la biomasa, el contenido de clorofila y agua de la planta (Krishna et al., 2018). La mejor exploración de un volumen de suelo puede permitir a la parte radicular extenderse a las zonas de mayor disponibilidad de agua para dar a la planta mayor acceso a ella (Ruiz-Lozano & Aroca, 2010).

Sin embargo, la utilización de HMA en sistemas productivos agrícolas se ha visto desvalorizada por los resultados nulos o con poco impacto en condiciones normales del cultivo en campo, que distan de los resultados observados en condiciones ambientales reguladas como invernaderos, posiblemente debido a las condiciones en que se mantienen los cultivos (Barrera Berdugo, 2009).

3.3 Eficiencia en el uso del agua EUA

La producción de nueva biomasa en cualquier cultivo o comunidad vegetal está fuertemente determinada por la cantidad de agua disponible en el suelo, la razón está en que es el proceso base de la producción de nueva biomasa, la fotosíntesis, y el gasto de agua o transpiración se producen a la vez; tanto la entrada de dióxido de carbono y la salida de vapor de agua ocurren en los estomas (Medrano Gil et al., 2007).

De esta manera, la eficiencia en el uso del agua (EUA) puede entenderse como el volumen de agua que las plantas necesitan consumir para incorporar a su biomasa una determinada cantidad de carbono proveniente de la atmósfera. (Medrano Gil et al., 2007). Así, la EUA puede convertirse en un indicador económico importante que permite calcular el valor del agua en un cultivo cuando se relaciona el rendimiento de la planta en kg por m³ de agua utilizada, como se muestra en la Ecuación 1 (Fernández y Camacho, 2005 citado por Salazar-Moreno et al., 2014).

$$Ef\ Agua = \frac{Producción\ (kg)}{Agua\ utilizada\ (m^3)}$$

Ecuación 1

En el mismo sentido, la EUA dependerá principalmente de las características propias de la planta, como especie y variedad; y de las características del ambiente en el que se desarrolla. Además, dependerá de la etapa y de la escala a la que se considere, bien sea a escala de planta, cultivo o ecosistema (Medrano Gil et al., 2007). Algunos tipos de EUA, dependiendo de la escala, son la EUA fotosintética, la cual compara la asimilación de moles de carbono con moles de agua utilizada, y la EUA total que relaciona la biomasa total de la planta en kg y la cantidad de agua total de riego utilizada en metros cúbicos.



4 Estado del arte-Investigaciones relacionadas con el uso del agua en plantas inoculadas con HMA

El estudio de los efectos de la inoculación con HMA en diversas especies de plantas ha aumentado en los últimos años con el avance en el entendimiento del funcionamiento de la simbiosis MA en las plantas. Aunque la mayor parte de los estudios están focalizados en el aumento de la absorción de P, se pueden encontrar también investigaciones acerca del estado del agua en plantas micorrizadas.

Sin embargo, la información disponible de los efectos de la inoculación con HMA en la eficiencia del uso de agua en variedades de *Capsicum* es escasa, aunque existe suficiente documentación sobre otras especies de la misma familia de las Solanáceas, como el tomate. No obstante, la mayoría de esta información presenta una escala de medición en la EUA diferente a la tratada en el presente estudio.

Por lo anterior, se prestará suma atención a la información consultada de los resultados observados en investigaciones realizadas en otras especies de Solanáceas, y en menor medida, en otros tipos de cultivos agrícolas no relacionados con el ají tabasco.

En México, Mena-Violante et al (2006), evaluaron el efecto de los HMA en la calidad del fruto de plantas de chile ancho (*Capsicum annum L. cv San Luis*) bajo condición de sequía en un invernadero. El ciclo de sequía fue de 26 días y se utilizaron HMA nativos de la región. En condiciones de riego normal, 80% de la humedad a capacidad de campo, el peso fresco de los frutos producidos por plantas inoculadas con HMA fue un 25% mayor que en plantas no inoculadas. Por otro lado, el peso de los frutos de plantas micorrizadas en condiciones de sequía fue similar al peso de los frutos de plantas no micorrizadas bajo condiciones normales de agua. Aunque en la investigación no se cuantificó, esto sugiere un aumento en el UEA.

Un estudio similar fue realizado por Davies Jr. et al (2002), donde evaluaron el estado del agua en plantas de la misma variedad de chile ancho (*Capsicum annum L. cv San Luis*) sometidas a sequía y asociadas a HMA nativos de México. Para igualar el crecimiento y minimizar las diferencias de contenido de P entre plantas inoculadas y no inoculadas, las ultimas recibieron más P. De esta manera, encontraron que, aunque la simbiosis MA aumentó la tolerancia a la sequía, no mejoró la EUA fotosintética (g carbono / kg H₂O) en el cultivar.

Respecto a los resultados anteriores, Augé, Toler, & Saxton (2014), argumentan que la mejora del estado del agua y fijación de carbono, evidenciada en la conductancia estomática, en plantas asociadas con HMA puede deberse a un aumento de la vigorosidad generado por la absorción de nutrientes, específicamente, por la absorción de P. A pesar de ello, estos beneficios no son específicos de la mejora en la nutrición de plantas micorrizadas, pero el impacto es mucho menor si se compara con plantas no micorrizadas en óptimas condiciones nutricionales. De esta manera, explica que la correlación entre los beneficios (como absorción de agua y nutrientes) de los HMA en las plantas es tan intensa que es casi imposible estudiarlos de manera independiente.



Otro estudio desarrollado en Hungría por Ombódi et al. (2019), donde se examinó el efecto de la inoculación con HMA en el crecimiento y rendimiento de plantas de pimiento dulce (*Capsicum annuum* L.) manifestó que la simbiosis puede aumentar el rendimiento en un 18% (de 12.43 a 14.74 kg m²) principalmente debido a un incremento en el número de frutos. El rendimiento aumentó en condiciones de fertilización limitada y temperatura bajas, a pesar de una alta presencia de simbiosis nativos en el suelo.

Con el objetivo de estudiar los efectos de la simbiosis MA en los índices morfológicos, fisiológicos y bioquímicos de cuatro especies de *Capsicum annuum* L sometidos a estrés por sequía, Krishna et al. (2018) realizaron una investigación en India, donde encontraron que la reducción del agua de riego aplicada afectó negativamente el crecimiento de las plantas micorrizadas y no micorrizadas comparadas con plantas sometidas a riego óptimo. Sin embargo, las plantas asociadas con HMA aumentaron el crecimiento y el rendimiento en contraste con plantas no asociadas. Además, las cuatro especies de *Capsicum* respondieron de manera diferente al mismo HMA y demostraron la sensibilidad varietal de la simbiosis MA en este caso.

En una investigación realizada por Jezdinsky et al (2012), con el objetivo de evaluar el efecto de los HMA y la sequía en parámetros fotosintéticos en el pimiento dulce (*Capsicum annuum* L. 'Slávy'), se observó un ligero incremento en la EUA fotosintética de plantas micorrizadas bajo condiciones de estrés hídrico, mientras que en condiciones de riego óptimo el efecto de los HMA no fue claro en la EUA fotosintética en comparación con plantas no micorrizadas.

Se evidencia en la revisión bibliográfica el efecto de los beneficios de la asociación MA sobre cultivares del género *Capsicum* como el aumento del rendimiento, la tasa fotosintética y la tolerancia a la sequía, aunque no se presenta material explícito de la EUA (rendimiento kg / agua utilizada m³) se puede relacionar el aumento del rendimiento en condiciones de déficit hídrico con el aumento de la EUA.

A continuación, en la Tabla 1 se presenta un resumen de algunas investigaciones relacionadas con la EUA, primeramente, en cultivares relacionados con el ají tabasco como el tomate y la berenjena, ambas plantas de la familia Solanácea, y también se tendrán en cuenta resultados obtenidos en otro tipo de especies vegetales sin parentesco con el ají tabasco.

Tabla 1 Antecedentes relacionados con la EUA en plantas micorrizadas.

Autor/año	Cultivo/Lugar	Objetivos	Resultados relevantes
(Wahb-Allah et al., 2014).	Tomate en invernadero, Arabia Saudí.	Evaluar la influencia de la inoculación con HMA en el crecimiento de las plantas, rendimiento y EUA del tomate en condiciones de invernadero.	La inoculación junto con un nivel de riego de 80% ETc, contribuyó con el aumento del rendimiento entre 5,28% y 6,89%. Además, la inoculación permitió ahorrar agua de riego en un 20%.



Autor/año	Cultivo/Lugar	Objetivos	Resultados relevantes
(Bowles et al., 2016)	Tomate en campo, EEUU	Estudiar el efecto de la simbiosis entre HMA y plantas de tomate en el rendimiento del cultivo bajo déficit hídrico.	Descubrieron que plantas micorrizadas aumentaron el rendimiento en un 28% y 24% respecto a las plantas no micorrizadas bajo riego completo y deficitario, respectivamente. Por lo tanto, el UEA fue mayor para plantas micorrizadas. Además, la asociación con HMA aumentó la absorción de nitrógeno y fósforo.
(Tuzel et al., 2015)	Berenjena en invernadero, Turquía.	Evaluar el efecto combinado de la inoculación con HMA y el estrés hídrico en plantas de berenjena cultivadas en perlita.	Los aumentos de rendimiento en plantas inoculadas con HMA fueron del 24% en otoño y del 45% en primavera. La EUA aumento en un 18% en plantas inoculadas en la temporada de otoño. Aunque el rendimiento aumentó cuando se aplicaron HMA en condiciones de estrés por sequía, el mayor rendimiento se obtuvo bajo riego completo.
(Candido et al., 2015)	Tomate en campo, Italia.	Investigar los efectos agronómicos de la combinación de dos inóculos de HMA diferentes sometidos a regímenes de riego de 0%, 50% y 100% de ETC.	La inoculación con HMA aumento el rendimiento comercializable, principalmente como resultado de un mayor número y peso de frutas. Ambos inóculos de HMA no afectaron significativamente los parámetros de calidad de la fruta, aunque aumentaron la eficiencia del uso del agua del rendimiento comercializable. Sin embargo, no se encontró sinergia entre la inoculación y los regímenes de riego.



(Bakr et al., 2017)	Tomate en campo, Hungría.	Estudiar los efectos de los bioinoculantes comerciales de HMA en el procesamiento de tomate cultivado bajo tres suministros de agua diferentes.	La tasa de colonización de raíces en plantas inoculadas aumentó significativamente en condiciones de déficit hídrico. Las plantas micorrizadas mejoraron la biomasa total y la EUA total en un 42% en comparación con las plantas no micorrizadas. El efecto micorrízico disminuyó con el suministro total de agua.
(Bolandnazar et al., 2007)	Cebolla en invernadero, Irán.	Evaluar los efectos de la Inoculación con HMA en el rendimiento de bulbos y EUA de un cultivo de cebolla en invernadero en suelo estéril y suelo no estéril.	Encontraron un aumento de la ETc en plantas inoculadas, debido a la mejora del crecimiento en comparación con las plantas no inoculadas. Además, la inoculación con HMA mejoró el uso eficiente del agua y el rendimiento del cultivo en los dos tipos de suelo estudiado.
(Michalis et al., 2013)	Sandia en campo, Chipre.	Evaluar el efecto de la inoculación con HMA comerciales en el rendimiento y EUA de un cultivo de sandía en campo.	El rendimiento y la EUA aumentaron un 19%. Por otro lado, en condiciones de riego no limitado la inoculación con HMA no produjo resultados significativos en el rendimiento.
(Boyer et al., 2015)	Fresas en invernadero, Reino Unido.	Estudiar el efecto de la inoculación con dos especies de HMA, en un tratamiento mixto (con las dos especies) y dos separados (por si mismos), sobre el crecimiento y la tolerancia al estrés hídrico de un cultivo de fresa.	Demostraron que el aumento en el crecimiento de las plantas fue influenciado directamente por un aumento de la colonización de raíces por HMA. Bajo sequía y condiciones normales de riego, las plantas inoculadas obtuvieron una mayor EUA que las no inoculadas. Se observó una mayor colonización de HMA en las raíces de las plantas sometidas a estrés hídrico. La



			inoculación con una sola especie dio resultados similares a la inoculación mixta.
--	--	--	---

De acuerdo con las investigaciones anteriores, se ha demostrado que la asociación MA aumenta la tolerancia de las plantas a la sequía, favorece un mayor rendimiento de frutos y aumenta la EUA a diferentes escalas, principalmente bajo condiciones de sequía y escasez de nutrientes en el suelo. Aunque existen diferencias en la escala de medición de la EUA, por lo general presenta aumentos en plantas inoculadas con HMA. Sin embargo, son pocas las investigaciones que evalúan la EUA en cultivos de ají o similares.



5 Metodología

A continuación, se presentará en diferentes apartados las especificaciones, materiales y métodos utilizados en el desarrollo del presente estudio.

5.1 Localización del experimento

El experimento se realizó en la azotea de una vivienda ubicada en la ciudad de Santiago de Cali, barrio Mariano Ramos, de coordenadas $3^{\circ} 24' 26.122''$ N 76° y $31' 6.532''$ W (Figura 4). La zona cuenta con una altura media de 990 msnm, precipitación media anual de 1000 mm y temperatura promedio de 25°C . El experimento se desarrolló durante 140 días a cielo abierto, desde el 13 de octubre de 2020 hasta el 5 de marzo de 2021.



Figura 4. Localización del estudio en la terraza de un tercer piso perteneciente a una vivienda del barrio Mariano Ramos al oriente de la ciudad Santiago de Cali - Valle del Cauca - Colombia.

5.2 Plántulas

Inicialmente, se obtuvieron por medio de la empresa Hugo Restrepo & Cía, 120 plántulas de ají Tabasco con 25 días de desarrollo en semillero, preparadas para trasplantar como se observa en la Figura 5. Se decidió trabajar con plántulas aportadas por la empresa debido a



que estas vienen de proceso de adaptación a las condiciones ambientales del Valle del Cauca, además, para garantizar aspectos óptimos fitosanitarios y de producción.



Figura 5. Plántulas de ají Tabasco con 25 días en semillero aportadas por la empresa Hugo Restrepo & Cía.

5.3 Suelo

El suelo utilizado en el experimento se extrajo de la estación experimental del Laboratorio de Aguas y Suelos Agrícolas (LASA), perteneciente a las Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente (EIDENAR), de la Universidad del Valle sede Meléndez situada en la ciudad de Santiago de Cali, Valle del Cauca.

El suelo se extrajo de la primera capa de la superficie, no superando los 20 cm de profundidad, en un área de alrededor 8 m², posteriormente fue tamizado a 2 mm y transportado en baldes de 18 litros hasta la localización del experimento. Finalmente, el suelo fue mezclado en la ubicación del estudio, para garantizar su homogeneidad.

Además, se realizó una caracterización del suelo donde las propiedades químicas y la textura se determinaron por medio de los servicios prestados por el Laboratorio Nacional de Suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y se determinó la capacidad de campo *in situ*, el punto de marchitez permanente por el método biológico y la densidad aparente del suelo *in situ*, utilizando una guía metodológica de Cenicaña diseñada por Cruz Valderrama (2014), como se presenta a continuación.

5.3.1 Densidad aparente

Para la determinación de la densidad aparente se excavó en cinco maceteros, una semana después de realizar el trasplante, un agujero de unos 8 cm de diámetro con la ayuda de una cuchara, el suelo extraído de los agujeros se depositó en bolsas plásticas individuales debidamente marcadas para luego ser secadas en un horno a 100 °C aproximadamente, por 24 horas y finalmente pesarlas.

