



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

**MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS
AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES**

**EFFECTO DEL ÁCIDO SALICÍLICO SOBRE EL INCREMENTO
DE BIOMASA Y AZÚCARES EN *Agave cupreata* TREL. &
BERGER Y *Agave salmiana* GENTRY**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA EN
CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES**

P R E S E N T A:

I.A.I. ANA MARÍA ROQUE OTERO

El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México. Mayo de 2023



UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

**MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS
AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES**

**EFFECTO DEL ÁCIDO SALICÍLICO SOBRE EL INCREMENTO
DE BIOMASA Y AZÚCARES EN *Agave cupreata* TREL. &
BERGER Y *Agave salmiana* GENTRY**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA EN
CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES**

P R E S E N T A:

I.A.I. ANA MARÍA ROQUE OTERO

COMITÉ DE TUTORES

Dr. Amaury Martín Arzate Fernández. Tutor académico.

Dr. Aurelio Domínguez López. Tutor adjunto.

Dr. Rubí Martín Arriaga. Tutor adjunto.

El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México. Mayo de 2023

RESUMEN

En México, el género *Agave* tiene importancia socioeconómica, agroecológica y cultural debido a sus múltiples usos, entre los que destaca la elaboración de mezcal y el pulque. La cantidad y tipo de azúcares contenidos en el tallo acaule determina la calidad y cantidad del alcohol producido. Sin embargo, el ciclo para producir agave es muy largo, de ahí la importancia de investigar alternativas orientadas a aumentar el contenido de azúcar y acortar el ciclo del agave. El ácido salicílico (AS) es un regulador del crecimiento y su aplicación puede generar beneficios a las plantas. Así el, el objetivo de la presente investigación es evaluar el efecto del AS en el incremento de los azúcares reductores y biomasa en plantas de *Agave cupreata* y *A. salmiana*, cultivadas en un sistema semi-hidroponico. Para ello se evaluaron plantas en igualdad de condiciones de nutrición, pero tratadas con diferentes dosis, se realizó un análisis de regresión completamente al azar con siete repeticiones por tratamiento para ambas especies en donde la variable independiente fueron las dosis 1.0, 3.6 y 7.2 μM del ácido salicílico y las variables dependientes fueron todas aquellas respuestas relacionadas con las características fenológicas (altura y ancho de la hoja, diámetro del tallo, biomasa fresca y seca) y las variables químicas (Azúcares Reductores). El resultado indico que el AS tuvo efecto diferencial en las plantas de agave, para cada especie evaluada, en la materia orgánica seca se observó un incremento significativo en la raíz, y los mejores tratamientos sobre el incremento de azúcares fueron los que utilizaron dosis a una concentración de 1 y 3.6 μM de AS la hoja mostró el mayor incremento en ambas especies de agave. El AS podría incrementar la concentración de azúcar en plantaciones comerciales de agaves y posiblemente acelerar el periodo de cosecha, pero cada especie podría reaccionar de manera diferenciada a este regulador de

crecimiento. Aplicaciones de AS tienen un efecto en el incremento de azúcares en plantas de agave crecidas en un sistema semi-hidropónico lo que indica que este tipo de planta con metabolismo CAM responde favorablemente a este regulador aplicado en bajas concentraciones y aplicarlo en concentraciones altas puede producir un efecto inhibitorio.

Palabras Clave. Agave, desarrollo, carbohidratos, biomasa y Ácido salicílico.

ABSTRACT

In Mexico, the Agave genus has socioeconomic, agroecological and cultural importance due to its multiple uses, among which the production of mezcal and pulque stands out. The quantity and type of sugars contained in the acaule stem determine the quality and quantity of the alcohol produced. However, the cycle to produce agave is very long, hence the importance of investigating alternatives aimed at increasing the sugar content and cutting the cycle of the agave. Salicylic acid (SA) is a growth regulator and its application can generate benefits to plants. Thus, the objective of the present investigation is to evaluate the effect of AS on the increase of reducing sugars and biomass in *Agave cupreata* and *A. salmiana* plants, grown in a semi-hydroponic system. For this, plants were evaluated under equal nutritional conditions, but treated with different doses, a completely randomized regression analysis was carried out with seven repetitions per treatment for both species where the independent variable was the doses 1.0, 3.6 and 7.2 μM of the salicylic acid and the dependent variables were all those responses related to the phenological characteristics (height and width of the leaf, stem diameter, fresh and dry biomass) and the chemical variables (Reducing Sugars). The result indicated that the AS had a differential effect on the agave plants, for each species, in the dry organic matter a significant increase was evaluated in the root, and the best treatments on the increase of sugars were those that used doses at a concentration of 1 and 3.6 μM of SA, the leaf showed the highest increase in both agave species. AS could increase the sugar concentration in commercial agave plantations and possibly speed up the harvest period, but each species could react differently to this growth regulator. AS applications have an effect on the increase of sugars in agave plants grown in a semi-hydroponic system, which indicates that this type of plant with CAM metabolism responds favorably to this regulator

applied in low concentrations and applying it in high concentrations can produce a inhibitory effect.

Keywords. Agave, development, carbohydrates, biomass and salicylic acid.

ÍNDICE

DEDICATORIA	¡Error! Marcador no definido.
RESUMEN	III
ABSTRACT	V
AGRADECIMIENTOS	¡Error! Marcador no definido.
ÍNDICE	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE CUADROS	X
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. Agave	3
2.1.1. Metabolismo CAM.....	4
2.1.2. Nutrición en el agave	5
2.1.3. Principales usos del agave	6
2.2. Principales azúcares en el agave.....	8
2.3. <i>Agave cupreata</i>	8
2.4. Mezcal	9
2.4.1. Especies de agave mezcaleras	9
2.4.2. Producción de mezcal por año	10
2.4.3. Porcentaje de azúcares que debe tener un agave para producir mezcal.....	10
2.4.4. Tiempo que tarda un agave en crecer para producir mezcal.....	11
2.5. <i>Agave salmiana</i>	11
2.5.1. Pulque	11
2.6. Ácido salicílico.....	11
2.6.1. Funciones del ácido salicílico	12
2.6.2. Efecto del ácido salicílico en plantas	13
2.7. Hidroponía	14
2.7.1. Elementos de un sistema hidropónico	15

2.7.2. Tipos de cultivos hidropónicos.....	15
2.7.3. Ventajas de los sistemas hidropónicos (Zarate, 2014).	16
2.8. Sustratos	16
2.8.1. Tipos de sustratos	17
III. JUSTIFICACIÓN.....	19
IV. HIPÓTESIS.....	21
V. OBJETIVOS	22
5.1. Objetivo general.....	22
5.2. Objetivos específicos	22
VI. MATERIALES Y MÉTODOS	23
6.1. Materiales	23
6.1.1. Materiales para la germinación	23
6.1.2. Reactivos químicos.....	23
6.1.3. Materiales para la construcción de los sistemas hidropónicos.....	24
6.2. Metodología.....	24
6.2.1. Elaboración de los sistemas hidropónicos.....	24
6.2.2. Obtención del material genético	25
6.2.3. Germinación de la semilla	25
6.2.4. Trasplante de las plántulas	26
6.2.5. Riego de las plantas	26
6.2.6. Análisis de variables físicas.....	27
6.2.7. Preparación de la muestra para realizar la determinación de azúcares reductores	27
6.2.8. Determinación de Materia orgánica seca.....	27
6.2.9. Cuantificación de azúcares reductores	28
VII. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	30
VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	31
8.1. Número de hojas	31
8.2. Longitud y ancho de las hojas.....	32
8.3. Diámetro de tallo acaule.....	34

8.4. Efecto del ácido salicílico sobre el contenido de materia seca orgánica y azúcares reductores	35
IX. CONCLUSIONES.....	41
X. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura de un sistema semi-hidropónico fabricado y usado en el presente trabajo de investigación (A), necrosis en hojas de <i>A. cupreata</i> efecto de aplicar AS por aspersión (B) y Aspecto de una planta de <i>A. cupreata</i> con hojas sanas después de haber recibido aplicaciones de AS directamente en la solución nutritiva (C).....	25
Figura 2. Efecto del Ácido salicílico en el número de hojas en <i>A. cupreata</i> y <i>A. salmiana</i> de 12 meses de edad.....	32
Figura 3. Efecto del Ácido salicílico en la longitud y ancho de las hojas en dos especies de agave de 12 meses de edad.....	33
Figura 4. Efecto del Ácido salicílico en el Diámetro del tallo acaule en dos especies de agave de 12 meses de edad.....	34
Figura 5. Efecto de la dosis de ácido salicílico sobre el contenido de la materia seca orgánica en plantas de <i>A. cupreata</i> y <i>A. salmiana</i> de 12 meses de edad	36
Figura 6. Efecto de la dosis de ácido salicílico sobre el contenido de azúcar en plantas de <i>A. cupreata</i> y <i>A. salmiana</i> de 12 meses de edad	38
Figura 7. Efecto de la dosis de ácido salicílico y la edad de las plantas sobre el contenido de azúcar en plantas de <i>A. cupreata</i> y <i>A. salmiana</i> de 12 meses de edad.....	40

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Taxonomía del agave.....	3
Cuadro 2. Pasos metabólicos que suceden en el día y la noche en una planta CAM.....	5
Cuadro 3. Principales usos de importancia socioeconómica y agroecológica del <i>Agave</i> spp.....	6 y 7
Cuadro 4. Producción de Mezcal por año y Estado.....	10
Cuadro 5. Estudios relacionados con el efecto del ácido salicílico en plantas.....	13 y 14

I. INTRODUCCIÓN

En México, los agaves han tenido y tienen amplia importancia económica, agroecológica y cultural debido a sus múltiples usos como la elaboración de mieles, también han tenido un destacado uso en la elaboración de bio-combustible, plantas de ornato, fibras y abonos entre otros (García-Mendoza, 2011). Por otra parte, existe variedad de bebidas alcohólicas hechas a partir de la fermentación y destilación del agave (Guzmán, 1997). La demanda en torno a la producción del agave se ha centrado en la fabricación y preparación de bebidas en las que sobresalen el tequila, mezcal, bacanora y el pulque, quizá en ese orden según importancia económica (García, 2007). El tipo y cantidad de azúcares contenidos en el tallo central determina la cantidad y calidad del alcohol producido puesto que los azúcares son utilizados por las levaduras para la producción de etanol y de los compuestos que proveen las características sensoriales del producto (Bautista *et al.*, 2001). Sin embargo, el ciclo para producir agave es muy largo, debido a esto los productores utilizan agaves de diferentes edades para complementar su producción de pulque y mezcal la cual se ve afectada por diferencia de contenido de azúcares acumulados en el tallo acaule, lo que impide que tengan una producción homogénea entre lote y lote. Las poblaciones naturales de maguey se localizan cada vez más aisladas de los lugares para producir el mezcal o pulque lo que origina un aumento en los costos de producción, por lo que es apremiante el desarrollo de materia prima de agave con un elevado contenido de azúcares reductores, precocidad, potencial forrajero y fibras para el establecimiento de plantaciones comerciales (Trujillo, 2002).

