



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

**PROGRAMA DE POSTGRADO EN RECURSOS GENÉTICOS Y
PRODUCTIVIDAD**

FISIOLOGÍA VEGETAL

CRECIMIENTO Y FISIOLOGÍA DE MAGUEY PULQUERO (*Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck) OBTENIDO POR SEMILLA

SONIA TERESA CRUZ VASCONCELOS

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRÍA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2019

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACION

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe Sonia Teresa Cruz Vasconcelos, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser participe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor Dra. Lucero del Mar Ruiz Posadas, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis Crecimiento y fisiología de maguey pulquero (*Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck) obtenido por semilla

y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 27 de febrero de 2019



Firma del
Alumno (a)



Dra. Lucero del Mar Ruiz Posadas
Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis titulada: **Crecimiento y fisiología de maguey pulquero (*Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck) obtenido por semilla** realizada por la alumna: **Sonia Teresa Cruz Vasconcelos** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS

RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD

FISIOLOGÍA VEGETAL

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERA


Dra. Lucero del Mar Ruiz Posadas

ASESOR


Dr. Edmundo García Moya

ASESOR


Dr. Manuel Sandoval Villa

Montecillo, Texcoco, Estado de México, febrero de 2019.

Crecimiento y fisiología de maguey pulquero (*Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck) obtenido por semilla

**Sonia Teresa Cruz Vasconcelos, M. en C.
Colegio de Postgraduados, 2019**

RESUMEN

La reproducción promueve la diversidad genética en maguey y aunado a un adecuado manejo en la fertilización, podría incrementar su rendimiento. El objetivo de este trabajo fue determinar la influencia del abonado orgánico y la fertilización química en el crecimiento de tres variantes de *Agave salmiana* (ssp. *crassispina*, var. *salmiana* y var. *ferox*). Las plantas fueron donadas por la Protectora de Bosques del Estado de México, y plantadas en San Bartolomé Actopan, municipio de Temascalapa. Las variables de crecimiento que se evaluaron cada mes en plantas de entre 2 a 4 años en 2 etapas, fueron: altura, diámetro de planta, longitud y despliegue de pencas). Las variables fisiológicas consideradas fueron: porcentaje de ácido málico, contenido de sólidos solubles totales (SST) y tasa de intercambio de CO₂. Los datos se procesaron con el programa SAS bajo el modelo lineal generalizado.

El abonado orgánico favoreció el crecimiento de las variantes de *A. salmiana*, en especial la ssp. *crassispina* que obtuvo los mejores valores para cada una de las variables estudiadas; le siguen las plantas con fertilización química; en este tratamiento la var. *salmiana* se vio favorecida en la emisión de hijuelos. El contenido nutrimental, la var. *salmiana* cultivadas con abono orgánico y fertilización química obtuvieron los mayores contenidos de macronutrientes.

Los factores ambientales como la humedad del suelo afectan la tasa de intercambio de CO₂, con significancia entre tratamientos y variantes de *A. salmiana*.

El porcentaje de ácido málico y Sólidos Solubles Totales no fue significativo entre las variantes de agave ni entre tratamientos.

El uso de abono orgánico en el cultivo del maguey se considera recomendable como alternativa ecológica y económica.

Palabras clave: fertilización, abono, tasa de intercambio de CO₂, materia seca, rizomas, contenido nutrimental.

Growth and physiology of pulque maguey (*Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck) obtained by seed

**Sonia Teresa Cruz Vasconcelos, M. en C.
Colegio de Postgraduados, 2019**

ABSTRACT

Reproduction promotes genetic diversity in agave and, together with an adequate management in fertilization, could increase its yield. Therefore, the objective of this work was to determine the influence of manure and fertilization on the growth of three variants of *Agave salmiana* (ssp, *crassispina*, var. *salmiana* and var. *ferox*). The plants were donated by the Protectora de Bosques del Estado de México, and planted in San Bartolomé Actopan, municipality of Temascalapa. The growth variables that were evaluated each month in plants between 2 to 4 years in 2 stages, were: height, plant diameter, length, deployment and number of stalks. The physiological variables considered were: percentage of malic acid, total soluble solids (TSS) and CO₂ exchange rate. The data was analyzed with the SAS program under the generalized linear model.

The manure favored the growth of the variants of *A. salmiana*, especially the ssp. *crassispina* that obtained the best values for each of the variables studied; followed by plants cultivated with fertilization, in this treatment var. *salmiana* was favored in the emission of rhizomes. In nutritional content, var. *salmiana* grown in both mineral and organic fertilization obtained the highest macronutrient contents.

The environmental factors as the humidity of the soil affected the CO₂ exchange rate, with significance among treatments and variants of *A. salmiana*.

The percentage of malic acid and Total Soluble Solids was not significant between the agave variants neither between treatments

The use of organic fertilization in the cultivation of maguey is recommended as an ecological and economic alternative.

Keywords: fertilization, CO₂ exchange rate, dry matter, rhizomes, nutritional content.

AGRADEZCO A:

El Colegio de Postgraduados, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento para realizar mis estudios de maestría

La Dra. Lucero del Mar Ruiz Posadas, por su disposición, paciencia, asesorías, por dirigir este proyecto y sus enseñanzas tanto en lo académico y personal. ¡GRACIAS TOTALES!

Al Dr. Edmundo García Moya por su apoyo, esmero en la revisión del escrito y consejos en todo este trayecto

Al Dr. Manuel Sandoval Villa por su apoyo, esmero en la revisión del escrito, sus enseñanzas y motivación

Al Dr. Nicacio Cruz Huerta por su apoyo en la medición de fotosíntesis, sus atinadas observaciones en esta investigación y su disposición

Al Dr. Mario Luna por sus atinadas observaciones como sinodal

Al Dr. Abel Muñoz por su asesoría en la parte estadística y sus enseñanzas

Al M. en C. Antonio García por sus consejos

A todos los profesores que contribuyeron en mi formación académica

Al químico Cecilio por permitirme trabajar en el laboratorio, por su apoyo y amistad.

A la M. en C. Aracely Gaytán por motivarme siempre

A la familia del Díaz, en especial Don Martín, Don Pablo y Doña Maguito, por permitirme trabajar en sus parcelas y abrirme las puertas de su hogar

Al señor Ignacio Zarco y Maribel por su amabilidad y apoyo en todo momento

A mis mamitas Susana Vasconcelos y Eusebia Bautista por todo su amor y apoyo

A mi esposo Víctor Rodríguez por cumplir una meta más juntos y su apoyo en el trabajo de campo

A mi hermano Bernardo por sus sonrisas y apoyo moral en todo momento

A mis amigos Nuria, Anatihu, Isabel, Laura, Garde, Juanito, Pablo y Vicente

CONTENIDO

	Página
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
CONTENIDO	vii
LISTA DE CUADROS	xi
LISTA DE FIGURAS	xiv
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos.....	2
General.....	2
Específicos	3
1.2 Hipótesis.....	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1 Generalidades de <i>Agave salmiana</i>	4
2.2 Descripción taxonómica de las variantes de <i>Agave salmiana</i>	5
2.2.1 <i>Agave salmiana</i> Otto ex Salm-Dyck.....	6
2.2.2 <i>Agave salmiana</i> Otto ex Salm-Dyck var. <i>salmiana</i> Gentry	8
2.2.3 <i>Agave salmiana</i> Otto ex Salm. ssp. <i>crassispina</i> (Trel.) Gentry	10
2.2.4 <i>Agave salmiana</i> Otto ex Salm, var. <i>ferox</i> (Koch) Gentry.....	11
2.3 Distribución.....	13
2.4 Importancia económica del maguey	14
2.4.1 Historia del pulque	14
2.4.2 Situación nacional del pulque.....	17
2.4.3 Exportación del pulque.....	21
2.5 Otros aprovechamientos del maguey	22

2.5.1	Cutícula de maguey	22
2.5.2	Pencas	23
2.5.3	Insectos asociados.....	24
2.5.4	Jarabe (miel) de agave	25
2.5.5	Pulcatta	26
2.6	Formas de propagación.....	26
2.6.1.	Rizomas	27
2.6.2	Semilla	28
2.7	Fisiología y metabolismo de <i>Agave salmiana</i>	29
2.7.1	Fotosíntesis en plantas MAC	31
2.7.2	Ciclo diario de la fotosíntesis de las plantas MAC.....	32
2.7.3	Factores ambientales que afectan la fotosíntesis	34
2.7.4	Métodos para determinar fotosíntesis	36
2.8	Nutrición vegetal	38
2.8.1	Nutrientes.....	39
2.8.2	Fertilización química	39
2.8.3.	Abonado.....	40
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	41
3.1	Descripción del área de estudio.....	41
3.1.1	Clima.....	42
3.1.2	Suelo	42
3.2	Antecedentes del material vegetal.....	42
3.3	Establecimiento de la plantación en campo.....	43
3.3.1	Análisis nutrimental del suelo.....	43
3.4	Demanda nutrimental de <i>Agave salmiana</i>	44

3.5 Tratamientos y diseño experimental	45
3.6 Dosis de aplicación de abonado orgánico y fertilización química	45
3.6.1 Abonado orgánico	46
3.6.2 Fertilización química	46
3.7 Variables evaluadas	47
3.7.1 Variables de crecimiento	47
3.7.2 Variables fisiológicas.....	49
3.7.3 Análisis químico del material vegetal	53
3.8 Análisis estadístico	54
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	55
4.1 Variables de crecimiento	55
4.1.1 Primera etapa: junio a diciembre de 2017	55
4.1.2 Segunda etapa: enero a septiembre de 2018	59
4.1.3 Peso fresco, seco, materia seca	69
4.1.4 Área foliar, índice de área foliar	71
4.1.5 Rizomas emergentes y no emergentes.....	72
4.2 Variables fisiológicas	76
4.2.1 Acidez titulable	76
4.2.2 Grados Brix	80
4.2.3 Tasa de intercambio de CO ₂ en condiciones de riego	81
4.2.4 Tasa de intercambio de CO ₂ en condiciones de baja humedad en el suelo ..	87
4.3. Estado nutrimental en pencas	91
4.3.1 Concentración nutrimental en pencas	91
4.3.2 Contenido nutrimental en <i>Agave salmiana</i>	96
4.4 Actividades de mantenimiento	98

4.4.1 Deshierbe.....	98
4.4.2 Chinicuiles.....	98
4.5. Costos	99
V. CONCLUSIONES	101
VI. BIBLIOGRAFÍA.....	101

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Elementos esenciales y benéficos para las plantas superiores.	39
Cuadro 2. Propiedades físicas y químicas del suelo de las parcelas experimentales en San Bartolomé, Temascalapa, Estado de México.....	44
Cuadro 3. Disponibilidad de nutrimentos en el suelo para <i>A. salmiana</i>	44
Cuadro 4. Demanda y requerimiento de los principales elementos para <i>A. salmiana</i>	45
Cuadro 5. Total aplicado por abonado con cerdaza.	46
Cuadro 6. Contenido típico de nutrientes en el abonado orgánico (estiércol de cerdo) kg/t o kg/m ³ (peso fresco).	46
Cuadro 7. Total aplicado en tratamiento con fertilización química.	46
Cuadro 8. Variables de crecimiento evaluadas en maguey.....	47
Cuadro 9. Unidades muestrales por variantes de <i>Agave salmiana</i> con diferentes tratamientos.	54
Cuadro 10. Comparación de medias de las variables de crecimiento por tratamiento en <i>Agave salmiana</i>	56
Cuadro 11. Promedio de pencas desplegadas por mes de agosto a diciembre de 2017 por efecto de los tratamientos de fertilización en <i>Agave salmiana</i>	57
Cuadro 12. Grados de libertad y valores de P del efecto de los tratamientos, variantes de <i>Agave salmiana</i> , mes y sus interacciones sobre variables del crecimiento.	59
Cuadro 13. Comparación de medias para variables de crecimiento.	60
Cuadro 14. Medias de altura (cm) de las variantes de <i>Agave salmiana</i> por efecto de los tratamientos.....	62
Cuadro 15. Medias de diámetro (cm) de la planta de las variantes de <i>Agave salmiana</i> por efecto de los tratamientos.....	62
Cuadro 16. Medias en longitud de pencas (cm) de las variantes de <i>Agave salmiana</i> por efecto de los tratamientos.....	63
Cuadro 17. Medias en número de pencas de las variantes de <i>A. salmiana</i> por efecto de los tratamientos.....	64

Cuadro 18. Medias en pencas desplegadas por variantes de <i>Agave salmiana</i> por efecto de los tratamientos.	64
Cuadro 19. Pencas desplegadas de febrero a septiembre de 2018.....	65
Cuadro 20. Peso fresco, peso seco y materia seca en <i>Agave salmiana</i>	69
Cuadro 21. Índice de área foliar, materia seca por hectárea por cada tratamiento.	71
Cuadro 22. Hijuelos emitidos hasta septiembre de 2018.	72
Cuadro 23. Número de rizomas emergentes y no emergentes por planta.	74
Cuadro 24. Longitud de raíz, proporción parte aérea (PPA) y radical (PPR) respecto al peso total.	74
Cuadro 25. Porcentaje de ácido málico (% A) y pH por temporada para tratamientos aplicados al considerar las tres variantes de <i>Agave salmiana</i>	77
Cuadro 26. Porcentaje de ácido málico (% A) y pH por variantes de <i>A. salmiana</i> con los tres tratamientos en la temporada de sequía.....	77
Cuadro 27. Porcentaje de ácido málico (% A) y pH por variantes de <i>Agave salmiana</i> con los tres tratamientos en temporada de lluvias.	78
Cuadro 28. Grados Brix por tratamiento y variantes de <i>Agave salmiana</i>	80
Cuadro 29. Efecto del tratamiento y la hora de medición sobre la tasa de intercambio de CO ₂ (μmol m ⁻² s ⁻¹) en <i>Agave salmiana</i> , con humedad en el suelo a capacidad de campo.....	82
Cuadro 30. Efecto del tratamiento y la hora de medición sobre la tasa de intercambio de CO ₂ (μmol m ⁻² s ⁻¹) en variantes de <i>Agave salmiana</i> con humedad en el suelo a capacidad de campo.	82
Cuadro 31. Efecto del tratamiento y la hora de medición sobre la tasa de intercambio de CO ₂ (μmol m ⁻² s ⁻¹) en <i>Agave salmiana</i> con humedad del suelo por abajo del PMP.	87
Cuadro 32. Efecto del tratamiento y la hora de medición sobre la tasa de intercambio de CO ₂ (μmol m ⁻² s ⁻¹) por variantes de <i>Agave salmiana</i> con humedad del suelo por abajo del PMP.....	88
Cuadro 33. Concentración de nutrimentos en <i>Agave salmiana</i> por efecto del tratamiento.	92

Cuadro 34. Concentración de nutrimentos en las tres variantes de <i>Agave salmiana</i>	92
Cuadro 35. Concentración nutrimental en <i>Agave salmiana</i> por efecto del tratamiento.	94
Cuadro 36. Contenido nutrimental, en gramos por planta (g/planta), de tres variantes de <i>Agave salmiana</i> con abonado, fertilización y testigo.	96
Cuadro 37. Costos por fertilización química en tres variantes de <i>Agave salmiana</i>	100
Cuadro 38. Costos por abonado orgánico en tres variantes de <i>Agave salmiana</i>	100

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. <i>Agave salmiana</i> Otto ex Salm-Dyck var. <i>salmiana</i> fotografiada A) cerca de Tepetitlán, Jalisco (Gentry, 1982), B) en San Bartolomé, Temascalapa (2018).....	9
Figura 2. <i>Agave salmiana</i> Otto ex Salm. ssp. <i>crassispina</i> fotografiada A) cerca de Saltillo, Coahuila (Gentry, 1982) B) en San Bartolomé, Temascalapa (2018).....	11
Figura 3. <i>Agave salmiana</i> var. <i>ferox</i> fotografiada A) en jardín botánico Huntington, San Marino, California (Gentry, 1982), B) en San Bartolomé, Temascalapa (2018).	13
Figura 4. Superficie con plantaciones de magueyes pulqueros en los estados de Hidalgo, Tlaxcala y México en el periodo de 1940 a 2012 (Aguilar <i>et al.</i> , 2014).	18
Figura 5. Producción de pulque a nivel nacional de los principales estados productores durante el período 2003 a 2016 (SIAP, 2018).	19
Figura 6. Valor de producción de pulque a nivel nacional y del Estado de México durante el periodo comprendido entre 2003 y 2016.	20
Figura 7. Metabolismo del ácido crasuláceo (MAC). Separación temporal de la absorción de CO ₂ (Taiz and Zeiger, 2010).	32
Figura 8. Curva de asimilación de CO ₂ de una planta MAC bien irrigada. Se muestran las cuatro fases típicas de la fotosíntesis MAC con las enzimas fijadoras de CO ₂ correspondientes.	34
Figura 9. Localización de las parcelas experimentales en el Poblado de San Bartolomé, Temascalapa (INEGI, 2009).	41
Figura 10. Variables de crecimiento medidos en maguey.	48
Figura 11. Peso fresco, rizomas y secado de maguey.	49
Figura 12. Materiales empleados para la cuantificación de ácido málico.	51
Figura 13. Maceración del meyolote para la toma de grados Brix.	52

Figura 14. Variables de crecimiento en plantas de <i>Agave salmiana</i> , con tres tratamientos. Cada punto es el promedio de 25 repeticiones. A) Altura en cm, B) Diámetro en cm, C) Longitud de penca recién desplegada en cm, D) Número de pencas. Las barras verticales indican el error estándar, n=25.	56
Figura 15. Efecto de la interacción T* Vr sobre las variables de crecimiento; A) altura de la planta; B) diámetro de la planta; C) Longitud de penca y D) número de pencas. Promedio de 11 repeticiones mensuales de enero a septiembre de 2018. Las barras verticales indican el error estándar, n=11.	66
Figura 16. Efecto de la interacción T*M sobre las variables de crecimiento; A) altura de la planta; B) diámetro de la planta; C) longitud de penca y D) número de pencas. Cada punto es el promedio de 11 repeticiones mensuales de enero a septiembre de 2018.	68
Figura 17. A) Raíces y rizomas no emergentes, B) Hijuelos emergiendo con 3-4 cm, C) Hijuelo con las primeras 3 pencas desplegadas, D) Hijuelos con pencas desarrolladas y extendidas, E) <i>A. salmiana</i> ssp. <i>crassispina</i> con 4 hijuelos completamente desarrollados.	73
Figura 18. Tasa de intercambio de CO ₂ en tres variantes de <i>Agave salmiana</i> con abonado orgánico con humedad en el suelo a capacidad de campo. Las barras verticales indican el error estándar, n=3.	83
Figura 19. Tasa de intercambio de CO ₂ en tres variantes de <i>Agave salmiana</i> con fertilización química con humedad en el suelo a capacidad de campo. Las barras verticales indican el error estándar, n=3.	84
Figura 20. Tasa de intercambio de CO ₂ en tres variantes de <i>Agave salmiana</i> testigo con humedad en el suelo a capacidad de campo. Las barras verticales indican el error estándar, n=3.	85
Figura 21. Tasa de intercambio de CO ₂ en tres variantes de <i>A. salmiana</i> con abono orgánico y con humedad en el suelo por debajo de PMP. Las barras verticales indican el error estándar, n=3.	88

Figura 22. Tasa de intercambio de CO ₂ en tres variantes de <i>Agave salmiana</i> con fertilización química y con humedad en el suelo por debajo de PMP. Las barras verticales indican el error estándar, n=3.	89
Figura 23. Tasa de intercambio de CO ₂ en tres variantes de <i>Agave salmiana</i> testigo y con humedad en el suelo por debajo de PMP. Las barras verticales indican el error estándar, n=3.	90
Figura 24. <i>Agave salmiana</i> var. <i>salmiana</i> abonada con presencia de chinicuiles.	99

I. INTRODUCCIÓN

El maguey pulquero (*Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck) se cultiva desde la época prehispánica. Es un recurso cuyos productos se han empleado en la alimentación, vestimenta, cultura y rituales de los pueblos nativos. El pulque, el principal derivado de esta planta era considerado como “la bebida de los dioses” ya que su consumo se reservaba para sacerdotes y en ocasiones especiales. En la contemporaneidad, la planta sigue siendo de importancia gastronómica, económica y cultural para los pueblos originarios del altiplano mexicano que comprende los estados de Tlaxcala, Hidalgo, Puebla y México, ya que de esta maravillosa planta se obtienen diversos productos, en particular agua miel, para obtener el pulque.