Una vez extraído el suelo del agujero, se procedió a forrar el interior con un plástico delgado con el fin de impermeabilizar las paredes del hoyo para posteriormente llenarlo de agua,



extraerla y medir el volumen en una probeta graduada como se presenta en la Figura 6. De esta manera se obtuvo el volumen total del suelo.



Figura 6. (De izquierda a derecha) excavación del agujero, impermeabilización del agujero y extracción del agua agregada.

Finalmente, se dividió el peso del suelo seco en gramos, por el volumen total del suelo en cm^3 y el resultado es la densidad aparente en g/cm^3 , como se muestra en la Ecuación 2.

$$\text{Densidad aparente} = \frac{\text{Peso suelo seco}}{\text{Volumen total del suelo}}$$

Ecuación 2

5.3.2 Capacidad de campo (CC)

El método propuesto por (Cruz Valderrama, 2014) para el cálculo de la CC fue modificado debido a las condiciones específicas del estudio, por ende, los resultados fueron comparados con los obtenidos por (Camayo Fernandez, 2015), en su estimación de las propiedades hidrofísicas del suelo del laboratorio del LASA usado en el estudio.

Para la estimación de la CC, se propone elegir un área de terreno de aproximadamente un metro cuadrado, la cual es saturada con agua, entre 150 y 200 litros, para posteriormente ser cubierta con un plástico. Al cabo de tres días, en suelos arcillosos, se retira el recubrimiento y se procede a tomar 3 muestras de suelo húmedo, que son pesadas y luego secadas para ser pesadas nuevamente, la relación entre estos dos valores da como resultado la humedad a CC.

Sin embargo, en el presente estudio, la prueba se realizó en tres maceteros a los cuales se les añadió agua hasta que empezarán a drenar para garantizar la saturación del suelo, posteriormente fueron tapados y se tomó una muestra por recipiente tres días después a una profundidad de 5 cm con la ayuda de una cuchara, como se muestra en la Figura 7. Posteriormente el suelo fue pesado, secado al horno durante 24 horas a 100°C y vuelto a pesar.



Figura 7. (De izquierda a derecha) aplicación de 10 litros de agua para saturar el suelo, recipiente con suelo saturado tapado, muestra tomada y pesada tres días después.

Finalmente, la CC se calculó relacionando, para cada muestra, el peso del agua perdida en el secado en el horno y el peso del suelo seco como se presenta en la Ecuación 3.

$$\text{Humedad de la muestra} = \frac{\text{Peso del agua perdida por el suelo}}{\text{Peso del suelo seco}}$$

Ecuación 3

5.3.3 Punto de marchitez permanente (PMP)

Para el cálculo del PMP se introdujo 1 kg de suelo en cada una de tres bolsas plásticas, donde se sembraron semillas de frijol, las cuales se regaron hasta que desarrollaron tres pares de hojas y 15 cm de altura, en ese momento se suspendió el riego y se selló con cinta la parte superior. Una vez que las plantas mostraron signos de marchitez, se abrieron las bolsas y se tomaron las muestras del suelo. Posteriormente, se pesaron las muestras húmedas, se ingresaron a un horno por 24 horas a 100 °C, aproximadamente, y se pesaron de nuevo. En la Figura 8 se presentan las plantas utilizadas en la prueba.

Finalmente, el PMP se calculó utilizando la Ecuación 3 usada para calcular la CC, debido a que al final, los dos son puntos de humedad del suelo que convergen en un mismo procedimiento.

Los resultados de estas pruebas fueron usados para el cálculo de la lámina de agua rápidamente aprovechable (LARA), la cual fue usada en la cuantificación de la cantidad de agua de riego teniendo en cuenta la precipitación. Además, para el cálculo de la LARA se estableció una profundidad efectiva de 25 cm y un factor de agotamiento de 40%.



Figura 8. Plantas de frijol marchitas sembradas en el suelo del estudio y ejemplo de una de las tres muestras extraídas y pesadas.

5.4 Inóculo MA

Como inoculante biológico se utilizó un producto comercial desarrollado por la empresa Safer Agrobiológicos S.A.S, el cual contiene esporas, micelio libre y raicillas colonizadas con HMA, diseminadas en un sustrato arenoso desinfectado libre de patógenos. El producto contiene micorrizas de los géneros *Glomus sp*, *Scutellospora sp*, *Acaulospora sp* y *Entrophospora sp*, con una concentración garantizada de mínimo 300 esporas por gramo de sustrato y 70% de raicillas colonizadas, como se puede apreciar en la Figura 9.



Figura 9. (De izquierda a derecha) Inoculante biológico MA usado en el estudio, raicillas colonizadas presentes en el sustrato y sustrato con esporas.

5.5 Maceteros

Los maceteros empleados en el estudio se elaboraron a partir de cuñetes de plástico de 18 litros, 30 cm de diámetro y 36 cm de altura. Para permitir un adecuado drenaje del lisímetro, estos fueron perforados 30 veces en el fondo utilizando un taladro y broca de 3/8" de pulgada, posteriormente se colocó en el interior una malla de anqueo con el fin de impedir



que el suelo se filtrara por los agujeros. Después se agregó una capa de 5 cm de espesor de grava 3/4 con el propósito de favorecer el drenaje y evitar que el agua se estancara en el fondo del recipiente. Finalmente, se relleno cada macetero con el suelo previamente tamizado por 2 mm y mezclado como se representa en la Figura 10.



Figura 10. (De izquierda a derecha) Recipiente con agujeros en el fondo, recipiente con malla, recipiente con capa de grava 3/4 y macetero final vista lateral.

5.6 Diseño experimental

El diseño experimental se realizó completamente al azar de 10 tratamientos cada uno con 3 repeticiones, donde se administraron 5 regímenes de riego para plantas inoculadas (MA+) y plantas no inoculadas (MA-). Los regímenes de riego se adecuaron según el Kc de cada una de las etapas fenológicas correspondientes al ají tabasco. Los tratamientos estudiados fueron los siguientes:

T1-MA.	Lamina aproximadamente igual al 115 % del Kc sin aplicación de HMA
T1+MA.	Lamina aproximadamente igual al 115 % del Kc con aplicación de HMA
T2-MA.	Lamina aproximadamente igual al 100 % del Kc sin aplicación de HMA
T2+MA.	Lamina aproximadamente igual al 100 % del Kc con aplicación de HMA
T3-MA.	Lamina aproximadamente igual al 90 % del Kc sin aplicación de HMA
T3+MA.	Lamina aproximadamente igual al 90 % del Kc con aplicación de HMA
T4-MA.	Lamina aproximadamente igual al 70 % del Kc sin aplicación de HMA
T4+MA.	Lamina aproximadamente igual al 70 % del Kc con aplicación de HMA
T5-MA.	Lamina aproximadamente igual al 50 % del Kc sin aplicación de HMA
T5+MA.	Lamina aproximadamente igual al 50 % del Kc con aplicación de HMA

Para garantizar la aleatoriedad de la disposición final de cada unidad experimental en el espacio designado, se realizó un sorteo; posteriormente, se organizaron las unidades sobre estacas de madera de 5 cm de grosor a una distancia mínima de 40 cm y cada macetero fue rotulado con el símbolo del tratamiento y repetición correspondiente, como se representa en la Figura 11 .

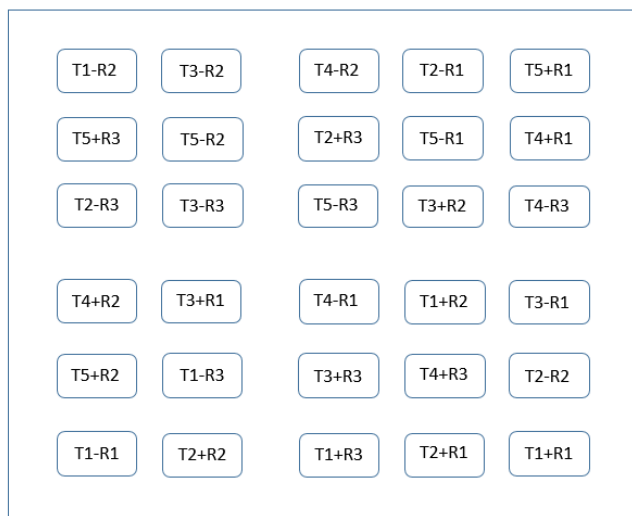


Figura 11. Disposición final de cada unidad experimental.

5.7 Variables agronómicas de respuesta

Al final del experimento se recolectaron las mediciones de las variables agronómicas como, la altura desde el primer nudo y el grosor del tallo. Además, durante el proceso de floración se contó el número de flores para cada planta y al finalizar la cosecha se contaron la cantidad de frutos y su peso fresco para cada planta.

Una vez recolectada la información anterior, se procedió a calcular el rendimiento en kg y el total de frutos para cada tratamiento y planta, sumando los totales de las cosechas, de igual forma se determinó el peso por fruto dividiendo el total de cada recolecta de la cosecha en kg entre la cantidad de frutos recogidos.

5.8 Riego

Para el cálculo de la cantidad de agua de riego a aplicar se utilizaron las mediciones diarias obtenidas de un tanque evaporímetro y un pluviómetro, dispuestos en el lugar del estudio como se muestra en la Figura 12, de esta manera se cuantifico la evaporación y la precipitación para calcular la cantidad de agua diaria de riego.



Figura 12. Disposición final del tanque evaporímetro y el pluviómetro en el lugar del experimento.

De esta manera, se utilizó un pluviómetro tipo San Isidro MA15 de 136 mm de capacidad, el cual fue situado en una viga de madera a 2 metros de altura, de forma que quedara en un lugar despejado y totalmente recto con el fin de medir la precipitación. Las mediciones de precipitación junto con la evapotranspiración del tanque se realizaron a las 7 de la mañana durante todos los días de duración del estudio.

El tanque evaporímetro usado para el manejo del riego fue calibrado teniendo en cuenta la información obtenida de la estación meteorológica Meléndez suministrada por CENICAÑA, la calibración dio como resultado un coeficiente de tanque de 84%. El tanque fue cubierto con una capa de pintura de aluminio blanca y ubicado al lado del cultivo sobre una base de madera de 5 cm de altura, para facilitar la circulación de aire en la parte de abajo. El nivel diario del agua en el tanque fue medido mediante una regleta y una vez al mes fue necesario limpiarlo de algas y suciedad acumulada.

Para la aplicación del riego se realizó el cálculo y la aplicación diaria de la lámina de riego, a partir de los valores de evapotranspiración del tanque evaporímetro clase A ubicado al lado del cultivo y los valores de coeficiente de cultivo K_c del ají tabasco y las condiciones específicas para cada uno de los tratamientos, utilizando la Ecuación 2.

$$\text{Lamina de riego (mm)} = ET(\text{mm}) * K_t * K_c$$

Ecuación 4

Dónde: *Lamina de riego (mm)*, es la lámina de agua en milímetros; K_c , el coeficiente de cultivo del tratamiento de riego respectivo; ET , es el valor de la evaporación del tanque evaporímetro en milímetros y K_t el coeficiente del tanque evaporímetro.

Posteriormente el volumen total de agua de riego para cada tratamiento se calculó usando la Ecuación 5, teniendo en cuenta el área de riego.

$$V_t(\text{cm}^3) = \text{Lamina de riego (cm)} * A_r(\text{cm}^2)$$

Ecuación 5



Dónde: $Vt(cm^3)$, es el volumen de riego total para cada tratamiento para cada rendimiento; $LARA(cm)$, es la lámina de riego rápidamente aprovechable en metros y $Ar(cm^2)$, es el área superficial del recipiente donde se encuentra la planta.

Cada vez que se presentó una precipitación, se midió la cantidad de agua caída en el pluviómetro y se calculó la precipitación efectiva. Cuando la precipitación efectiva alcanzó valores iguales o superiores al doble de la LARA, el riego diario fue reanudado 3 días después (contando el día de la lluvia); cuando alcanzó valores menores al doble y superiores a la LARA, el riego se reanuda 2 días después, y, por último, cuando la precipitación efectiva no alcanza a satisfacer la LARA, esta fue satisfecha con riego.

La cantidad de agua calculada para cada riego fue aplicada mediante una probeta volumétrica de 250 ml, por lo tanto, se asumió una eficiencia en la aplicación de riego de 100%. Las plantas se regaron de manera que no se presentaran encharcamientos en los maceteros para impedir el crecimiento de hongos, por lo tanto, la cantidad de agua para riego se fraccionó en varias aplicaciones, separadas en promedio por un tiempo de 10 minutos.

Sin embargo, la lámina de riego estimada dejó de ser aplicada después de la sexta semana del trasplante teniendo en cuenta el coeficiente del tanque calculado, debido a que todas las plantas, incluso las de los tratamientos con exceso de agua (kc 115%), presentaron fuertes signos de déficit hídrico, por ello, se incrementó la lámina de agua un 15%, en otras palabras, se prescindió del coeficiente del tanque de 85% para el cálculo del riego.

El aumento de la lámina en un 15% se estipuló, de manera empírica, ya que, con este factor se observó que las plantas pertenecientes a los tratamientos sin déficit, kc 100 y kc 115, no presentaron signos de déficit, mientras que, los demás tratamientos si lo hicieron, cada uno en proporción al déficit correspondiente.

5.9 Prácticas culturales

Las labores culturales que preceden el establecimiento de un cultivo son de vital importancia para su óptimo crecimiento y, en el presente caso, tratar de garantizar la independencia de las variables de respuesta frente a condiciones externas. Durante la etapa de experimentación del presente estudio se llevaron a cabo varias prácticas que se presentan a continuación.

5.9.1 Trasplante

Las plántulas de ají Tabasco se trasplantaron en cada uno de los maceteros previamente demarcados con su tratamiento y repetición correspondiente, primero se realizó un hoyo en el suelo del macetero y, para el caso de los tratamientos con MA, se adicionaron 20 gramos del producto inoculante micorrízico en el hoyo, posteriormente se colocó una plántula en el centro de la cavidad para finalmente rellenarla con suelo, como se muestra en la Figura 13. Las 30 plántulas trasplantadas tenían la misma altura y cantidad de hojas, con el fin de garantizar la igualdad entre todas las unidades experimentales.



Figura 13. Trasplante a maceteros de las plántulas de ají tabasco, se realizó la operación con la ayuda de una espátula y se adiciono el producto inoculante, para los tratamientos correspondientes, con la ayuda de una cuchara.

5.9.2 Control de plagas y arvenses

Durante el estudio, se eliminaron de forma manual y frecuente todo tipo de arvenses a medida que se presentaban en el cultivo; su aparición en los maceteros disminuyó a medida que las plantas de ají Tabasco se desarrollaron. La eliminación se realizó con el fin de impedir que estas compitieran por agua, luz y nutrientes con las plantas de ají Tabasco y no representaran una variable que interfiriera en los resultados del estudio.

Durante todo el desarrollo del cultivo se realizó un manejo integrado de plagas, se utilizaron métodos químicos, biológicos y mecánicos con el fin de evitar y controlar la presencia de áfidos, aleuródidos, tisanópteros, noctuidos y curculiónidos, insectos que tuvieron mayor incidencia en el cultivo.

Eventualmente, se elaboraron 8 trampas amarillas a partir de tapas de baldes pintadas con aerosol amarillo, las cuales fueron rellenas de agua diariamente, estas trampas se ubicaron al lado de las plantas como se muestra en la Figura 14. Estas funcionaron atrayendo a los trips y moscas blancas que morían ahogadas en el agua. Las trampas mostraron alta eficacia en el control de estas plagas que aparecieron posterior del trasplántate y después de 4 semanas desaparecieron. Las trampas se dejaron en el lugar para prevenir futuras proliferaciones.