Por ello, se han investigado alternativas orientadas a aumentar el crecimiento y contenido de azúcar o acortar el ciclo del agave, tal es el caso de un estudio realizado por García *et al.* (2010) quien para incrementar el rendimiento del agave realizaron fertirrigación con cantidades diferentes de nutrimentos, por otra parte Arrazola *et al.* (2020) utilizaron riegos con diferentes concentraciones de solución nutritiva Steiner y diferentes frecuencias entre los riegos y Sánchez y Bautista, (2022) emplearon la aplicación de fertilizantes de liberación lenta y fitohormonas sin embargo aún no se ha reportado el uso de sistemas semi-hidroponicos para acelerar el crecimiento de las plantas de agave. Por otro lado, el ácido salicílico (AS) es un regulador del crecimiento, su aplicación a de diferentes dosis puede generar beneficios a las plantas este comportamiento fue explicado por Larqué-Saavedra y Martín-Mex, (2007); Hayat *et al.* (2010); Rivas-San Vicente y Plasencia (2011); MartínMex *et al.* (2013) quienes reportaron un incremento en la productividad de cultivos hortícolas tales como pepino, tomate, pimiento morrón y chile habanero al que le atribuyen un incremento del crecimiento radical en las citadas plantas, de ahí la importancia para el desarrollo del presente estudio cuyo objetivo fue realizar una investigación dirigida a aumentar el tamaño y contenido de azúcares en dos especies de agave mediante aplicaciones de AS empleando un sistema semi-hidroponico.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Agave

El género Agave es originario de América tropical con muchas especies productoras de aproximadamente un 90% de las fibras duras consumidas en el mundo, pertenece a la familia de las Agavaceae (Cuadro 1) y comprende muchas especies originarias de las zonas desérticas de América. La mayor parte de las especies florecen una sola vez en su vida y mueren después de maduración de los frutos, tienen una forma característica de roseta y poseen raíces muy ramificadas, cutícula gruesa, hojas suculentas con estomas hundidos y metabolismo fotosintético tipo CAM (Domínguez *et al.*, 2008).

Cuadro 1. Taxonomía del agave

Nombre Científico:	<i>Agave L.</i>
Reino:	Plantae
División:	Magnoliophyta
Clase:	Liliopsida
Subclase:	Liliidae
Orden:	Asparagales
Familia:	Agavaceae
Género:	Agave
Hábitat:	México, Colombia, Venezuela, Sur de Estados Unidos.

Fuente: (Domínguez *et al.*, 2008).

2.1.1. Metabolismo CAM

El metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM, del nombre en inglés) es una muestra de adaptación al estrés ambiental y se presenta en plantas de sitios con periodos de escasa disponibilidad de agua o de CO₂. Este tipo de fotosíntesis es uno de los tres encontrados en los tejidos de las plantas vasculares para la asimilación de CO₂ de la atmósfera. (Taiz y Zeiger, 2002; Larcher, 2003). A diferencia de la fotosíntesis C3 y C4, en la fotosíntesis CAM las plantas fijan el CO₂ especialmente por la noche con el uso de la enzima PEPC, pero el producto de la reacción de cuatro carbonos se almacena en vacuolas; luego, durante el periodo de luz consecutivo se asimila el CO₂ en los cloroplastos por el ciclo C3 (Larcher, 2003). Aproximadamente 7% de las plantas vasculares presentan la fotosíntesis CAM que incluye plantas del desierto, plantas acuáticas y epífitas, un porcentaje mucho mayor que el de las plantas con la fotosíntesis C4 (Winter y Smith, 1996). La fotosíntesis CAM consiste en los siguientes pasos metabólicos que se describen en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Pasos metabólicos que suceden en el día y la noche en una planta CAM.

Durante el día	Por la noche
1) Liberación del malato de la vacuola hacia el citosol	1) Formación del aceptor primario del CO ₂ , fosfoenol-piruvato (PEP) a partir de carbohidratos no estructurales en las células fotosintéticas
2) Descarboxilación del malato en el citosol, liberación de CO ₂ y formación de compuestos de tres carbonos (piruvato o PEP)	2) Fijación del CO ₂ por la enzima PEP carboxilasa (PEPC) en el citosol y síntesis del ácido málico.
3) Asimilación del CO ₂ liberado en los cloroplastos por la enzima rubisco, seguida por el ciclo de Calvin-Benson y la regeneración de carbohidratos de almacén o gluconeogénesis	3) Almacenaje del ácido málico (como ión malato) en la vacuola central de las células fotosintéticas.

Fuente: (Andrade *et al.*, 2007).

2.1.2. Nutrición en el agave

Además de utilizar la luz para completar su ciclo de vida, las plantas necesitan de dieciséis elementos químicos para su metabolismo, crecimiento y desarrollo. Estos se identifican como elementos esenciales dado que satisfacen tres criterios: a) en ausencia de un elemento, una planta sería incapaz de completar su ciclo de vida; b) la función del elemento no puede realizarla otro elemento y c) el elemento debe realizar una función metabólica específica dentro de la planta (Marschner, 1995).

2.1.3. Principales usos del agave

El *Agave* tiene importancia, socioeconómica, agroecológica y cultural, algunos de sus principales usos se describen en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Principales usos de importancia socioeconómica y agroecológica del *Agave* spp.

USOS	Producto	Parte de la planta
Alimentación	*Azúcar, guisos, dulce, envolver barbacoa mixiotes gusanos blancos, gusanos rojos (chinicuales), pan de pulque y tortillas.	*Tallo (piña), flores, frutos (cápsulas frescas), escapo floral (quiote) y hojas
Bebidas	*Aguamiel, miel, atole de aguamiel, pulque, mezcal, tequila, sotol, bacanora, vinagre, jarabe.	*Tallo (piña)
Agrícola	*Cerca viva, evitar erosión como formadora de suelo abono orgánico (fertilizante)	*Planta completa y composta de hojas *Planta completa
Forraje	*Bovinos, caprinos y porcinos	*Hojas, escapos florales, flores, parte de la inflorescencia y bagazo
Construcción	*Cercas, casas (jacales), corrales para cubrir techos de casas canales para colectar agua de lluvia materiales compuestos: resinas termoplásticas o termófilas + fibras	*Escapo floral (quiote) y hojas *Residuos de fibra

Fibras	*Cordelería, jarcería y cestería (lazos, ropa domestica). *Escobetillas y cepillos para limpieza con jabón incluido, estropajos, tejido y vestuario	*Fibras de hojas y raíces *Fibras de hojas
Medicinal	*Cura golpes y lesiones internas, prevención de escorbuto, sana heridas (antinflamatorio). *Cura anemia	*Hojas *Mieles y pulque
Ornamental	*Adornos corporales (aretes, collares) *Adornos florales	*Semillas y planta completa *Fibras de las hojas y planta completa
Doméstico	*Jabón o detergente para trastes y ropa, shampoo, macetas o recipientes para agua, tapaderas de cazuelas, ollas o barriles palillos para la extracción de gusanos comestibles *Aguja incluyendo hilo para coser	*Hojas, tallos, raíces y espina terminal de hojas
Otros usos	*Industria química, farmacéutica, medicamentos y productos esteroides (saponinas) *Productos de celulosa para papel *Producción de etanol, celulosa y glucósidos	*Hojas, raíces, tallo y semilla *Pulpa residuos del desfibramiento, bagazo y jugos

Fuente: (García *et al.*, 2010).

2.2. Principales azúcares en el agave

Wesche (2000), reporta que el agave, tienen como reserva de carbohidratos polímeros de fructosa (fructosanos) en lugar de glucosa, entre los cuales se encuentran en forma de inulina, que son más pequeños que las moléculas de almidón y más solubles en agua. Algunos fructosanos son ramificados. Las inulinas se encuentran más frecuentemente almacenadas en raíces y tubérculos en lugar de secciones aéreas de las plantas. Los tubérculos de la alcachofa Jerusalén (*Helianthus tuberosus* L.) y dalia *Dahlia pinnata* Cav.); los bulbos de iris (*Iris* sp.) y las raíces del diente de león 2 (*Taraxacum officinales* Weker) y la achicoria (*Chicorium intyvus* L.) son ricos en inulina, así como también las piñas de los agaves (Arrazola, 1969).

La síntesis de inulina “comienza con la adición de fructosa a una molécula de sacarosa, formando un trisacárido. La síntesis completa del polímero requiere de varias enzimas: La inulina presente en el agave, se degrada durante el cocimiento dando principalmente varias moléculas de fructosa, alrededor del 20% de sacarosa y el trisacárido 1,fructosil inulobiosa (Arrazola, 1969). La fructosa y la glucosa presentes en el agave son dos azúcares reductores que pueden ser utilizados para obtener alcohol con un proceso de fermentación, además de que pueden interactuar con las proteínas dando como resultado la caramelización o reacción de Maillard (Téllez, 1998).

2.3. *Agave cupreata*

El *Agave cupreata* es también conocido por la gente de la región como gordito, papalote o papalotl, que en náhuatl significa “mariposa”, y es nombrado así por la peculiar figura que forman sus pencas. Llega a tornarse en una roseta de un metro de ancho y 80 cm de alto, con hojas verde brillantes ampliamente lanceoladas, con espinas grandes y curvas

de color cobre; su inflorescencia mide hasta seis metros, con flores amarillas, y se reproduce por semilla. Esta especie es endémica de la cuenca del Balsas, habita en bosques de pino y encino, en pastizales, palmares y selvas bajas (Salas y Hernández, 2015).

2.4. Mezcals

El mezcal es una bebida alcohólica procedente de uno o varios agaves, de las cuales 14 especies son las más comunes, resaltando el *Agave angustifolia*, el *Agave cupreata*, el *Agave salmiana*, el *Agave potatorum* y el *Agave inaequidens*. El proceso de elaboración comprende las mismas cuatro fases que el tequila, a saber: Cocción del agave, maceración o molienda, fermentación, y por último, destilación. Dependerá de la región, esto es, de las condiciones ecológicas, antecedentes históricos y contexto socioeconómico, el que se utilicen ciertas especies de agave y que predomine algún tipo de organización para manejar las plantas silvestres, semicultivarlas, o de plano domesticarlas (Ruiz, 2011).