El maguey pulquero formó parte fundamental de las haciendas de españoles durante la conquista, para la venta del pulque a las clases bajas. Posterior a la revolución mexicana, hubo un descenso en las plantaciones de maguey y en la producción del pulque. La “bebida de los dioses” se ha vuelto importante en los sectores de clase media o alta como una curiosidad gastronómica a últimas fechas y para la celebración de ferias en honor al mismo, y desde los años 90 se exporta a Europa y E. UU., al ser considerada una bebida única y original. Sin embargo, se requiere más publicidad para hacer competencia con bebidas introducidas, como la cerveza, el ron, y las bebidas nacionales destiladas, muy populares en la actualidad: el mezcal y el tequila. Derivado del descenso en la producción de esta bebida, el maguey pulquero se considera en alguna categoría de riesgo, protección especial o en peligro de extinción (Becerril, 2015; Mendoza-Mendoza *et al.*, 2016) aunque en el listado de la NOM-059 *Agave salmiana* no está en alguna categoría de riesgo. Sin embargo, la superficie plantada disminuyó más del 80 % desde 1940 a 2012 (Aguilar *et al.* 2014).

El maguey, vale la pena mencionarlo, no sólo es importante por sus derivados, sino que juega un papel ecológico para la conservación de suelos y la fauna. Además, debido a su metabolismo fotosintético MAC, la planta crece en condiciones ambientales secas y muy secas, donde la precipitación es escasa, las temperaturas son extremas, los suelos

son someros y con baja fertilidad (Escamilla, 2011), por lo que su cultivo es una alternativa ante el panorama del cambio climático global.

Un aspecto muy debatido y polémico es la propagación de esta especie, ya que la forma más empleada es por hijuelos debido a la facilidad en el manejo agronómico (Gentry, 1982; Ávila, 2010). Se creía que los hijuelos eran individuos genéticamente homogéneos, sin embargo, se ha demostrado la existencia de variabilidad genética, ya que los magueyes tienen procesos de hibridación, poliploidía, multiplicación, y mutaciones somáticas que heredan a sus descendientes, lo que representa una ventaja evolutiva importante (Lara-Ávila, 2005; García-Mendoza, 2007). Al margen de las ventajas de la propagación por hijuelos de rizoma, la reproducción ha sido mínima o casi nula al implicar la colecta de semillas, a pesar de la recombinación genética que se da a través de este proceso (Ramírez-Tobías *et al.*, 2011).

La fertilización es un aspecto importante en las plantas cultivadas ya que incrementa la biomasa y mejora la calidad nutritiva del agua miel. Se tiene conocimiento que en el maguey pulquero, es una práctica poco común (Aguilar *et al.*, 2014), que es necesario estudiar. En este trabajo se evaluó el efecto del abonado orgánico y la fertilización química sobre el crecimiento de tres variantes de *Agave salmiana* obtenidos por semilla, con lo cual se pretende reducir el tiempo de cosecha y motivar a los productores a incrementar la superficie cultivada.

1.1 Objetivos

General

Determinar la influencia del abonado y la fertilización en el crecimiento de variantes de *Agave salmiana* obtenidas por semilla, establecidos en campo en agosto de 2016.

Específicos

- 1) Determinar el mejor tratamiento reflejado por su efecto en las variables de crecimiento.
- 2) Determinar el número de hijuelos producidos por planta durante la investigación.
- 3) Evaluar actividad fotosintética en las diferentes variantes de *Agave salmiana*.
- 4) Determinar acidez tisular en las diferentes variantes de *Agave salmiana*.
- 5) Determinar el contenido nutrimental en pencas de las variantes de *Agave salmiana* cultivadas con tres tratamientos.

1.2 Hipótesis

Ho 1: Las plantas tratadas con fertilización química tendrán mayor crecimiento que las abonadas y el testigo.

Ho 2: Las plantas tratadas con fertilización química tendrán más producción de hijuelos que las no fertilizadas.

Ho 3: La actividad fotosintética difiere de acuerdo al tratamiento y variante de *Agave salmiana*.

Ho 4: La acidez tisular será mayor en plantas con fertilización química comparadas, luego las que recibieron abonado orgánico y las plantas testigo las menos favorecidas.

Ho 5: La concentración nutrimental en hojas de las variantes de *A. salmiana* fertilizadas estará dentro de los niveles de suficiencia, seguido de las que crecieron con abono orgánico.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Generalidades de *Agave salmiana*

La palabra “maguey” es de origen caribe (taíno) y significa planta, es el nombre genérico que se aplica desde México hasta Venezuela a las especies del género *Agave* (Aguirre *et al.*, 2001). El nombre agave parece estar relacionado con la diosa Mayahuel por lo que es probable que los conquistadores introdujeron el término. En la actualidad, la mayoría de las palabras para la planta, partes de ella y algunos utensilios que emplean en el proceso de capado, raspado y elaboración del pulque derivan en su mayoría del náhuatl como: maguey (metl), quiote (quiyotl –tallo de la planta), mixiote (xiotl-cutícula), meyolote (yolotl-corazón), pulque (polihuque – descompuesto), entre otros términos (Aguirre *et al.*, 2001; Erlwein *et al.*, 2013).

La palabra agave proviene del griego y significa “admirable”. Fue propuesto por primera vez en 1753 por el naturalista Carlos Linneo (Nobel, 1998), para plantas con pencas suculentas, acomodadas en espiral alrededor de un tallo corto, las hojas con bordes de espinas marginales y una terminal en el ápice.

El género *Agave* es endémico de América, en especial de México de donde fue llevado a otros países por su potencial de aprovechamiento (Gentry, 1982 y Nobel, 1998). Pertenece a la familia Asparagaceae (antes Agavaceae) y subfamilia Agavoidea. México es el centro primario de riqueza y distribución, extendiéndose a la zona adyacente del sur de Estados Unidos. La Familia cuenta con 9 géneros y 340 especies. El género *Agave* está constituido por 200 especies, de las cuales México tiene 159 y de éstas, 119 son endémicas (74 %). En el Valle de Tehuacán-Cuicatlán se encuentran 25 especies y 4 taxa infraespecíficos de las cuales 7 especies son endémicas (García-Mendoza, 2007 y 2011).

Los agaves han formado parte de la dieta humana desde hace 9000 años (Nobel, 1998) y junto con otras especies propiciaron el desarrollo agrícola de las culturas ahí establecidas; y es probable que en el proceso de su evolución de planta silvestre a cultivada, ocurrieron nuevas combinaciones genéticas. La difusión del cultivo de agave desde su núcleo original en las tierras altas mesoamericanas ocurrió con rapidez

después de la conquista. Cuando los españoles comenzaron la colonización de las regiones más septentrionales, como Durango y Saltillo, llevaron consigo a la gente náhuatl como intérpretes, trabajadores y agricultores. Los hacendados establecieron el cultivo de maguey que aún persiste como la franja norte del complejo de pulque (Gentry, 1982).

2.2 Descripción taxonómica de las variantes de *Agave salmiana*

El maguey pulquero pertenece al orden Asparagales, familia Asparagaceae, subfamilia Agavoidea y del género *Agave*. En el caso específico de magueyes pulqueros, Gentry (1982) agrupó en la sección *Salmianae* los siguientes: *Agave macroculmis* Tod., *A. mapisaga*, *A. mapisaga* var. *lisa*, *A. salmiana* var. *salmiana*, *A. salmiana* var. *angustifolia*, *A. salmiana* var. *ferox*, *A. salmiana* ssp. *crassispina* y *A. tecta* Trel.

Granados (1993) destaca que entre las poblaciones clonales de maguey, la variación entre individuos es causada por el medio, reflejado en el número de pencas. El género *Agave* representa un problema desde el punto de vista taxonómico por su gran variación genotípica y fenotípica dentro de la población y en la misma planta; el número de cromosomas difiere acorde a la edad y las diferentes partes de la planta. Aunado a estas variaciones, García-Mendoza (2011) destaca que la abundancia de los nombres se debe a la plasticidad que presenta la especie, producto de la domesticación a lo largo de los años, además de la cruce de especies cultivadas y silvestres, lo que dificulta la identidad de las especies. El autor reconoce únicamente dos subespecies: *A. salmiana* subsp. *tehuacanensis* (en este trabajo *A. salmiana* var. *ferox*) y *A. salmiana* subsp. *salmiana* (*A. salmiana* var. *salmiana*).

Mora-López *et al.* (2011) llevaron al cabo exploraciones botánicas; registraron 47 variantes de *Agave salmiana*, destacan que esta especie mostró variabilidad morfológica más amplia y sus variantes se encontraron en ambientes con distinto grado de humanización, desde agostaderos de uso múltiple hasta plantaciones y áreas agrícolas, además de multiplicidad de usos. Por otro lado, Alfaro-Rojas *et al.* (2007) analizaron seis poblaciones de magueyes pulqueros del Nororiente del Estado de México, con el empleo de marcadores moleculares variante RAPD (Polimorfismos en el ADN Amplificados al

Azar) y algunas variables morfológicas para determinar la diversidad genética entre y dentro de las mismas. Encontraron que los magueyes 'Manso' como 'Ayoteco' se clasifican como *Agave salmiana*, variedades "salmiana".

Romero (2018) caracterizó morfológica y molecular cuatro etnotaxa de maguey pulquero: Ayoteco, Chalqueño, Manso y Púa Larga del municipio de Nanacamilpa, Tlaxcala. Los resultados mostraron variabilidad genética entre los etnotaxa del 57.64 % y dentro de los etnotaxa de 42.36 %; Resalta que las características morfológicas más importantes fueron, longitud de penca, altura de la roseta, longitud de la espina terminal y anchura de la penca y que los marcadores moleculares ISSR (Inter Secuencias Simples Repetidas) son adecuados para identificar variación intraespecífica en *A. salmiana*.

Derivado de la dificultad para una designación unánime de las variantes de *Agave salmiana*, se optó por considerar la clasificación de Gentry (1982), ya que las descripciones de carácter morfológico coincidieron con las características de los ejemplares.

2.2.1 *Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck

Son plantas rosetófilas acaules o subcaulescentes, coloniales; rosetas densas a laxas, (1.5-) 2.0-2.8 m alto, 2.0-5.0 m diámetro. **Pencas** 30-70 por individuo, (0.5-) 1.0-2.2 m largo, 20.0-35.0 cm ancho, lanceoladas, ampliamente lanceoladas u oblanceoladas, succulentas, erectas a recurvadas, cóncavas hacia la parte media, ápice acuminado, a veces con una curvatura sigmoidea, verde opaco, verde claro, verde-amarillento a verde-glaucos, en ocasiones haz con tonos diferentes simulando franjas, margen recto, repando o crenado, mamilas inconspicuas a prominentes hacia la parte media, dentado, dientes 0.5-2.0 cm largo, 1.0-2.0 cm ancho, en ocasiones las bases son tan amplias que forman un margen córneo continuo, rectos o más o menos recurvados, pardo oscuros, grisáceos a negruzcos, distantes entre sí 2.0-5.0 cm en la parte media de la penca, espina terminal 4.0-8.0(-12.0) cm largo, 0.5-1.5 cm ancho, robusta, angosta a ampliamente acanalada en el haz, en ocasiones decurrente 12.0-17.0 cm, ocasionalmente aquillada en el envés. **Inflorescencias** panículas muy laxas, con 6-25 umbelas, contorno piramidal, (3.0-)4.0-8.0 m alto, fértil en el tercio o el cuarto superior, ramas primarias hasta 1.0 m largo,

también ramillas secundarias, terciarias y a veces cuaternarias; pedúnculo verdoso; brácteas (18.0-) 25.0-45.0 cm largo, (6.0-)10.0-18.0 cm ancho en la base, carnosas e imbricadas o coriáceas y separadas, deltoides, margen entero o con algunos diente-cillos menores 1.0 mm largo, espina terminal 0.5-3.0 cm largo, parda a grisácea; pedicelos 0.5-2.5 cm largo. **Flores** (5.0-) 6.0-9.0(-11.0) cm largo, infundibuliformes, amarillentas; **tépalos** 2.0-3.0 cm largo, 5.0-8.0 mm ancho, oblongos, angostos hacia el ápice, margen involuto, ápice curvado hacia adentro en anthesis, gruesos, los externos ligeramente más largos que los internos, estos últimos aquillados, cuello 5.0-10.0 mm largo, tubo del perigonio 1.0-2.0 (-2.5) cm largo, 1.3-2.0 cm diámetro en la porción distal, surcado; **estambres** con filamentos 5.0-8.0 cm largo, insertos a la mitad o el cuarto superior o en la boca del tubo, anteras 2.0-3.5 cm largo, 1.5-2.0 mm ancho, amarillentas; **ovario** 3.0-5.0(-6.0) cm largo, 4.0-10.0 mm ancho, cilíndrico, estilo 4.0-10.0 cm, estigma clavado. **cápsulas** 6.0-7.0 cm largo, 2.0-3.0 cm ancho, oblongas, rostradas, leñosas; **semillas** 7.0-9.0 mm largo, 5.0-7.0 mm ancho, negras, ala muy angosta (García- Mendoza, 2011).

Gentry (1982) menciona 4 categorías infraespecíficas de *Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck, 3 variedades y una subespecie: **A. salmiana** Otto ex Salm-Dyck **var. angustifolia** Berger, **A. salmiana** Otto ex Salm-Dyck **subsp. crassispina** (Trel.) Gentry, **A. salmiana var. ferox** (K. Koch) Gentry y **A. salmiana** Otto ex Salm-Dyck **var. salmiana** Gentry; en la presente investigación se estudiaron 3 variantes de *Agave salmiana* mencionados a excepción de la var. *angustifolia*.

Clave para variedades y subespecies de *Agave salmiana* (Gentry, 1982)

- 1 Plantas masivas; tallos gruesos; pencas de 1-2 m de largo; 3
flores más grandes, 90-110 mm de largo
- 1' Plantas más pequeñas con troncos más estrechos; pencas 3`
generalmente no más de 1 m de largo; flores más pequeños,
70-90 mm de largo
- 2 Pencas verdes, ampliamente lanceoladas ----- **var. salmiana**
--
- 2' Pencas de color gris claro glauco, lineal ----- **var. angustifolia**
--
- 3 Rosetones urceolados, pencas de color verde brillante,
salientes, cortos acuminados, los márgenes cremados, con
dientes grandes y anchos; flores relativamente esbeltas, el tubo
var. ferox

15 mm de ancho-----

- 3' Plantas variables, las rosetas no típicas urceoladas; pencas de color verde opaco a verde glauco, erecto-ascendente, rara vez curvado, por lo general más acuminado, los márgenes y los dientes variables; tubo de 17-21 mm de ancho-----

ssp.
crassispina

2.2.2 *Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck var. *salmiana* Gentry

Nombre común: En Temascalapa se le conoce como penca ancha y García-Mendoza (2011) lo refiere como maguey manso o maguey de quiote.

Plantas de tamaño mediano a grande, con tallos cortos y gruesos, formando rosetas densas de 1.5-2.0 m de altura y el doble de diámetro; **pencas** de 100-200 x 20-35 cm, ampliamente lanceoladas, acuminadas, gruesas y carnosas, de color verde a glauco grisáceo, profundamente convexas en la base, cóncavas hacia la parte media, ápice sigmoidal curvado; margen repando; **dientes** más grandes a lo largo de la mitad de la lámina, la mayoría de 5-10 mm de largo, 3-5 cm de distancia, marrón a café grisáceo, las cúspides rectas a flexionadas o curvadas desde las bases anchas bajas; **espina terminal** larga, robusta, subular, de 5-10 cm de largo, de color café oscuro, surcada a más de la mitad de su longitud, decurrente. **Inflorescencia** en panículas, el pedúnculo estrechamente imbricado con grandes brácteas carnosas, 7-8 m de altura; panícula amplia, con 15-20 umbelas grandes descompuestas en la mitad superior del eje; **flores** de 80-110 mm de largo, gruesas carnosas, amarillas sobre ovario verde; **ovario** de 50-60 mm de largo, grueso, cilíndrico, con cuello no restringido; tubo con forma de embudo grande, 21-24 mm de profundidad, 20 mm de ancho, pared gruesa entre surcos profundos; **tépalos** desiguales, lanceoladas, margen involuto, ápice curvado hacia adentro en anthesis, los externos de 21-25 x 6 mm y abultadas en la base, con margen involuto delgado, los internos más cortos 2-3 mm, con quilla ancha; **filamentos** de 55-70 mm de largo, insertados justo por encima del medio del tubo, los de los tépalos externos a menudo 1-3 mm más altos; **anteras** de 30-35 mm de largo, amarillas, excéntricas;

pistilos que alcanzan los estambres en la post-antesis; **cápsula** 5.5-7 x 2-2.2 cm, estipitada, picuda, leñosa, marrón; semilla 8-9 x 6-7 mm, negra, muesca hilar superficial, apical.

Agave salmiana var. *salmiana* (**Figura 1**) tiene poblaciones silvestres y cultivadas, las formas de cada una son numerosas. Sin embargo, la especie es generalmente reconocible por sus pencas verdes anchas, pesadas y bien armadas, con los ápices sigmoides de largo acuminado y grandes brácteas pedunculares que subtienden panículas grandes y piramidales. Las flores son gruesamente carnosas, los tépalos dimórficos, angostos, involucionados, el interior con una quilla carnosa alta bordeada por finos márgenes hialinos que se enrollan. Las flores tienen entre 8 y 11 cm de largo, frecuentemente son de color rojizo pero se abren de color amarillo.