Figura 14. (De izquierda a derecha) Recipiente pintado de amarillo usado como trampa para plagas, trampas dispuestas en el lugar del estudio al lado de las plantas.

De igual manera, se aplicó semanalmente al cultivo mediante un atomizador, una solución concentrada del agente microbiano *Bacillus Thuringiensis*, producto de marca comercial Biotechn, con el fin de proteger las plantas de defoliadoras, minadores y perforadores, en especial, del gusano cornudo del tomate o manduca sexta, el cual fue el lepidóptero con más presencia en el cultivo. En la Figura 15 se muestran algunas orugas de esta especie que fueron extraídas de forma manual y el producto microbiano aplicado.



Figura 15. (De izquierda a derecha) gusano cornudo del tomate de 3 cm de longitud sobre un fruto de ají, especímenes de cornudo del tomate extraídos de forma manual del cultivo, producto comercial concentrado de *Bacillus Thuringiensis* usado en el cultivo y atomizador para su aplicación.

Del mismo modo, ocasionalmente se realizaron aplicaciones foliares de una solución con jabón potásico para el control de pulgones y trips. Adicionalmente, se realizaron liberaciones de coccinélidos (Mariquitas) y crisópidos (Crisopas) extraídas de zonas verdes aledañas, las cuales se alimentaron de los pulgones que no eran eliminados con la solución de jabón potásico. El control químico y biológico permitió mantener una población baja de pulgones. En la Figura 16 se muestran algunos especímenes de controladores biológicos presente en el cultivo y el producto químico de jabón potásico utilizado.



Figura 16. Especímenes de mariquitas presentes en el cultivo y producto comercial de jabón potásico, ambos utilizados para el control de plagas, se pesó 6 gramos de jabón potásico como se puede ver en la figura para cada aplicación junto con un litro de agua.

5.9.3 Manejo de arvenses

El control de arvenses se realizó cada vez que aparecieron en el cultivo, con mayor frecuencia en las primeras 8 semanas desde el trasplante, donde se presentó mayor crecimiento de arvenses por el bajo porcentaje de sombra de las plantas de ají Tabasco, el crecimiento de plantas no deseadas en los maceteros disminuyó después de la semana 8. Esta práctica se realizó con el fin de impedir que las arvenses no perturbaran el desarrollo de las plantas de ají Tabasco.

5.9.4 Cosecha

Durante la temporada de maduración de los frutos se realizaron 5 cosechas durante un mes, para recolectar la mayor parte de la producción del primer pico de producción del cultivo. Se recolectaron los frutos manualmente cada semana, iniciando el 21 de enero de 2021. Los frutos de cada planta fueron extraídos y depositados en bolsas plásticas marcadas con su respectivo tratamiento, como se presenta en la Figura 17, posteriormente cada bolsa fue pesada y se cuantificó la cantidad de frutos.

Al final del ciclo de cosecha, con la información recolectada se calculó, para cada unidad experimental, la cantidad de frutos cosechados, el rendimiento total en gramos y el peso promedio por fruto.



Figura 17. Frutos de cada unidad experimental cosechados en la primera jornada de cosecha.

5.10 Eficiencia en el uso del agua (EUA)

La EUA se calculó para cada tratamiento utilizando la Ecuación 1, relacionando los resultados de masa fresca de frutos en kg (rendimiento), y la cantidad de agua de riego aplicada, en m^3 , durante todo el ciclo para cada tratamiento.

5.11 Cálculo del ahorro en el uso del agua de riego y reducción en el rendimiento

El ahorro en el uso del agua de riego (AUA) y la reducción en el rendimiento planteado por Ismail (2010), se calculó usando la Ecuación 6 y la Ecuación 7 respectivamente, de esta manera se relacionaron los valores de cantidad de agua aplicada en m^3 y rendimiento, en kg, del cultivo del promedio del tratamiento control con los valores del promedio de los demás tratamientos. Se comparó la EUA de los tratamientos que no obtuvieron diferencias altamente significativas entre si en búsqueda de posibles ahorros en el uso del agua para riego.

$$\text{Reduccion en rendimiento} = 100 - \left(\frac{\text{Rendimiento en Tratamiento } X}{\text{Rendimiento en T1MA}} * 100 \right)$$

Ecuación 6

$$\text{Ahorro de agua} = 100 - \left(\frac{\text{Agua aplicada en Tratamiento } X}{\text{Agua aplicada en T1MA}} * 100 \right)$$

Ecuación 7

5.12 Análisis estadístico

Finalmente, se realizó la verificación de la normalidad y la homogeneidad de varianzas de los datos, posteriormente, se realizó un análisis de varianza ANOVA y un análisis POSTANOVA (test de Tukey) con un nivel de confianza del 95%, mediante el software SPSS Statistics, entre los tratamientos, para establecer si existen diferencias significativas en la EUA y para las variables agronómicas evaluadas.



6 Resultados y discusión

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el desarrollo del experimento de las propiedades del suelo, las variables agronómicas de las plantas, la cantidad de agua de riego aplicada y su pertinente discusión.

6.1 Propiedades del suelo

En la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos de la caracterización del suelo usado en el estudio, las propiedades químicas y la granulometría obtenidos mediante los servicios prestados del Laboratorio Nacional de Suelos del IGAC y las características CC, PMP y Da obtenidos a través de la metodología planteada por Cenicaña (Cruz Valderrama, 2014).

El suelo presentó al final del estudio una concentración media de potasio y baja de fósforo. Además, una relación alta de $(Ca+Mg)/K$ de 81.3, lo cual indica una amplia diferencia con el contenido de K y una deficiencia de este en el suelo. Por otra parte, el suelo presentó un pH medianamente ácido de 6.46 y una capacidad de intercambio catiónico alta, debido al elevado contenido de arcillas.

Las propiedades físicas del suelo tales como, CC, PMP y Da, presentadas (Tabla 2), fueron comparadas con las expuestas por Camayo Fernández, (2015), en su investigación, la cual consistió en caracterizar físicamente el suelo del LASA, suelo usado en el presente estudio. La comparación dio como resultado una gran similitud entre las propiedades evaluadas, ya que, los valores resultantes estuvieron dentro de los rangos obtenidos en el 2015. Estos rangos son, para CC, PMP y Da, 34%-49%, 12%-17%, 1.13 g/cm³-1.4 g/cm³, respectivamente, para el suelo entre 0 y 10 cm de profundidad.

Tabla 2 Resultados de las propiedades químicas finales y físicas del suelo usado en el estudio.

	Variables	unidad	Resultado		Variables	unidad	Resultado
Propiedades químicas	Fósforo disponible	mg/kg	7,19	Propiedades físicas	Arcilla	%	44
	Calcio	cmol/kg	18,72		Arena	%	33,6
	Magnesio	cmol/kg	3,23		Limo	%	22,4
	Potasio	cmol/kg	0,27		Clase textural		Ar
	Sodio	cmol/kg	0,08		CC	%	36
	pH	1:01	6,46		PMP	%	14
	CIC	cmol/kg	24,107		Da	g/cm3	1,22
	CICE	cmol/kg	22,3				
	Saturación de bases	%	92,5				
	Nitrógeno total	%	0,22				
	Carbono orgánico	%	1,8982				

6.2 Riego

La cantidad total de agua aplicada al cultivo mediante riego fue de 586 mm, con una evapotranspiración total de 738 mm y una precipitación efectiva de 424 mm. En la Figura 18 se presenta de manera acumulada, la cantidad de agua aplicada en milímetros para cada



uno de los regímenes de riego en contraste con las etapas iniciales de floración y cosecha. Las líneas de la gráfica presentan un crecimiento constante interrumpido por zonas planas, que representan la precipitación, y son periodos donde no se aplicó riego.

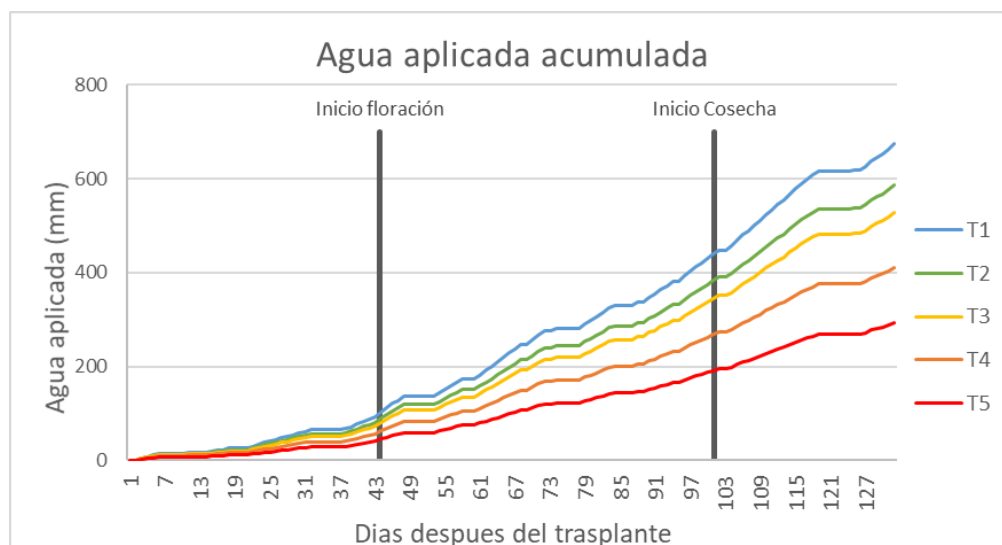


Figura 18. Agua aplicada acumulada en milímetros durante todo el experimento para cada uno de los 5 regímenes de riego. T1=kc 115%, T2=kc 100%, T3=kc 90%, T4=kc 70% y T5=kc 50%

La decisión de prescindir del coeficiente del tanque se tomó ante el evidente y fuerte déficit hídrico que presentaron todas las unidades experimentales, incluso las que comprendían un régimen de exceso. Probablemente, los signos graves de déficit se presentaron debido a las altas temperaturas que se presentaron en el lugar por ser una zona urbana, con poca vegetación alrededor y por el color oscuro de los maceteros, factores que aumentaron la temperatura y, junto con el viento fuerte, por ser un lugar alto (terrace), propiciaron la evapotranspiración.

6.3 Evaluación de la inoculación micorrízica

En la Tabla 3 se presentan los resultados obtenidos de la prueba biológica. El porcentaje de eficiencia en la colonización representa el éxito de la simbiosis micorrízica y el porcentaje de raíz micorrizadas evidencia la proporción de raíz infectada. El tratamiento T4+MA presenta el mayor porcentaje de colonización, 22%, y eficiencia en la colonización, 28%, junto con el tratamiento T1+MA con un porcentaje de eficiencia en la colonización de 24%.

Aunque el suelo usado en el estudio no presenta limitantes para el desarrollo de HMA, la eficacia y el porcentaje de colonización fueron bajos para los tratamientos inoculados comparados con resultados obtenidos en otros estudios similares, donde estos porcentajes superan el 60%, hasta el 95% (Fracasso et al., 2020; Ombódi et al., 2019).

Probablemente, el bajo nivel de micorrización en la raíz se deba a que la cantidad de inóculo aplicado en el trasplante fue insuficiente o el producto comercial empleado fue de baja calidad. También, es posible que el tiempo transcurrido hasta el análisis de laboratorio o medidas inadecuadas de conservación del material biológico facilitaran la descomposición



de la muestra biológica (Gelvez, 2018; Narvaez & Navarrete, 2014). De igual forma, es probable que las cepas de HMA usadas no presentaran alta afinidad con las plantas de ají Tabasco (Barrera Berdugo, 2009).

Tabla 3. Porcentaje de raíz micorrizadas y eficiencia en la colonización de cada tratamiento inoculado.

Tratamiento	% Eficiencia en la Colonización	% Raíz micorrizada
T1+MA	24,00	2,00
T2+MA	11,00	1,00
T3+MA	12,00	2,00
T4+MA	28,00	22,00
T5+MA	11,00	2,00

6.4 Efecto de la aplicación de HMA en las variables agronómicas del ají tabasco

A continuación, se presentan los resultados estadísticos de las variables agronómicas de respuesta medidas en el cultivo y su respectiva discusión. En síntesis, las plantas de ají tabasco inoculadas con HMA mostraron diferencias estadísticas significativas en las variables rendimiento total, número de frutos y peso promedio de fruto, mientras que en las variables altura, grosor del tallo, número de ramas y número de flores no se presentaron diferencias significativas entre tratamientos.

6.4.1 Disminución en el rendimiento total

El tratamiento con exceso de riego, T1, obtuvo un mayor rendimiento en comparación con el tratamiento con riego adecuado, T2, mientras que, en los tratamientos con riego deficitario, T3, T4 y T5, se observó una disminución en el rendimiento a medida que el déficit incrementaba. En la Tabla 4 se muestran en porcentaje la reducción en el rendimiento, comparada con el tratamiento de riego normal o tratamiento control T2-MA. El mayor porcentaje en la disminución del rendimiento lo presentó el tratamiento T5-MA con un 28% y el mayor aumento lo presentó el tratamiento T1-MA con un 7,8%.

Tabla 4. Reducción del rendimiento en comparación con el tratamiento control T2-MA.

Tratamiento	Rendimiento (g)	Reducción en rendimiento (%)
T1-MA	126,9	7,8
T1+MA	125,4	6,5
T2-MA	117,8	0,0
T2+MA	117,2	-0,5
T3-MA	107,0	-9,2
T3+MA	105,6	-10,3
T4-MA	97,9	-16,9
T4+MA	102,9	-12,6
T5-MA	84,7	-28,0
T5+MA	93,7	-20,4



Estadísticamente se presentaron diferencias significativas entre el régimen de riego T5 y T1, sin embargo, no se presentaron diferencias entre el T5+MA y el T2+MA, lo que puede sugerir que la aplicación de HMA influyó en la mitigación de la reducción del rendimiento por estrés hídrico. Así mismo, el T4+MA no presentó diferencias con el T1+MA, este último presentó un aumento del rendimiento total, de igual forma, presuntamente la aplicación de HMA mitigó el daño al rendimiento total en las plantas con mayor estrés hídrico T4 y T5 ($p < 0.05$).

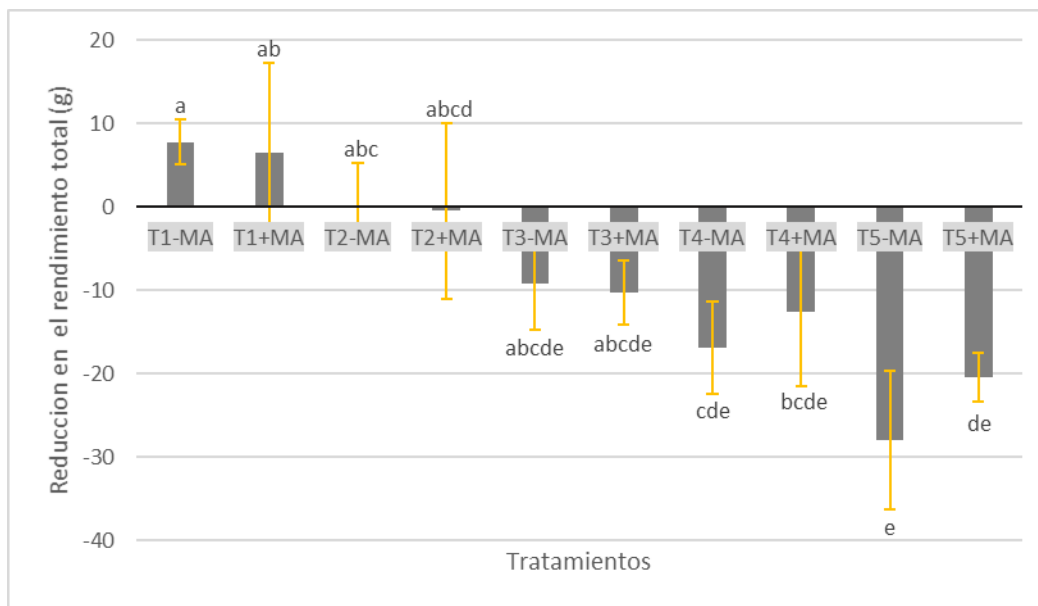


Figura 19 Reducción del rendimiento total en gramos para cada uno de los 10 tratamientos evaluados comparados con el tratamiento control T2-MA. Números negativos representan aumento y negativos reducción Letras distintas sobre las barras indican diferencias estadísticas según la prueba Tukey ($p < 0.01$).