2.4.1. Especies de agave mezcaleras

Se han reportado más de 20 especies empleadas en la elaboración de bebidas destiladas (mezcales), siendo 12 las más importantes: *A. tequilana* Weber, *A. angustifolia* Haw., *A. karwinski* Zucc., *A. marmorata* Roetzl, *A. potatorum* Zucc., *A. americana* L. var. *oaxacensis* Gentry, *A. cupreata* Trel. & Berger, *A. rhodacantha* Trel., *A. salmiana* Otto ssp. *crassispina* (Trel.) Gentry, *A. wocomahi* Gentry, *A. durangensis* Gentry y *A. maximiliana* Baker (Gentry, 1982 y García, 1998).

2.4.2. Producción de mezcal por año

En seguida se presenta la distribución porcentual de la producción de mezcal por Estado; estos resultados reflejan la preponderancia de **Oaxaca** con más del **90%** de la producción (Cuadro 4).

Cuadro 4. Producción de Mezcal por año y Estado.

Estado	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Oaxaca	77.4%	93.0%	99.4%	93.7%	97.3%	83.5%	87.0%	92.3%	90.1%
Puebla	-	-	-	-	-	0.1%	3.5%	1.5%	3.2%
Durango	0.0%	0.6%	0.0%	0.4%	0.5%	1.6%	1.8%	2.0%	2.5%
Zacatecas	22.2%	4.5%	0.1%	4.4%	0.5%	9.3%	2.8%	0.1%	1.7%
Guerrero	0.3%	1.6%	0.4%	0.9%	1.1%	3.5%	2.5%	1.8%	1.1%
San Luis Potosí	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%	0.7%	1.3%	0.7%	0.6%
Michoacán	-	0.0%	0.0%	0.5%	0.2%	0.8%	0.6%	1.5%	0.3%
Guanajuato	0.0%	0.2%	0.1%	0.0%	0.2%	0.5%	0.4%	0.1%	0.3%
Tamaulipas	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	0.2%
Total	100%	100.0%							

Fuente: Informe estadístico 2020 Consejo regulador del Mezcal.

2.4.3. Porcentaje de azúcares que debe tener un agave para producir mezcal

La industria del mezcal que existe en otros estados tiene como norma que las piñas no deben contener menos del 10% de azúcares reductores totales (Trujillo, 2008).

2.4.4. Tiempo que tarda un agave en crecer para producir mezcal

La cosecha del agave se inicia cuando el agave tiene de 6 a 8 años se elimina el quiote y se deja seis meses con la finalidad de que aumenten los azúcares en la piña; después se jima (o se corta), antes de la época de lluvias con la finalidad de que el agua no diluya los azúcares (Trujillo, 2008).

2.5. *Agave salmiana*

Agave salmiana es adecuado para aprovechar su savia fresca, el aguamiel, que ya fermentado se conoce como pulque (Fournier y Mondragón, 2012).

2.5.1. Pulque

El producto extraído del maguey más renombrado, en náhuatl octli, la bebida embriagante más importante originaria de México. El pulque era un elemento esencial en la vida ritual y se utilizaba como bebida en las ceremonias o como ofrenda. El pulque se consumía en ciertas celebraciones, no estaban permitidos los excesos y éstos se castigaban con severidad, de hecho, fuera de estas fiestas solo se permitía ingerirla a los ancianos” (Vela, 2014). Entre los principales estados productores de pulque se encuentran Hidalgo, Tlaxcala, Estado de México y Puebla (SIAP, 2019).

2.6. *Ácido salicílico*

El ácido salicílico (AS) es un compuesto fenólico simple que deriva del aminoácido fenilalanina. El AS y algunos de sus derivados como el ácido acetil salicílico (o aspirina), son mejor conocidos en medicina por sus propiedades analgésicas. La importancia del AS como regulador del crecimiento en plantas está reducida a pocos procesos. En algunos casos su presencia afecta la síntesis de otros reguladores de crecimiento los cuales afectan directamente algún proceso fisiológico. Por ejemplo, AS

reduce la síntesis de etileno y en algunas especies esto origina un retardo de la senescencia de flores o inducción de la floración (Martínez *et al.*, 2004).

2.6.1. Funciones del ácido salicílico

Una función reguladora muy especial del AS fue descubierta cuando se estudiaba el fenómeno de termogénesis en flores de especies de la familia Araceae. Previamente se conocía que este fenómeno estaba relacionado al proceso de respiración resistente a cianuro que involucra a la oxidasa alternativa. Hace varias décadas se postuló la hipótesis de una señal química o “calorígeno” que se movilizaba desde la flor masculina hacia el resto de la inflorescencia y muy posteriormente se evidenció que AS era capaz de inducir la oxidasa alternativa y la producción de calor en una planta del género Arum (Raskin *et al.*, 1987 y Vanderstraeten *et al.* 1995). La producción de calor tendría como función atraer polinizadores en este género de flores. Acaso el papel más estudiado del AS es su participación como molécula señal en defensas locales y regulación de la respuesta sistémica adquirida que se ejecuta en las plantas después de ser atacada por patógenos (Shah, 2003).

Se ha determinado que incrementos de los niveles del AS en plantas invadidas por bacterias u hongos son necesarios para la manifestación de síntomas del ataque biótico y además coincide con la expresión de genes considerados de defensa que codifican para las llamadas proteínas relacionadas con patogenicidad o PR. Esta correlación y función de la hormona fueron demostradas además con la aplicación de agentes que bloquean la síntesis de AS o la expresión de genes que codifican para enzimas que degradan AS (Delaney *et al.*, 1994, Wildermuth *et al.*, 2001).

Más aún, la aplicación de AS exógenamente es capaz no sólo de inducir la expresión de genes PR, sino también de conferir mayor resistencia contra patógenos. La acumulación local de AS en el sitio de infección generaría la movilización de una señal sistémica, probablemente metil-salicilato, la cual induce una respuesta sistémica adquirida responsable de la expresión de genes de resistencia en lugares distantes (Dempsey *et al.*,1999). La regulación de la expresión génica mediada por AS involucra la proteína NPR1/NIM1 la cual forma complejos con factores de transcripción llamados TGA (de tipo bZIP) para regular promotores de genes PR. A su vez, la regulación de NPR1 a nivel de expresión es controlada por factores de transcripción de la clase WRKY (Yu *et al.*,2001).

2.6.2. Efecto del ácido salicílico en plantas

Cuadro 5. Estudios relacionados con el efecto del ácido salicílico en plantas

Fuente	Especie	Dosis (AS)	Efectos en la planta
(Fariduddin <i>et al.</i> , 2003)	<i>Brassica juncea</i>	1 µM	*Eficiencia de la carboxilación y la actividad de la nitrato reductasa
(Khodary, 2004)	<i>Zea mays</i>	10 mM	*Acelera la actividad de la enzima Rubisco *Aumenta la actividad fotosintética * Incrementa el contenido clorofila a y b *Incrementa el contenido de carotenoides y de carbohidratos *Aumenta la longitud, peso fresco y seco de la raíz; altura, biomasa seca y fresca

			de la parte aérea de la planta, así como el área foliar
(Gunes <i>et al.</i> , 2007)	<i>Zea mays</i>	0.5 mM	*Incrementa la biomasa seca total en plantas de maíz
		0.01 mM	*Incrementa la longitud y peso seco en la raíz de este cereal
(Hayat <i>et al.</i> , 2005)	<i>Triticum aestivum</i> L.	10µM	*Al embeber las semillas en una solución de estivan AS se estimula la actividad de la nitrato reductasa, incrementando el peso seco y fresco de las plantas.
(Martín-Mex <i>et al.</i> , 2010)	<i>Petunia hybrida</i>	1 µM	*Incrementa en 72% el número de flores por planta
(Martín-Mex <i>et al.</i> , 2012)	<i>Carica papaya</i>	0.01 µM	*Incremento de flores hermafroditas

2.7. Hidroponía

Es un conjunto de técnicas que permite el cultivo de plantas en un medio libre de suelo. La hidroponía permite en estructuras simples o complejas producir plantas principalmente de tipo herbáceo aprovechando sitios o áreas como azoteas, suelos infértiles, terrenos escabrosos, invernaderos climatizados o no, etc. A partir de este concepto se desarrollaron técnicas que se apoyan en sustratos (medios que sostienen a la planta), o en sistemas con aportes de soluciones de nutrientes estáticos o circulantes, sin perder de vistas las necesidades de la planta como la temperatura, humedad, agua y

nutrientes. La palabra hidroponía deriva del griego HIDRO (agua) y PONOS (labor o trabajo) lo cual significa literalmente trabajo en agua. Sin embargo, en la actualidad se utiliza para referirse al cultivo sin suelo. La hidroponía es una herramienta que permite el cultivo de plantas sin suelo, es decir sin tierra. Un cultivo hidropónico es un sistema aislado del suelo, utilizado para cultivar plantas cuyo crecimiento es posible gracias al suministro adecuado de los requerimientos hídriconutricionales, a través del agua y solución nutritiva (Canovas y Diaz, 1993).

2.7.1. Elementos de un sistema hidropónico

- Material vegetal
- Contenedor o recipiente
- Sustrato
- Solución nutritiva

2.7.2. Tipos de cultivos hidropónicos

- **Cultivo hidropónico puro:** Aquel en el que, mediante un sistema adecuado de sujeción, la planta, desarrolla sus raíces en medio líquido (agua con nutrientes disueltos) sin ningún tipo de sustrato sólido.
- **Cultivo hidropónico según la tendencia mayoritaria:** Es utilizado para referirnos al cultivo en agua (acuicultura) o en sustratos sólidos más o menos inertes y porosos a través de los cuales se hace circular la disolución nutritiva.
- **Cultivo semihidropónico:** En este se emplean sustratos no inertes (turba, fibra de coco, corteza de pino, otros sustratos orgánicos, mezclas con fertilizantes de

liberación controlada, etc.) que suministran una importante parte de los nutrientes a la planta.

2.7.3. Ventajas de los sistemas hidropónicos (Zarate, 2014).

- No depende de fenómenos meteorológicos
- Rinde varias cosechas al año
- Mantiene el equilibrio entre aire, agua y nutrimentos
- Ahorra en el consumo de agua
- Permite corregir deficiencias y excesos de fertilizante.
- Logra productos de mayor calidad
- Rinde más por unidad de superficie
- Acorta el tiempo para la cosecha
- No requiere mano de obra calificada
- Permite cultivar la misma especie ciclo tras ciclo
- Presenta buen drenaje
- Mantiene la humedad uniforme y controlada
- Facilita el control de pH
- Admite mayor densidad de población
- Reduce los costos de producción
- Facilita la limpieza e higiene de las instalaciones
- Utiliza materiales nativos y de desecho

2.8. Sustratos

Sobre el término sustrato aplicado a la horticultura, existen diversas definiciones (Burés, 1997) señala que sustrato es cualquier medio que se utilice para el cultivo de plantas en contenedores, donde se entiende por contenedor cualquier recipiente que tenga altura limitada. Por su parte (Abad *et al.*, 2004) señalan que sustrato es todo material sólido distinto del suelo *in situ*, natural, de síntesis o residual, mineral u orgánico, que,

colocado en un contenedor, en forma pura o en mezcla, permite el anclaje del sistema radicular, desempeñando, por tanto, un papel de soporte para la planta y que este puede intervenir o no en la nutrición vegetal.