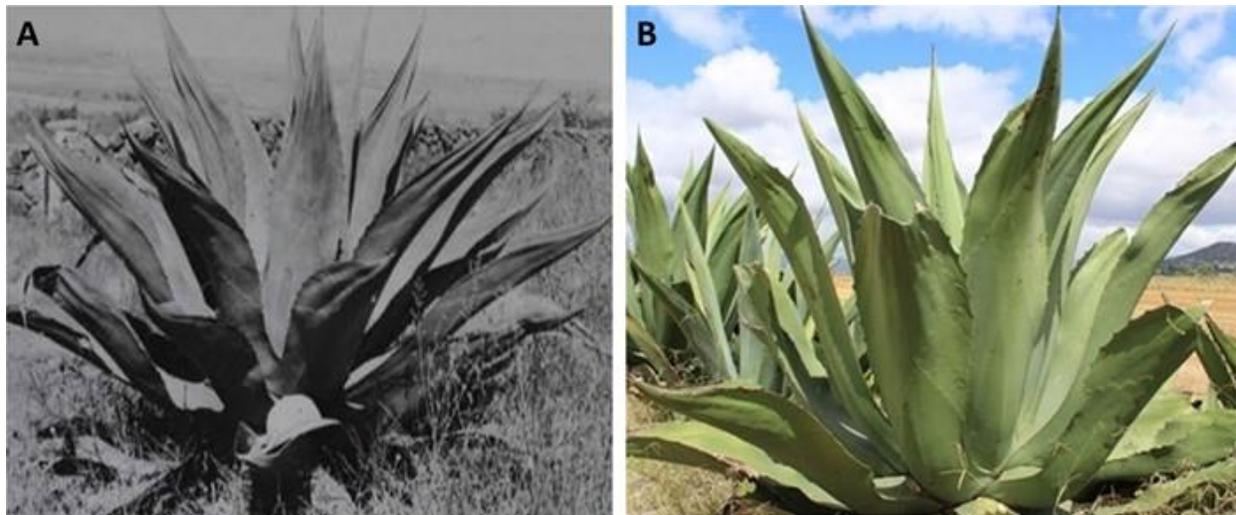


Figura 1. *Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck var. *salmiana* fotografiada A) cerca de Tepetitlán, Jalisco (Gentry, 1982), B) en San Bartolomé, Temascalapa (2018).

El uso de nombres comunes para esta variante de maguey Alfaro *et al.* (2007) integraron en el mismo grupo a Ayoteco, Manso y Verde, que concuerdan con los de Rzedowski y Calderón (1990), ya que ambos son *Agave salmiana*.

Fenología. Floración de abril a septiembre, aunque el desarrollo de la inflorescencia suele comenzar en octubre o noviembre del año anterior. Fructificación a partir de noviembre.

Mora-López *et al.* (2011), destacan que en esta especie *A. salmiana* var. *salmiana* existen 31 variantes distribuidos en 17 localidades desde Tlaxcala hasta Coahuila.

2.2.3 *Agave salmiana* Otto ex Salm. ssp. *crassispina* (Trel.) Gentry

Nombre común: en Temascalapa se le conoce como Polludo o polludo grande.

Planta con pocas pencas, relativamente más pequeñas que var. *salmiana*, generalmente silvestre, las rosetas son de 8-12 m de altura, compactas; **pencas** ampliamente lanceoladas 60-90 x 16-25 cm rara vez más grande, grueso rígido, estrecho hacia la base, gruesa y convexa, más delgado y cóncavo a la mitad de la lámina, acuminado, verde a verde grisáceo, márgenes ondulados, **dientes** firmes y de base ancha, de 7-12 mm de largo, color marrón oscuro a blanquecino con 1-3 cm de separación; **espinas** fuertemente subuladas 5-9 cm de largo, ranurado, decurrente largo; **inflorescencia** panículas muy laxas, con 6-25 umbelas, contorno piramidal, (3.0-)4.0-8.0 m alto, fértil en el tercio o el cuarto superior; flores generalmente amarillas sobre el ovario verde, de 70-90 mm de largo, densamente suculentas; **ovario** de 38-50 mm de largo, cilíndrico, cuello no estrechado; tubo de perigonio de 11-14 mm de largo, 17-20 mm de ancho, paredes gruesas, finamente acanaladas; **tépalos** desiguales, 21-30 mm de largo; filamentos de 52-70 mm de largo, insertados casi en un nivel ligeramente por encima del medio del tubo; **anteras** de 30-35 mm de largo, amarillas.

El nombre de Trelease se aplica aquí para designar las extensas poblaciones silvestres de *A. salmiana*, que se producen desde el sur del estado de San Luis Potosí hasta el sur de Tehuacán, Puebla y el norte adyacente de Oaxaca. Crecen y se desarrollan libremente, y hay una considerable variación natural en todo su ámbito de distribución. En general, son plantas más pequeñas con tallos y pencas menos gruesas que los cultivos. Las pencas anchas con puntas sigmoideas, largas espinas y grandes brácteas suculentas de los tallos son indicadores de este taxón, tal como lo es para el resto de las

especies de Salmianae. Algunas de las pencas cortas acuminadas en las poblaciones del sur se asemejan a las de *A. salmiana* var. *ferox*, y se hace obvio que no existe una ruptura morfológica distinta entre los taxa salmianae. Sin embargo, las plantas cultivadas tienen pencas de color verde brillante (**Figura 2**), es un clon y, como tal, se reconoce fácilmente.

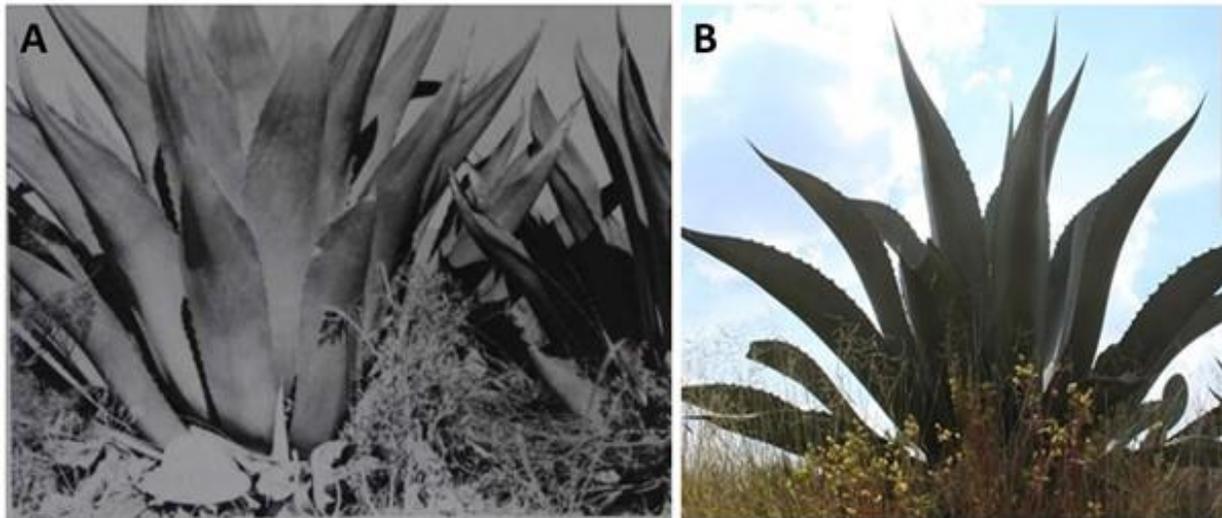


Figura 2. *Agave salmiana* Otto ex Salm. ssp. *crassispina* fotografiada A) cerca de Saltillo, Coahuila (Gentry, 1982) B) en San Bartolomé, Temascalapa (2018).

García- Mendoza (2011) menciona que la subespecie *crassispina* se diferencia por ser planta más grande, masiva, con mayor número de pencas, con margen recto a ondulados y dientes más pequeños.

Se distribuye de 1800 a 2400 m de altitud, en regiones de clima BS seco estepario, clasificación de Koppen (García, 1973) con precipitaciones medias anuales de 325.8 a 502.9 mm y temperaturas medias anuales de 16 a 18.7 °C (Tello, 1988).

2.2.4 *Agave salmiana* Otto ex Salm, var. *ferox* (Koch) Gentry

Nombre común: En Temascalapa se le conoce como maguey cenizo y García- Mendoza (2011), lo refiere como maguey cimarrón.

Rosetones grandes, bastante compactos, de 1-1.5 m de altura, casi el doble de ancho (Fig. 21.16); **pencas** de 70-90 x 23-30 cm, 20-30 por individuo, ampliamente oblanceoladas, erectas a recurvadas, de color verde brillante, cóncavas hacia la parte media, ápice corto-acuminado, densamente suculentas, el margen crenado; **dientes** de base amplia, castaños a pardos, 0.5-)1.0-2.0 cm largo, 1.0-1.5 cm ancho, distantes entre sí 2.0-4.0 cm en la parte media de la penca; **espina** (5.0-)6.0-7.5 cm largo, 0.5-1.5 cm ancho, fuerte, ampliamente acanalada en el haz, en ocasiones decurrente por 12.0-17.0 cm, quilla menor de 3 mm de largo, en mamilas prominentes; **espina terminal** estrechamente subular, 6-7 cm de largo, castaño a marrón oscuro, largo decurrente; **Inflorescencia** en cuanto a la especie, con densas umbelas, pero las flores más delgadas, 70-85 mm de largo, tubo de aprox. 15 mm de ancho; **cápsulas** de 58-60-70 mm de largo, obovoides, estipitadas, de pico largo, café grisáceo a café oscuro; semillas de 7x5 mm, de color negro brillante, con angosto margen alado.

Agave salmiana var. *ferox* (**Figura 3**) se distingue fácilmente por sus pencas gruesas, elegantes, de color verde claro brillante, con márgenes fuertemente marcados. Es una planta hermosa por su color y forma pero es sensible a heladas debajo de 25 °F (- 4 ° C). Berger lo atribuyó a México, Trelease al Valle de México, donde pudo haberlo visto (Gentry, 1982). Nobel (1988) encontró un clon de la variedad en México, en el Valle de Tejupan en el norte de Oaxaca, el ejemplar fue plantado y sus pencas fueron empleadas para techar los refugios de verano en los campos. Menciona además que algunos clones parecían ser espontáneos en las laderas del valle abierto. Una forma estrechamente relacionada fue encontrada por C. Earl Smith, con pequeñas flores secas, en el Valle de Nochixtlán, Oaxaca.

Plantas de pencas cortas y acuminadas similares a las silvestres y se cultivan alrededor de Tehuacán, Puebla, pero las flores son más grandes con tubos más amplios, confundiéndolo con ssp. *crassispina*, la identificación específica es compleja. Su aparente origen nativo en Oaxaca y explica en gran parte su sensibilidad a las heladas en climas más templados, como en Phoenix, Arizona y el sur de California.



Figura 3. *Agave salmiana* var. *ferox* fotografiada A) en jardín botánico Huntington, San Marino, California (Gentry, 1982), B) en San Bartolomé, Temascalapa (2018).

Fenología: Floración marzo a mayo; las plantas cultivadas hasta agosto. Fructificación después de julio.

Para esta especie, García- Mendoza (2011) retoma el nombre de *Agave salmiana* Otto ex Salm subsp. *tehuacanensis* descrito por Salm-Dyck (1859).

2.3 Distribución

El género *Agave* se encuentra distribuido en más del 75% del territorio mexicano y los estados más ricos en número de especies son Oaxaca, Chihuahua, Sonora, Coahuila, Durango y Jalisco. El área de mayor riqueza se encuentra en el Valle de Tehuacán-Cuicatlán, con 15 especies, de las cuales 8 son endémicas de esta región (García-Mendoza, 2007).

La zona de producción es de fría a templada, y se desarrolla, sin restricción entre los 2 mil 200 a 2 mil 700 m de altitud. Es una planta que resiste las prolongadas sequías de las zonas secas de los estados de Hidalgo, Tlaxcala, México y Puebla; en donde la precipitación es escasa, con heladas muy fuertes y frecuentes en las estaciones de otoño e invierno.

2.4 Importancia económica del maguey

En México se aprovechan diversas especies de maguey cultivadas y silvestres. El maguey pulquero tiene relevancia económica en la industria del pulque y otros productos tales como: miel, fibra, aprovechamiento de insectos asociados (Herrera, 2003), pencas, venta de plántulas (Aguilar *et al.*, 2014), medicinal, combustible, cobijo, ornato, abono, material de construcción de viviendas, elaboración de implementos agrícolas (García-Mendoza, 2007); forrajero como fuente de carbohidratos solubles (Gentry, 1982; Pinos-Rodríguez *et al.*, 2008), como sustrato para la producción del hongo comestible *Pleurotus ostreatus* (Jacq. Ex Fr.) P. Kumm (Heredia *et al.*, 2014), entre otros usos que le dan un valor agregado a la planta y a los subproductos.

El pulque es uno de los derivados más importantes de esta maravillosa planta, bebida fermentada artesanal obtenida del aguamiel, que es la savia producido por algunos variantes de maguey (*Agave salmiana*, *Agave atrovirens* Karw. ex Salm-Dyck y *Agave mapisaga* Trel.), este líquido está compuesto por una alta cantidad de azúcares fermentables (Muñiz-Márquez *et al.*, 2013), 4.41 % de proteína cruda, alto contenido de Ca, Zn, Fe; que al ingerir 500 mL por persona se aportaría un aproximado el 60 % del requerimiento diario de Fe y Zn (Silos-Espino *et al.*, 2011).

2.4.1 Historia del pulque

Las evidencias encontradas en Teotihuacán, Estado de México, Tula y Tulancingo Hidalgo, muestran que los magueyes han sido aprovechados para la obtención de pulque desde hace más de 3 mil 500 años (Mora-López *et al.*, 2011) y en las cuevas del Valle de Oaxaca, el de Tehuacán y en Coahuila, en este último, se hallaron restos de fibras mascabadas, cordeles de ixtle y sandalias elaboradas con fibras de maguey, por lo que el empleo del maguey como alimento y fibra pervive en México desde hace por lo menos siete mil años (García-Mendoza, 2007).

El maguey era muy valorado por los pueblos indígenas que habitaban en zonas donde escaseaba el agua, ya que tomaban jugo de esta planta en sustitución al líquido vital (Granados, 1993), es así como poco a poco fueron seleccionando los mejores

ejemplares acorde a sus necesidades e hicieron de México su centro de domesticación y diversificación (García- Mendoza, 2007).

El pulque (octli) era una bebida sagrada para los aztecas, lo consumían ciertos estratos sociales en especial los sacerdotes, que podían tomar hasta 5 copas diarias; también su ingesta era permitido para: mujeres en gestación o lactancia, soldados en guerra, víctimas propicias al sacrificio con el fin de amortiguar el sufrimiento y a personas menores de 52 años de edad, se les permitía tomar sólo 2 copas, ya que la embriaguez se castigaba con pena de muerte. El pulque representaba una amenaza de desorden para la estructura social, por tal razón era castigado con severidad (Gentry, 1982; Godoy *et al.*, 2003); tenían una diosa del maguey Mayahuel (Gentry, 1982) y otros dioses conocidos como Centzon-Totochtin (Cuatrocientos conejos): Tepoztéctli, Quatlapanqui, Tlilhua, Papáztac y Tzoaca que perfeccionaron el pulque y que estaban implicados en la elaboración de esta bebida (Godoy *et al.*, 2003).

El pulque no sólo es ingerido por su efecto alcohólico, sino también como un alimento complementario de la dieta diaria de varios grupos humanos por lo general, de bajos recursos, debido a su alto contenido de proteínas y vitaminas del complejo B, sustancias proporcionadas por los microorganismos que se desarrollan en la bebida, en particular las levaduras (Herrera, 2003).

Los mexicas, al saberse vencidos después de la conquista española y ya sin la prohibición de sus jefes en el consumo de la bebida, empezaron a tomarla en excesivo, acto que fue mal visto por los españoles, prohibiéndoles también consumirla (Erlwein *et al.*, 2013). No obstante, el pulque se vio como un negocio virreinal por su elevado consumo, por lo que la Corte española determinó “que se aplicase a la Real Hacienda el procedido del Real Impuesto del pulque” y ordenó a partir de 1665, que los rendimientos del mismo “fueran remitidos a España en la primera ocasión por cuenta aparte” (Ramírez, 2004), este impuesto se mantuvo hasta 1769 (González, 1971). Para 1753 se establecieron 36 pulquerías de las cuales 24 eran para hombres y 12 para mujeres (Godoy *et al.*, 2003), pues muchos españoles se mantenían de la embriaguez de los indios (Ramírez, 2004). Al ver que del pulque se obtendrían magníficos dividendos (Guerrero, 1980), empezaron a establecer plantaciones de maguey en las tierras que no

eran aptas para cultivos, por lo que esta bebida sagrada pasó a ser una bebida de diversión y poderío (Godoy *et al.*, 2003).

El Conde de Revillagigedo (1789-1794), emitió una reglamentación más estricta para las pulquerías. En 1791 le pediría al barón Alexander von Humboldt hacer una investigación sobre los consumos en la capital de la Nueva España, en donde hizo notar que la ciudad de México tuvo un volumen de entrada de 294 mil 794 cargas (175 L equivalente a una carga) de pulque, en dicho año. Entre 1785 y 1789 el Ramo del Pulque ocupó el cuarto lugar en el conjunto de las fuentes de tributación del Virreinato por el monto de productos totales, sólo superado por las Alcabalas, la Plata, y las Amonedaciones (Ramírez, 2004). Para 1794 el consumo anual de pulque alcanzaría un aproximado de 46 millones de litros, cifra que se reduce a menos de la mitad para 1799-1800 (Godoy *et al.*, 2003).

El cultivo del maguey a finales del S. XVII, se había extendido abarcando incluso tierras que habían sido aprovechadas para el cultivo del maíz (Riva, 1987). El pulque formó parte de los artículos de primera necesidad al igual que el maíz, los nopales, el frijol y el chile; los jefes de familia destinaban parte importante de sus ingresos a comprar pulque; en ocasiones la cantidad era superior o igual a la gastada en carne, pan, leche, tabaco, maíz y frijol (González, 1971).

La ciudad de México contaba con 817 pulquerías y 781 expendios de licores, además de 1598 locales donde se ofrecía bebida para la embriaguez en 1886 (Ramírez, 2000). Durante este período la problemática social del alcoholismo trajo consigo el desprestigio del pulque (Ramírez, 2004) ya que las pulquerías chocaban con la imagen afrancesada de las clases dirigentes del Porfiriato. Por tal motivo, desde los primeros años, fueron expulsadas del centro de la ciudad y de las nuevas urbanizaciones, como los alrededores de Paseo de las Reforma. En esas zonas se prohibió la instalación de pulquerías; solo los bares, cantinas y cafeterías (cafés) al estilo europeo (*Ibidem*).

En la segunda mitad del siglo XX, las plantaciones de maguey disminuyeron de manera drástica en el Valle de México (Aguilar *et al.*, 2014).

2.4.2 Situación nacional del pulque

Las estadísticas referentes a: superficies plantadas de maguey pulquero, producción anual de pulque, comercialización nacional e internacional y precios, son dispersos, lo que dificulta tener un panorama global de la situación (Álvarez *et al.*, 2018). El auge de las pulquerías inició al concluir la guerra de independencia; generaron ganancias para las haciendas pulqueras, las cuales crecieron de modo espectacular cuando el ferrocarril atravesó Apan, llevaron pulques finos de esa zona a la capital. En los años treinta, la Reforma Agraria ocasionó a la sobreexplotación del maguey (Erlwein *et al.*, 2013).

La industria pulquera se consolidó en la década de 1950, en paralelo se incrementó la superficie de cultivo a 47 mil 656 ha, con un número de plantas cercano a los 25 millones. De esta forma, el cultivo de maguey pulquero permitió una alta producción de pulque. Para la década de 1960, el maguey se cultivó en sistemas intensivos y extensivos, en una superficie de 54 mil 817 ha con un total de 27 millones 500 mil plantas, lo que permitió que la producción de pulque fuera mayor y se lograra ampliar los márgenes de ganancia (Flores *et al.*, 2009).