Probablemente la aplicación de HMA mitigó la reducción del rendimiento en los tratamientos con mayor estrés hídrico T4+MA y T5+MA, los cuales presentaron respectivamente 4.2% y 7.6% más rendimiento que los tratamientos equivalentes sin HMA. Lo que evidencia unos de los beneficios estudiados de la simbiosis MA, la cual propone que a medida que incrementa el déficit hídrico, los HMA empiezan a tener un papel cada vez más fuerte en la toma de agua y nutrientes para la planta (Augé et al., 2014). No obstante, este aumento en el rendimiento fue bastante bajo en comparación con otros estudios (Bakr et al., 2017; Bowles et al., 2016; Michalis et al., 2013; Wahb-Allah et al., 2014).

La reducción en el rendimiento fue mucho menos de lo esperado, en comparación con resultados obtenidos por Ismail (2010), donde una reducción del 15% en la lámina de agua genera disminuciones cercanas al 30%. Sin embargo, la reducción en el rendimiento de los tratamientos con déficit hídrico fue más bajo debido al aporte de agua por precipitación.

Como se muestra en la Figura 20, se observó con mayor frecuencia y gravedad signos de déficit hídricos en plantas con igual régimen de riego, pero sin HMA, lo que puede sugerir un papel fundamental de la obtención de agua, ya sea por su disponibilidad por cambios



realizados por los HMA en las condiciones del suelo o bien, por una extracción directa de agua por los micélos de los hongos como lo presenta la bibliografía (Smith & Read, 2002).



Figura 20. Plantas con un mismo régimen de riego T4, donde la planta sin HMA muestra signos de estrés hídrico, como hojas decaídas y amarillentas, mientras la planta con HMA no muestra signos de estrés hídrico.

6.4.2 Rendimiento total, peso del fruto y cantidad de frutos

El rendimiento total en gramos recolectado durante la labor de cosecha osciló entre 126.9 y 84.7 gramos, para el tratamiento T1-MA y T5-MA, respectivamente. Los tratamientos con riego normal, T2-MA y T2+MA, obtuvieron rendimientos similares, de aproximadamente 117 gramos. Los tratamientos con riego igual al 50% del Kc, T5+MA y T5-MA, obtuvieron los menores promedios en rendimiento, respectivamente de 93,6 y 84,7 gramos. En total, el rendimiento fue de 3255,8 gramos. Sin embargo, en promedio el rendimiento es relativamente bajo en contraste con un cultivo comercial en campo el cual ronda los 600 gramos por planta para el ciclo estudiado.

Los resultados obtenidos en rendimiento, son altos en comparación con los resultados obtenidos por Ospina Salazar et al. (2018) y Pardey Rodríguez et al. (2009), ambos con una media de rendimiento de 78 gramos aproximadamente. Sin embargo, se debe tener en cuenta que no se realizó ningún tipo de fertilización al cultivo, por lo que los resultados pueden llegar a ser inferiores a los de un cultivo comercial.

En general, no se presentaron variaciones fuertes del rendimiento entre tratamientos con HMA y sin estos. El T4+MA y T5+MA, obtuvieron un aumento del rendimiento solo del 4.5 y 9.5% respectivamente en comparación con los tratamientos sin HMA, lo que concuerda con estudios similares, donde se evidencia una relación positiva entre el rendimiento de plantas inoculadas con HMA a medida que el déficit hídrico y nutricional aumentan (Augé et al., 2014; Bakr et al., 2017).

Además, estadísticamente no se presentaron diferencias significativas ($p < 0.01$) entre tratamientos bajo un mismo régimen de riego, como se muestra en la Figura 21. Posiblemente, esto se deba a que la precipitación otorgó una cantidad extra de agua que



mitigó los efectos del déficit en los tratamientos correspondientes y mitigó de igual forma, la dependencia de la planta a la simbiosis micorrícica, generando que esta no tuviera un papel fundamental en la nutrición de la planta. Sin embargo, no debe descartarse la posibilidad de que la dispersión de datos afecte la interpretación de los resultados.

El análisis estadístico no mostró diferencias altamente significativas ($p>0.01$) para los tratamientos T2 y el T5+MA, aunque estos difieren en cantidad de agua aplicada en un 50%, lo que puede sugerir que la aplicación de HMA pudo mantener la producción sin que esta se redujera significativamente a pesar del déficit hídrico, como se muestra en la Figura 1. Por otra parte, no se presentaron diferencias altamente significativas para los tratamientos T1, T2, T3 y T4.

Independientemente de la aplicación de HMA, se puede suponer que la cantidad de agua agregada en el régimen de riego T1 (115% kc), es ineficiente en las plantas de ají Tabasco, pues el aumento del 15% de agua de riego no presenta una diferencia estadística significativa con el rendimiento del régimen T2 (100% kc), y este a su vez, no presentó diferencia con el régimen T3, lo que supone una posible reducción al 90% del kc sin afectar significativamente el rendimiento del cultivo.

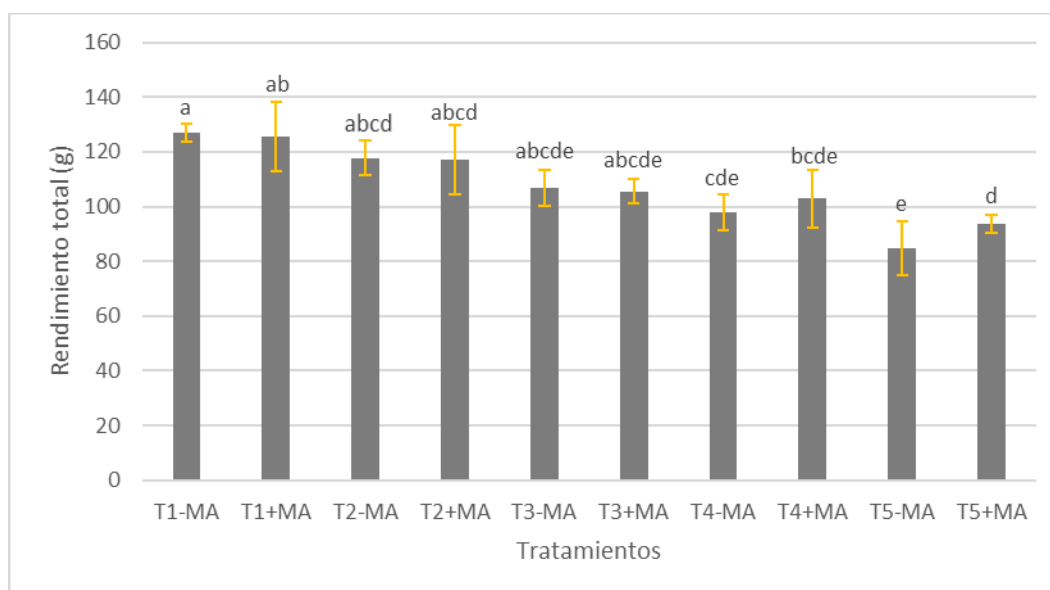


Figura 21. Rendimiento total promedio en gramos para cada uno de los 10 tratamientos evaluados. Letras distintas sobre las barras indican diferencias estadísticas según la prueba Tukey ($p<0.01$).

El número de frutos cosechados fue de 4487 aproximadamente, los valores más bajos los presentaron los T5 sin HMA, con 124 frutos en promedio. Los valores más altos se obtuvieron de los T1, con aproximadamente 170 frutos en promedio, tanto para tratamientos con HMA y sin ellos, siendo T1+M1 el que obtuvo mayor número de frutos con 184 en total. Resultados menores fueron obtenidos por (Ospina-Salazar et al., 2018; Pardey Rodríguez et al., 2009) y similares en comparación con (Palacios Castro & García Dávila, 2008).



El análisis estadístico arrojó que no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre número de frutos de plantas con igual régimen de riego ($p>0.05$), lo que supone que el número de frutos no tuvo afectaciones por la inoculación con HMA. Sin embargo, si existen diferencias entre tratamientos con diferente régimen, sobre todo en los regímenes más dispares T1, T2 en comparación con los T5, evidentemente valores menores corresponden a déficits más pronunciados.

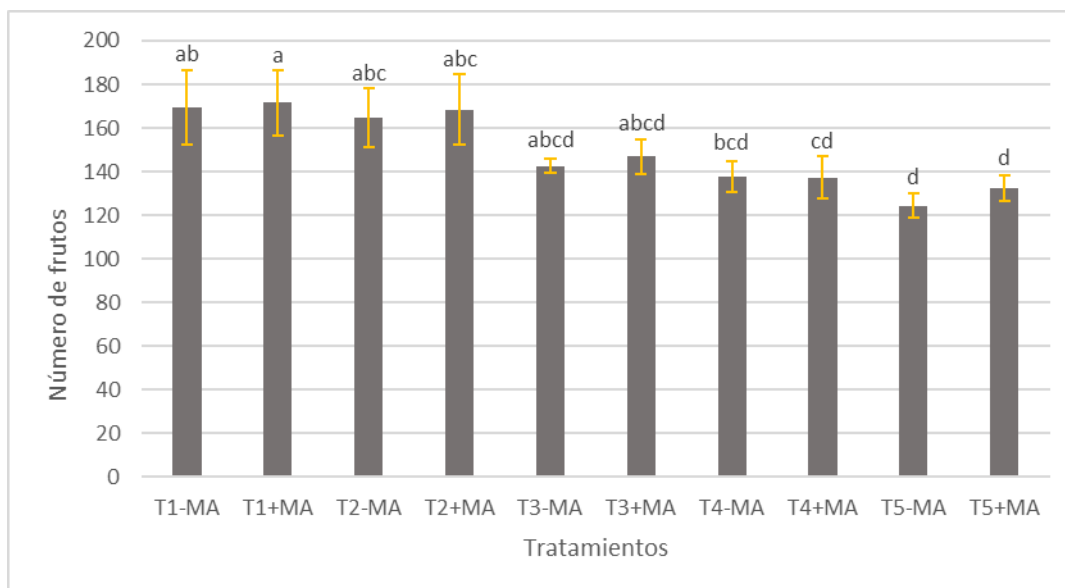


Figura 22. Promedio de número total de frutos cosechados para cada uno de los 10 tratamientos evaluados. Letras iguales sobre las barras indican que son estadísticamente iguales (Tukey $p<0.05$).

Los valores obtenidos de peso por fruto fluctuaron entre 0,85 y 0,62 gramos. Estadísticamente no se presentaron diferencias significativas para el peso del fruto por efecto de los tratamientos, como se muestra en la Figura 23, ($p>0.05$). De igual forma, no se evidencia influencia alguna de la aplicación de HMA. En comparación con resultados obtenidos en otros estudios (Pardey Rodríguez et al., 2009), los valores para peso promedio de fruto fueron bajos.

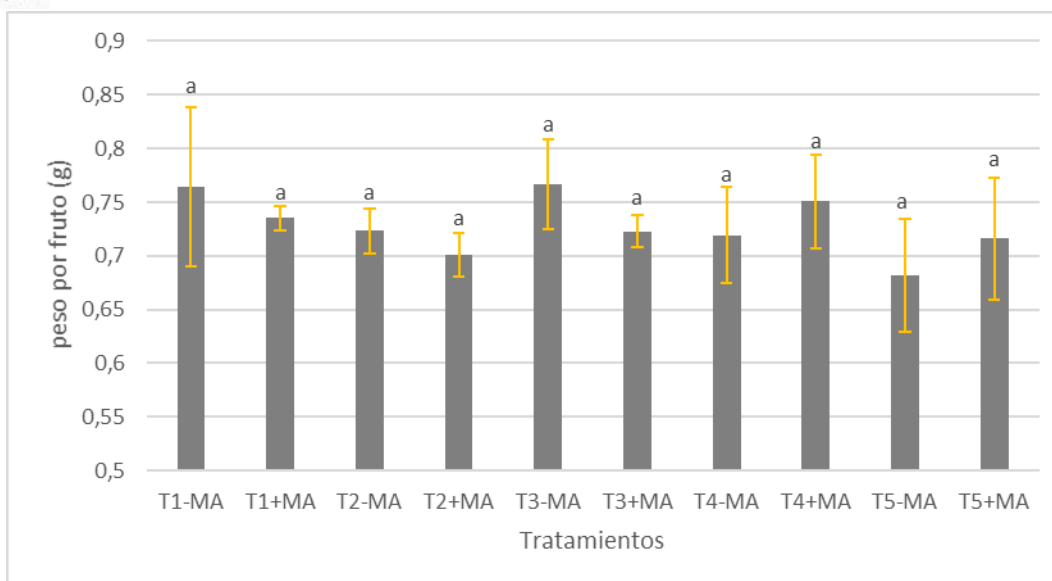


Figura 23. Peso promedio por fruto para cada uno de los 10 tratamientos evaluados. Letras iguales sobre las barras indican que son estadísticamente iguales (Tukey $p < 0.05$).

Los bajos valores en el peso por fruto y, de manera general, en el rendimiento del cultivo, posiblemente se deban a los bajos niveles de K^+ que contiene el suelo utilizado en el estudio, puesto que, según Adams (1994), existe una correlación positiva entre el peso por fruto y el contenido de K en el suelo, lo que pudo inferir en la presencia de frutos pequeños como se observa en la Figura 24. De igual forma, la deficiencia en nutrientes como P y N, son precursores del aborto de frutos y flores (Zelia et al., 2017), fenómeno que ocurrió con frecuencia en el cultivo. Estos síntomas de déficit nutricional son incrementados por el déficit hídrico afectando la relación fuente/sumidero, la cual propone que plantas con poca biomasa no son capaces de soportar rendimientos altos, lo que induce estancamiento en el crecimiento, frutos pequeños, maduración precoz y aborto de flores y frutos (Roberta et al., 2004).