2.8.1. Tipos de sustratos

Existen diferentes criterios de clasificación de los sustratos, sin embargo, de acuerdo con Abad *et al.* (2004) los sustratos se pueden clasificar como materiales orgánicos e inorgánicos.

a) Materiales orgánicos. Los materiales orgánicos a la vez se pueden subdividir en:

- De origen natural (turba o peat moos).
- De síntesis (espuma de poliuretano, poliestireno expandido).
- Residuos y subproductos de diferentes actividades, aunque este tipo de materiales deben ser previamente acondicionados mediante un proceso de compostaje o vermicompostaje. Entre algunos ejemplos de este tipo de materiales se encuentra el bagazo de caña, bagazo de agave, corteza de árboles, orujo de uva, residuos sólidos urbanos, lodos de depuración de aguas residuales, cascarilla de arroz, paja de cereales, fibra y polvo de coco, entre otros.

b) Materiales inorgánicos o minerales. Estos materiales también se subdividen en:

- De origen natural. Se obtienen a partir de rocas o minerales de origen diverso, como, por ejemplo: rocas de tipo volcánico como el tezontle, piedra pómez, arena, grava.
- Materiales transformados o tratados industrialmente. Son obtenidos a partir de rocas o minerales mediante tratamientos físicos y a veces químicos, que

modifican las características de los materiales de partida. Algunos ejemplos de estos son la perlita, vermiculita, arcilla expandida y lana de roca.

- Residuos y subproductos industriales, como las escorias de horno alto, estériles de carbón.

III. JUSTIFICACIÓN

La producción de tequila y mezcal ha tenido un auge en los últimos años, en el caso de estos productos es forzoso que la materia prima contenga altos contenidos de azúcares debido a que algunos de estos se van perdiendo durante las diferentes etapas del proceso de estos productos. Ante la demanda de estos productos se tienen que garantizar los volúmenes de producción de agave los cuales deben cumplir con las características que se solicitan para lograr producir un producto de buena calidad, sin embargo para conseguir piñas que cumplen con las características correctas en cuanto a la concentración de azúcares se debe esperar un gran lapso de tiempo lo cual demora las producciones, esto ha originado que los productores no se esperen el tiempo que tarda en alcanzar su madurez el agave y los cosechan muy pequeños debido a que se encuentran aún en edades tempranas, lo cual como consecuencia los obliga a aumentar el número de tallos necesarios para elaborar el mezcal. La sobreexplotación del Agave silvestre para la producción de mezcal, la falta de sustentabilidad en la poda y la siembra de esta planta, así como la ausencia de programas sobre su adecuado manejo, han ocasionado que el 50% de las variedades que existen de esta planta, se encuentren en peligro de extinción. Por otra parte el ácido salicílico es un regulador de crecimiento de las plantas el cual se ha demostrado que en especies como gramíneas como *Zea mays* utilizando aplicaciones de 10 mM de AS acelera la actividad de la enzima Rubisco, aumentando la actividad fotosintética; incrementa el contenido clorofila a y b, de carotenoides y de carbohidratos; aumenta también la longitud, peso fresco y seco de la raíz; altura, biomasa seca y fresca de la parte aérea de la planta, así como el área foliar (Khodary 2004). Y como los procesos para la producción de agave son demasiado

largos, resulta interesante buscar alternativas con la finalidad de acortar ciclos para obtener el mismo o mayor contenido de biomasa y azúcares.

Derivado de esta problemática, en los objetivos propuestos de nuestro trabajo de investigación se realizó una investigación impulsada a incrementar en un lapso menor la producción, el tamaño y contenido de azúcares en este género y se desarrolló una estrategia de nutrición adecuada para el agave en donde se estarán aplicando 3 dosis de ácido salicílico en un lapso menor, lo cual beneficiaría directamente a los productores quienes podrán replicar esta metodología como una alternativa para la reproducción de agaves.

Finalmente, los resultados obtenidos de la presente investigación serán divulgados para usarlos en posteriores trabajos que permitan dar un valor agregado a las especies analizadas.

IV. HIPÓTESIS

Al menos una de las concentraciones de ácido salicílico (AS) tiene un efecto en el incremento de biomasa y azúcares reductores en las plantas de *Agave* establecidas en los sistemas semi-hidroponicos.

V. OBJETIVOS

5.1. Objetivo general

- Evaluar el efecto del ácido salicílico en el incremento de los azúcares reductores y biomasa, en plantas de *Agave cupreata* y *Agave salmiana*, cultivadas en un sistema semi-hidroponico.

5.2. Objetivos específicos

- Evaluar el efecto de tres dosis de ácido salicílico (AS) en plantas de *Agave* cultivadas en un sistema semi-hidroponico.

6.1.3. Materiales para la construcción de los sistemas hidropónicos.

- Tubo PVC Sanitario 75 MM
- Codo PVC Sanitario 75X90°
- Tapa de inserción PVC 75 MM
- Adaptador inserción 13 MM
- Bote de cemento OATEY verde ¼ LT 8 oz
- 4 bombas de agua
- 4 Times
- Tubo PVC Hidráulico 19MM
- Codo PVC Hidráulico 19X19°
- Tapa PVC Hidráulico 19MM
- Adaptador Macho PVC Hidráulico 19 MM
- 4 contenedores de plástico de 40 Litros c/u
- 4 bombas de oxígeno

6.2. Metodología

6.2.1. Elaboración de los sistemas hidropónicos.

Los sistemas semi-hidroponicos se construyeron empleando como material tubos de PVC hidráulico (19 mm de diámetro) los cuales fueron cortados y unidos para formar un cubo que sostiene en la parte superior a 6 tubos (75 mm), con un espacio de 8 cm entre cada uno de los tubos, cada tubo de la parte superior con cuatro perforaciones de un diámetro de 10 cm en los cuales se introdujeron las plántulas (Figura 1), en la parte superior se colocó un despachador con seis mangueras por las cuales circulaba la solución nutritiva, la cual estuvo en la parte inferior del sistema en un contenedor de 40 L y dentro de este una bomba sumergible de agua con una capacidad de 200 L/h la cual proporcionaba la fuerza para recircular el agua al sistema y una bomba de aire con una capacidad de 60L que proporcionaba oxígeno al agua para evitar la descomposición de la misma. Cada sistema tenía la capacidad de 24 plantas.

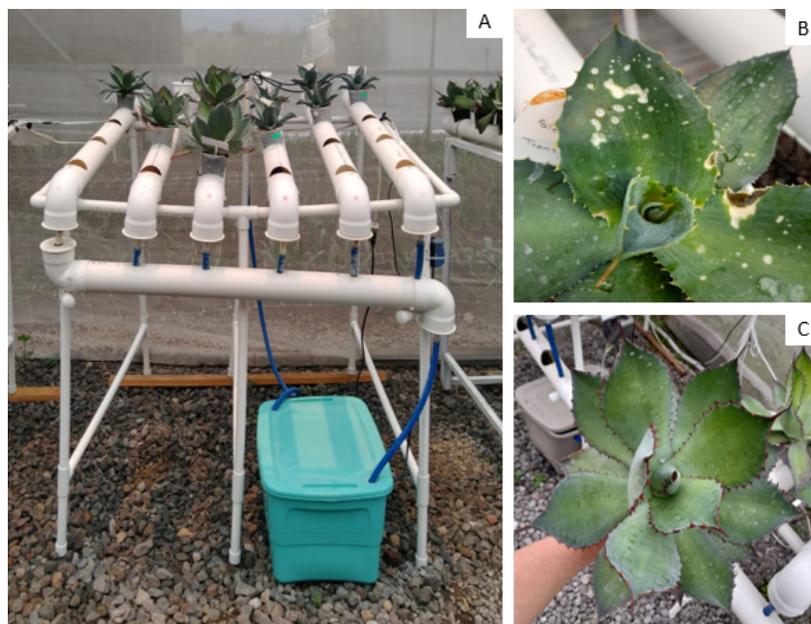


Figura 1. Estructura de un sistema semi-hidropónico fabricado y usado en el presente trabajo de investigación (A), necrosis en hojas de *A. cupreata* efecto de aplicar AS por aspersión (B) y Aspecto de una planta de *A. cupreata* con hojas sanas después de haber recibido aplicaciones de AS directamente en la solución nutritiva (C).

6.2.2. Obtención del material genético

Se germinaron semillas de *Agave cupreata* y *A. salmiana*, provenientes de una donación por productores del estado de Guerrero.

6.2.3. Germinación de la semilla

Para la germinación de las semillas primero se realizó la preparación de un sustrato a base de Peat moss, agrolita y fibra de coco en una proporción 1:1:1 el cual una vez mezclado fue esterilizado en una auto clave a 120 °C durante 20 minutos y una presión de 1.1 Kg/cm². Una vez esterilizado el sustrato se colocó una capa de 5 cm de altura dentro de una charola de germinación de 25X40cm y se colocaron las semillas las cuales previamente fueron desinfectadas empleando un remojo en hipoclorito de sodio al 5% v/v a durante 3 min (Rodríguez *et al.*, 2020), posteriormente se colocó sobre las semillas

una pequeña capa de sustrato y por último se colocó una capa de coxal de pino, finalmente se regó con suficiente agua natural para que el sustrato estuviera húmedo.

6.2.4. Trasplante de las plántulas

Una vez obtenida la primera hoja o penca en las plántulas de agave, a las 6 semanas después de la germinación, estas fueron sometidas durante 10 minutos a un remojo de agua con ozono 600mg/h, posteriormente fueron transferidas a vasos de plástico biodegradable con una capacidad de 16oz los cuales fueron perforados 5mm en la base y de la cual se introdujo un hilo-estambre de aproximadamente 15 cm que ayudó a absorber el agua por capilaridad, cada uno de estos vasos se llenó con un sustrato a base de 100% tepojal con un diámetro de partícula de 2mm.