La cerveza, el aguardiente y los habaneros aparecieron después de la revolución, ganándole terreno al pulque, ya que la producción giró hacia la cebada y destilados (Morera *et al.*, 1982; Erlwein *et al.*, 2013). Las declaraciones y programas oficiales de apoyo al maguey quedaron en “letra muerta” (López *et al.*, 1988). En tal circunstancia, en 1996 el gobierno creó el Patronato del Maguey con el propósito de mejorar los sistemas de cultivo y explotación del maguey, nuevas plantaciones, mejorar en la producción y venta de pulque en aspectos sanitarios, económico, envase y transporte, entre otros. En 1977 el patronato pasó a ser parte de la Coordinación del Plan Nacional de Zonas Deprimidas y Grupos Marginados (COPLAMAR); en 1980 pasó a constituir la Promotora del Maguey y el Nopal y cinco años después desapareció la promotora, integrándose a la Comisión Nacional de Zonas Áridas. La falta de recursos económicos y los cambios constantes impidió a la Promotora cumplir sus objetivos (López *et al.*, 1988).

La superficie de plantaciones de *Agave salmiana* y *A. mapisaga* en el valle de México disminuyó en más del 80 % en el periodo 1940 a 2012 (Aguilar *et al.*, 2014), y esta tendencia continúa. El robo del mixiote y pencas (José-Jacinto y García-Moya, 2000), la longevidad del ciclo de las plantas (Álvarez-Duarte *et al.*, 2018), la comercialización y la falta de tecnología en la industrialización del pulque son las principales situaciones que desmotivan a los productores que dejan de plantar magueyes. En la **Figura 4** se muestra la situación de los tres principales estados con plantaciones de maguey pulquero, donde se observa un descenso significativo en la superficie plantada (Aguilar *et al.*, 2014).

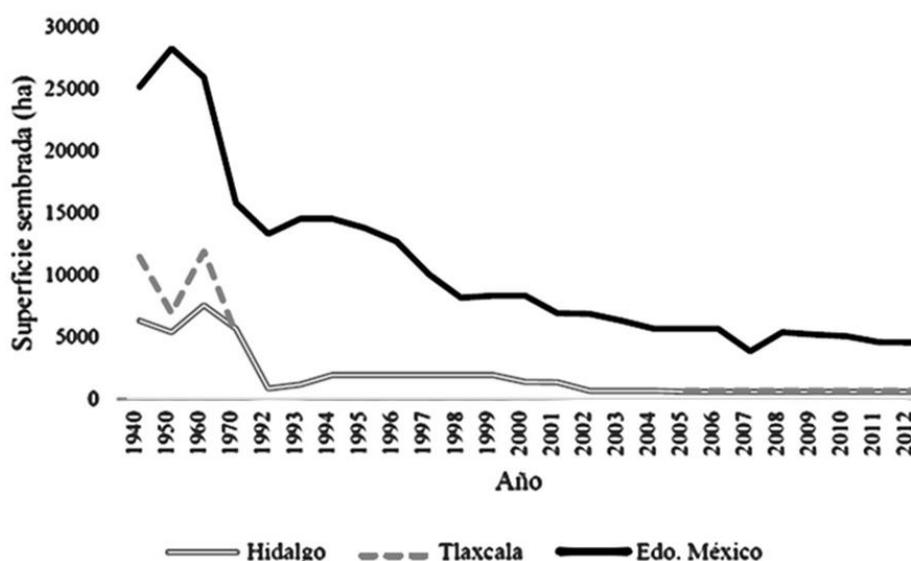


Figura 4. Superficie con plantaciones de magueyes pulqueros en los estados de Hidalgo, Tlaxcala y México en el periodo de 1940 a 2012 (Aguilar *et al.*, 2014).

La producción de pulque, con base en las cifras referidas del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP en línea), del año 2003 al 2016 (**Figura 5**) ha sido dinámico en cuanto a la producción pero, en general, se mantuvo lineal hasta el año 2011, donde se observó un repunte, con un pico máximo en el año 2013. En 2015 y 2016 hubo un descenso. En el análisis por estados, Hidalgo ha ocupado en este periodo el primer lugar. El Estado de México ocupó el segundo lugar de 2003 a 2005, el tercer lugar de 2006 a 2012 al ceder el segundo lugar al estado de Tlaxcala. En 2013 pasa a ocupar quinto lugar, y de 2014 a 2016 se mantiene en cuarto lugar.

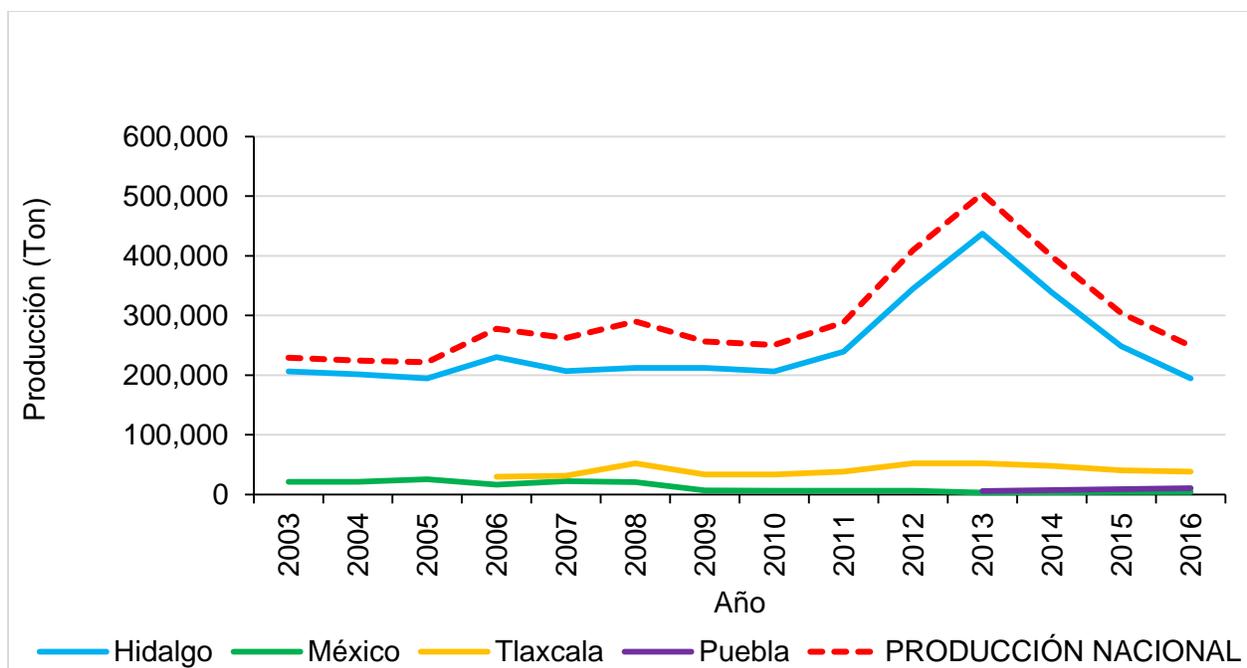


Figura 5. Producción de pulque a nivel nacional de los principales estados productores durante el período 2003 a 2016 (SIAP, 2018).

La producción en el año 2016 fue de 249 mil 023.35 toneladas equivalentes a 249 millones de litros de pulque, de las cuales el 78 % (194 mil 578.65 ton) lo aportó el estado de Hidalgo con 6 mil 152.2 hectáreas plantadas. El Estado de México ocupó el cuarto lugar con una producción de 4 millones 130 mil 890 litros de pulque, una superficie de mil 435.7 hectáreas y con un valor de producción de \$14 millones 452 mil 460.00 pesos. En el Estado de México se registran 12 municipios productores. El municipio de Jiquipilco ocupa el primer lugar con una producción de un millón 900 mil litros de pulque y 300 hectáreas plantadas. El segundo lugar lo ocupa el municipio de Otumba con un millón 150 mil 550 litros de pulque y 701.1 hectáreas plantadas. El municipio de Temascalapa ocupa el séptimo lugar con una producción de 93 mil litros de pulque y una superficie plantada de 60 hectáreas.

El maguey representa una fuente de ingresos constantes para muchas familias. Conforme a las cifras mencionadas por el SIAP, la producción en miles de pesos del 2003 al 2016 ha sido creciente (**Figura 6**).

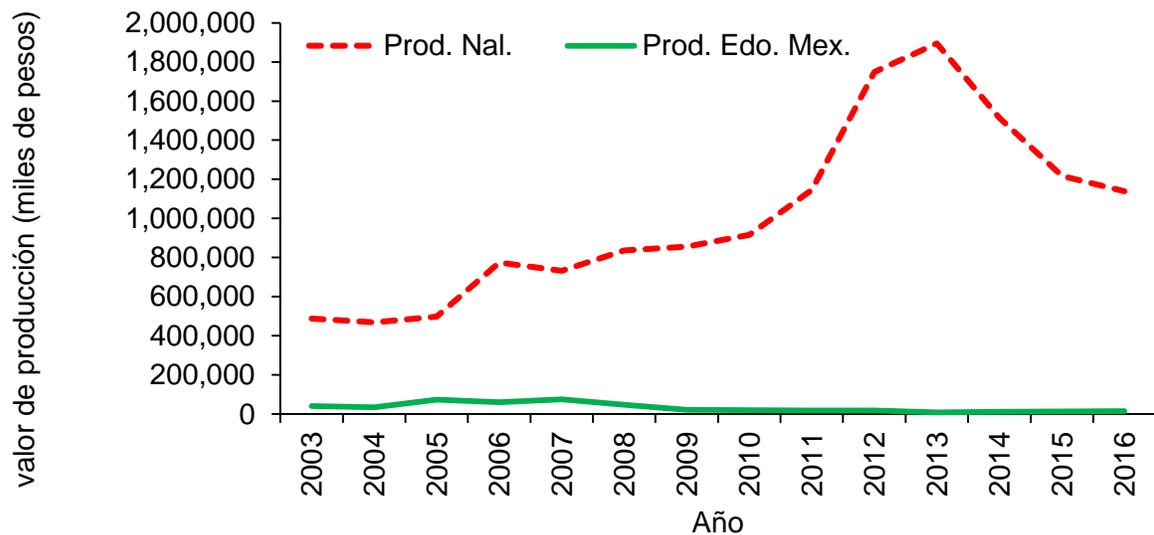


Figura 6. Valor de producción de pulque a nivel nacional y del Estado de México durante el periodo comprendido entre 2003 y 2016.

Las cifras en producción de pulque a nivel nacional de 2003 a 2016, en general son crecientes, lo que muestra que este producto sigue siendo una fuente de ingresos importantes para los productores de maguey. El valor de la producción de pulque en 2003 fue por 487 millones, 907 mil 410.00 pesos. En 2013 se alcanza un máximo por mil 894 millones 314 mil 070.00 pesos, 400 % más que en 2003. Sin embargo, para 2015 y 2016 la tendencia es decreciente, el valor obtenido en 2016 fue de mil 138 millones, 678 mil pesos, 200 % más que en 2003.

El caso del Estado de México, la tendencia es dinámica. En 2003 se tenía un valor por 41 millones 766 mil 250.00 pesos, en el año 2007 se alcanzó un máximo de 75 millones 572 mil 100.00 pesos y de 2008 a 2016, la tendencia es decreciente, reportándose para el último año 14 millones 452 mil 460.00 pesos.

Aunque la tendencia es creciente a nivel nacional, hay comunidades de Hidalgo, Estado de México y Puebla en donde la producción y consumo de pulque ocurre por tradición y por personas de edad avanzada, pues la mayoría de las personas prefiere el consumo

de otras bebidas azucaradas o destiladas (Erlwein *et al.*, 2013; Álvarez- Duarte *et al.*, 2018). Ante esta situación de amenaza en la conservación del maguey en las siguientes generaciones, se debe buscar alternativas viables y redituables inmediatas.

No obstante, en otros lugares como la ciudad de México, el consumo del pulque se empieza a popularizar y como una manera de impulsar el consumo nacional del pulque y atraer ingresos a los productores de maguey se han implementado en diferentes estados del altiplano mexicano ferias en honor al pulque, la más conocida es la feria del pulque en Tepetlaoxtoc, Estado de México, la Feria del Maguey y la Cebada, celebrada en Semana Santa en Apan Hidalgo (Erlwein *et al.*, 2013; Nieto *et al.*, 2016).

2.4.3 Exportación del pulque

El pulque es un producto 100 % natural con cualidades nutritivas y raíces prehispánicas tradicionales que datan del siglo XI durante la época de los Mexicas. Es un recurso que desde los años 1990 se ha exportado a Estados Unidos y Europa. Una de las empresas mexicanas que ha logrado introducir esta bebida en el mercado internacional es el Corporativo Magueyero San Isidro, S.A. de C.V., ubicado en la ciudad de Nanacamilpa, Tlaxcala, es una empresa familiar que desde 1996 encontró la fórmula para detener el proceso de fermentación de manera natural y así enlatar el pulque, lo que permitió la comercialización en el mercado nacional gourmet y su distribución en el extranjero, en un principio a países como Estados Unidos, Alemania y España (González, 2017). Aunque a inicios del 2017 hubo decrementos en comparación a los años anteriores (Zempoalteca, 2017).

La compañía Desarrollos Agropecuarios del Altiplano ubicado en el estado de Puebla, se ha dedicado desde 1998 a la producción, investigación, desarrollo y comercialización, desde 2013 tienen contratos con Japón para exportar pulque enlatado y la Hacienda Amoltepec en el municipio de Chignahuapan, Puebla que también empezó la exportación de pulque a EE.UU. en 2013 con un lote de 100 mil latas, cada una de 325 mL natural y de sabores. El gerente de la Hacienda resaltó que se generan alrededor de 40 empleos directos (López, 2013). Para 2016, la Hacienda ya exportaba para la Unión Americana,

Francia, Costa Rica, Paraguay, y Colombia, mientras buscaban comercialización en los países asiáticos de Japón y Rusia (Barrios, 2016).

No hay datos más precisos respecto al PIB aportado por la exportación de pulque, pero se considera que en conjunto con la sidra, y otras bebidas fermentadas han aportado de 1988 a 2003 de 1.69 a 2.29 % del valor agregado bruto (Salomón, 2005).

2.5 Otros aprovechamientos del maguey

El maguey y sus derivados se emplean en aspectos ecológicos, alimenticios y económicos en el altiplano mexicano. La planta tiene un uso agrícola importante, sirve para delimitar parcelas, separar terrazas, retención de suelos y como barrera rompevientos. La planta también es un huésped o fuente de alimento para los gusanos blanco, rojo o chinicuil para consumo o venta. Cada una de las partes de la planta tiene un aprovechamiento específico. Ruvalcaba (1984) menciona que de la base de las pencas se obtenían enseres para cocina, la punta más ancha y flexible se usaba como recipiente, como ejemplo, la *xoma* donde se acostumbraba tomar el pulque natural, la cutícula para *mixiote* y seca servía en la construcción o como leña; de las raíces se obtienen fibras duras para la fabricación de cepillos, escobas u otros objetos análogos; el mezontete cuando ha dejado de producir se utiliza como olla para guardar productos del campo, como macetas colmenar en el solar. Álvarez- Duarte *et al.* (2018) mencionan que en los estados de Puebla y Tlaxcala, encontraron 10 formas de aprovechamiento de los magueyes, de los cuales, sobresalen la extracción de aguamiel para elaboración de pulque en un 84.6 %, la cosecha de pencas para preparación de barbacoa con el 38.4 % y los gusanos comestibles, 20 % solo en Calpulalpan, Tlaxcala. Algunos de los aprovechamientos más importantes se mencionan en los apartados siguientes.

2.5.1 Cutícula de maguey

Gentry (1982) comenta que entre los indios mixe de Oaxaca, la cutícula de *Agave atrovirens* y otras especies, se desprende de la penca y se utiliza como envoltura para tacos y otros alimentos que se llevan como almuerzo al campo. En estudios recientes

realizados por Arteaga (2017) del Instituto Politécnico Nacional (UPIIZ-IPN), se desarrollaron plásticos biodegradables hechos como alternativa ecológica con polímeros de agave (cutano y cutina) obtenidos de la cutícula de las pencas.

Un aprovechamiento actual y muy cotizado es el mixiote, que es la cutícula obtenida de las pencas jóvenes no desplegadas (meyolote) al hacer una incisión perpendicular en éstas (Aguilar *et al.*, 2014). Es parecido a un papel transparente con el cual se hace un platillo tradicional mexicano denominado mixiote (SIAP, 2017). Su aprovechamiento ha provocado la explotación clandestina e irracional de esta especie a fin de obtener su cutícula para la elaboración del mixiote (José-Jacinto y García-Moya, 2000), que ocasiona que el meyolote se seque, propiciando la muerte del maguey (Erlwein *et al.*, 2013; Vázquez, 2018), por lo que esta actividad causa pérdidas para los productores de maguey por el daño que se ocasiona a la planta.

Cabe resaltar que no se cultivan magueyes para este propósito, pero personas ajenas al cultivo hurtan las pencas jóvenes de la planta y debido a este daño entra en decadencia y muerte prematura. Para desmotivar esta práctica los productores perforan el meyolote con una varilla, dañan la cutícula de éstas pencas no expuestas (Aguilar, 2014); no obstante, el daño provoca estrés en la planta.

Ante esta problemática, es necesario que todos los estados productores de maguey implementen leyes que protejan los recursos pulqueros; sin embargo, hasta la fecha, sólo tres estados, cuenta con una ley de protección y manejo del maguey, Estado de México, Hidalgo y Tlaxcala; en este último, la **Ley para el Fomento y Conservación del Maguey y sus Derivados**, en sus diversos capítulos propone una serie de medidas para el aprovechamiento de pencas y mixiotes.

2.5.2 Pencas

Las pencas tienen diversidad de aprovechamientos en función de la región, las costumbres y necesidades que se tengan. Las pencas de *A. salmiana* tienen un uso alimenticio para el ganado en San Luis Potosí y Valle de Tehuacán (Gentry, 1982; Baraza *et al.*, 2008). Lo anterior refleja la presión de la población humana sobre los recursos

vegetales disponibles y un ingenio local de extender la producción de leche en una región desértica, muy alejada de la región de origen de la industria animal (Gentry, 1982).

Las pencas son empleadas en los hornos bajo tierra donde se cocina la barbacoa, que es un platillo elaborado con base en carne de ganado bovino, ovino o caprino; además de chile y especias. Los ingredientes son envueltos con pencas de maguey para evitar el contacto con la tierra. Las pencas que se usan son las más viejas de la planta, las que se cortan y se les eliminan todas las espinas de los bordes y del ápice. Ya que las pencas son gruesas, éstas se adelgazan mediante cortes con un machete en la parte cóncava del envés, después se colocan directamente al fuego practicándoles un asado por ambos lados de la penca (haz y envés) hasta que estén flácidas; una vez que tengan esta consistencia se colocan en el horno y encima se coloca la carne para elaborar la barbacoa. El precio de una penca de maguey va desde \$2.5 hasta \$5.0 pesos (Aguilar, 2014).

2.5.3 Insectos asociados

El consumo de insectos se remonta también a la época prehispánica, donde los pueblos indígenas complementaban su dieta con éstos. En nuestros días persevera el consumo de la gran mayoría de los insectos como dieta de muchos pueblos originarios, además de venta en mercados locales, fondas y en restaurantes gourmet (Ramos, 1999) donde el precio de los platillos es exorbitante.