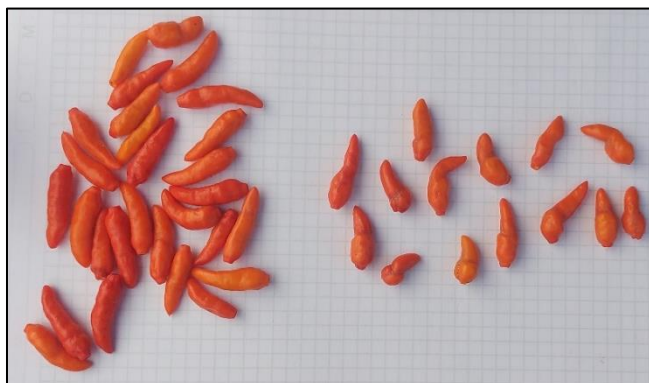


Figura 24. Frutos de ají pequeños y deformados (derecha) en comparación con frutos normales (izquierda)



De igual forma, las variables agronómicas de producción se pudieron ver afectadas por factores externos abióticos, como la incidencia de plagas y enfermedades que redujeron la biomasa aérea como se muestra en la Figura 25, ya que, los resultados tienden a ser ambiguos comparados con (Al-Karaki, 2017; Bowles et al., 2016; Mena-Violante et al., 2006; Ombódi et al., 2019), donde se plantea que la inoculación con HMA beneficia el crecimiento de biomasa en la planta, que, a su vez, permite a la planta mantener un mayor número de frutos con un mayor peso por unidad.



Figura 25. Rama sin hojas producto de insectos defoliadores y hojas caídas por efecto de hongos.

El análisis estadístico de los datos demostró que la aplicación de HMA tuvo un efecto significativo en el rendimiento de los tratamientos con mayor déficit hídrico T5. De esta manera, se puede suponer que la aplicación de HMA en plantas de ají Tabasco bajo condiciones de déficit pronunciado aumenta el rendimiento, presentando un mayor peso y cantidad de frutos, en comparación con plantas sin HMA, como lo plantea (Augé, 2001; Augé et al., 2014; Smith & Read, 2002). Sin embargo, no se presentaron resultados relevantes que respalden la hipótesis de que plantas inoculadas con HMA incrementan su rendimiento y vigorosidad en cualquier régimen de riego, en comparación con resultados de estudios similares (Davies Jr. et al., 2002; Bowles et al., 2016; Krishna et al., 2018; Ombódi et al., 2019).

Posiblemente, la no presencia de resultados relevantes que probaran la hipótesis de que la aplicación de HMA aumentara la capacidad de la planta de obtener agua y nutrientes del suelo, se deba a factores como la poca colonización micorrízica, debido probablemente, a la no aplicación de fertilizantes orgánicos y materia orgánica, ya que, se ha demostrado que contribuyen a un aumento en la estabilidad de la simbiosis MA (Serralde & Ramírez, 2004). De igual forma, varios estudios ratifican el aumento del rendimiento en el cultivo de ají al combinar fertilizantes con HMA en comparación con solo la aplicación de HMA, suponiendo que la aplicación de HMA y la fertilización química se complementan (Rodríguez Araujo et al., 2010).

Por otro lado, según Rodríguez Yon et al.(2016), aunque la simbiosis MA no es considerada específica, puesto que, cualquier HMA puede relacionarse con cualquier planta, ciertas especies de hongos bajo ciertas condiciones edafoclimáticas pueden beneficiar en mayor medida a unas plantas que a otras. De esta manera, podemos suponer, que es posible que



las cepas usadas no mostraron una alta compatibilidad con las plantas de ají Tabasco bajo las condiciones edafoclimaticas del estudio.

6.4.3 Altura de la planta, grosor del tallo y número de flores

La altura de las plantas varió entre 48 y 40 cm, para los tratamientos T1-MA y T5-MA, respectivamente. Estadísticamente, solo se presentaron diferencias entre los mencionados tratamientos ($p < 0.05$). Además, independientemente de la aplicación de HMA no se presentaron diferencias estadísticas entre los tratamientos ($p < 0.05$). Estadísticamente los resultados no demuestran que la aplicación de HMA beneficiaran el crecimiento vertical de las plantas inoculadas. Sin embargo, la aplicación de HMA en los tratamientos con déficit hídrico presenta una tendencia a incrementar la altura de la planta.

Probablemente el incremento de la altura de las plantas con HMA se deba a una mayor nutrición debido al incremento en la absorción de agua y nutrientes por medio de los micélos de los hongos, como lo presenta la teoría al respecto (Gianinazzi et al., 2010). Además, el aumento de la biomasa debido a la mejor nutrición de plantas inoculadas en situaciones de estrés hídrico es proporcional al aumento de fotoasimilados y el incremento de la altura (Krishna et al., 2018).

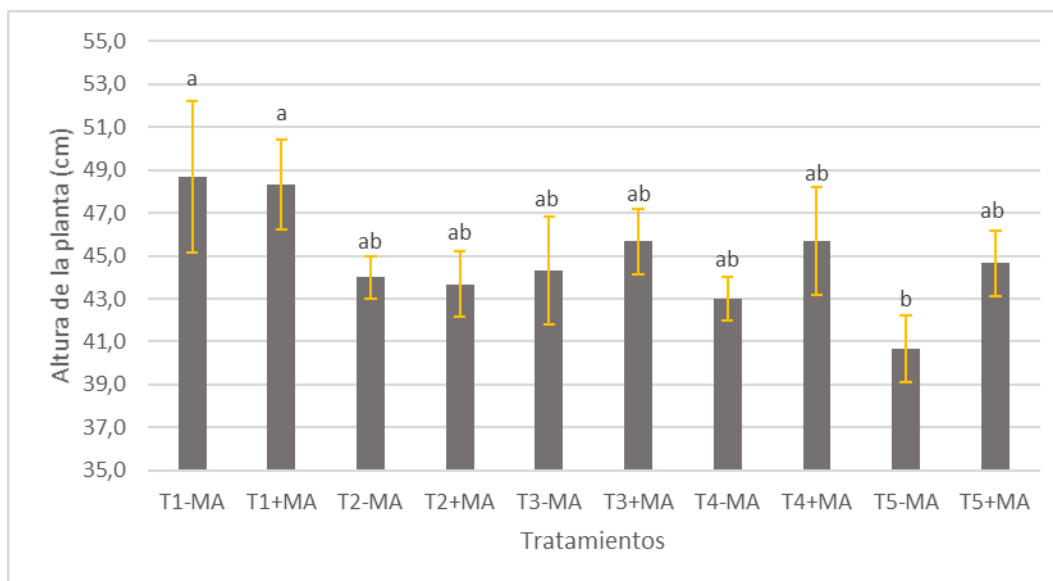


Figura 26. Altura promedio para cada uno de los 10 tratamientos evaluados. Letras iguales sobre las barras indican que son estadísticamente iguales (Tukey $p < 0.05$).

Se presentaron valores que oscilaron entre 1.13 y 1.35 centímetros para el grosor del tallo de las plantas, respectivamente, el mayor valor lo presentó el T1-MA y el menor el T3-MA. Estadísticamente, no se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos ($p < 0.05$). El tallo de las plantas en el experimento se caracterizó por su predominante grosor y por la corta distancia entre nudos.

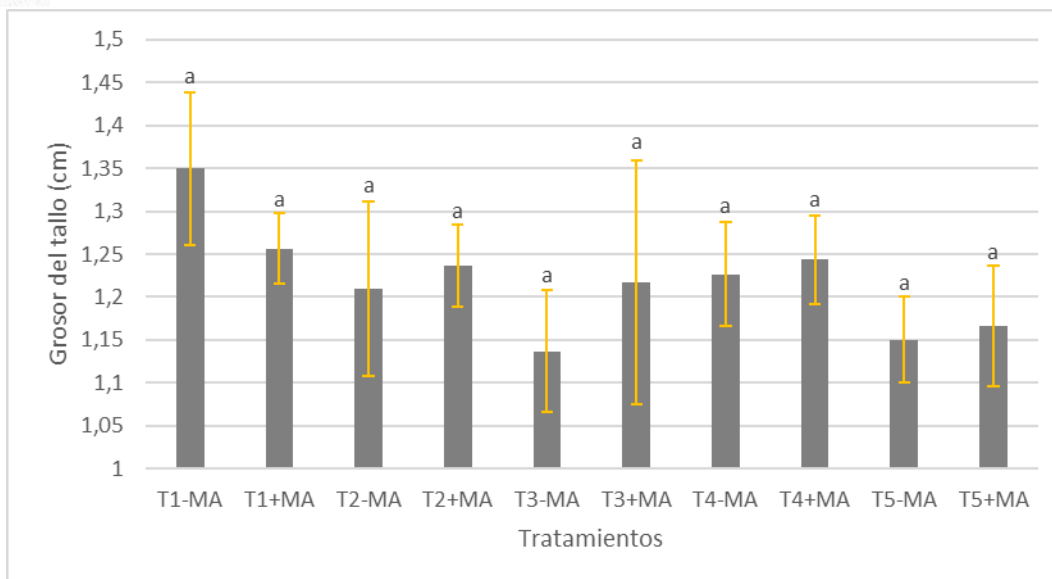


Figura 27. Grosor del tallo promedio para cada uno de los 10 tratamientos evaluados. Letras iguales sobre las barras indican que son estadísticamente iguales (Tukey $p < 0.05$).

A diferencia de otros estudios (Rodríguez Yon et al., 2016), en el presente no se obtuvieron resultados que demostraran la influencia de la probable mejora de la absorción de nutrientes por la colonización MA que se ven reflejados en la altura de la planta y el grosor del tallo. Sin embargo, puede ser consecuencia del fuerte viento, además de los argumentos planteados anteriormente.

Se ha demostrado que el viento puede afectar el crecimiento de las plantas, haciendo que los tallos sean más cortos, gruesos y fuertes con el fin de evitar volcamientos, además, la distancia entre nudos se acorta (Smith & Ennos, 2003). Durante el estudio, se presentaron fuertes corrientes de viento durante el ocaso. Lo que provocó la inclinación y el engrosamiento de los tallos de las plantas, como se muestra en la Figura 28, lo que evitó su óptimo desarrollo, difuminando, además, los posibles efectos de la aplicación de HMA.



Figura 28. Distancia corta entre nudos, engrosamiento e inclinación del tallo producto del viento.



El promedio para el número acumulado de flores en cada tratamiento fluctuó entre los valores 56 y 74, para los T3-MA y T1-MA, respectivamente. El análisis estadístico mostró que no se presentaron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos ($p < 0.05$). Los valores obtenidos son bastante similares entre sí, posiblemente se deba a que la metodología empleada para contar las flores no fue la más indicada, puesto que, se contaron flores totalmente abiertas de forma semanal. Autores plantean el conteo de pedúnculos como una forma más representativa a la hora de enumerar las florescencias, pues en el ají Tabasco, estas tienen un periodo en promedio de 3 días (Martínez et al., 1989).

Aunque la aplicación de HMA está relacionada con la presencia de más flores, el aumento del rendimiento, o en algunos casos con la disminución de la tasa de abortos de flores (Di Cesare et al., 2012), los datos obtenidos no lo demuestran, y no tienden a relacionarse en proporción con la cantidad de frutos y el rendimiento. Probablemente, este comportamiento se deba meramente a la gran dependencia de la efectividad de la micorrización en la especificidad de la relación de los HMA aplicados y las plantas de ají, más que a factores ambientales.

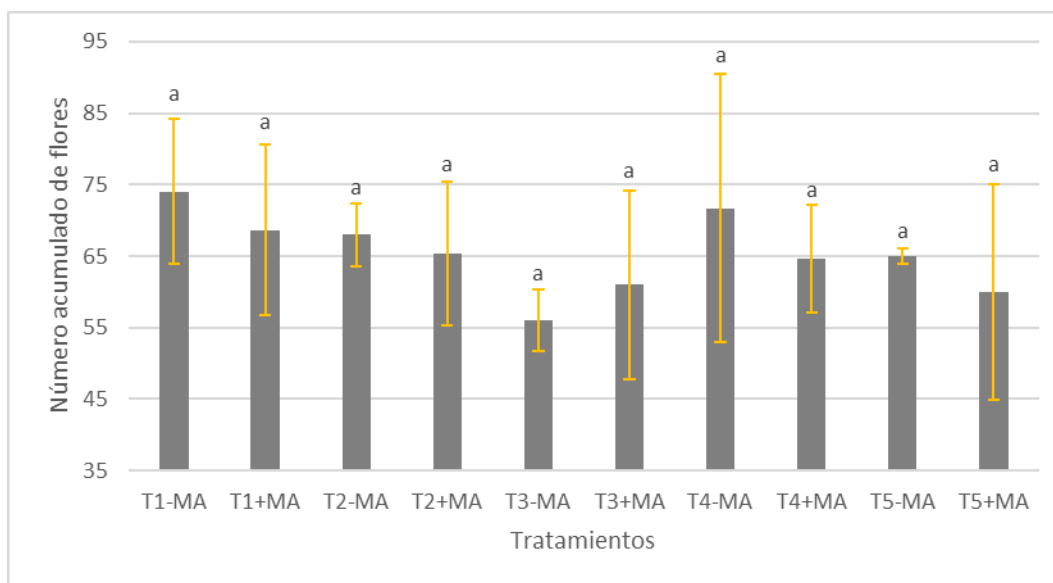


Figura 29. Número acumulado de flores promedio para cada uno de los 10 tratamientos evaluados. Letras iguales sobre las barras indican que son estadísticamente iguales (Tukey $p < 0.05$).

6.5 Eficiencia en el uso del agua (EUA) y ahorro en el uso del agua de riego

En la EUA del cultivo se obtuvieron valores para cada tratamiento entre 2.6 y 4.5 kg por metro cúbico de agua aplicada. Los valores más bajos los obtuvieron los regímenes de riego en exceso, mientras que los más altos se presentaron en los regímenes con mayor déficit, se observó, además, un comportamiento de la EUA estable alrededor de los 2.8 kg/m³ en los T1, T2 y T3, como se presenta en la Tabla 5. En el régimen de riego T5 se presentó la mayor diferencia entre EUA, el T5+MA obtuvo 11% más EUA que el T5-MA, mientras que los demás regímenes de riego obtuvieron valores de EUA similares entre sí.



Tabla 5. Promedio de la eficiencia en el uso del agua (EUA) en kg/m^3 y cantidad de agua aplicada en litros para cada tratamiento.

Tratamiento	Cantidad de agua aplicada (l)	EUA (kg/m^3)
T1-MA	48	2,6
T1+MA	48	2,6
T2-MA	41	2,9
T2+MA	41	2,9
T3-MA	37	2,9
T3+MA	37	2,9
T4-MA	29	3,4
T4+MA	29	3,5
T5-MA	21	4,0
T5+MA	21	4,5

Estadísticamente no se presentaron diferencias significativas entre tratamientos con y sin HMA bajo mismo régimen de riego como se muestra en la Figura 30 ($p < 0.05$). Pero, se presentaron diferencias entre los regímenes con mayor déficit T4 y T5, respecto a T1, T2 y T3, evidenciando una tendencia creciente a medida que aumentó el déficit. Además, se presentó una homogeneidad en los regímenes T1, T2 y T3, lo que puede suponer que la cantidad de agua aplicada en estos tratamientos no influyó de manera significativa en la EUA y el rendimiento total, al igual que la aplicación de HMA.