6.2.5. Riego de las plantas

Las soluciones para evaluar de (AS) se prepararon en apego a la técnica descrita por Gutiérrez-Coronado *et al.* (1998). Después de la germinación, se definieron lotes de plantas creciendo uniformemente (misma edad, mismo porte o vigor) en cada sistema semi-hidropónico con el mismo tipo de sustrato, solución nutritiva y la misma frecuencia entre los riegos los cuales se realizaron tres veces al día cada 8 horas iniciando a las 8:00 h de la mañana, de lunes a viernes. Cada lote o sistema semi-hidropónico tenía una capacidad de 24 plantas, 8 meses después fueron aplicados los tratamientos los cuales corresponden a las concentraciones 1, 3.6 y 7.2 μM de AS empleando solo agua para el control o testigo, dirigida directamente en el contenedor durante 3 meses consecutivos, esto debido a que en un ensayo previo se realizaron las aplicaciones mediante aspersion y provocaron necrosis en las hojas (Figura 1).

6.2.6. Análisis de variables físicas

Un mes después de la última aplicación, es decir, 12 meses después de haber sido establecidas las plantas en los sistemas semi-hidropónicos, las plantas fueron cosechadas para hacer las mediciones cuantitativas, se les contabilizó el número de hojas, se midió la altura y ancho de la hoja, con un Vernier digital (Truper, CALDI-6MP) se evaluó el diámetro del tallo acaule, y con una balanza analítica (Sartorius, BP221S) se determinaron los pesos frescos de raíz, tallo acaule y hojas, después la muestra se colocó en una incubadora (Felisa), Modelo FE133A a una temperatura de 65 °C durante 72 h, posteriormente se pesó para determinar la cantidad de biomasa seca y por último, con un molino eléctrico (General Electric), Modelo 5XBG00G, con una criba de 20 micras, las muestras fueron molidas hasta su pulverización.

6.2.7. Preparación de la muestra para realizar la determinación de azúcares reductores

Se utilizaron las hojas y el tallo debido a que en esos órganos se acumulan los azúcares, las muestras utilizadas para esta variable se obtuvieron de las plantas establecidas en los sistemas semi-hidropónicos, estas muestras se seleccionaron al azar, a cada planta le fue retirado el tepojal empleando solamente un enjuague con agua corriente para posteriormente cuantificar la concentración de azúcares reductores por el Método DNS de Miller (Miller, 1959).

6.2.8. Determinación de Materia orgánica seca

Se colocó a peso constante un crisol de porcelana, perfectamente limpio, introduciéndolo a la mufla a 550 °C aproximadamente, durante una hora; posteriormente se pasó el crisol al desecador y se dejó enfriar hasta temperatura ambiente, se determinó el peso del crisol en balanza analítica con aproximación de gramos y se registró el dato

como A. Después se tomó una muestra representativa de 5 gramos previamente secada y se determinó el peso del crisol con la muestra en balanza analítica con aproximación a gramos y se registró el dato como B. Posteriormente se incineraron las muestras utilizando un mechero hasta que no emitiera humo y las paredes del crisol estuvieron blancas, se introdujo el crisol, con la muestra calcinada, a la mufla a 550 °C aproximadamente, durante 24 horas; pasado el tiempo se pasó el crisol al desecador y se dejó enfriar hasta temperatura ambiente, por último se determinó el peso del crisol y de la muestra calcinada en balanza analítica con aproximación de miligramos y se registró el valor como C.

Expresión de resultados:

$$\text{Cenizas \%} = \frac{C-A}{B-A} \times 100$$

Donde:

A= Peso del crisol vacío en gramos

B= Peso del crisol y la muestra seca en gramos

C= Peso del crisol y la muestra calcinada en gramos

6.2.9. Cuantificación de azúcares reductores

Para la cuantificación de azúcares reductores se aplicó con algunas modificaciones el método DNS de Miller (Miller, 1959). Se disolvieron 4.8 g de NaOH (Hidróxido de sodio) y se agregaron 120 ml de agua destilada, posteriormente se colocó en un matraz con una capacidad de 500 ml y se colocó sobre un agitador orbital, posteriormente se adicionaron 90 g de Na-K (tartrato de sodio y potasio) tetra hidratado y se complementó hasta 240 con agua. Se comenzó a añadir lentamente 3 g de DNS (ácido 3,5-

dinitrosalisílico) y se aforó a 300 ml con agua destilada, se dejó en agitación durante toda la noche, por último, se filtró y se almacenó en un frasco ámbar a 4 °C. La concentración de azúcares reductores se determinó utilizando una curva de calibración absorbancia en función de la concentración. Para obtener esta curva se prepararon soluciones de 5-0 mg/L, utilizando glucosa como estándar. A estas soluciones se les aplicó el método DNS y se realizó una lectura a las absorbancias de cada una de ellas en un espectrofotómetro (Genesys 10vis) a una longitud de onda 540 nm. Una vez construida la curva patrón se aplicó el método DNS a cada una de las muestras. Para lo cual se pesó 0.5 g de muestra y se aforaron a 10 ml y se centrifugaron a 10,000 rpm durante 10 minutos, para el desarrollo de la reacción DNS en tubos de cristal de 10 ml se adicionaron 0.5 ml de muestra y 0.5 ml del reactivo DNS, se colocaron a ebullición durante 5 min, se enfriaron con hielo y se le añadieron 5 ml de agua destilada, se agito y se realizó una lectura a 540 nm en el espectrofotómetro y el mismo procedimiento se realizó para el blanco con agua destilada y finalmente se dio lectura a la absorbancia de cada una de las muestras en la curva patrón se determinó la concentración de azúcares reductores.

VII. DISEÑO EXPERIMENTAL

Se realizó un análisis de regresión completamente al azar con siete repeticiones por tratamiento para ambas especies en donde la variable independiente fue la concentración del ácido salicílico y las variables dependientes fueron todas aquellas respuestas relacionadas con las características fenológicas (altura y ancho de la hoja, diámetro del tallo, biomasa fresca y seca) y las variables químicas (Azúcares Reductores). Los datos obtenidos se analizaron por medio del programa estadístico Stathgraphics Plus Versión 5.0. En aquellas variables donde se presentó diferencia significativa, se realizó una prueba de comparación de medias (método DMS) con un nivel de significancia del 95%.

VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1. Número de hojas

En ambas especies se observó la formación completa de la primera hoja a partir de las 6 semanas después de la germinación, al alcanzar un año de edad, el rango de valores obtenido de los resultados de las medias de los tratamientos para el número de hojas se encuentra en la Figura, 2. Para el caso de *A. cupreata* el rango se encuentra entre 10 y 11 hojas y en el caso de *A. salmiana* se encuentra entre 8 y 9 hojas, en ambas especies el primero corresponde a las plantas control donde no se aplicó AS y el segundo corresponde a todas aquellas plantas a las que se les aplicaron los diferentes tratamientos. En la literatura no existen reportes relacionados al incremento de hojas en plantas de agave, sin embargo, Martín-Mex *et al.* (2010) publicó que aplicaciones de AS a una concentración de concentraciones de 1 μ M incrementa el número de flores por planta en *Petunia hybrida*.

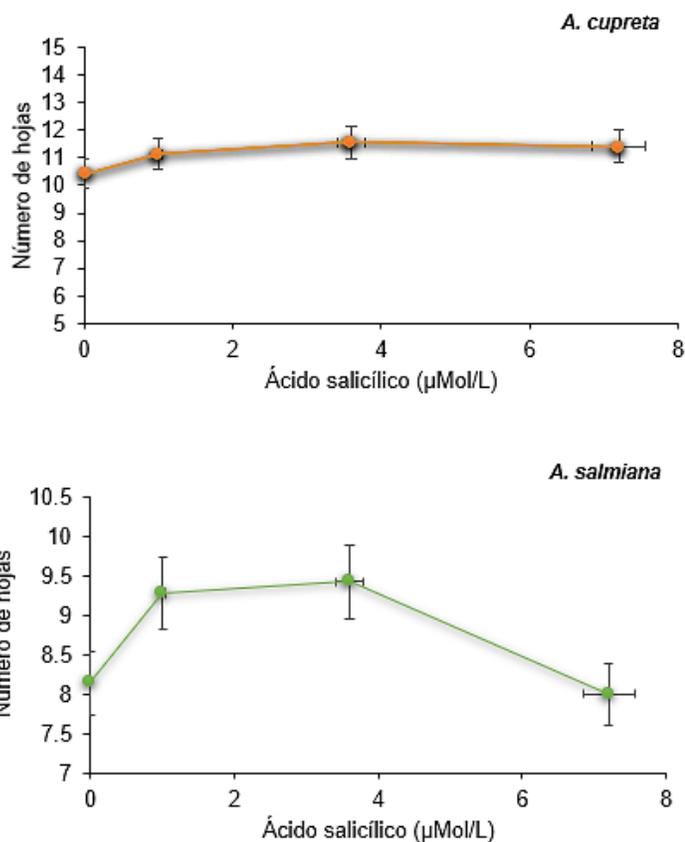


Figura 2. Efecto del Ácido salicílico en el número de hojas en *A. cupreata* y *A. salmiana* de 12 meses de edad.

8.2. Longitud y ancho de las hojas

Los resultados obtenidos de los tratamientos para la longitud y ancho de las hojas se presentan en la Figura 3, donde se aprecia que el AS promovió su crecimiento en ambas especies, sin embargo, el incremento más alto se dio en *A. cupreata* con aplicaciones de 1.0 μM de AS favorecieron significativamente la longitud de hoja teniendo un crecimiento de 8.69 a 11 cm y el ancho de 4.86 a 5.93 cm empleando aplicaciones de 3.6 μM respecto al control. Para el caso de *A. salmiana* se observó un aumento en la longitud de la hoja de 6.77 a 7.77 cm siendo similar el resultado al aplicar concentraciones de 1.0 y 3.6 μM de AS y el ancho de la hoja mostró un rango de 3.14 a

3.80 cm, el primero corresponde a plantas con aplicaciones del tratamiento con la concentración 1.0 μM de AS y el segundo corresponde a las plantas que se les aplicó la concentración 3.6 μM de AS. No existen reportes en la literatura que muestren del efecto reportado en el presente trabajo, aunque se ha señalado que el AS también afecta la producción de frutos, como se menciona en un estudio reportado por Martín *et al.* (2012) en (*Carica papaya*) en el cual al aplicar concentraciones de 0.01 μM de AS incrementaron significativamente la altura y grosor de la planta, así como el número y peso de los frutos.