Asociados a los magueyes pulqueros se encuentran algunos insectos plaga para la planta y comestibles para los humanos: gusano blanco (*Acentrocne me hesperiaris* Walter), gusano rojo (*Comadia redtenbacheri* Hamm. sinonimia *Hypoapta agavis* B.) y los escamoles (*Liometopum apiculatum* Mayr.), los cuales son recolectados y acopiados para su venta y que sin duda representan un ingreso económico para las familias (Cruz *et al.*, 2014; Lara-Juárez *et al.*, 2015), no obstante los daños provocados en la planta son irremediables (Vázquez, 2018).

El aprovechamiento y consumo de gusanos en el Valle de México es amplio, aunque no todos los productores de maguey aprovechan los gusanos. Las personas que utilizan el maguey para extracción de aguamiel y pulque no obtienen beneficios de estos insectos.

En cambio hay personas que se dedican sólo a coleccionar y comercializar estos insectos. Los productores de la región del Valle de México no logran abastecer el mercado regional, por lo tanto, compran gusanos en los estados de Puebla, Querétaro, Chiapas y Oaxaca para venderlos en el estado de Hidalgo, y lograr abastecer el mercado, lo cual genera gastos y aumento del precio (Aguilar, 2014).

El Ejido de San Andrés, Zacatecas por acuerdo ejidal, renta cada año del 15 de marzo al 15 de mayo a intermediarios de otros estados como Tlaxcala e Hidalgo para la recolecta de insectos por un pago de \$7 mil pesos. La única ventaja de esta variante de convenios es evitar grandes destrozos ya que los recolectores son personas expertas (Luna, 2012).

Los dueños de las magueyeras como arrendadores o recolectores se quedan con una ínfima porción de las ganancias, los intermediarios son los que se quedan con la mayor parte, pues ellos establecen los precios en el mercado y éstos oscilan de \$500.00 hasta \$3 mil por kilogramo. Aunado a las jugosas ganancias derivados de la venta nacional e internacional de estos insectos, Ramos *et al.* (2006) mencionan que esto da pauta a explotaciones irracionales o recolecciones inmoderadas y poco efectivas, destacan la necesidad de implementar una reglamentación al respecto, ya que no existen normas para su recolección ni un de control de calidad en su comercialización.

2.5.4 Jarabe (miel) de agave

La miel es una sustancia dulce producida de manera artesanal o industrial como alternativa para incrementar ingresos y evitar el desperdicio de aguamiel cuando hay excedentes, debido su rápida fermentación. La venta de la miel ha ido en aumento debido a su alto valor nutritivo y el contenido de azúcares que sirven como edulcorantes naturales para pacientes diabéticos.

La producción de miel de manera industrial empezó en el año de 1900, cuando un grupo de empresarios mexicanos, constituyeron la importante Compañía Expendedora de Pulque S.A, en Apan, Hidalgo, al ofrecer miel de primera y segunda calidad. Por desgracia la empresa dejó de funcionar quince años después (Macedo, 1950).

Los estados: México, Hidalgo y Tlaxcala elaboran miel de agave; sin embargo, en una evaluación, las muestras de jarabe no cumplieron con el mínimo de grados Brix ni con el contenido mínimo de carbohidratos (70 %) que especifica la norma mexicana vigente NMX-FF-110-SCFI-2008, relacionada con el contenido de proteína, no se degrada durante la etapa de evaporación para obtener jarabe a partir del aguamiel. El jarabe del Estado de México mostró mayor contenido de carbohidratos hasta 6.5 % con respecto al proveniente de Hidalgo y a su vez 30 % que el estado de Tlaxcala (Espíndola-Sotres *et al.*, 2018).

2.5.5 Pulcatta

Es una bebida que se obtiene de la destilación del pulque y que se elaboraba desde tiempos precolombinos. La empresa Pulcatta fundada en el año 1998 es la única en el país que cuenta con una producción industrial del destilado de pulque en diferentes sabores: tejocote, quiote, jengibre y otros frutos de la región.

El proceso para obtener esta bebida inicia desde la colecta del aguamiel, su fermentado, la destilación, almacenamiento en barricas de roble para el reposado y añejamiento, el envasado y la distribución en diversas tiendas y restaurantes (entrevista SabersinfinTV, 2017).

2.6 Formas de propagación

Las plantas se pueden reproducir (sexual-semilla) o propagar (asexual) y cada una tiene su variante de propagación, además de los propósitos con los que se hace. Las plantas de maguey se reproducen, se propagan por hijuelos de rizoma, cultivo de tejidos *in vitro* y en algunas especies por bulbilos producidos en la inflorescencia como en *Agave angustifolia*, *Agave potatorum*, *Agave sisalana*, etc. Para las variantes de *Agave salmiana*, la forma más común es por rizomas.

2.6.1. Rizomas

La formación de vástagos en los tallos subterráneos (rizomas) son formas características de la propagación de los magueyes. El rizoma es un tallo lateral etiolado, el cual crece diageotrópicamente al lado de planta madre o a alguna distancia de ella, tienen pencas pequeñas excepto cuando es expuesta a la luz; emerge del tallo principal y es inducido acrópetamente (García-Mendoza, 2007); tiene funciones de absorción, almacenamiento, anclaje y propagación (Tello, 1988). Los hijuelos están unidos a la planta madre durante etapas tempranas de su ciclo de vida, lo que aumenta las probabilidades de sobrevivencia (García-Mendoza, 2007).

López *et al.* (1988) refieren dos variantes de propagación: La primera consiste en formar un vivero con hijuelos de 50 cm, una vez que alcanzan un metro de altura, se trasplantan al lugar definitivo y la segunda consiste en el trasplante al lugar definitivo. Previo al trasplante definitivo, se le quitan las raíces y las pencas adultas, el hijuelo podado seorea de quince días a 2 meses, después se planta (Nieto *et al.*, 2016). En ambos casos, los hijuelos seleccionados deben estar sanos y vigorosos. Este método de propagación es muy simple y es el método habitual para propagar la especie (Gentry, 1982), además de ser la forma más exitosa de propagación de plantas de *Agave* spp. silvestres y cultivados (Vázquez *et al.*, 2011). Cuando los hijuelos alcanzan de 40 a 60 cm tienen de 2 a 4 años de edad (Aguirre *et al.*, 2001; Ramírez, 2015).

Debido a las facilidades en el manejo antes mencionadas, los productores optan por este método de propagación, empero, existe una polémica referente a la diversidad genética de los individuos originados de rizomas; algunos autores mencionan que hay pérdida de variabilidad genética (Gentry, 1982; Robert *et al.*, 2007) y por otro lado, García-Mendoza mencionó en una gaceta de la UNAM, que los hijuelos, son clones genéticamente iguales a la 'madre' (Romero, 2018). En contraparte, diversos estudios han demostrado que existe un alto porcentaje de diversidad genética. Escobar (2009), mediante marcadores variante AFLP encontró polimorfismo del 42 % entre hijuelos obtenidos a partir de rizomas y del 40 % entre bulbilos, todos ellos procedentes de la misma planta madre de *Agave tequilana* Weber var. azul. Alfaro *et al.* (2007) en un estudio de diversidad genética

con marcadores variante RAPD en seis poblaciones de maguey pulquero: Manso (*Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck var. *salmiana* Trel.), Ayoteco (*A. salmiana* var. Ayoteco), Verde, Carrizo (*Agave mapisaga* Trel.), Negro y Xilometl en el Nororiente del Estado de México, encontraron 73.2 % de loci polimórficos entre poblaciones, mientras que dentro de las poblaciones hubo reducida variabilidad genética.

2.6.2 Semilla

El desarrollo del vástago floral o quiote, la formación de frutos y semillas en magueyes silvestres se observa cada año. Sin embargo, es poco común el establecimiento de individuos nuevos. Lo anterior se explica, en parte la escasa sobrevivencia de las plántulas a la temporada seca del año (Valenzuela-Zapata, 2003; Sánchez-Urdaneta *et al.*, 2004). Bajo condiciones controladas se ha podido comprobar que la germinación de las semillas, la emergencia y establecimiento de las plántulas de algunos magueyes (como *A. salmiana*) es relativamente exitosa (Sánchez-Urdaneta *et al.*, 2004). Lo anterior resulta ser del mayor interés científico, ya que es posible diseñar acciones como propagación de individuos generados a partir de semillas y después trasplantarlos en sus lugares de origen (Vázquez *et al.*, 2016).

La reproducción se logra mediante la polinización que efectúan algunos animales, en forma destacada por murciélagos nectarívoros y, en menor grado, insectos y aves (García-Mendoza, 2007). Acorde al trabajo realizado por Trejo-Salazar *et al.* (2105), en la Reserva de la Biósfera Barranca de Meztitlán, los murciélagos nectaríferos son polinizadores primarios que remueven el polen de las anteras, ya que su presencia coincide con los momentos de mayor producción de néctar, con la liberación de polen viable, así como por su abundancia y porque en sus visitas tocan tanto las anteras como los estigmas de las flores. Una inflorescencia ofrece recursos como néctar y polen para los murciélagos por lo menos durante una semana. Las principales especies de murciélagos polinizadores de agave son: *Leptonycteris yerbabuena*, *L. nivalis* y *Choeronycteris mexicana* Tschudi, cuya existencia permite la polinización del agave. En el caso de *Agave salmiana* ssp. *crassispina* (Trel.) Gentry población silvestre, no hay

evidencias de reproducción sexual a falta de polinizadores debido a las afectaciones en las poblaciones de murciélagos (Martínez, 1985).

Aunado a lo anterior, los individuos originados de semilla son importantes porque mantienen la estructura y dinámica de las poblaciones de maguey, como la de todas las plantas le incrementan la variabilidad genética (Ramírez-Tobías *et al.*, 2011 y Vázquez *et al.*, 2011). Además, una planta puede producir una gran cantidad de semillas, hasta 65 mil en *Agave deserti* (Jordan y Nobel, 1979) en contraste con la propagación por hijuelos ya que cada planta produce únicamente de 8 a 10 hijuelos en su vida (Toribio, 2005). Para fines de producción masiva, la reproducción (por semillas) facilita la obtención de individuos homogéneos. No obstante, en condiciones naturales son pocas las semillas que germinan y de esas pocas que prosperan, difícilmente llegarán a la edad adulta por las condiciones drásticas de sequía (García-Mendoza, 2007). Al respecto, hay poca información por lo que Robert *et al.* (2007) mencionan que es necesario destinar mayores esfuerzos de investigación hacia la reproducción.

Debido a que el crecimiento de esta planta es lento y el ciclo de vida de maguey es de 10 a 15 años (Ramírez-Tobías *et al.*, 2011 y Álvarez-Duarte *et al.*, 2018), un inconveniente de la reproducción es la prolongación del ciclo de producción; al respecto hay pocos trabajos de investigación. Zamora (1997) evaluó fertilización y riego en plantas de *A. salmiana* obtenidos por semilla en San Antonio de las Alazanas en Arteaga Coahuila y concluyó que se recomienda usar fertilizante triple 17 (N-P₂O₅-K₂O) para reducir el ciclo vegetativo de la planta.

2.7 Fisiología y metabolismo de *Agave salmiana*

Los magueyes son plantas perennes, adaptadas a vivir en ambientes áridos y semiáridos con largos periodos de sequía, altas temperaturas, déficit hídrico, salinidad y deficiencias nutrimentales. Han desarrollado adaptaciones morfológicas, como son raíces someras y ramificadas, cutícula gruesa, tejidos suculentos, bajo número de estomas que además se encuentran hundidos (Nobel, 1998; Hernández *et al.*, 2007 y Zúñiga, 2013). El sistema radical superficial, facilita la absorción de agua de lluvia, por lo general escasa; de modo que la probabilidad de sobrevivencia de los individuos en sequías prolongadas

depende del volumen de agua y de los carbohidratos almacenados durante la época favorable. Asimismo, en época seca, el agua almacenada ayuda a mantener las reacciones bioquímicas y la apertura de estomas para la asimilación de carbono (CO_2), aún en condiciones prolongadas de sequía. Por otro lado, la cutícula gruesa, las ceras epicuticulares y estomas hundidos (variante paralítico o rubiáceo). Estas características permiten la turgencia y evitan la transpiración excesiva durante los periodos de sequía (García- Mendoza, 2007; Zúñiga, 2013).

Las hojas conocidas como “pencas” se distribuyen en forma de espiral alrededor del tallo, los márgenes y la punta presenta espinas; almacenan sustancias que en su momento intervendrán en el espectacular crecimiento de la inflorescencia. La reproducción es semélparo o monocárpica, es decir, las plantas mueren después de reproducirse (García-Mendoza, 2007).

La principal adaptación fisiológica es la variante de fotosíntesis conocida como metabolismo ácido de las crasuláceas (MAC), que permite a las plantas mejorar la eficiencia en el uso del agua, ya que la conservación de este líquido es crucial para su éxito ecológico e incrementa su potencial agrícola en terrenos áridos y semiáridos, al ser los tallos los que almacenan grandes volúmenes, lo que les permite sobrevivir en condiciones extremas (Nobel, 1998). Intrínseco a este metabolismo, las altas temperaturas favorecen la descarboxilación del malato y las bajas favorecen su síntesis. Muchas plantas MAC viven en ambientes desérticos donde el día es cálido y la noche fría. Las MAC permiten la fotosíntesis y la sobrevivencia ante condiciones de extraña desecación (Bidwell, 1990). Por lo que la importancia ecológica de la fijación nocturna de CO_2 por las plantas MAC radica en su contribución a la sobrevivencia de las mismas al proveer un mecanismo de recirculación interna de CO_2 en condiciones de severa sequía con lo que se evita la inhibición del aparato fotosintético cuando el cierre estomático total impide la absorción de CO_2 externo (Nobel, 2011).

2.7.1 Fotosíntesis en plantas MAC

La fotosíntesis (del griego *photo*, que significa luz, y *synthesis* que significa composición, es el proceso biológico más importante que ocurre sobre la tierra, a través del cual las plantas y algas convierten la energía lumínica a energía química (ATP y NADPH₂) y transporte de electrones que depende de la cantidad de luz que recibe la hoja o por la tasa de utilización de las triosas fosfato (Azcón y Nieto, 2013).

El dióxido de carbono presente en la atmósfera es absorbido por las plantas, a través del proceso de fotosíntesis y en las plantas C₄ y MAC, hay fijación adicional de CO₂ a parte de la fijada en el ciclo de Calvin y Benson, ya que el carbono es el principal constituyente del organismo vegetal.

El metabolismo MAC fue descubierto por el científico Teodoro Nicolás de Saussure (Suizo) en 1804, al percatarse que las plantas toman CO₂ en la noche (Nobel, 1998). En estas plantas la formación de ácidos C₄ está separada en tiempo y espacio. Por la noche, el CO₂ es fijado por la PEP carboxilasa en el citosol y el malato resultante u otro ácido orgánico de cuatro carbonos es transportado a la vacuola, este transporte requiere de energía, lo que conduce a un progresivo sabor amargo o ácido durante la noche. Al día siguiente la luz estimula el metabolismo fotosintético C₃ en los cloroplastos, que fijan CO₂ durante el día, pero gran parte de éste proviene de la descarboxilación del malato y otros ácidos almacenados durante la noche anterior y el CO₂ liberado es fijado por el ciclo de Calvin y el NADPH es utilizado para convertir la triosa fosfato en almidón, **Figura 7** (Nobel, 1998; Taiz y Zeiger, 2010).

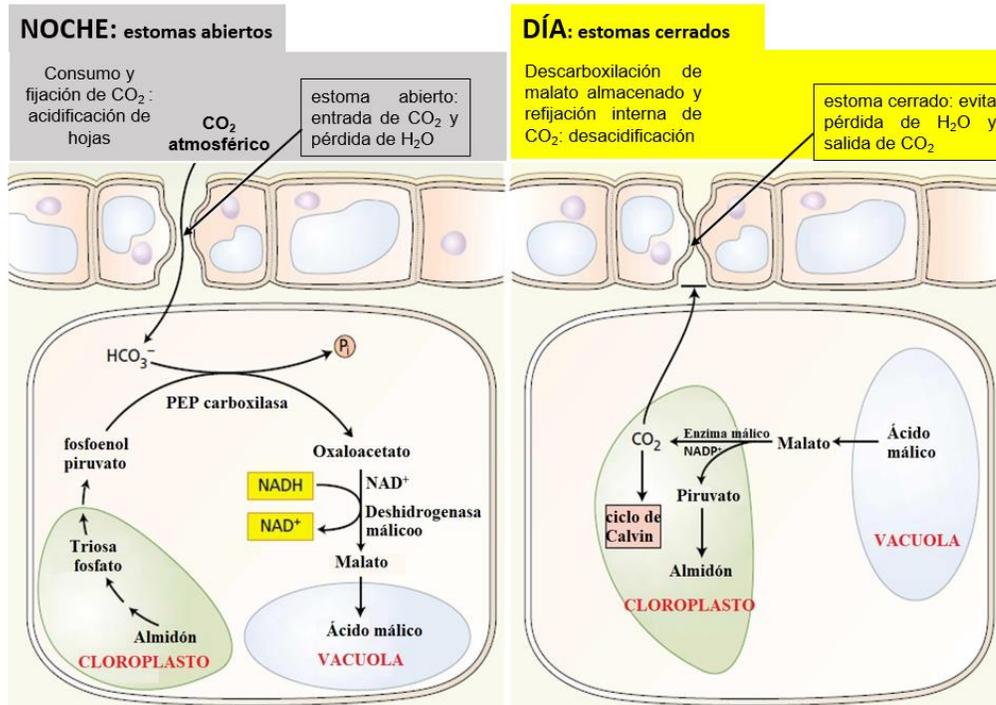


Figura 7. Metabolismo del ácido crasuláceo (MAC). Separación temporal de la absorción de CO₂ (Taiz and Zeiger, 2010).

La captación y fijación de CO₂ tienen lugar por la noche y la descarboxilación y la refijación del CO₂ liberado en el interior ocurren durante el día. La ventaja adaptativa de las MAC es la reducción de la pérdida de agua por transpiración, lograda por la apertura estomática durante la noche.

2.7.2 Ciclo diario de la fotosíntesis de las plantas MAC

El ciclo MAC puede dividirse a lo largo del día en cuatro fases, denominadas fases I, II, III y IV (Taiz y Zeiger, 2010). Al final de la noche, la concentración de malato alcanza un estado estacionario debido al agotamiento del complejo de fosfoenolpiruvato. A partir de ese momento, la fijación de CO₂ desciende con rapidez. La fase I es la que tiene lugar durante la noche. En ella, la resistencia estomática es baja y la concentración de ácido málico aumenta en paralelo con la tasa de fijación del CO₂.

La fase II ocurre durante las primeras horas del amanecer. En esta fase, la resistencia estomática es todavía baja, debido a que en esas horas la demanda evaporativa de agua es baja. Durante esta fase se produce un aumento de la tasa de fijación de CO_2 que no se traduce en un incremento de la concentración de malato, ya que en esta fase la fijación de CO_2 tiene lugar mediante el metabolismo C_3 .

La fase III es la fase MAC característica, que tiene lugar durante las horas de mayor intensidad de irradiancia. Durante esta fase, la resistencia estomática aumenta hasta llegar al cierre estomático completo. La incorporación de CO_2 a la planta, por consiguiente, se reduce a su mínima expresión. Se presenta la removilización diurna de los ácidos orgánicos almacenados en la vacuola, decarboxilación, refijación y asimilación de CO_2 .