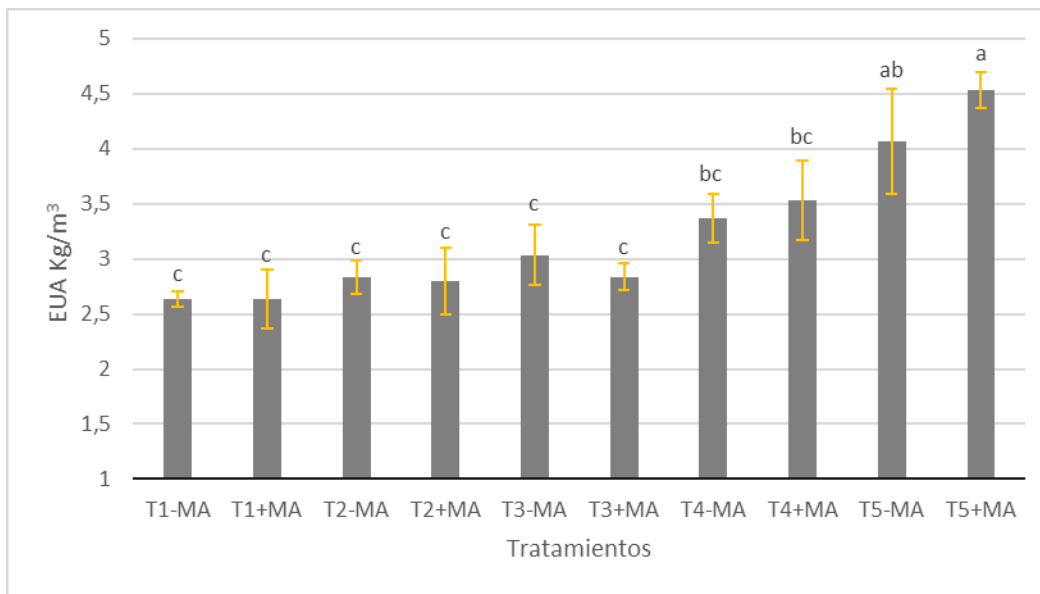


Figura 30. EUA en kg/m^3 para cada uno de los 10 tratamientos evaluados. Letras iguales sobre las barras indican que son estadísticamente iguales (Tukey $p < 0.05$).

La EUA en el presente estudio está ligada a la interpretación junto con el rendimiento total y la cantidad de agua aplicada, puesto que, aunque la EUA presentó un aumento en los



regímenes con mayor déficit, sería inadecuado compararlo con otro régimen de riego, sin que existiese alguna otra relación, como el análisis estadístico del rendimiento.

Por lo anterior, al comparar la EUA de los tratamientos T2-MA y T5+MA que no presentan diferencias altamente significativas entre su rendimiento ($p < 0.01$), se puede afirmar que, aunque el T5+MA tuvo un déficit en el régimen del riego 50% menor, este no presentó diferencias estadísticas relevantes en el rendimiento final de la cosecha, probablemente por la aplicación de HMA, lo que supone un aumento en la EUA de un 35% aproximadamente. Resultados menores, de alrededor del 25% obtuvieron Bowles et al. (2016), Michalis et al. (2013) y Tuzel et al. (2015); probablemente esta diferencia se deba, a que el aporte de agua por precipitación fue significativo, disminuyendo el efecto del déficit.

De igual forma, se puede deducir al implementar la Ecuación 7, que la aplicación de HMA permitió ahorrar un 48% de agua de riego en el T5+MA respecto al T2-MA logrando mantener rendimientos similares con la aplicación de HMA. Resultados menores han obtenido otros autores (Wahb-Allah et al., 2014), es probable que el aporte de agua de la precipitación haya generado un aumento en el rendimiento en los tratamientos con déficit, por lo que el AUA real, del agua total aprovechada por la planta, puede llegar a ser inferior a los resultados obtenidos o similares a la bibliografía.

De manera general, no se presentaron resultados que confirmaran que la aplicación de HMA, siempre y cuando se hubiese presentado una adecuada simbiosis, potenciaran de manera relevante el rendimiento, la EUA y el AUA, como si se presenta en la bibliografía. Sin embargo, el tratamiento con mayor déficit y aplicación de HMA presentó comportamientos similares a la literatura, aumentando la EUA, el rendimiento y el AUA, concordando de igual manera con la hipótesis de que las condiciones de estrés potencian la simbiosis e incrementan sus beneficios a la planta (Augé et al., 2014).

No obstante, es probable que los resultados de la aplicación de HMA puedan evidenciarse de mejor manera a largo plazo, ya que, en el presente estudio solo se evaluó el primer pico de la cosecha del ají Tabasco, como se muestra en la Figura 31, algunas plantas inoculadas con HMA en comparación con las no inoculadas, presentaron al final del experimento más flores y frutos en desarrollo.



Figura 31. Plantas para el régimen de riego T5, tratamientos con HMA en la parte de arriba y sin estos en la parte de abajo, se puede observar que la cantidad de frutos en las plantas con HMA dos semanas después de terminado el experimento es mayor que las plantas sin HMA.



7 Conclusiones

La aplicación de HMA aumentó la EUA en plantas de ají Tabasco sometidas a déficit hídrico, en el régimen de riego T5 (50% kc), el tratamiento con HMA (T5+MA) presentó un aumento del 11.1% en la EUA, mientras que en el régimen T4 (70% kc) el tratamiento T4+MA, presentó un aumento del 2.8%. En los demás regímenes no se presentaron diferencias entre tratamientos con y sin HMA.

la aplicación de HMA aumentó el rendimiento en un 7.2 y 4.6%, en los tratamientos T5+MA y T4+MA respectivamente, en comparación con los tratamientos del mismo régimen a los cuales no se les aplicó el producto comercial con HMA.

No se presentaron resultados relevantes que indicaran que la aplicación de las cepas de HMA usadas en el estudio beneficiaran de manera significativa el peso del fruto, número de frutos, número de flores, la altura y el grosor del tallo de plantas de ají Tabasco cultivadas a cielo abierto en maceteros.

El tratamiento T5+MA con HMA y el tratamiento control T2-MA sin HMA no obtuvieron diferencias fuertemente significativas estadísticamente entre sí ($p < 0.01$), a pesar de que el primero presentó un déficit de riego de 50% respecto al otro, lo que supone un posible AUA del 50%, teniendo en cuenta que el agua aprovechada por precipitación influyó atenuando el déficit hídrico.



8 Recomendaciones

Sin duda, se recomienda combinar la aplicación de fertilización química y HMA puede representar un mayor beneficio para los cultivos, siempre y cuando no se exceda el contenido de fósforo en el suelo, por lo que es importante en estudios futuros, implementar ambas enmiendas con el fin de potenciar la posibilidad de aumentar la EUA.

Es importante en investigaciones futuras identificar y promover el crecimiento de HMA nativos que se encuentren adaptados a las características edafoclimáticas del entorno, de esta manera se reduce el riesgo de aplicar HMA que no se adapten a dichas condiciones y sus beneficios al cultivo se vean mermados. De igual forma, es fundamental identificar cierto tipo de especies o cepas que presenten más afinidad con el cultivo de interés.

Es indispensable en futuras investigaciones evaluar todo el ciclo productivo de las plantas de ají Tabasco bajo la aplicación de los HMA en complemento con la fertilización química, ya que, bajo ciertas condiciones las plantas pueden evidenciar los beneficios de la simbiosis en una escala de tiempo más amplia.



9 Referencias

- Abdel Latef, A. A. H., & Chaoxing, H. (2014). Does Inoculation with *Glomus mosseae* Improve Salt Tolerance in Pepper Plants? *Journal of Plant Growth Regulation*, 33(3), 644–653. <https://doi.org/10.1007/s00344-014-9414-4>
- Adams, L. A. (1994). Dinámica del potasio en suelos agrícolas. *Agrociencia*, 36(11 – 21).
- Al-Amri, S. M. (2019). Mitigation of salinity stress of pepper (*Capsicum annuum* L.) by arbuscular mycorrhizal fungus, *glomus constrictum*. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(4), 9965–9978. https://doi.org/10.15666/aeer/1704_99659978
- Al-Karaki, G. N. (2017). Effects of Mycorrhizal Fungi Inoculation on Green Pepper Yield and Mineral Uptake under Irrigation with Saline Water. *Advances in Plants & Agriculture Research*, 6(5), 164–169. <https://doi.org/10.15406/apar.2017.06.00231>
- Asohofrucol. (2013). Plan Horticola Nacional. *Canasta de Productos Del Plan Horticola Nacional*, 437–462.
- Augé, R. M. (2001). Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza*, 11(1), 3–42. <https://doi.org/10.1007/s005720100097>
- Augé, R. M., Toler, H. D., & Saxton, A. M. (2014). Arbuscular mycorrhizal symbiosis alters stomatal conductance of host plants more under drought than under amply watered conditions: a meta-analysis. *Mycorrhiza*, 25(1), 13–24. <https://doi.org/10.1007/s00572-014-0585-4>
- Bakr, J., Daood, H. G., Pék, Z., Helyes, L., & Posta, K. (2017). Yield and quality of mycorrhized processing tomato under water scarcity. *Applied Ecology and Environmental Research*, 15(1), 401–413. https://doi.org/10.15666/aeer/1501_401413
- Barrera Berdugo, S. (2009). El uso de hongos micorrizicos arbusculares como una alternativa para la agricultura. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial: BSAA*, 7(1), 123–132.
- Blasco, M., & Burbano, H. (2015). La vida en el suelo. Notas sobre su bioquímica y microbiología. *Universidad de Nariño*, 1, 365.
- Bolandnazar, S., Aliasgharzad, N., Neishabury, M. R., & Chaparzadeh, N. (2007). Mycorrhizal colonization improves onion (*Allium cepa* L.) yield and water use efficiency under water deficit condition. *Scientia Horticulturae*, 114(1), 11–15. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2007.05.012>
- Bonfante, P., & Genre, A. (2010). Mechanisms underlying beneficial plant - Fungus interactions in mycorrhizal symbiosis. *Nature Communications*, 1(4), 1–11. <https://doi.org/10.1038/ncomms1046>
- Bowles, T. M., Barrios-Masias, F. H., Carlisle, E. A., Cavagnaro, T. R., & Jackson, L. E. (2016).



- Effects of arbuscular mycorrhizae on tomato yield, nutrient uptake, water relations, and soil carbon dynamics under deficit irrigation in field conditions. *Science of the Total Environment*, 566–567, 1223–1234. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.178>
- Boyer, L. R., Brain, P., Xu, X. M., & Jeffries, P. (2015). Inoculation of drought-stressed strawberry with a mixed inoculum of two arbuscular mycorrhizal fungi: effects on population dynamics of fungal species in roots and consequential plant tolerance to water deficiency. *Mycorrhiza*, 25(3), 215–227. <https://doi.org/10.1007/s00572-014-0603-6>
- Burbano, H. (1989). El suelo: Una visión sobre sus componentes biorgánicos. *Universidad de Nariño*, 1, 447.
- Camayo Fernandez, C. D. (2015). CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL SUELO DE LA GRANJA EXPERIMENTAL DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE. *Universidad Del Valle - Trabajo de Grado*.
- Candido, V., Campanelli, G., D'Addabbo, T., Castronuovo, D., Perniola, M., & Camele, I. (2015). Growth and yield promoting effect of artificial mycorrhization on field tomato at different irrigation regimes. *Scientia Horticulturae*, 187, 35–43. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.02.033>
- Cardona, G., Peña-Venegas, C. P., & Arcos, A. (2008). Ocurrencia de hongos formadores de micorriza arbuscular asociados a ají (*Capsicum* sp.) en la Amazonia colombiana. *Agronomía Colombiana*, 26(3), 459–470.
- Cruz, J. R. V. (2015). Manejo Eficiente Del Riego En El Cultivo De La Caña De Azúcar En El Valle Geografico Del Río Cauca. *Centro de Investigacio de La Caña de Azucar de Colombia - CENICAÑA*, 192.
- Cruz Valderrama, J. R. (2014). Balance hídrico priorizado para la programación de los riegos en caña de azúcar. *Centro de Investigación de La Caña de Azucar de Colombia*, 96.
- Davies Jr., F. T., Olalde-Portugal, V., Aguilera-Gomez, L., Alvarado, M. J., Ferrera-Cerrato, R. C., & Boutton, T. W. (2002). Alleviation of drought stress of Chile ancho pepper (*Capsicum annuum* L. cv. San Luis) with arbuscular mycorrhiza indigenous to Mexico. *Scientia Horticulturae*, 92(3–4), 347–359. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(01\)00293-X](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(01)00293-X)
- Di Cesare, L. F., Migliori, C., Ferrari, V., Parisi, M., Campanelli, G., Candido, V., & Perrone, D. (2012). Effects of Irrigation-Fertilization and Irrigation-Mycorrhization on the Alimentary and Nutraceutical Properties of Tomatoes. *Irrigation Systems and Practices in Challenging Environments*, 2. <https://doi.org/10.5772/32580>
- Douds, D. D., & Schenck, N. C. (1990). Increased sporulation of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi by manipulation of nutrient regimens. *Applied and Environmental Microbiology*, 56(2), 413–418. <https://doi.org/10.1128/aem.56.2.413-418.1990>
- Fracasso, A., Telò, L., Lanfranco, L., Bonfante, P., & Amaducci, S. (2020). Physiological



Beneficial Effect of Rhizophagus intraradices Inoculation on Tomato Plant Yield under Water Deficit Conditions. *Agronomy*, 10(1).
<https://doi.org/10.3390/agronomy10010071>

- Gelvez, I. (2018). Toma de muestras de suelo y raíces para diagnóstico de nematodos fitoparasitarios. *Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA*, 1, 16.
- Gianinazzi, S., Gollotte, A., Binet, M. N., van Tuinen, D., Redecker, D., & Wipf, D. (2010). Agroecology: The key role of arbuscular mycorrhizas in ecosystem services. *Mycorrhiza*, 20(8), 519–530. <https://doi.org/10.1007/s00572-010-0333-3>
- Herrera, J. (2015). *Determinación experimental de la curva del coeficiente de cultivo (kc) del ají tabasco (capsicum annum) en la vereda guacas, municipio de Guacarí (Valle)*. 123. <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/8958/1/CB-0529028.pdf>
- Hugo Restrepo & CIA S.A. (2018). Exportando ají. *Fecha de Consulta: 3/05/2021*, 40. <https://www.hugorestrepo.com/docs/Informe Sostenibilidad.pdf>
- Ismail, S. M. (2010). Influence of Deficit Irrigation on Water Use Efficiency and Bird Pepper Production (*Capsicum annum* L.). *JKAU: Met., Env. & Arid Land Agric. Sci*, 23(1), 19–35. <https://doi.org/10.4197/Met>
- Jaramillo, D. F. (2014). *El suelo: origen, propiedades, espacialidad* (Universidad Nacional de Colombia (ed.); 1st ed.).
- Jezdinský, A., Vojtíšková, J., Slezák, K., Petěiková, K., & Pokludaxs, R. (2012). Effect of drought stress and Glomus inoculation on selected physiological processes of sweet pepper (*Capsicum Annuum* L. CV.'Slávy'). *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 60(3), 69–76. <https://doi.org/10.11118/actaun201260030069>
- Krishna, M. S. R., Lakshmisahitya, U., Sravani Ch, L., Sandhya Rani, N., Tabitha, K., & Akshitha, B. V. (2018). Arbuscular mycorrhizal symbiosis alters morphological and biochemical indices in hot pepper (*Capsicum annum* L.) under drought stress. *International Journal of Green Pharmacy*, 12(2), 75–81. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85051269657&partnerID=40&md5=20be829d9b541fd572bde8035f3905a4>
- Martinez, O., Hoyos, P., & Palacios, V. (1989). Análisis de factores principales en la variabilidad de una colección colombiana de ají. *ICA*, 24, 7.
- Medrano Gil, H., Bota Salort, J., Cifre Llompарт, J., Flexas Sans, J., Ribas Carbó, M., & Gulías León, J. (2007). Eficiencia en el uso del agua por las plantas. *Investigaciones Geográficas*, 43(43), 63–84. <https://doi.org/10.14198/ingeo2007.43.04>
- Mena-Violante, H. G., Ocampo-Jiménez, O., Dendooven, L., Martínez-Soto, G., González-Castañeda, J., Davies, F. T., & Olalde-Portugal, V. (2006). Arbuscular mycorrhizal fungi enhance fruit growth and quality of chile ancho (*Capsicum annum* L. cv San Luis)