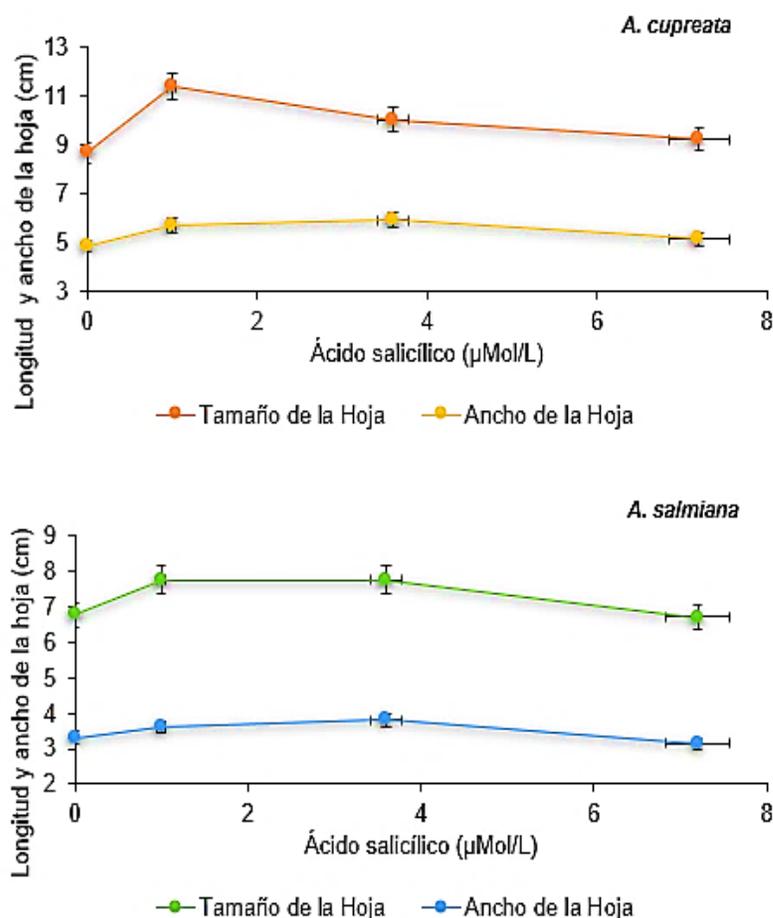


Figura 3. Efecto del Ácido salicílico en la longitud y ancho de las hojas en dos especies de agave de 12 meses de edad.

8.3. Diámetro de tallo acaule

La Figura 4 muestra el efecto del AS en el tallo acaule de ambas especies. En esta figura se observa que en el tallo de *A. cupreata* creció significativamente al emplear la concentración 1.0 μM . Resultados similares han sido reportados por Tucuch *et al.* (2015) en plántulas de trigo (*Triticum aestivum* L.) donde los valores del diámetro del tallo estuvieron por encima del control al aplicar concentraciones de 1.0 μM de AS. Por otra parte, en *A. salmiana* tuvo un mejor desarrollo en el tallo al emplear la concentración 3.6 μM . No obstante, en ambas especies al incrementar la concentración de AS se observa un efecto inhibitorio.

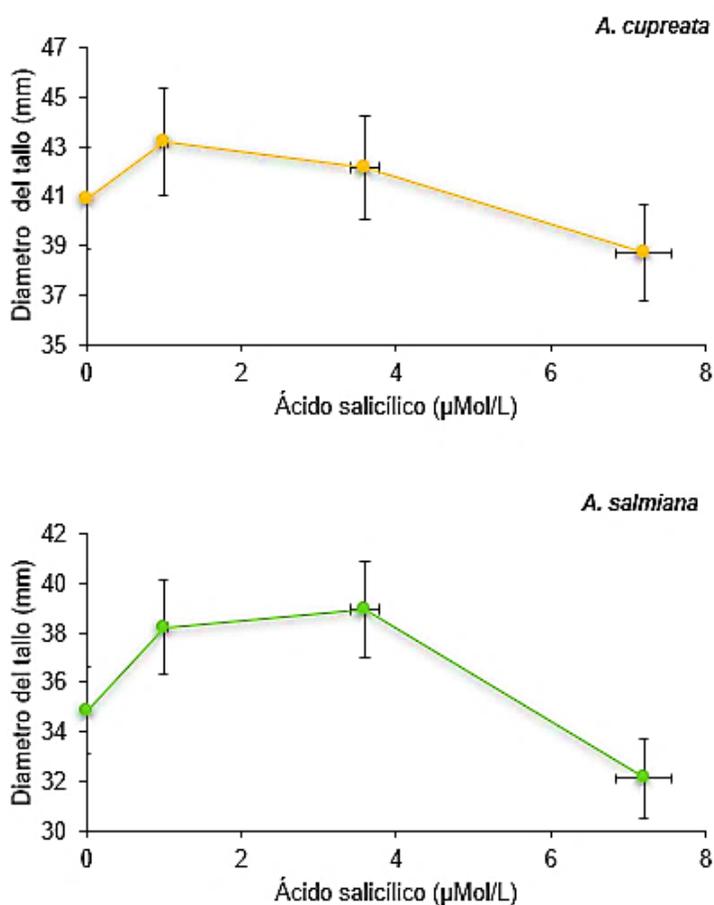


Figura 4. Efecto del Ácido salicílico en el Diámetro del tallo acaule en dos especies de agave de 12 meses de edad.

8.4. Efecto del ácido salicílico sobre el contenido de materia seca orgánica y azúcares reductores

A las muestras de *Agave cupreata* y *A. salmiana* se les determinó la materia seca y el porcentaje de minerales en función de la concentración de AS y la edad de las plantas. Se consideró la materia seca orgánica de ambos agaves como el porcentaje de materia seca menos el porcentaje de ceniza de cada una de las muestras. No se observó un incremento significativo de la materia seca orgánica en ninguno de los agaves a través del tiempo. Esto sugiere que la generación de asimilados y la absorción de materiales a través de la raíz se destina fundamentalmente al crecimiento de las plantas. En la Figura 5 se observa el efecto de la dosis de AS sobre la materia seca.

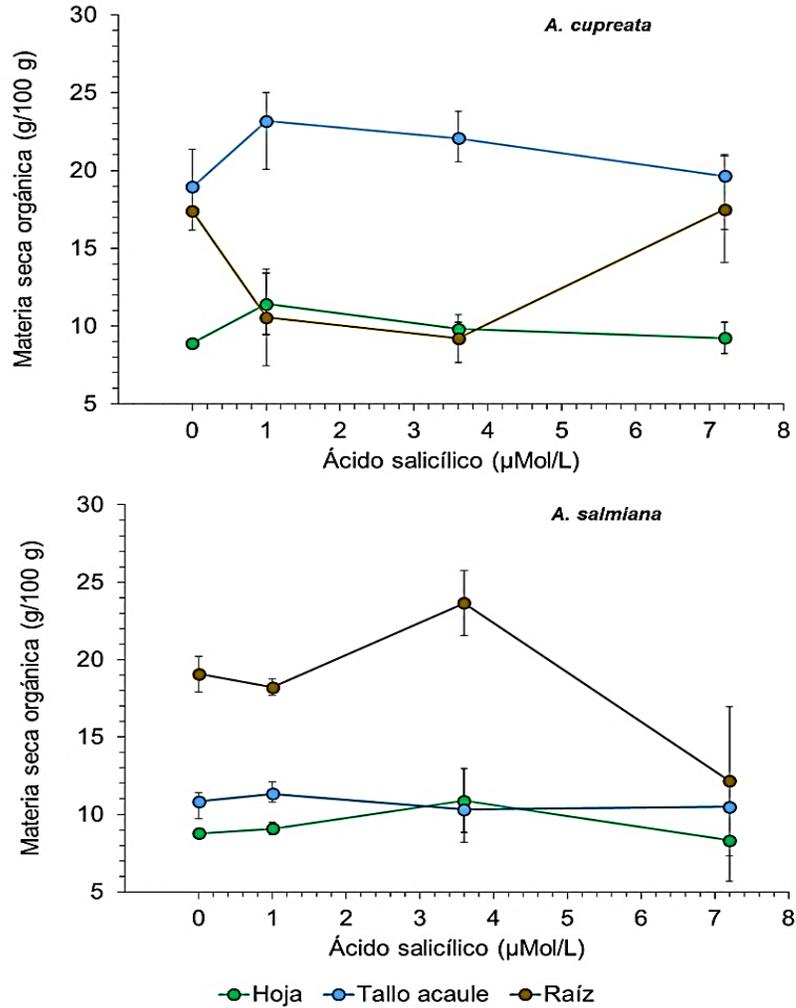


Figura 5. Efecto de la dosis de ácido salicílico sobre el contenido de la materia seca orgánica en plantas de *A. cupreata* y *A. salmiana* de 12 meses de edad (las barras representan la DMS).

De acuerdo con esta figura, la materia seca orgánica en tallo acaule y hojas no se vio afectada por el AS. Sin embargo, en la raíz, este compuesto afecta de manera diferenciada en la raíz, a ambas especies. En el caso de *A. cupreata* se observó un decremento significativo de la materia seca orgánica en la medida que aumenta la concentración de AS. Por lo que, a la concentración de 7.2 µM la acumulación de biomasa resultó significativa. En el caso de *A. salmiana* este incremento se observó a

una concentración inferior a 3.6 μM . En este sentido debe de señalarse que Gutiérrez-Coronado *et al.* (1998) reportaron que en soya la aplicación de bajas concentraciones de AS al dosel de las plántulas favoreció significativamente el crecimiento de la raíz. De igual forma Khodary (2004) reportó que aplicaciones de 10 mM de AS en *Zea mays* acelera la actividad de la enzima Rubisco, aumentando la actividad fotosintética; permitiendo un incremento en el contenido de clorofila a y b, de carotenoides y de carbohidratos; provocando un aumento también en la longitud, peso fresco y seco de la raíz; altura, biomasa seca y fresca de la parte aérea de la planta, así como el área foliar. En la Figura 6 se observa el efecto en la evolución del contenido de azúcar en ambos agaves en función del ácido salicílico.