La fase IV tiene lugar al atardecer, cuando la reserva de malato celular disminuye hasta casi desaparecer. En estas condiciones, la tasa de reducción del CO_2 se eleva en forma progresiva con respecto a la tasa de liberación interna por el malato, de manera que la presión parcial de CO_2 alrededor de la Rubisco disminuye. Ello puede inducir la apertura de los estomas, con el consiguiente incremento de la tasa de fijación de CO_2 , que tiene lugar en esta fase mediante la vía normal C_3 , al igual que en la fase II. Estas cuatro fases, en especial la II y la IV, no siempre se observan en las plantas MAC, ya que dependen de las condiciones ambientales. Por ejemplo, en condiciones de estrés (hídrico o salinidad) suele desaparecer alguna de las fases (Azcón y Talón, 2013).

La mejor comprensión del metabolismo se presenta de manera resumida en la **Figura 8**, que muestra las cuatro fases en la curva de asimilación de CO_2 clásica de Osmond (1994) en plantas bien irrigadas. La fase I corresponde a la asimilación de CO_2 y la formación de ácidos orgánicos por la noche. En la fase II, al inicio del periodo de luz, ocurre el cierre estomático, pero en algunas plantas se presenta un aumento en la conductancia estomática y en la asimilación de CO_2 , y se presume que están involucradas la PEPC y la RUBISCO. En la fase III los ácidos orgánicos son descarboxilados, se presenta el metabolismo C_3 y se acumulan los azúcares y el almidón.

Cuando los ácidos orgánicos se agotan, los estomas se abren de nuevo y ocurre la fase IV, cuando el CO₂ endógeno y exógeno es fijado por la Rubisco y por la PEPC (Lambers *et al.*, 1998).

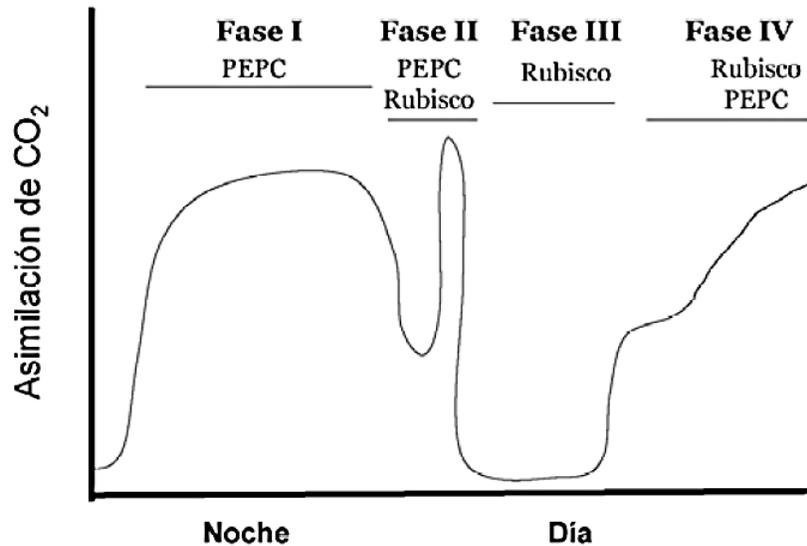


Figura 8. Curva de asimilación de CO₂ de una planta MAC bien irrigada. Se muestran las cuatro fases típicas de la fotosíntesis MAC con las enzimas fijadoras de CO₂ correspondientes.

Con la difusión del CO₂ desde la atmósfera hasta los cloroplastos, donde tendrá lugar la fijación del dióxido de carbono gracias a la actividad de la carboxilasa de la enzima Rubisco algunas plantas dependen menos de la difusión, ya que tienen mecanismos que les permiten concentrar el CO₂ para la fotosíntesis, aunque con un cierto costo energético. Son ejemplo de ellas las plantas C₄ y las plantas MAC (Azcón y Talón, 2013).

2.7.3 Factores ambientales que afectan la fotosíntesis

Es posible sugerir que los magueyes muestran el metabolismo MAC sólo en ciertos estadios de desarrollo o en ciertas temporadas del año, o bajo ciertas condiciones de estrés abiótico (Lira, 2007). Lo anterior puede ocurrir cuando no existe limitación de agua como ocurre en la estación de lluvias, como se ha observado en varias plantas MAC que toman el CO₂ con los estomas abiertos durante el día, utilizando el metabolismo C₃ (Nobel, 1998).

El mecanismo MAC está íntimamente ligado al medio, y puede ser modificado o alterado por temperatura, intensidad lumínica, estatus nutricional, humedad ambiental relativa y disponibilidad de agua (Dodd *et al.*, 2002).

La temperatura diurna influye en la apertura de los estomas y, por ende, en el intercambio gaseoso, si son altas, conducen a una mayor pérdida de agua a través de los estomas abiertos, con respecto a la pérdida que se da por la noche. Así el metabolismo MAC es crucial para la conservación de agua de la mayoría de las agaváceas y cactáceas (Nobel, 1998) ya que permite que los estomas se mantengan cerrados durante el día para reducir pérdidas excesivas de agua por transpiración. Se ha referido que de 10 a 15 °C es la temperatura óptima para la fijación nocturna de CO₂ (Nobel *et al.*, 1992).

La humedad atmosférica: Un aumento en el déficit de presión de vapor de la atmósfera (disminución de la humedad relativa) elevará la transpiración sin un incremento simultáneo en la fotosíntesis, lo cual conduce a una disminución en la eficiencia transpiratoria. Por tanto, una elevada temperatura del aire, a través de su efecto en el déficit de presión de vapor, reducirá la eficiencia transpiratoria (Azcón y Talón, 2013).

La disminución de la tasa de transpiración siempre va acompañada de una disminución en la absorción de CO₂ y, por tanto, de la fotosíntesis. Los déficits hídricos también afectan a la fotosíntesis por sus consecuencias sobre los procesos enzimáticos, el transporte electrónico y el contenido en clorofila (Azcón y Talón, 2013).

La temperatura, la radiación fotosintéticamente activa (RFA) e intercambio gaseoso, tienen un impacto sobre la productividad; pero el factor clave es el agua, sin la cual no existe una apertura estomática y los procesos metabólicos se ven alterados (Granados, 1993).

Las especies C₃-MAC son probablemente las de mayor plasticidad en la expresión de MAC porque poseen una capacidad inherente de inducir MAC en función de los factores ambientales presentes (Dodd *et al.*, 2002). Por ejemplo, en *Mesembryanthemum crystallinum* L. el cambio de C₃ a MAC se observa cuando se induce estrés por déficit hídrico u osmótico (Adams *et al.*, 1998). Las plantas “MAC-cíclico” muestran toma diurna de CO₂ durante las primeras horas del día más re-fijación nocturna de CO₂ respiratorio,

acompañado por una pequeña fluctuación de ácidos orgánicos de cuatro carbonos. En especies MAC obligadas, la toma de CO₂ ocurre en la fase I con alguna toma en las fases II y IV en dependencia del estatus hídrico y con una gran fluctuación de ácidos orgánicos de cuatro carbonos. Bajo condiciones de estrés hídrico severo ciertas especies mantienen los estomas cerrados día y noche previenen la toma de CO₂ y la pérdida de agua; aun así, las plantas mostrarían pequeñas fluctuaciones de ácidos de cuatro carbonos debido a la fijación de CO₂ respiratorio. En general, la inducción de MAC es considerada como una respuesta al estrés que mantiene un balance positivo del carbono (Dodd *et al.*, 2002).

2.7.4 Métodos para determinar fotosíntesis

Existen diferentes métodos para determinar la tasa fotosintética pero todos se basan en la medición del intercambio gaseoso (CO₂ – O₂) que ocurre durante el proceso. La medición se hace sobre uno de los dos gases y los resultados siempre se expresan en tres dimensiones: mg (gas)*Área (foliar cm²)*Tiempo (minutos, segundos, horas). También existen métodos de estimación de fotosíntesis: peso específico de la penca, densidad estomática y contenido de proteína soluble en una planta; en seguida se mencionan dos métodos comunes y que se emplearán en este trabajo de investigación.

2.7.4.1 Volumen de CO₂ absorbido por unidad de área por tiempo con IRGA

El uso de un analizador de gases en infrarrojo (IRGA, por sus siglas en inglés) nos permite determinar las concentraciones de CO₂ en mediciones instantáneas. El análisis infrarrojo del CO₂ y H₂O se basa en que ambos gases absorben luz infrarroja de manera que una determinada cantidad de estos gases absorberá una magnitud de radiación de manera proporcional a su concentración en la corriente de aire. Debido a que ambos gases presentan picos de absorción en zonas próximas o solapadas del espectro infrarrojo, es necesario el uso de filtros específicos para evaluar las concentraciones de cada uno. Esta proporcionalidad se determina por medio de un gas de referencia de concentración conocida, que al pasar por el equipo dará una determinada lectura de la concentración de CO₂ expresada en partes por millón. Posteriormente, si una muestra semejante de gas pasa a través de una cámara con una hoja iluminada; la ocurrencia de

fotosíntesis provocará la absorción de una parte del CO₂ presente en el gas y un aumento en la concentración de vapor de H₂O (transpiración). De esta manera, la tasa de fotosíntesis es un parámetro estimando a partir de medidas indirectas como la concentración de CO₂, el flujo del aire, la humedad relativa, la temperatura del aire y de la hoja, y otros parámetros (Fernández y Gyenge, 2010).

El IRGA además, aporta información importante sobre la transpiración, la conductividad estomática y la resistencia estomática que pueden ayudar a hacer una mejor valoración de la tasa fotosintética de las plantas en condiciones de campo.

2.7.4.2 Acidez titulable MAC

La determinación de los cambios en acidez tisular ha sido una medición confiable de la actividad MAC y se ha practicado desde mucho antes de que se hicieran mediciones de fijación de CO₂. El incremento en la acidez tisular es proporcional a la concentración de ácido málico en las vacuolas de las células, ya que por cada molécula de CO₂ fijada por una planta MAC se produce una molécula de ácido málico y dos iones de hidrogeno (Nobel, 1988). Para medir la actividad MAC se requiere hacer dos titulaciones del tejido, una al anochecer y otra al amanecer, con una solución alcalina de KOH o NaOH en concentraciones del 0.01-0.05 N (Osmond *et al.*, 1994). La acidificación se expresa como el incremento nocturno del ácido málico en unidades de equivalentes de acidez o concentraciones de iones hidrogeno (H⁺) por peso fresco, por área o por volumen de agua de los tejidos. El incremento de la acidez nocturna en las plantas MAC depende del total de luz recibida (RFA) durante el día. La relación entre el arreglo de las pencas, la RFA y el incremento de acidez nocturna va de acuerdo con la ubicación de las pencas en la roseta de la planta (Granados, 1993).

La expresión del metabolismo MAC se ha estudiado en magueyes de diversas edades, para conocer la expresión del metabolismo en las primeras etapas del ciclo de vida de plantas MAC. En *Agave attenuata* se encontró que el metabolismo MAC se presentó desde el inicio de su desarrollo cuando las plantas crecieron en condiciones favorables de humedad Wen *et al.* (1996), por lo que en la etapa de plántula de este maguey no se presentó el metabolismo C₃ esperada. En cambio, para plántulas de *A. salmiana* y *A.*

striata la oscilación de acidez fue variable en función de los cambios en el desarrollo de la plántula y de la restricción de humedad, lo que sugiere que son facultativos (Ruíz, 2014). Por lo que la expresión del metabolismo en estas plántulas, obedece a factores genéticos de la especie (Vázquez, 2010).

2.8 Nutrición vegetal

Hasta mediados del siglo XIX empezó a configurarse una visión armónica de los problemas nutricionales de las plantas. En esa época surgieron figuras como Justus von Liebig (1803-1873), quién enunció la Ley del Mínimo. Liebig reunió y estructuró toda la información existente en su época por lo que fue definitivo el abandono de la teoría aristotélica del humus (1848). Este hecho condujo a un rápido aumento en el uso de fertilizantes. A fines del siglo XIX, en especial Europa, se usaban en agricultura y horticultura grandes cantidades de potasa, superfosfato y, después, nitrógeno inorgánico, con el fin de mejorar el crecimiento y la productividad de los cultivos (Azcón y Talón, 2013).

El término **elemento mineral esencial o nutriente**, debe cumplir estos tres criterios:

1. La ausencia del elemento mineral considerado, limita a la planta completar su ciclo vital.
2. La función que desempeña dicho elemento no puede hacerla ningún otro mineral de reemplazo o de sustitución.
3. El elemento debe estar implicado en el metabolismo por ejemplo, como componente de una molécula esencial de la planta o ser necesario en una fase metabólica precisa, como, por ejemplo, una reacción enzimática.

Está bien establecido que existen 17 elementos minerales esenciales, aunque el níquel solo lo es en un número limitado de especies (Azcón y Talón, 2013). También el sodio y el silicio, muy abundantes en la biosfera, se comportan como esenciales para algunas plantas.

Los elementos esenciales por tradición se dividen en dos categorías: 1) macronutrientes, y 2) micronutrientes, elementos traza u oligoelementos.

2.8.1 Nutrientes

La mayor parte de los micronutrientes son constituyentes enzimáticos y, en consecuencia, sólo son necesarios en cantidades muy pequeñas. En cambio, los denominados **macronutrientes** son elementos constituyentes de las biomoléculas estructurales, tales como proteínas, lípidos o carbohidratos, o actúan como osmolitos. La clasificación de los elementos se detalla en el **Cuadro 1**.

Cuadro 1. Elementos esenciales y benéficos para las plantas superiores.

Clasificación	Elementos	Plantas superiores
Macroelementos esenciales o macronutrientes	C, O, H, N, P, S, K, Mg, Ca	+
Microelementos esenciales o micronutrientes	Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo, Cl, Ni	+
Elementos benéficos	Na, Si, Co, I, V,...	±

Azcón y Talón (2013)

2.8.2 Fertilización química

La fertilización y el riego son aspectos importantes en las plantas cultivadas (Vázquez *et al.*, 2011), aunque la presencia de magueyes en zonas secas se atribuye a su capacidad de ser más eficiente que los zacates o leguminosas en la conversión de agua a materia seca, con base en su metabolismo fotosintético especializado, ya que es una planta MAC. No obstante, las plantas se desarrollan en suelos deficientes en nutrimentos tienen crecimiento lento y bajos rendimientos. El maguey pulquero no es ajeno a este hecho, en el trabajo de Álvarez- Duarte *et al.* (2018) se documenta que de las prácticas culturales realizadas por los productores de Tlaxcala y Puebla, sólo el 38.4 % abona sus plantas.

La fertilización química, se debe hacer con base en análisis nutrimental del suelo previo a la aplicación de la misma; por lo general no se lleva a cabo ya que implica costos, por lo que la mayoría de los productores en caso de fertilizar, lo hace acorde a su ingreso económico (Chagoya-Méndez, 2004). La fertilización es de vital importancia para las plantas, y más en los magueyes que en general se plantan en suelos pobres en materia orgánica y elementos esenciales.

Nobel *et al.* (1988) encontraron que la aplicación de nitrógeno y fósforo, por separado, en *A. lechuguilla* cultivada en campo, aumentó la cantidad de pencas desplegadas y la tasa neta de intercambio de CO₂; la fertilización con potasio y con boro no generó diferencias en pencas desplegadas, pero sí en asimilación nocturna de CO₂.

Zamora (1997) evaluó fertilización y riego en plantas de *A. salmiana* obtenidos por semilla en San Antonio de las Alazanas, Arteaga Coahuila e informa que el fertilizante triple 17 es recomendable y Pérez *et al.* (2017) recomienda una combinación de abonado y fertilización (fosfonitrato o triple 17).

2.8.3. Abonado

La aplicación de materiales orgánicos como fuente de nutrientes es una práctica poco frecuente en los sistemas de producción del maguey. Sin embargo, Medina *et al.* (2003) y Aguilar *et al.* (2014) informan que al momento del trasplante, se aplican 2-3 kg de abono, por lo general estiércol de ovinos, bovinos, caprinos que se incorporan a la tierra y es común que no se hagan aplicaciones posteriores, aunque Pérez *et al.* (2017) recomiendan abonar cada 4 o 5 años, en los meses de diciembre a marzo con 4 a 6 kg/planta, distribuidos alrededor de la planta mezclado con los primeros 20 cm de suelo.

Cabe destacar que aún no se cuenta con algún criterio técnico de que sea la dosis adecuada, por lo que en este trabajo se hará el análisis nutrimental de los materiales orgánicos aplicados.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Descripción del área de estudio

Las parcelas experimentales se establecieron en el Poblado de San Bartolomé, municipio de Temascalapa, Estado de México, se ubica entre los paralelos $19^{\circ} 43' 35''$ y $19^{\circ} 54' 42''$ N y meridianos $99^{\circ} 42' 03''$ y $98^{\circ} 57' 04''$ O. La altitud media sobre el nivel del mar es de 2 mil 400 metros, pertenece al Distrito Judicial de Otumba y tiene las siguientes colindancias (**Figura 9**): Al Norte: con los Municipios de Tolcayuca y Villa de Tezontepec, ambos del Estado de Hidalgo; al Este: con el Municipio de Axapusco, Estado de México; al Sur: con los Municipios de San Martín de las Pirámides y San Juan Teotihuacán, ambos del Estado México; al Oeste: con los Municipios de Tizayuca, Estado de Hidalgo y Tecámac Estado México (Bando Municipal, 2017).

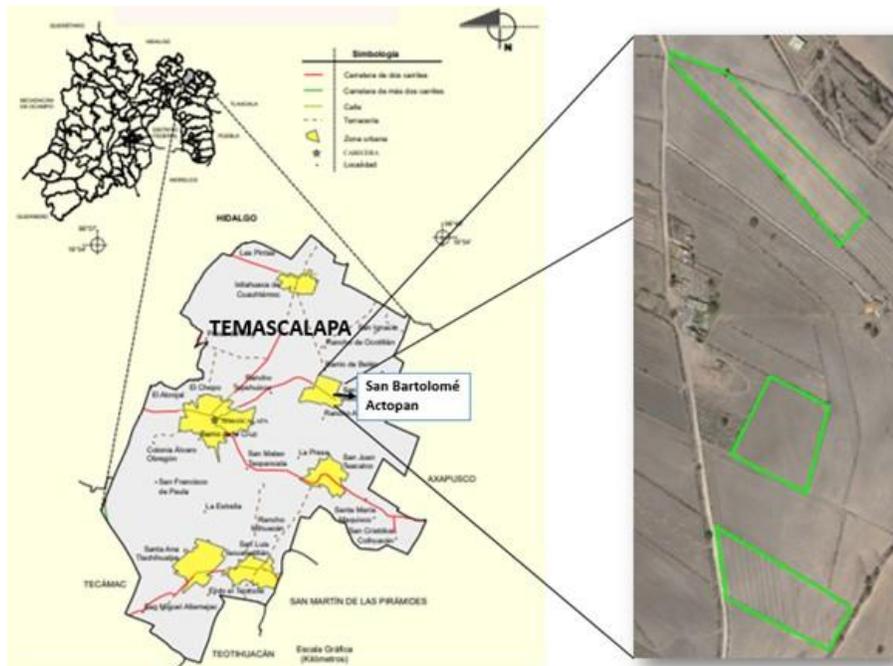


Figura 9. Localización de las parcelas experimentales en el Poblado de San Bartolomé, Temascalapa (INEGI, 2009).