- plants exposed to drought. *Mycorrhiza*, 16(4), 261–267. <https://doi.org/10.1007/s00572-006-0043-z>
- Michalis, O., Ioannides, I. M., & Ehaliotis, C. (2013). Mycorrhizal inoculation affects arbuscular mycorrhizal diversity in watermelon roots, but leads to improved colonization and plant response under water stress only. *Applied Soil Ecology*, 63, 112–119. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.09.013>
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2017). Agronet, producción y agronegocios, producción nacional por producto, ají. *Agronet*, 4. <http://www.agronet.gov.co/Documents/Arveja.pdf>
- Moreira, F. M. S. ., Huising, E. J., & Bignell, D. E. (2012). Manual de biología de suelos tropicales. In *Instituto Nacional de Ecología: Vol. Primera Ed* (Primera Ed). www.ine.gob.mx
- Narvaez, B., & Navarrete, A. (2014). Empaque y embalaje de muestras de laboratorio. *Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA*, 1, 6.
- OCDE. (2017). Recomendación del Consejo de la OCDE sobre el Agua. *Fecha de Consulta: 3/05/2021*, 1–16. <https://www.oecd.org/water/Recomendacion-del-Consejo-sobre-el-agua.pdf>
- Ombódi, A., Csorbainé Gógán, A., Birkás, Z., Kappel, N., Morikawa, C. K., Koczka, N., & Posta, K. (2019). Effects of mycorrhiza inoculation and grafting for sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) crop under low-tech greenhouse conditions. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 47(4), 1238–1245. <https://doi.org/10.15835/nbha47411641>
- Ospina-Salazar, D. I., Benavides-Bolaños, J. A., Zúñiga-Escobar, O., & Muñoz-Perea, C. G. (2018). Photosynthesis and biomass yield in Tabasco pepper, radish and maize subjected to magnetically treated water. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 19(2), 307–321. https://doi.org/10.21930/rcta.vol19_num2_art:537
- Pagano, M. C. (2014). Drought stress and mycorrhizal plant. In *Use of Microbes for the Alleviation of Soil Stresses* (Vol. 1, pp. 97–110). https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9466-9_5
- Palacios Castro, S., & García Dávila, M. A. (2008). Caracterización morfológica de 93 accesiones de *Capsicum* spp del banco de germoplasma de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Palmira. *Acta Agronómica*, 57(4), 247–252.
- Pardey Rodriguez, C., García Dávila, M. A., & Vallejo Cabrera, F. A. (2009). *Evaluación agronómica de accesiones de Capsicum del banco de germoplasma de la Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira*. 5–10.
- Peña, C., Cardona, G., Mazorra, A., Arguellez, J., & Arcos, A. (2006). Micorrizas arbusculares de la Amazonia colombiana Catálogo ilustrado. *Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas* - *SINCHI*, 90.



https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/18983/44082_56213.pdf?sequence=1

- Pinto, C. M. F., dos Santos, I. C., de Araujo, F. F., & da Silva, T. P. (2016). Pepper importance and growth (capsicum spp.). In *Production and Breeding of Chilli Peppers (Capsicum Spp.)*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-06532-8_1
- Pozo, M. J., & Azcón-Aguilar, C. (2007). Unraveling mycorrhiza-induced resistance. *Current Opinion in Plant Biology*, 10(4), 393–398. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2007.05.004>
- Rillig, M. C., & Mummey, D. L. (2006). Mycorrhizas and soil structure. *New Phytologist*, 171(1), 41–53. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01750.x>
- Roberta, M., José, L., & Bibliografica, R. (2004). Reparto De Materia Seca Como Factor Determinante De La Producción De Las Hortalizas De Fruto Cultivadas En Invernadero. *Revista Brasileira de Agrociência*, 10(1), 5–11. <https://doi.org/10.18539/cast.v11i1.1171>
- Rodríguez Araujo, E. A., Bolaños Benavides, M. M., & Menjivar Flores, J. C. (2010). Efecto de la fertilización en la nutrición y rendimiento de ají (Capsicum spp.) en el Valle del Cauca, Colombia. *Acta Agronómica*, 59(1), 55–64.
- Rodríguez Yon, Y., Pons, B. de la N., Fernández Martín, F., & Rodríguez Hernández, Y. P. (2016). Estudio comparativo del comportamiento de seis cepas de hongos micorrízicos arbusculares en su interacción con el tomate (Lycopersicon esculentum m. var “amalia”). *Ecología Aplicada*, 3(1–2), 162. <https://doi.org/10.21704/rea.v3i1-2.286>
- Romero-Lozada, M. D. P., Puentes-Páramo, Y. J., & Menjivar-Flores, J. C. (2017). Extracción de nutrientes minerales en hojas y frutos de ají (Capsicum sp .), y su influencia en el rendimiento. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 11(1), 114–121.
- Ruiz-Lozano, J. M., & Aroca, R. (2010). Host response to osmotic stresses: Stomatal behaviour and water use efficiency of arbuscular mycorrhizal plants. In *Arbuscular Mycorrhizas: Physiology and Function* (pp. 239–256).
- Salazar-Moreno, R. ;, Rojano Aguilar, A., & López Cruz, I. L. . (2014). La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, V(2), 177–183.
- Serralde, A. M., & Ramírez, M. M. (2004). Análisis de poblaciones de micorrizas en maíz (Zea mays) cultivado en suelos ácidos bajo diferentes tratamientos agronómicos. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 5(1), 31. https://doi.org/10.21930/rcta.vol5_num1_art:22
- Smith, & Read, D. (2002). Mycorrhizal Symbiosis. In *Mycorrhizal Symbiosis* (Second edi). <https://doi.org/10.1016/b978-012652840-4/50003-6>
- Smith, V. C., & Ennos, A. R. (2003). The effects of air flow and stem flexure on the mechanical and hydraulic properties of the stems of sunflowers Helianthus annuus L. *Journal of*



Experimental Botany, 54(383), 845–849. <https://doi.org/10.1093/jxb/erg068>

- Strack, D., Fester, T., Hause, B., Schliemann, W., & Walter, M. (2003). Arbuscular mycorrhiza: Biological, chemical, and molecular aspects. *Journal of Chemical Ecology*, 29, 1955–1979. <https://doi.org/10.1023/A:1025695032113>
- Tamayo, P. J., & Jaramillo, J. E. (2013). Enfermedades del tomate, pimentón, ají y berenjena en Colombia. In *CORPOICA* (Vol. 2).
- Tuzel, I. H., Tunali, U., Tuzel, Y., & Oztekin, G. B. (2015). Effects of mycorrhiza and different irrigation programs on eggplant in soilless culture. *Acta Horticulturae*, 3384(117), 215–220. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2015.117.29>
- Valnir Júnior, M., Vasconcelos, A. J. F., Lima, L. S. de S., Silva, K. F., & Carvalho, C. M. (2015). Eficiência do uso da água em pimenta da espécie *Capsicum frutescens* L., variedade tabasco. *Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada Nas Ciências Agrárias*, 8(June). <https://doi.org/10.5935/paet.v8.n3.06>
- Wahb-Allah, M., Abdel-Razzak, H., Alsadon, A., & Ibrahim, A. (2014). Growth, yield, fruit quality and water use efficiency of tomato under arbuscular mycorrhizal inoculation and irrigation level treatments. *Life Science Journal*, 11(2), 109–117.
- Zelia, S. A., Fernando, W. A., Hiyoshi, N. R., Filho, C., Bernardes, A., & Waldir, J. (2017). Symptoms of Macronutrients Deficiency in Sweet Pepper (*Capsicum annuum* L.). *Agrociencia Uruguay*, 31–43. <https://doi.org/10.31285/agro.21.2.5>



10 Anexos

Anexo A. Resultados totales de las variables agronómicas evaluadas en el cultivo para cada tratamiento y repetición.

Tratamiento	Número total de frutos (#)	Rendimiento total (g)	Altura (cm)	Número total de ramas (#)	Número total de flores (#)	Grosor (cm)	Promedio peso por fruto (g)
T1-R1	180	130,63	52	17	85	1,38	0,74
T1-R2	179	125,44	45	15	72	1,25	0,71
T1-R3	150	124,76	49	14	65	1,42	0,85
T1+R1	184	133,92	49	17	81	1,21	0,73
T1+R2	176	131,43	46	15	68	1,29	0,75
T1+R3	155	110,92	50	17	57	1,27	0,73
T2-R1	154	112,84	43	16	63	1,23	0,74
T2-R2	180	124,73	44	18	71	1,10	0,70
T2-R3	160	115,71	45	17	70	1,30	0,73
T2+R1	183	130,32	44	15	55	1,20	0,72
T2+R2	151	105,50	45	17	66	1,22	0,70
T2+R3	171	115,63	42	14	75	1,29	0,68
T3-R1	145	114,46	47	16	58	1,15	0,80
T3-R2	144	102,42	42	15	59	1,20	0,72
T3-R3	139	122,65	44	14	51	1,06	0,91
T3+R1	150	105,84	44	17	66	1,15	0,71
T3+R2	153	110,05	47	14	71	1,12	0,72
T3+R3	138	100,95	46	14	46	1,38	0,74
T4-R1	130	92,94	44	15	50	1,24	0,72
T4-R2	143	95,55	42	15	83	1,16	0,67
T4-R3	140	105,17	43	14	82	1,28	0,76
T4+R1	127	90,97	48	16	65	1,20	0,72
T4+R2	146	106,97	43	15	72	1,30	0,73
T4+R3	139	110,73	46	14	57	1,23	0,80
T5-R1	128	89,63	39	14	65	1,15	0,70
T5-R2	118	73,48	41	15	66	1,10	0,62
T5-R3	127	91,13	42	14	64	1,20	0,72
T5+R1	130	91,11	46	15	55	1,10	0,70
T5+R2	139	92,30	43	16	77	1,16	0,67
T5+R3	128	97,65	45	16	48	1,24	0,78



Anexo B. Resultados del análisis estadístico para las variables agronómicas.

Número total de frutos

Tratamientos		Pruebas de normalidad					
		Kolmogorov-Smirnova			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Numero de frutos (#)	T1-MA	0,375	3	.	0,775	3	0,056
	T1+MA	0,280	3	.	0,937	3	0,516
	T2-MA	0,301	3	.	0,912	3	0,424
	T2+MA	0,232	3	.	0,980	3	0,726
	T3-MA	0,328	3	.	0,871	3	0,298
	T3+MA	0,314	3	.	0,893	3	0,363
	T4-MA	0,301	3	.	0,912	3	0,424
	T4+MA	0,236	3	.	0,977	3	0,712
	T5-MA	0,353	3	.	0,824	3	0,174
	T5+MA	0,321	3	.	0,881	3	0,328

Prueba de igualdad de Levene de varianzas de error^{a,b}

Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
1,959	9	20	0,101

ANOVA

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	8255,367	9	917,263	7,409	0,00
Dentro de grupos	2476	20	123,8		
Total	10731,367	29			

HSD Tukey a,b

Tratamientos	N	Subconjunto			
		a	b	c	d
T5-MA	3	124,33			
T5+MA	3	132,33			
T4+MA	3	137,33	137,33		
T4-MA	3	137,67	137,67	137,67	
T3-MA	3	142,67	142,67	142,67	142,67
T3+MA	3	147	147	147	147
T2-MA	3		164,67	164,67	164,67
T2+MA	3		168,33	168,33	168,33
T1-MA	3			169,67	169,67
T1+MA	3				171,67
Sig.		0,327	0,065	0,052	0,099



Rendimiento total (g)

Tratamientos		Pruebas de normalidad			Shapiro-Wilk		
		Kolmogorov-Smirnov ^a					
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Rendimiento total (g)	T1-MA	0,347	3	.	0,836	3	0,203
	T1+MA	0,350	3	.	0,830	3	0,189
	T2-MA	0,296	3	.	0,918	3	0,446
	T2+MA	0,215	3	.	0,989	3	0,798
	T3-MA	0,217	3	.	0,988	3	0,791
	T3+MA	0,187	3	.	0,998	3	0,918
	T4-MA	0,308	3	.	0,901	3	0,390
	T4+MA	0,318	3	.	0,887	3	0,344
	T5-MA	0,358	3	.	0,813	3	0,147
	T5+MA	0,321	3	.	0,881	3	0,328

Prueba de homogeneidad de varianzas

Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
1,593	9	20	0,184

ANOVA

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	5235,279	9	581,698	7,781	0,00
Dentro de grupos	1495,266	20	74,763		
Total	6730,544	29			

HSD Tukey a,b

Tratamientos	N	Subconjunto				
		e	d	c	b	a
T5-MA	3	84,7467				
T5+MA	3	93,6867	93,6867			
T4-MA	3	97,8867	97,8867	97,8867		
T4+MA	3	102,89	102,89	102,89	102,89	
T3+MA	3	105,6133	105,6133	105,6133	105,6133	105,6133
T3-MA	3	106,9767	106,9767	106,9767	106,9767	106,9767
T2+MA	3		117,15	117,15	117,15	117,15
T2-MA	3			117,76	117,76	117,76
T1+MA	3				125,4233	125,4233
T1-MA	3					126,9433
Sig.		0,083	0,058	0,159	0,076	0,107



Peso promedio por fruto (g)

Tratamientos		Pruebas de normalidad					
		Kolmogorov-Smirnova			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Peso promedio por frutos (g)	T1-MA	0,305	3	.	0,906	3	0,404
	T1+MA	0,273	3	.	0,945	3	0,549
	T2-MA	0,267	3	.	0,952	3	0,578
	T2+MA	0,238	3	.	0,976	3	0,702
	T3-MA	0,218	3	.	0,987	3	0,785
	T3+MA	0,175	3	.	1	3	1
	T4-MA	0,21	3	.	0,991	3	0,821
	T4+MA	0,32	3	.	0,884	3	0,336
	T5-MA	0,323	3	.	0,879	3	0,322
	T5+MA	0,264	3	.	0,955	3	0,59

Prueba de homogeneidad de varianzas

Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
2,398	9	20	0,051

ANOVA

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	0,036	9	0,004	1,616	0,177
Dentro de grupos	0,049	20	0,002		
Total	0,085	29			

HSD Tukey a,b

Tratamientos	N	Subconjunto
		d
T5-MA	3	0,6817
T2+MA	3	0,701
T5+MA	3	0,7163
T4-MA	3	0,7193
T3+MA	3	0,723
T2-MA	3	0,7233
T1+MA	3	0,7353
T4+MA	3	0,751
T1-MA	3	0,7643
T3-MA	3	0,8123
Sig.		0,093



Altura de la planta (cm)

Tratamientos		Pruebas de normalidad					
		Kolmogorov-Smirnova			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
altura de la planta (cm)	T1-MA	0,204	3	.	0,993	3	0,843
	T1+MA	0,292	3	.	0,923	3	0,463
	T2-MA	0,175	3	.	1,000	3	1,000
	T2+MA	0,253	3	.	0,964	3	0,637
	T3-MA	0,219	3	.	0,987	3	0,780
	T3+MA	0,253	3	.	0,964	3	0,637
	T4-MA	0,175	3	.	1,000	3	1,000
	T4+MA	0,219	3	.	0,987	3	0,780
	T5-MA	0,253	3	.	0,964	3	0,637
	T5+MA	0,253	3	.	0,964	3	0,637