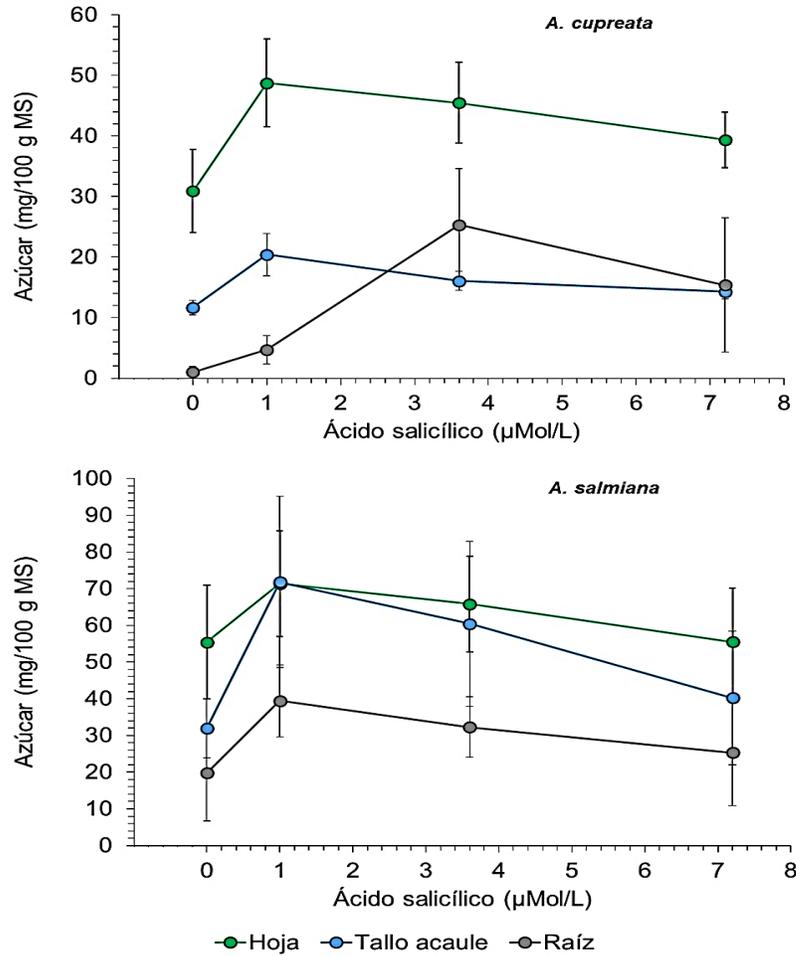


Figura 6. Efecto de la dosis de ácido salicílico sobre el contenido de azúcar en plantas de *A. cupreata* y *A. salmiana* de 12 meses de edad (las barras representan la DMS).

Se pudo observar que la concentración de azúcares reductores es mayor en las hojas que en el tallo acaule y la raíz. En ambos agaves, el AS provocó un incremento significativo del azúcar en las hojas y en el tallo acaule cuando fue aplicado a una concentración de 1 µM. Es evidente este incremento en la hojas de *A. cupreata* y en la hojas y el tallo de *A. salmiana*. La Figura 7 es una gráfica de *iso*-concentración de azúcares reductores en ambos agaves en función del AS y de la edad de las plantas. En el caso de *A. cupreata* se observó el mayor porcentaje de azúcares reductores en las hojas a una concentración

entre 1.5 y 2.5 μM de AS. Además, este incremento se observa principalmente a una edad de las plantas de alrededor de 145 días. En *A. salmiana*, el máximo nivel de azúcar en las hojas se observó a una edad ligeramente más temprana (a los 140 días) de las plantas y a una concentración 2 μM de AS. En la literatura se reporta que las plantas del género *Agave* almacenan fructanos como principal carbohidrato de reserva (López *et al.*, 2003; Mancilla-Margalli y López, 2006). En un estudio realizado por Mellado-Mojica y López (2012) en plantas de *Agave tequilana* Weber var. azul extraídas con una edad de 2 a 7 años reportaron que conforme aumenta la edad de la planta en campo, los fructanos almacenados se vuelven moléculas más complejas, en las cuales se muestra un incremento gradual, esto sugiere que al continuar con aplicaciones de AS se podría incrementar el grado de polimerización de los fructanos, lo cual puede permitir cosechar los tallos de agave en periodos relativamente más cortos.

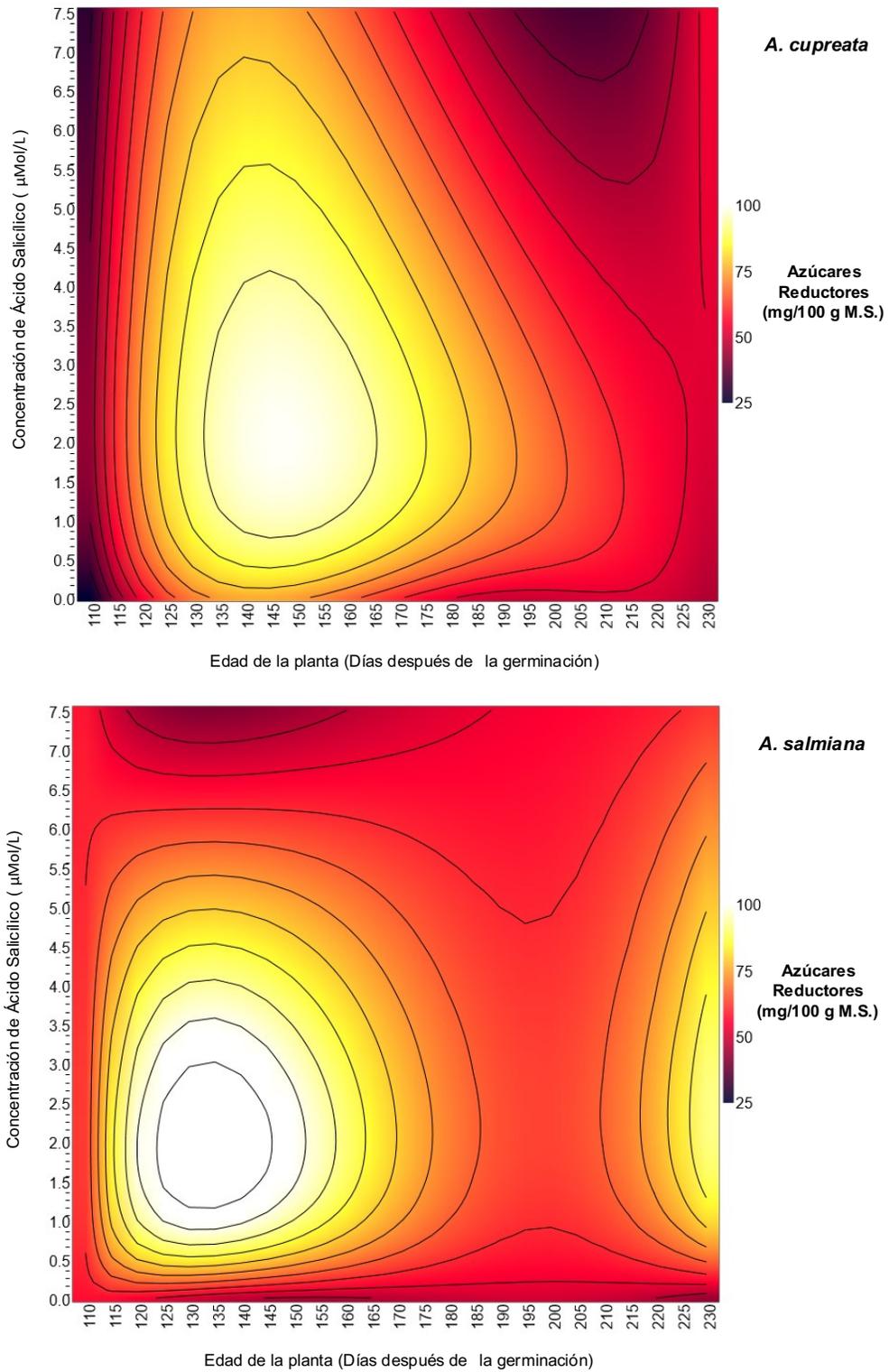


Figura 7. Efecto de la dosis de ácido salicílico y la edad de las plantas sobre el contenido de azúcar en plantas de *A. cupreata* y *A. salmiana* de 12 meses de edad

IX. CONCLUSIONES

Es el primer reporte de aplicaciones de ácido salicílico empleando sistemas semi-hidroponicos en plantas de *Agave cupreata* y *A. salmiana*. Los resultados de esta investigación mostraron que las aplicaciones de ácido salicílico si tiene un efecto en las plantas de agave, sin embargo, este puede comportarse de manera diferente para cada especie. Su efecto en las variables morfológicas de la planta se observa que para ambas especies (*A. cupreata* y *A. salmiana*), tuvo efecto en las propiedades como número, largo y ancho de las hojas, así como en el diámetro del tallo, siendo mayores respecto al control aquellas en las que les aplicaron concentraciones de 1 y 3.6 μM .

Por otra parte, ambas especies no tuvieron un efecto significativo a través del tiempo en ninguno de los agaves de ambas especies respecto a la materia seca en las estructuras (Hoja y tallo acaule), pero si en la raíz, en el caso de *A. cupreata* se observó un decremento significativo de materia seca orgánica a medida que aumenta la concentración a diferencia del *A. salmiana* en el cual se observa su incremento al utilizar concentraciones inferiores a 3.6 μM . En contraparte el ácido salicílico muestra un efecto significativo sobre la concentración de azúcares en ambas especies, siendo mayor en las estructuras como hojas que en el tallo acaule y la raíz.

Aplicaciones de ácido salicílico en plantas de agave cultivadas en un sistema semi-hidroponico podría aumentar el tamaño de las hojas, el diámetro del tallo, la biomasa fresca y contenido de azúcares de la planta lo que indica que este tipo de plantas con metabolismo CAM responde positivamente a este regulador de crecimiento incluso aplicado en bajas concentraciones y al aumentar la concentración, pero en niveles altos puede producir un efecto inhibitorio.

Estos resultados, si bien evaluados en un periodo muy corto del ciclo de vida, sugieren que el AS podría incrementar la concentración de azúcar en plantaciones comerciales de agaves y posiblemente acelerar el periodo de cosecha, pero cada especie reaccionaría de una manera diferenciada a este producto.

X. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abad-Berjon M, Noguera-Murray P, Carrión-Benedito C. Los sustratos en los cultivos sin suelo. En: Urrestarazu-Gavilán. Cultivo sin suelo. Madrid: Mundi Prensa, 2004. 113-158.

Andrade, José Luis, & Barrera, Erick de la, & Reyes García, Casandra, & Ricalde, M. Fernanda, & Vargas Soto, Gustavo, & Cervera, J. Carlos (2007). El metabolismo ácido de las crasuláceas: diversidad, fisiología ambiental y productividad. Boletín de la Sociedad Botánica de México (81),37-50. [fecha de Consulta 13 de Diciembre de 2020]. ISSN: 0366-2128. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=577/57708102>

Arrazola, D. F. de M. (1969). Estudio del Contenido de Azúcares en la Piña del Agave tequilana. Tesis de Licenciatura. Facultad de Química. Universidad Autónoma de Puebla, México pp. 4 y 5.

Arrazola-Cárdenas, L., García-Nava, J.R., Robledo-Paz, A., Ybarra-Moncada, M.C., & Muratalla-Lúa, A. 2020. Sustratos y dosis de fertirrigación en la acumulación de Azúcares totales y el crecimiento de *Agave salmiana* (*Asparagaceae*). Polibotánica, (50), 109-118. Epub 25 de noviembre de 2020.<https://doi.org/10.18387/polibotanica.50.8>.

Bautista, M., & García, L., & Parra, LA, & Salcedo, R. 2001. Azúcares en agaves (*Agave tequilana* Weber) cultivados en el estado de Guanajuato. Acta Universitaria, 11 (1),33-38.