3.1.1 Clima

El clima que predomina en el municipio de Temascalapa es el Bs₁ kw (w) seco, precipitación de 500 a 700 mm (INEGI, 2009). La temporada de lluvia dura 8,2 meses, del 23 de marzo al 29 de noviembre, con un intervalo móvil de 31 días de lluvia de por lo menos 13 milímetros. La mayoría de la lluvia cae durante los 31 días centrados alrededor del 2 de julio, con una acumulación total promedio de 154 milímetros. El periodo del año sin lluvia dura 3,8 meses, del 29 de noviembre al 23 de marzo. Las temperaturas oscilan entre 5 °C a 25 °C y rara vez baja a menos de 2 °C o sube a más de 29 °C. Acorde con el Sistema Meteorológico Nacional (SMN) la temperatura máxima alcanzada entre 1983 y 2010 fue 39 °C en marzo de 2006 y la mínima de -6 °C en febrero y diciembre de 1989 (Weather Spark, 2018).

3.1.2 Suelo

El municipio pertenece a la provincia geológica del eje neovolcánico, el cual está caracterizado por rocas volcánicas cenozoicas, de los períodos Terciario y Cuaternario, por rocas ígneas de composición basáltica, así como por depósitos lacustres y aluviales (INEGI, 2009).

Las variantes de suelos localizados en el municipio son: Feozem-háplico de textura media, colores cafés pálido y oscuro, negro, permeabilidad moderada y buen drenaje interno; el tepetate, el cual se llega a encontrar a 80 centímetros de profundidad.

El 65.16 % del territorio municipal es agrícola, pastizales 12.89 %, habitacional 6.92 %, 7.79 % se encuentra erosionado, matorrales 5.41 %, 0.21 % lo conforman cuerpos de agua y 4.27 % está destinado a otros usos (Gobierno del Estado de México, 2005).

3.2 Antecedentes del material vegetal

Las tres variantes de *Agave salmiana* (ssp. *crassispina*, var. *salmiana* y var. *ferox*) fueron obtenidas por semilla y donadas a través del Programa de Reforestación y Restauración Integral de Microcuencas (PRORRIM) en la convocatoria del año 2016.

Las plantas se produjeron en el invernadero Forestal Naucalli perteneciente a la Región II de la Protectora de Bosques del Estado de México. Cabe resaltar que a partir de su germinación hasta que alcanzaron una altura de 8.0 cm y contando con un promedio de 6 pencas, pasaron 18 meses. Desde los 14 meses de edad, se les redujo el riego para adaptarlas a las condiciones que tendrían en campo.

3.3 Establecimiento de la plantación en campo

Las tres variantes de *Agave salmiana* se establecieron con distribución aleatoria en 3 ha en agosto de 2016, en el poblado de San Bartolomé Actopan, Municipio de Temascalapa. La técnica de trasplante fue cepa común, con un espaciado de 3 m entre plantas y 4 m entre hileras, a una densidad de 750 plantas ha⁻¹ y un total poblacional de 2250 plantas por las tres hectáreas.

3.3.1 Análisis nutrimental del suelo

El muestreo de suelo es el primer paso conocer el aporte nutrimental del mismo, por lo que se requiere de precisión y exactitud (Swenson *et al.*, 1984). La unidad de muestreo en este caso fue cada una de parcelas donde se estableció el experimento. Se procedió a tomar en cada parcela, 10 submuestras de un kilogramo, que fueron tomados de la siguiente manera: 5 entre surcos y 5 entre plantas de maguey, sin considerar los surcos e hileras periféricas de la parcela. Para la toma de cada submuestra, se eliminaron los 2 centímetros superficiales y con una pala recta se extrajo un kilogramo de suelo a no más de 30 cm de profundidad, se colocaron en una cubeta de 20 litros. Por último, se hizo una mezcla homogénea de cada conjunto de submuestras y se extrajo un kilogramo de suelo para su posterior análisis.

El análisis de suelo fue importante en este trabajo para cuantificar el suministro nutrimental del suelo y con ello conocer la diferencia de éste y la demanda del cultivo del maguey y con los datos se procedió a calcular una dosis de fertilización adecuada para

un máximo rendimiento. Las características del suelo determinadas se muestran en el **Cuadro 2**. El suelo, con base en los porcentajes de partículas del suelo, se clasifica como franco arcilloso.

Cuadro 2. Propiedades físicas y químicas del suelo de las parcelas experimentales en San Bartolomé, Temascalapa, Estado de México

Textura			HS		pH	CE	MO	Nutrientes							
(%)			(%)					(mg kg ⁻¹)							
Arena	Limo	Arcilla	CC	PMP	P	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Zn	Mn			
40	30	30	28	17	8.1	0.11	2.7	10	35.2	520	61.9	2.8	0.4	0.5	5

HS: humedad del suelo; **CC:** capacidad de campo; **PMP:** punto de marchitez permanente; **CE:** conductividad eléctrica; **MO:** materia orgánica.

La información del análisis nutrimental del suelo, fueron la base para la estimación de la dosis de fertilización, acorde a la demanda nutrimental de las plantas de maguey. La fertilización química y el abonado orgánico se llevaron al cabo en septiembre de 2017, durante la temporada de lluvias. El análisis correspondiente indica que el pH de 8.1 está moderado alcalino.

Cuadro 3. Disponibilidad de nutrientes en el suelo para *A. salmiana*.

Variable	Elementos				
	N	P	K	Ca	Mg
Disponible en el suelo en kg/ha	32.8	7.0	245.7	3640	431.97
Aporte de suelo en g/planta	39.7	8.5	297.8	4412.12	523.60

3.4 Demanda nutrimental de *Agave salmiana*

La demanda nutrimental de *Agave salmiana* no se ha documentado hasta el momento, por lo que se optó por considerar la demanda nutrimental de *Agave tequilana* recomendado en: Folleto Técnico No. MX-0-310391-33-03-14-09-32 “**Nutrición de *Agave tequilana* y manejo de los fertilizantes en un sistema de producción intensiva (riego por goteo)**” de INIFAP (2013) en donde aplicaron una fertilización de 265.7 g de N, 62.9 g de P, 245.2 g de K, 69.6 g de Ca y 44.4 de Mg por planta.

Cuadro 4. Demanda y requerimiento de los principales elementos para *A. salmiana*.

Variable	Elementos				
	N	P	K	Ca	Mg
Demanda en g/planta	265.70	62.90	245.20	69.60	44.40
Requerimiento en g/planta	208.94	47.01	66.73	4342.52	479.20

Los números en negritas indican exceso en el suelo.

3.5 Tratamientos y diseño experimental

Una vez que se plantaron las plantas de maguey en agosto de 2016, y con base en los resultados del análisis nutrimental del suelo, para el cultivo de maguey se requería solo N y P, ya que el resto de los elementos se encontraba en cantidades excesivas en el suelo, debido a que las parcelas estaban destinadas al uso agrícola. La primera aplicación en agosto de 2016 consistió; para el tratamiento de abonado orgánico 1.5 kg de cerdaza, el tratamiento de fertilización química, 100 gramos fertilizante triple 17 por planta y el tratamiento testigo. La segunda aplicación se realizó en septiembre de 2017. Para el tratamiento de abonado orgánico 1.5 kg de cerdaza y para el tratamiento de fertilización química: 121.2 g de urea (46-00-00) y 181.8 gramos de fertilizante compuesto Yara Star (21-17-3).

El experimento duró 15 meses, y se dividió en dos etapas. La primera abarcó de julio a diciembre de 2017, ya que debido a la edad de las plantas, no se pudo distinguir las características morfológicas de las variantes de *Agave salmiana* por lo que los resultados se refieren para la especie con tres tratamientos. La segunda etapa abarcó de enero a septiembre de 2018, cuando se divide cada tratamiento por con tres variantes de *Agave salmiana*.

3.6 Dosis de aplicación de abonado orgánico y fertilización química

Los resultados obtenidos del análisis nutrimental del suelo y la demanda de la planta se emplearon para calcular los suministros posteriores con los fertilizantes y el abonado.

3.6.1 Abonado orgánico

En el **Cuadro 5** se indica el contenido nutrimental de 3.0 kg de abonado orgánico aplicados a cada planta. Los cálculos se derivaron con base en el folleto técnico de BPEX (2010), que considera la primera columna del **Cuadro 6** para los cálculos dado que el estiércol de cerdo aplicado fue en fresco.

Cuadro 5. Total aplicado por abonado con cerdaza.

Abono orgánico	N	P	K
kg/planta		g/planta	
3.0	2.2	11.6	23.7

Cuadro 6. Contenido típico de nutrientes en el abonado orgánico (estiércol de cerdo) kg/t o kg/m³ (peso fresco).

Variante de abono	Materia seca %	Nitrógeno (N)	Fosfato (P)	Potasio (K ₂ O)	Azufre (SO ₃)	Magnesio (MgO)
Estiércol fresco	-	7.0	7.0	5.0	1.8	0.7
	2	3.0	1.0	2.0	0.5	0.3
Estiércol líquido	4	4.0	2.0	2.5	0.7	0.4
	6	5.0	3.0	3.0	0.9	0.5

BPEX (2010)

3.6.2 Fertilización química

El análisis nutrimental y la demanda de la planta, aportó información requerida para la aplicación de fertilizantes comerciales se mencionan en el **Cuadro 7**.

Las dos aplicaciones de fertilización química se aplicaron de forma circular alrededor de cada planta (Arredondo *et al.*, 2001).

Cuadro 7. Total aplicado en tratamiento con fertilización química.

Fertilizante	g/planta	N (g)	P (g)	K (g)	S (g)
Triple 17	100.00	17.00	7.42	14.10	
Urea 46-00-00	121.2	55.76	0.00		0.00
Yara Star 21-17-3	181.8	38.18	13.49		5.45
Total aplicado	403	110.94	20.84	14.10	5.45

3.7 Variables evaluadas

Las mediciones que se hicieron a la planta como respuesta al abonado y la fertilización se dividieron en dos: a) variables de crecimiento que comprendieron aspectos visibles no destructivos, pero también métodos destructivos para la determinación de peso seco-fresco, b) variables fisiológicas en porcentaje de acumulación de ácido málico, grados Brix y fotosíntesis neta que también comprendieron métodos destructivos y no destructivos.

3.7.1 Variables de crecimiento

Las variables de crecimiento fueron registradas cada mes de julio de 2017 a septiembre de 2018 (**Figura 10**), se muestran en el **Cuadro 8**.

Cuadro 8. Variables de crecimiento evaluadas en maguey.

Variable	Descripción
Altura	Del ras del suelo a la punta de la espina terminal del meyolote
Diámetro	De espinas terminales de una penca a otra, en orientación N-S
Longitud de penca	Longitud a partir de la base a la punta de la espina terminal de la penca recién desplegada
Número de pencas desplegadas	Pencas desplegadas al 50 % o más del meyolote
Número de pencas	Pencas verdes en más del 50 % del total de la penca



Figura 10. Variables de crecimiento medidos en maguey.

3.7.1.1 Peso seco- fresco, área foliar y longitud de raíz

La determinación de estas variables se realizó en julio de 2017. Se extrajeron 9 plantas por tratamiento (3 plantas de cada variante de *A. salmiana*), con un total de 27 muestras, los cuales fueron lavados con agua a presión para eliminar residuos de tierra tanto de la parte radical y aérea, después se procedió a pesar en fresco la planta completa en una balanza analítica Sartorius LP 620P, luego se separó la porción radical del aéreo para el peso por separado. De cada planta, se contó el número de rizomas presentes. Las raíces se embolsaron y etiquetaron para su secado (**Figura 11**). La parte aérea se despencó para colocar las porciones en bolsas de papel para finalmente secarlas en una estufa de secado con circulación de aire a 70 °C durante 10 días, hasta alcanzar peso constante.

El área foliar se estimó con base en dos pencas completas seleccionadas de manera aleatoria de cada repetición de los nueve tratamientos. Se dibujó en papel bond y se les determinó el área de cada una y luego un promedio que fue multiplicado por el número total de pencas.

La longitud radical se midió del cuello de la raíz a la punta de la raíz principal que se caracterizó por ser la más gruesa.



Figura 11. Peso fresco, rizomas y secado de maguey.

3.7.2 Variables fisiológicas

3.7.2.1 Ácido málico

Las observaciones de las diferencias y semejanzas de la actividad MAC por medio de la acidez en las plantas crecidas con abonado orgánico, fertilización química y testigo. Se derivaron a través de la recolección de 4 repeticiones por cada variante de *A. salmiana* por tratamiento y en cada turno (matutino y nocturno). Una evaluación en temporada de estiaje en marzo de 2018 y otra en la de lluvias en julio de 2018.

La penca que se tomó para este análisis fue la tercera recién desplegada y de esta penca se tomó la porción media, ya que acorde a ensayos anteriores, era la penca y porción más idónea. Las muestras se recolectaron en la noche de 19:30 a 20:30 h y antes del amanecer 5:30 a 6:30 h. Cada muestra cortada fue envuelta en papel aluminio, etiquetada y congelada de inmediato en hielo y después en nitrógeno líquido para

detener los procesos metabólicos. Las muestras se almacenaron en refrigeración a 23 °C bajo cero mientras se procesaban.

De cada porción de penca congelada, se pesaron 13 g en una balanza analítica. Se licuó con 40 mL de agua destilada y después se centrifugó 10 minutos, a 250 x g (equivalente a 1500 rpm). Del sobrenadante, se tomaron dos alícuotas de 10 mL. Cada alícuota fue valorada con hidróxido de sodio 0.1 N debido a la masa (g) empleada y se consideró el promedio de NaOH empleado (**Figura 12**). Como indicador de la neutralización de la acidez, se usaron 2 gotas de fenolftaleína, la cual provoca un cambio en la solución de verde a color rosa ligero en la medida que se agrega NaOH. Con los mililitros de NaOH usados y el peso de la muestra, se estimó el porcentaje de ácido málico acorde la siguiente relación (AOAC, 2000):

$$\% \text{ Ácido málico} = \frac{(\text{ml NaOH utilizados})(\text{concentración del NaOH})(0.067)(\text{vol. total})(100)}{\text{peso muestra (vol. de la alícuota)}}$$

Donde:

- % ácido málico, es el ácido contenido en la solución por cada 100 unidades de tejido fresco
- mL NaOH utilizado: mL de hidróxido de sodio gastados hasta observar el cambio de color de la solución
- Concentración del NaOH: es la normalidad del hidróxido de sodio utilizado; 0.067 es un factor que debe utilizarse para calcular el contenido de ácido málico (Association of Oficial Analytical Chemists, 1990)
- Vol. Total: mL de la solución en los que se maceró la muestra
- 100 es el factor para expresar en porcentaje
- Peso de la muestra: corresponde a la masa en gramos (g) de cada penca cotiledonar o lateral
- Vol. de la alícuota: corresponde a los mL de solución individual valorada



Figura 12. Materiales empleados para la cuantificación de ácido málico.

El análisis de varianza del contenido de ácido málico y el pH, se hizo por las dos temporadas evaluadas y la acumulación al anochecer y antes del amanecer, con 3 tratamientos, 3 variantes de *A. salmiana* y cuatro repeticiones por cada variante.

Se realizó la comparación de medias con Tukey ($\alpha \leq 0.05$) con el programa estadístico SAS (versión 9).

3.7.2.2 Grados Brix

Las plantas que se colectaron para análisis nutrimental se usaron para medir el contenido de sólidos solubles totales. Para su determinación, se tomó una porción de 5 cm de la parte basal del meylote, la muestra se maceró en un mortero (**Figura 13**), después en un exprimidor metálico casero, se obtuvo una gota y al final se cuantificaron los grados Brix con un refractómetro portátil de mano marca ATAGO modelo PAL-1.



Figura 13. Maceración del meylote para la toma de grados Brix.

3.7.2.3 Tasa de intercambio de CO₂

A finales del mes de agosto se extrajeron de campo 9 plantas por tratamiento (3 de cada variante) y se trasplantaron en el momento en bolsas de 4 kg con el suelo circundante a cada planta. Se aclimataron bajo condiciones de invernadero durante un mes y una semana, aplicando 3 riegos durante este tiempo.

Las mediciones se hicieron cada cuatro horas, durante 24 horas en dos condiciones de humedad del suelo, una con capacidad de campo (28 %) y la otra por abajo del punto de marchitez permanente (10 %). Para este propósito se empleó un equipo portátil para medir fotosíntesis marca LI-COR, modelo 6400XT, con una cámara de 1 cm² adaptada con un empaque flexible, la cual fue colocada en la segunda mitad de la penca (a partir de la base).

Con los datos de cada cuatro horas, se calculó el área bajo la curva (Leal, 1999) para definir el porcentaje de asimilación de CO₂ nocturna y diurna. Los datos se analizaron con el programa SAS® v. 9.0 bajo el Modelo Lineal Generalizado (MLG) con comparación de medias con la prueba de Tukey. Se tuvo nueve repeticiones por tratamiento (3 repeticiones de cada variante de *A. salmiana*).

3.7.3 Análisis químico del material vegetal

El análisis nutrimental, de cada uno de los tratamientos se tuvieron tres repeticiones por cada variante de *A. salmiana*, un total de 27 ejemplares a los cuales se les cuantificó el contenido de los siguientes elementos: N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Zn, Cu, B, B y Mo.

Las plantas se extrajeron de manera aleatoria en el campo. Cada planta se lavó con agua a presión para eliminar residuos de tierra en las pencas; después la planta fue despencada para facilitar el secado y las porciones se colocaron en bolsas de papel etiquetadas. El secado se hizo en una estufa eléctrica con circulación forzada de aire a 70 °C, hasta alcanzar peso constante, de siete a 10 días. El secado de la planta se hace para detener la actividad enzimática y para facilitar la molienda.

La porción de la planta que se usó es la tercera penca considerando la recién desplegada número uno y la número tres, penca madura. La determinación de la concentración nutrimental se realizó en el laboratorio de Nutrición Vegetal del posgrado de Edafología.

Cada muestra de penca seca fue molida en una licuadora eléctrica para reducir el tamaño y homogeneizar el material (Alcántar y Sandoval, 1999). La determinación de nitrógeno, se obtuvo con una muestra de 0.1 g de material seco y se colocó en tubos de ensayo y se le añadió una mezcla de catalizadores (Na_2SO_4 , $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ y Se metálico), luego 2 mL de H_2SO_4 : salicílico. Se dejó reposar toda la noche. Los tubos se digieren en la plancha de arena 170-190 °C, hasta que se tornan de color azulado. Una vez terminada la digestión, se dejó enfriar y se le añadió 10 mL de agua destilada. En el equipo de destilación se agregaron la muestra y 10 mL de NaOH, que fueron recibidos en matraces de 50 mL con 20 mL de solución de ácido bórico al 4 % más dos gotas de indicador y al final se hizo la titulación con ácido sulfúrico al 0.05 N

Para el resto de los elementos (P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Zn, Cu, B y Mo) se pesó 0.5 g de material vegetal y se colocaron en tubos de ensayo aforados, se le agrega 8 mL de HNO_3 : HClO_4 (2:1), se dejó reposar 12 horas y después se colocaron los tubos de digestión en estufas de arena a una temperatura de 180 °C, hasta evaporar y aclarar. Después de tres días, se aforó cada tubo con agua desionizada, se filtró y se colocó en

frascos tapados para ser leídos en un espectrofotómetro de absorción atómica del mismo laboratorio.