Prueba de homogeneidad de varianzas			
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
0,936	9	20	0,517

ANOVA					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	154,133	9	17,126	4,211	0,004
Dentro de grupos	81,333	20	4,067		
Total	235,467	29			

HSD Tukey a			
Tratamiento	N	Subconjunto	
		1	2
T5-MA	3	40,7	
T4-MA	3	43,0	43,0
T2+MA	3	43,7	43,7
T2-MA	3	44,0	44,0
T3-MA	3	44,3	44,3
T5+MA	3	44,7	44,7
T3+MA	3	45,7	45,7
T4+MA	3	45,7	45,7
T1+MA	3		48,3
T1-MA	3		48,7
Sig.		0,133	0,061



Número total de flores

Tratamientos		Pruebas de normalidad					
		Kolmogorov-Smirnova			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Numero total de flores (#)	T1-MA	0,245	3	.	0,971	3	0,672
	T1+MA	0,189	3	.	0,998	3	0,908
	T2-MA	0,343	3	.	0,842	3	0,220
	T2+MA	0,193	3	.	0,997	3	0,890
	T3-MA	0,292	3	.	0,923	3	0,463
	T3+MA	0,314	3	.	0,893	3	0,363
	T4-MA	0,376	3	.	0,773	3	0,051
	T4+MA	0,184	3	.	0,999	3	0,927
	T5-MA	0,175	3	.	1,000	3	1,000
	T5+MA	0,296	3	.	0,918	3	0,446

Prueba de homogeneidad de varianzas			
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
2,383	9	20	0,051

ANOVA					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	804,7	9	89,411	0,746	0,665
Dentro de grupos	2398,667	20	119,933		
Total	3203,367	29			

HSD Tukey a		
Tratamiento	N	Subconjunto
		1
T3-MA	3	56
T5+MA	3	60
T3+MA	3	61
T4+MA	3	64,6667
T5-MA	3	65
T2+MA	3	65,3333
T2-MA	3	68
T1+MA	3	68,6667
T4-MA	3	71,6667
T1-MA	3	74
Sig.		0,6



Grosor del tallo

Tratamientos		Pruebas de normalidad					
		Kolmogorov-Smirnova			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Grosor del tallo (cm)	T1-MA	0,299	3	.	0,915	3	0,433
	T1+MA	0,292	3	.	0,923	3	0,463
	T2-MA	0,245	3	.	0,971	3	0,672
	T2+MA	0,304	3	.	0,907	3	0,407
	T3-MA	0,241	3	.	0,974	3	0,688
	T3+MA	0,347	3	.	0,835	3	0,202
	T4-MA	0,253	3	.	0,964	3	0,637
	T4+MA	0,269	3	.	0,949	3	0,567
	T5-MA	0,175	3	.	1,000	3	1,000
	T5+MA	0,204	3	.	0,993	3	0,843

Prueba de homogeneidad de varianzas			
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
1,568	9	20	0,192

ANOVA					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	0,102	9	0,011	1,846	0,122
Dentro de grupos	0,122	20	0,006		
Total	0,224	29			

HSD Tukey a		
Tratamiento	N	Subconjunto
		1
T3-MA	3	1,1367
T5-MA	3	1,15
T5+MA	3	1,1667
T2-MA	3	1,21
T3+MA	3	1,2167
T4-MA	3	1,2267
T2+MA	3	1,2367
T4+MA	3	1,2433
T1+MA	3	1,2567
T1-MA	3	1,35
Sig.		0,075



Reducción en el rendimiento total

Tratamientos		Pruebas de normalidad					
		Kolmogorov-Smirnova			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Reducción en el rendimiento total %	T1-MA	0,345	3	.	0,839	3	0,21
	T1+MA	0,35	3	.	0,83	3	0,188
	T2-MA	0,293	3	.	0,922	3	0,458
	T2+MA	0,215	3	.	0,989	3	0,797
	T3-MA	0,339	3	.	0,851	3	0,242
	T3+MA	0,187	3	.	0,998	3	0,915
	T4-MA	0,309	3	.	0,9	3	0,386
	T4+MA	0,317	3	.	0,887	3	0,347
	T5-MA	0,357	3	.	0,814	3	0,15
	T5+MA	0,321	3	.	0,881	3	0,328

Prueba de homogeneidad de varianzas			
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
2,294	9	20	0,059

ANOVA					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	3722,753	9	413,639	8,368	0
Dentro de grupos	988,653	20	49,433		
Total	4711,407	29			

HSD Tukey a,b						
Tratamientos	N	Subconjunto				
		e	d	c	b	a
T5-MA	3	71,9667				
T5+MA	3	79,5667	79,5667			
T4-MA	3	83,1	83,1	83,1		
T4+MA	3	87,3667	87,3667	87,3667	87,3667	
T3+MA	3	89,7	89,7	89,7	89,7	89,7
T3-MA	3	90,8667	90,8667	90,8667	90,8667	90,8667
T2+MA	3		99,5	99,5	99,5	99,5
T2-MA	3			100	100	100
T1+MA	3				106,5	106,5
T1-MA	3					107,7667
Sig.		0,082	0,057	0,157	0,076	0,108



Eficiencia en el uso del agua - EUA

Tratamientos		Pruebas de normalidad					
		Kolmogorov-Smirnova			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
EUA	T1-MA	0,385	3	.	0,75	3	0,078
	T1+MA	0,385	3	.	0,75	3	0,068
	T2-MA	0,253	3	.	0,964	3	0,637
	T2+MA	0,175	3	.	1	3	1
	T3-MA	0,253	3	.	0,964	3	0,637
	T3+MA	0,253	3	.	0,964	3	0,637
	T4-MA	0,292	3	.	0,923	3	0,463
	T4+MA	0,337	3	.	0,855	3	0,253
	T5-MA	0,349	3	.	0,832	3	0,194
	T5+MA	0,253	3	.	0,964	3	0,637

Prueba de homogeneidad de varianzas			
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
0,369	9	20	0,937

ANOVA					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	11,279	9	1,253	16,28	0
Dentro de grupos	1,54	20	0,077		
Total	12,819	29			

HSD Tukey a,b				
Tratamientos	N	Subconjunto		
		c	b	a
T5-MA	3	2,6333		
T5+MA	3	2,6333		
T4-MA	3	2,8		
T4+MA	3	2,8333		
T3+MA	3	2,8333		
T3-MA	3	3,0333		
T2+MA	3	3,3667	3,3667	
T2-MA	3	3,5333	3,5333	
T1+MA	3		4,0667	4,0667
T1-MA	3			4,5333
Sig.		0,02	0,12	0,572



Anexo C. Valores obtenidos para el cálculo de la Da, CC y PMP.

	Peso seco	Peso húmedo	Valor
CC	47,9	65,67	37%
	40,84	55,63	36%
	34	46,73	37%
Promedio			37%
PMP	34,37	39,79	16%
	52	60	15%
	27,59	31,56	14%
Promedio			15%
	Peso seco	Volumen	Valor
Da	56,25	44	1,28
	55,12	48	1,15
	67,12	54	1,24
Promedio			1,22



Anexo D. Precipitación efectiva (Pe) y riego (R) en milímetros para cada día después del trasplante (DDT)

DDT	Pe(mm)	R (mm)	DDT	Pe(mm)	R (mm)	DDT	Pe(mm)	R (mm)
1	10	0,0	45	0	7,6	89	6	0,0
2	0	0,0	46	0	7,6	90	0	9,1
3	0	3,6	47	0	6,0	91	2	4,5
4	0	3,0	48	0	7,6	92	0	9,1
5	0	2,4	49	4	0,0	93	0	7,6
6	0	3,0	50	73	0,0	94	0	7,6
7	51	0,0	51	0	0,0	95	10	0,0
8	0	0,0	52	0	0,0	96	0	10,6
9	18	0,0	53	5	0,0	97	0	9,1
10	0	0,0	54	0	6,0	98	0	7,6
11	0	3,0	55	0	7,6	99	0	7,6
12	54	0,0	56	0	6,0	100	0	7,6
13	0	0,0	57	0	6,0	101	0	9,0
14	1	0,0	58	0	6,0	102	0	7,4
15	0	1,8	59	19	0,0	103	9	0,0
16	0	2,4	60	0	0,0	104	0	7,4
17	4	0,0	61	0	7,6	105	0	10,3
18	0	3,0	62	0	9,1	106	0	10,3
19	14	0,0	63	0	7,6	107	0	7,3
20	10	0,0	64	0	7,6	108	0	10,2
21	0	0,0	65	0	9,1	109	0	8,7
22	0	3,6	66	0	7,6	110	0	11,6
23	0	4,2	67	0	7,6	111	0	8,6
24	0	3,0	68	0	7,6	112	0	8,7
25	0	2,4	69	5	0,0	113	0	8,6
26	0	3,0	70	0	9,1	114	0	11,5
27	0	3,6	71	0	9,1	115	0	10,0
28	5	2,4	72	0	7,6	116	0	10,0
29	0	3,0	73	15	0,0	117	0	7,1
30	0	3,0	74	0	6,0	118	0	8,5
31	0	3,2	75	87	0,0	119	0	7,0
32	1	2,8	76	0	0,0	120	25	0,0
33	19	0,0	77	14	0,0	121	0	0,0
34	19	0,0	78	0	0,0	122	19	0,0
35	1	0,0	79	0	7,6	123	5	0,0
36	16	0,0	80	0	6,0	124	0	0,0
37	0	0,0	81	0	7,6	125	5	2,8
38	2	3,0	82	0	7,6	126	13	0,0
39	4	3,1	83	0	9,1	127	0	5,5
40	4	4,4	84	0	3,0	128	0	10,9
41	2	5,7	85	34	0,0	129	0	6,8
42	1	3,6	86	1	0,0	130	0	6,8
43	4	4,9	87	3	0,0	131	0	8,1
44	0	9,1	88	0	7,6	132	0	9,4



Anexo D. Análisis químico final del suelo

		RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO – CARACTERIZACIÓN Q-01										FECHA DE EMISIÓN AUTENTICIDAD																					
		LABORATORIO NACIONAL DE SUELOS-LNS-CRA 30 N° 48-51 Bogotá D.C.										2021-03-26																					
		CARACTERIZACIÓN BÁSICA (CON CARBONO TOTAL)																															
INFORMACIÓN DEL CLIENTE																																	
NOMBRE Y APELLIDO / EMPRESA / PROYECTO				LUIS GUILLERMO GARCIA DOMINGUEZ				TIPO DE MUESTRA				SUELO																					
DEPARTAMENTO / MUNICIPIO				Valle Del Cauca - Cali				No. SOLICITUD				4740_1																					
MODIFICACIÓN				SUPLEMENTO DE RESULTADOS				DIRECCIÓN DEL CLIENTE				CARRERA 47 No. 37-93																					
No. DE LABORATORIO		IDENTIFICACIÓN DE CAMPO		LOCALIZACIÓN MUESTRA		Latitud Norte		Longitud Oeste		PROFUNDIDAD (cm)		GRANULOMETRÍA		CLASE TEXTURAL		% DE GRAVAS (FRACCIÓN > 2 mm)		RELACIÓN DE pH		pH		ACIDEZ INTERCAMBIABLE cmol(+)/kg		S.A.I. %		CARBONATO DE CALCIO Cuantitativo %		CARBONO ORGÁNICO %		CARBONO TOTAL %		NITRÓGENO TOTAL %	
MQ1-46965		MUESTRA #1		CAUCA / CALI		N.A.		N.A.		-		ARENAS %		LIMO %		ARCILLA %		Ar		N.A.		6.460		N.A.		N.A.		1.8662		2.88		0.22	
No. DE LABORATORIO		RELACIÓN CN		FÓSFORO Disponible mg/kg		CIC		CIDE		Ca		Mg		K		Na		B.T.		S.B. %		Interpretación		Mg/K		Ca/K		Interpretación		(Ca+Mg)/K		Interpretación (Ca+Mg)/K	
MQ1-46965		11.60		7.19		24.107		22.300		18.720		3.230		0.270		0.080		22.300		92.50		Amplia		11.963		68.333		Amplia con deficiencia de K		81.266		Amplia con deficiencia de K	
OBSERVACIONES:														CONVENCIONES GRANULOMETRÍA										ACLARACIONES									
														Ar: Arcillas										* Prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin la aprobación del Laboratorio Nacional de Suelos-LNS. * Los resultados emitidos corresponden a los parámetros analizados para la muestra.									
														EQUIVALENCIAS: cmol(+)/kgx200=mg/kg Ca cmol(+)/kgx200=mg/kg Mg cmol(+)/kgx120=mg/kg Na: cmol(+)/kgx230=mg/kg K cmol(+)/kgx391=mg/kg																			
APROBADO POR:														Vivian Lorena Alvarez Samirino COORDINADOR DEL LABORATORIO										Martha Lucia Carrasal RESPONSABLE DEL TEMA									
														Página 1 de 2																			



Anexo E. Resultados finales de porcentaje de colonización micorrícica para los tratamientos inoculados



INSTITUTO
GEOLÓGICO
AGRICOLA DE COLOMBIA

RESULTADOS MICORRIZAS RAICES B-17

RESULTADOS ANÁLISIS DE LABORATORIO MICORRIZAS

LABORATORIO NACIONAL DE SUELOS-LNS

FECHA DE EMISIÓN

AAAA-MM-DD

2021-03-23

NOMBRE Y APELLIDO / EMPRESA / PROYECTO

LUIS GUILLERMO GARCIA DOMINGUEZ

DEPARTAMENTO / MUNICIPIO / LOCALIZACIÓN

Valle Del Cauca - Cali

SUPLEMENTO DE RESULTADOS

DE FECHA

No. SOLICITUD

4766_1

No. DE LABORATORIO

MB1-47134-MB1-47138

IDENTIFICACIÓN CAMPO

TRATAMIENTO No. 1-
TRATAMIENTO No. 5

DIRECCIÓN DEL CLIENTE

CARRERA 47 No. 37-93

No. DE LABORATORIO	Tipo de muestra	% Eficiencia Colonización Micorrizas	% Raíz Micorrizada
MB1-47134	SUELO	TRATAMIENTO No. 1	24.00
MB1-47135	SUELO	TRATAMIENTO No. 2	11.00
MB1-47136	SUELO	TRATAMIENTO No. 3	12.00
MB1-47137	SUELO	TRATAMIENTO No. 4	28.00
MB1-47138	SUELO	TRATAMIENTO No. 5	11.00

OBSERVACIONES

PLANCHETA DE AGITACIÓN B046, MICROSCOPIO B009, ESTEREOSCOPIO B008

INTERPRETACIÓN

El término micorriza hace referencia a la asociación simbiótica entre raíces de plantas y hongos, esta asociación es mutualista porque tanto los hongos como la planta hospedera se benefician. El hongo simbionte recibe carbohidratos de la planta ya que él es incapaz de realizar fotosíntesis y a cambio, brinda a la planta varios beneficios reflejados en su crecimiento (JARAMILLO, 2011). Estos microorganismos del suelo forman simbiosis con más del 95% de las plantas terrestres. Adicionalmente la presencia de estos microorganismos estimulan el crecimiento, desarrollo y nutrición de las plantas, especialmente en suelos de baja y moderada fertilidad, también se ha demostrado que estos hongos micorrizcos arbúsculares mejoran la producción, la calidad nutricional e incrementan la tolerancia de las especies.