Burés S. Sustratos. Madrid: Ediciones Agrotécnicas, 1997. 342

Canovas, F.; Díaz, J.R. 1993. Cultivos Sin suelo. Curso Superior de Especialización. Ed. Instituto de Estudios Almerienses. Fundación para la Investigación Agraria en la Provincia de Almería. Almería.

Delaney TP, S Uknes, B Vernooij, L Friedrich, K Weymann, D Negrotto, T Gaffney, M Gutrella, H Kessmann, E ward & J Ryals. 1994. Un papel central del ácido salicílico en la resistencia a las enfermedades de las plantas. *Science* 266: 1247-1250.

Dempsey DA, J Shah y DF Klessig. 1999. Ácido salicílico y resistencia a enfermedades en plantas. *Revisiones críticas en ciencia de las plantas* 18: 547-575.

Domínguez Rosales, Manuel Salvador, & González Jiménez, Ma. de la Luz, & Rosales Gómez, Citlalli, & Quiñones Valles, César, & Delgadillo Díaz de León, Silvestre, & Fournier G., P. y Mondragón B., L. 2012. “Las bebidas mexicanas. Pulque, mezcal y tesgüino”. *Arqueología Mexicana*, Volumen XIX, número 114, Marzo – Abril de 2012, México. pp. 53-59.

García M. A. 2007. Los agaves en México. *Ciencias* 87. En línea <http://www.revistaciencias.unam.mx/images/stories/Articles/87/02/Los%20agaves%20de%20Mexico.pdf>. Consultado el 15 de enero de 2013.

García M. A. 2007. Los agaves en México. *Ciencias* 87. <http://www.revistaciencias.unam.mx/images/stories/Articles/87/02/Los%20agaves%20de%20Mexico.pdf>. Consultado el 15 de enero de 2013.

García, J., Méndez, J y Talavera, D. 2010. El género *Agave* spp. en México: principales usos de importancia socioeconómica y agroecológica. *RESPYN Revista Salud Publica y Nutrición Edición Especial*, Vol. 5, 111.

García-Mendoza, A. 1998. Con sabor a maguey. Guía de la colección nacional de agavaceas y nolináceas del jardín botánico del Instituto de Biología de la UNAM. ISBN 968-7365-07-2. Edit. Sistemas de Información Geográfica. S.A. de C.V.-UNAM.

García-Mendoza, A. J. 2011. Agaváceas, Flora del Valle de Tehuacán, Fascículo 88, Universidad Nacional Autónoma de México, México. 95 p.

Gentry S.H. 1982. Agaves of Continental North America. Univ. of Arizona Press. Tucson. 670 p.

Gunes, A., A. Inal, M. Alpaslan, F. Eraslan, E. G. Bagci, and N. Cicek. 2007. Salicylic acid induced changes on some physiological parameters symptomatic for oxidative stress and mineral nutrition in maize (*Zea mays* L.) grown under salinity. *J. Plant Physiol.* 164: 728-736.

Gutiérrez-Coronado, M. A., C. Trejo-López, and A. Larqué-Saavedra. 1998. Effects of salicylic acid on the growth of roots and shoots in soybean. *Plant Physiol. Biochem* 36: 563-565.

Guzmán, P. M. (1997). Aguardientes de México: Tequila, Mezcal, Charanda, Bacanora, Sotol. *Bebidas Mexicanas* 6(4) 37-40.

Guzmán, P. M. 1997. Aguardientes de México: Tequila, Mezcal, Charanda, Bacanora, Sotol. *Bebidas Mexicanas* 6(4) 37-40.

Hayat, Q., S. Hayat, M. Irfan y. A. Ahmad 2010. Efecto del ácido salicílico exógeno en un entorno cambiante: una revisión. *Reinar. Exp. Larva del moscardón.* 68: 14-25.

Hayat, Q., S. Hayat, M. Irfan, and A. Ahmad. 2010. Effect of exogenous salicylic acid under changing environment: Areview. *Environ. Exp. Bot.* 68: 14-25.

Khodary, S. E. A. 2004. Effect of salicylic acid on the growth, photosynthesis and carbohydrate metabolism in salt stressed maize plants. *Int. J. Agri. Biol.* 6: 5-8

Larcher, W. 2003. *Ecología vegetal fisiológica. Ecofisiología y fisiología del estrés de grupos funcionales.* Springer, Berlín.

Larqué-Saavedra, A. and R. Martín-Mex. 2007. Effects of salicylic acid on the bioproductivity of the plants. pp. 15-23. In: S. Hayat and A. Ahmad (eds.). *Salicylic acid, a plant hormone.* Springer publishers. Dordrech, The Netherlands.

López, M. G., Mancilla-Margalli, N. A. & Mendoza-Diaz, G. 2003. Molecular structures of fructans from *Agave tequilana* Weber var. azul. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51 (27), 7835-7840. DOI: 10.1021/jf030383v.

Mancilla-Margalli, N. A. & López, M. G. 2006. Water-soluble carbohydrates and fructan structure patterns from *Agave* and *Dasyilirion* Species. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54 (20), 7832-7839.

Martinez C, E Pons, G Prats & J León. 2004. El ácido salicílico regula el tiempo de floración y vincula las respuestas de defensa y el desarrollo reproductivo. *Plant Journal* 37: 209-17.

Martín-Mex, R., A. Nexticapán-Garcéz, and A. Larqué Saavedra. 2013. Potential benefits of salicylic acid in food production. pp. 299-313. In: S. Hayat, A. Ahmad, and M. N. Alyemeni (eds.). *Salicylic acid.* Springer publishers. Dordrech, The Netherlands.

Martin-Mex, R., S. Vergara-Yoisura, A. Nexticapán-Garcés, and A. Larqué-Saavedra. 2010. Application of low concentrations of salicylic acid increases the number of flowers in *Petunia hibrida*. *Agrociencia* 44: 773-778.

Martin-Mex, Rodolfo, Nexticapan-Garcéz, Ángel, Herrera-Tuz, Rubí, Vergara-Yoisura, Silvia, & Larqué-Saavedra, Alfonso. 2012. Efecto positivo de aplicaciones de ácido salicílico en la productividad de papaya (*Carica papaya*). Revista mexicana de ciencias agrícolas, 3(8), 1637-1643. Recuperado en 22 de marzo de 2023, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342012000800013&lng=es&tlng=es.

Mellado-Mojica, E. & López, M. G. 2012. Fructan metabolism in *A. tequilana* Weber blue variety along its developmental cycle in the field. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 60 (47), 11704-11713. DOI: 10.1021/jf303332n.

Miller, G. 1959. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. Analytical Chemistry, 31 (3). pp. 426-428. <https://doi.org/10.1021/ac60147a030>

Mireles Ordaz, Silvia Julieta, & Pérez Molphe Balch, Eugenio (2008). El cultivo in vitro como herramienta para el aprovechamiento, mejoramiento y conservación de especies del género agave. Investigación y Ciencia, 16(41),53-62. [fecha de Consulta 13 de Diciembre de 2020]. ISSN: 1665-4412. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=674/67404109>

Raskin I, UN Ehmann, WR Melander Y BJD Meeuse. 1987. Ácido salicílico: inductor natural de la producción de calor en los lirios de Arum. Science 237: 1602-2602.

Rivas-San Vicente, M. and J. Plasencia. 2011. Salicylic acid beyond defence: Its role in plant growth and development. J. Exp. Bot. 62: 3321-3338.

Rodríguez-García, María Florencia, Huerta-Espino, Julio, Villaseñor-Mir, Héctor Eduardo, Rivas-Valencia, Patricia, González-González, Miguel, Hortelano-

Santa Rosa, René, Robles-Yerena, Leticia, & Aranda-Ocampo, Sergio. 2020. Tratamiento químico en la semilla de trigo para disminuir la incidencia de bacterias. *Revista mexicana de fitopatología*, 38(2), 239-249. Epub 27 de noviembre de 2020. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2001-5>

Ruiz María. 2011. *Sobre mezcales*. Ciudad de México.

Salas, J y Hernández, L. (2015, septiembre). Mezcal cupreata, fuente de admiración. *Revista Ciencia*, Vol. 66 número, pág.: 42-43.

Sánchez-Mendoza, S., y Bautista-Cruz, A. 2022. Efecto de fertilizantes de liberación lenta y fitohormonas en el crecimiento de *Agave angustifolia* Haw. *Entreciencias: Diálogos En La Sociedad Del Conocimiento*, 10(24). <https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2022.24.82738>

Shah J. 2003. El bucle del ácido salicílico en la defensa de las plantas. *Opinión actual en biología vegetal* 6: 365–371.

Taiz L. y Zeiger E. 2002. *Fisiología de las plantas*. Asociados Sinauer, Inc., Editores, Sunderland, Massachusetts.

Téllez, M. P. 1998. El conocimiento, una etapa importante de la producción del tequila. *Bebidas mexicanas* 7(1) 19-20.

Trujillo R. 2002. Aviso de aprovechamiento de maguey mezcalero en el Ejido El Venado, del Municipio de Nombre de Dios, Dgo. Consultor Forestal E-Mail ucodefo@logicnet.com.mx

Tucuch Haas, Cesar J., Alcántar González, Gabriel, & Larqué Saavedra, Alfonso. 2015. Efecto del ácido salicílico en el crecimiento de la raíz y biomasa total de plántulas de trigo. *Terra Latinoamericana*, 33(1), 63-68. Recuperado en 25 de marzo de

2023, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792015000100063&lng=es&tlng=es.

Vanderstraeten D, L Chaerle, G Sharkov, H Lambers & M Van Montagu. 1995. El ácido salicílico mejora la actividad de la vía alternativa de respiración en las hojas de tabaco e induce la termogenicidad. *Planta* 196: 412-419.

Vela, E. 2014. "El maguey". *Arqueología Mexicana*. Edición especial 57, agosto de 2014, México. pp. 42-65.

Wesche, E. P. (2000). *Química de Alimentos de Origen Vegetal*. Universidad de las Américas - Puebla consultado en Internet: <http://webserver.pue.udlap.mx/~pwesche/3.4.htm>

Wildermuth MC, J Dewdney, G Wu Y Fm ausubel. 2001. Se requiere isocorismato sintasa para sintetizar ácido salicílico para la defensa de las plantas. *Nature* 414: 562-565.

Winter K. y Smith J.A.C. 1996. Una introducción al crasuláceo metabolismo ácido: principios bioquímicos y diversidad biológica. En: Winter K. y Smith J.A.C. Eds. *Ácido crasuláceo Metabolismo*. Bioquímica, ecofisiología y evolución, págs. 1-13, Springer, Berlín.

Yu D, C Chen & Z Chen. 2001. Evidencia de un papel importante de las proteínas de unión al adn wrky en la regulación de la expresión del gen NPR1. *Plant Cell* 13: 1527-1539.