Ecuación 1) Concentración: (Ms)(CN)

Donde:

Ms: materia seca en g

CN: contenido nutrimental

3.8 Análisis estadístico

Las variables evaluadas cada mes de enero a septiembre de 2018 fueron: altura, diámetro de planta, longitud de penca, pencas desplegadas, número de pencas vivas e hijuelos. De cada tratamiento (abonado orgánico, fertilización química y testigo), se tuvieron 11 repeticiones de cada variante de *Agave salmiana* (**Cuadro 9**). Las variables de variables de clasificación fueron: fertilización, variantes de *A. salmiana* y mes.

Cuadro 9. Unidades muestrales por variantes de *Agave salmiana* con diferentes tratamientos.

Tratamiento/ variantes de <i>A. salmiana</i>	Polludo (<i>A. salmiana</i> ssp. <i>crassispina</i>)	Penca ancha (<i>A. salmiana</i> var. <i>salmiana</i>)	Cenizo (<i>A. salmiana</i> var. <i>ferox</i>)
Abonado orgánico	11	11	11
Fertilización química	11	11	11
Testigo	11	11	11

Abonado orgánico: 3 kg de cerdaza por planta; **Fertilización química:** 100 g de triple 17 (17-17-17), 121 g de urea (46-00-00) y 182 g de Yara Star (21-17-3) por planta; **Testigo:** sin abonado ni fertilización.

Las parcelas experimentales si bien están separadas entre sí y aunque las características físicas y químicas del suelo son iguales, hay probabilidades de un efecto confundido de los tratamientos con el terreno, por lo que se usó el modelo lineal generalizado (GLM) del programa estadístico SAS (Statistical Analysis System) versión 9.0 (SAS Institute, 2002) para hacer un análisis de varianza bajo ese modelo.

Al observar valores significativos se procedió a realizar una comparación de medias con una prueba de Tukey ($\alpha=0.05$).

Variables

Modelo: h D Lp Np Pd =T Vs M T *Vs T *M Vs*M T *Vs*M

Donde:

h: altura	Np: número de pencas	Vr: variantes de <i>A. salmiana</i>
D: diámetro	Pd: Penca desplegada	M: mes
Lp: Longitud de penca	T: Tratamiento	

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Variables de crecimiento

La distribución al azar de las variantes de *Agave salmiana* en las tres hectáreas del experimento, la edad al momento de la plantación y las características morfológicas distintivas eran poco evidentes al inicio de la investigación, por lo que en el periodo de julio a diciembre de 2017, se consideró trabajar como especie *Agave salmiana*. Una vez que las características fueron diferenciándose, se procedió a separar por variantes de *A. salmiana*: subespecie *crassispina*, variedades *salmiana* y *ferox*.

4.1.1 Primera etapa: junio a diciembre de 2017

La precipitación media mensual para la primera etapa de junio a diciembre del año 2017 fue para el mes más seco con 5.08 mm en noviembre y para el mes más lluvioso con 182.88 mm en julio; la temperatura máxima y mínima diaria de 23.4 °C y 7.2 °C.

El **Cuadro 10** presenta las medias del análisis estadístico del efecto de los tratamientos y su relación con las variables de crecimiento en *A. salmiana*.

Cuadro 10. Comparación de medias de las variables de crecimiento por tratamiento en *Agave salmiana*.

Tratamiento	h	D	Lp	Np
Abonado	17.1 a	27.4 a	19.5 a	7.5 a
Fertilización	15.5 b	21.6 b	16.8 b	6.2 b
Testigo	10.2 c	20.1 c	13.4 c	7.9 a
DHS	1.26	1.44	1.51	0.52

h: altura, **D:** diámetro, **Lp:** longitud de penca, **Np:** número de pencas; **DHS:** Diferencia honesta significativa; los valores reportados son el promedio de 6 mediciones mensuales; medias con la misma letra en una columna son estadísticamente iguales (Tukey, 0.05).

El tratamiento con abono fue mejor ($p \leq 0.01$) en todas las variables evaluadas; el testigo también destacó en número de pencas. La **Figura 14** muestra los resultados obtenidos de julio a diciembre de 2017.

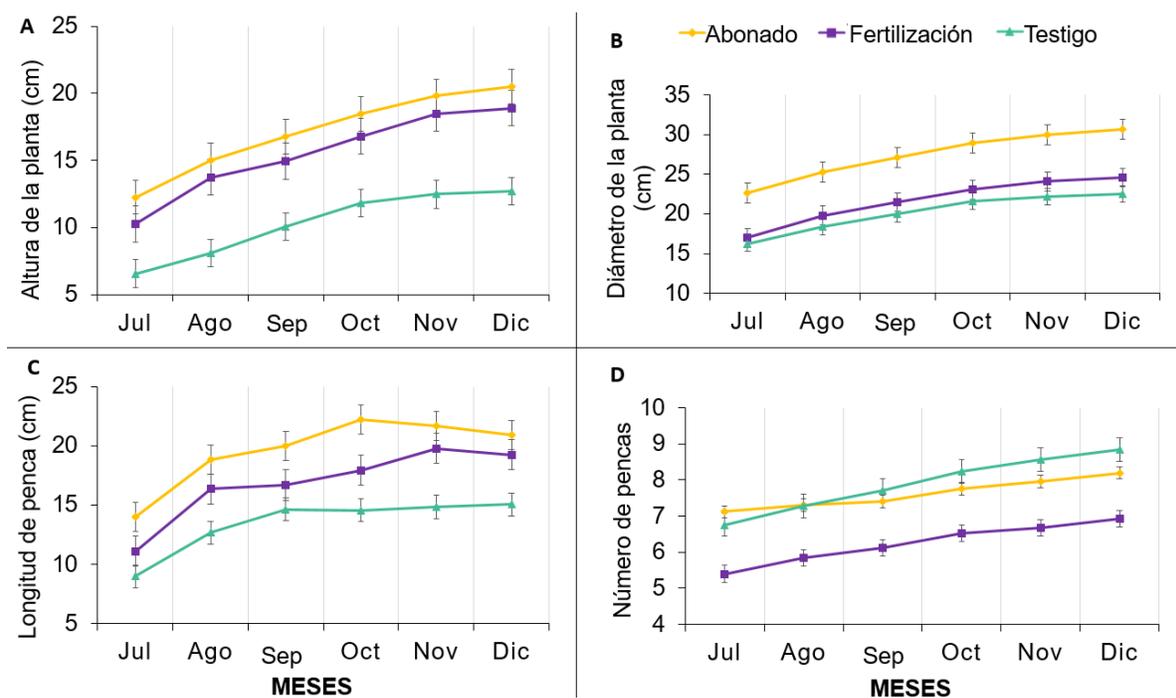


Figura 14. Variables de crecimiento en plantas de *Agave salmiana*, con tres tratamientos. Cada punto es el promedio de 25 repeticiones. A) Altura en cm, B) Diámetro en cm, C) Longitud de penca recién desplegada en cm, D) Número de pencas. Las barras verticales indican el error estándar, $n=25$.

Las variables: altura y diámetro de planta y longitud de penca de las plantas que crecieron con abono orgánico se vieron favorecidas; para número de pencas, no hubo significancia ($p \leq 0.01$) entre plantas que crecieron con abonado orgánico y el testigo, al registrar de 7 a 9 pencas por planta y las que crecieron con fertilización química fueron menos favorecidas, se registraron de 5.5 a 7 pencas.

La longitud de penca en algunos meses no fue acumulativo, ya que si desplegaba una nueva penca el valor decrecía, por ese motivo, se observa en el testigo se mantiene sin variación a partir de septiembre; en fertilización, los valores para el mes de septiembre fueron decrecientes y en los meses siguientes hubo incrementos mínimos y en fertilización incluso fue decreciente a partir de noviembre. Esta variable también puede tener una relación estrecha con la precipitación, ya que a partir de octubre, la precipitación se redujo en una tercera parte con apenas 60 mm y para los meses de noviembre con 5.08 mm y diciembre con 7.62 mm.

El despliegue mensual de pencas en esta primera etapa se detalla en el **Cuadro 11**.

Cuadro 11. Promedio de pencas desplegadas por mes de agosto a diciembre de 2017 por efecto de los tratamientos de fertilización en *Agave salmiana*.

Tratamiento	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Promedio
Abonado	0.64	0.28	0.36	0.28	0.24	1.8
Fertilización	0.68	0.44	0.32	0.12	0.24	1.8
Testigo	0.48	0.44	0.52	0.32	0.16	1.9
Promedio	0.60	0.40	0.40	0.24	0.21	

Cada valor es el promedio de 33 repeticiones.

El mayor despliegue de pencas se dio en el mes de agosto y septiembre que fueron meses con 172 y 144 mm de precipitación. Esta observación concuerda con lo referido por Nobel (1985, 2011) quien encontró que la tasa de despliegue de *A. deserti* y *A. fourcroydes* fue mayor durante la temporada de lluvias. Del 48 al 56 % de las plantas desplegaron 2 pencas en 6 meses y sólo el 14 % desplegó 3 pencas. Nobel *et al.* (1992) y García-Moya (2011) mencionan que el número de pencas desplegadas varía con la edad de las plantas, hasta con 5 pencas al año para *A. salmiana*.

Todas las variables de las plantas evaluadas fueron favorecidas por el abono, lo que concuerda con un trabajo realizado por Figueroa-Barrera *et al.* (2012) quienes

encontraron que el abonado con cerdaza estaba constituido por componentes lábiles o fácil mineralización, lo que permitió la liberación del nitrógeno aprovechable en las primeras semanas. Pese a los mínimos contenidos nutrimentales, estuvieron disponibles para la planta y fueron aprovechados.

El uso de excrementos animales, en este caso, fue favorable para las plantas; sin embargo, hay riesgos asociados en cuanto a liberación de patógenos y semillas de malezas, el olor en descomposición podría atraer insectos o vectores, por lo que la mejor opción en un futuro sería la aplicación de composta, que a través del proceso de elaboración, se evitarían todos los problemas antes mencionados. El abonado orgánico es una alternativa económica y viable en zonas rurales donde abundan residuos orgánicos del sector primario (residuos agrícolas, ganaderos y forestales), están disponibles a bajo costo en las zonas rurales.

La fertilización química no destacó en ninguna variable, estuvo en un nivel intermedio y en número de pencas por planta fue el menos favorecido. De manera general, la gran ventaja de esta variante de fertilización es la aplicación en cantidades exactas acorde a los requerimientos de la planta, no obstante, su alta solubilidad se torna una desventaja ya que las plantas deben aprovecharlo en menor tiempo.

Las plantas testigo no perecieron; sin embargo, el crecimiento fue mínimo, lo que repercute en el número de años para alcanzar la madurez fisiológica, aunque es posible ello se refleje en la calidad del agua miel como lo mencionan Narváez *et al.* (2016) que en los suelos de baja fertilidad, se produce aguamiel de alta calidad y en suficiente cantidad.

Derivado de los resultados, es recomendable aplicar abono para favorecer el crecimiento en el proceso de adaptación de las plantas en campo. Además, la ventaja de mejorar las propiedades físicas y químicas del suelo (estructura y porosidad, permeabilidad, retención hídrica, incremento en la capacidad de intercambio catiónico, etc.), mejora en la complejidad de las redes tróficas, optimización de los residuos y cierre de ciclos de nutrientes.

4.1.2 Segunda etapa: enero a septiembre de 2018

La etapa de enero a septiembre del año 2018, tuvo una precipitación media mensual para el mes más seco fue de 5.08 mm en noviembre y para el mes más lluvioso de 182.88 mm en julio. Con temperaturas máxima de 23.4 °C y mínima de 7.2 °C.

El **Cuadro 12** agrupa la significancia del efecto de los tratamientos, variante de *Agave salmiana*, mes y las interacciones tratamiento*variante de *A. salmiana*, tratamiento *mes, variante de *A. salmiana* *mes, y tratamiento * variante de *A. salmiana* *mes, sobre las variables de crecimiento: altura, diámetro, longitud de penca, número de pencas y pencas desplegadas. Se presentan también los grados de libertad para factores de variación, coeficiente de variación y r^2 para cada variable.

Cuadro 12. Grados de libertad y valores de P del efecto de los tratamientos, variantes de *Agave salmiana*, mes y sus interacciones sobre variables del crecimiento.

FV	GL	h	D	Lp	Np	Pd
Tratamiento (T)	2	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.55
Variante (Vr)	2	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.43
Mes (M)	8	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
T* Vr	4	0.0127	0.0001	0.0002	0.0001	0.97
T*M	16	0.0001	0.0001	0.0001	0.0002	0.41
Vr*M	16	0.25	0.07	0.06	0.81	0.91
T*Vr*M	32	0.68	0.71	0.06	0.06	0.99
Error	890					
CV		9.67	8.84	11.85	14.74	15.34
r²		0.87	0.79	0.78	0.39	0.28

FV: fuente de variación; **GL:** grados libertad; $p \leq 0.01$: altamente significativo; $p \leq 0.05$: significativo; **h:** altura; **D:** diámetro; **Lp:** longitud de penca; **Np:** número de penca; **Pd:** penca desplegada.

El tratamiento, variantes de *A. salmiana* y mes afectaron de manera significativa ($p \leq 0.01$) todas las variables de crecimiento, excepto pencas desplegadas que sólo tuvo alta significancia con el mes. La interacción de primer grado tratamiento* variante *A. salmiana*

tuvo alta significancia ($p \leq 0.01$) con las variables: diámetro, longitud de penca y número de pencas, lo que indica que éstas responden de manera diferente de acuerdo a la variante de *Agave salmiana* con los tratamientos. La interacción tratamiento*mes tuvo alta significancia con altura, diámetro, longitud de pencas y significancia ($p \leq 0.05$) con número de pencas. La interacción variante *A. salmiana**mes no tuvo significancia, lo que implica las variantes responden de manera similar ante el mes.

El **Cuadro 13** muestra las medias de las variables de crecimiento con los diferentes tratamientos y las variantes de *A. salmiana*. Las variables: altura, diámetro y número de pencas se vieron favorecidas con el abonado orgánico; en tanto la altura y la longitud de pencas se vieron favorecidas con la fertilización. Sin embargo, el número de pencas desplegadas fue igual para todos los tratamientos. El abonado orgánico favoreció la mayoría de las variables de crecimiento.

Cuadro 13. Comparación de medias para variables de crecimiento.

FV	Estratos	h	D	Lp	Np	Pd
Tratamiento	Abonado orgánico	27.6 a	35.6 a	28.3 b	8.4 a	0.17 a
	Fertilización química	27.3 a	33.6 b	28.9 a	7.6 b	0.16 a
	Testigo	18.0 b	26.2 c	19.2 c	8.5 a	0.15 a
Variante de A. salmiana	ssp. <i>crassispina</i>	25.5 a	32.7 a	26.6 a	8.4 a	0.17 a
	var. <i>salmiana</i>	24.6 b	31.6 b	26.1 a	8.4 a	0.16 a
	var. <i>ferox</i>	22.9 c	31.2 b	24.0 b	7.8 b	0.15 a
	DHM	0.43	0.52	0.56	0.23	0.03
	Enero	18.8 f	26.8 g	20.5 g	8.09 c	-
	Febrero	19.9 h	28.1 f	21.3 fg	8.5 bc	0.17 bc
Mes	Marzo	21.0 g	28.6 f	22.0 f	8.9 ab	0.23 b
	Abril	22.4 f	29.8 e	23.9 e	9.2 a	0.16 bc
	Mayo	23.9 e	30.4 e	26.1 d	7.15 e	0.12 d
	Junio	25.5 d	32.6 d	27.1 cd	8.1 c	0.34 a
	Julio	27.2 c	34.4 c	28.1 c	8.1 c	0.07 d
	Agosto	29.1 b	36.6 b	29.1 b	8.1 dc	0.22 b
	Septiembre	31.0 a	39.0 a	31.8 a	7.6 de	0.13 cd
	DHS	1.07	1.19	1.29	0.53	0.08

Abonado orgánico: 3 kg de cerdaza por planta; **Fertilización química:** 100 g de triple 17 (17-17-17), 121 g de urea (46-00-00) y 182 g de Yara Star (21-17-3) por planta; **Testigo:** sin abonado ni fertilización; **FV:** Factor de variación, **h:** altura, **D:** diámetro, **Lp:** longitud de penca, **Pd:** penca desplegada; **DHS:** diferencia honesta significativa; los

valores reportados son el promedio de 9 mediciones mensuales; medias con la misma letra en una columna son estadísticamente iguales (Tukey, 0.05).

El análisis por variantes de *A. salmiana*, mostró que la ssp. *crassispina* tuvo mejores incrementos en las variables respuesta, le sigue la var. *salmiana* que al igual que la subespecie antes mencionada se vio favorecida en longitud de penca y número de pencas; pencas desplegadas fue similar en las tres variantes *A. salmiana*.

Dado que las variables de crecimiento, altura-diámetro de planta y longitud de penca son acumulativas, el mejor mes fue septiembre por ser el último evaluado y es probable que también por las condiciones favorables de humedad y temperatura.

La mayor acumulación de pencas por planta fue en el mes de marzo y abril con una media de 8.9 y 9.1; estos meses se caracterizaron por tener una precipitación media mensual de 31 mm, presentándose en todo el mes temperaturas muy calientes de 29 a 35 °C alrededor de las 4 p.m. Para mayo disminuyó de manera drástica el número de pencas con una media de 7.15 pencas por planta, siendo el valor más bajo en los meses evaluados; en este mes la precipitación media mensual fue de 80 mm y también se presentaron temperaturas muy calientes de 29 a 35 °C en todo el mes.

El valor más alto en pencas desplegadas se presentó en junio coincidente con una precipitación media de 154 mm y en mayo el mínimo de pencas desplegadas, lo que está muy relacionado con el incremento en número de pencas.

4.1.2.1 Altura de la planta

El **Cuadro 14** agrupa los resultados del análisis estadístico del efecto de los tratamientos y variantes de *A. salmiana* sobre la altura. Se observa que el abonado y la fertilización tuvieron efecto positivo pero no hubo significancia ($p \leq 0.05$) entre ellos; hubo significancia entre las tres variantes de *A. salmiana* evaluados. La ssp. *crassispina* cultivada con abonado y fertilización tuvo mayor altura con una media de 27.73 cm y la var. *ferox* fue la menos favorecida. En las tres variantes *A. salmiana* testigo, la altura no se vio favorecida.

Cuadro 14. Medias de altura (cm) de las variantes de *Agave salmiana* por efecto de los tratamientos.

Tratamiento	Alturas		
	ssp. <i>crassispina</i>	var. <i>salmiana</i>	var. <i>ferox</i>
Abonado	28.73 a	27.93 a	25.50 b
Fertilización	28.73 a	28.02 a	26.30 b
Testigo	19.05 c	17.96 d	17.04 d

DHS=1.07; los valores reportados son el promedio de 9 mediciones mensuales; medias con la misma letra en una columna son estadísticamente iguales (Tukey, 0.05).

4.1.2.2 Diámetro de la planta

El **Cuadro 15** presenta los resultados del análisis estadístico del efecto de los tratamientos y las variantes de *A. salmiana* sobre el diámetro. Se observa que hubo significancia ($p \leq 0.05$) entre tratamientos; la mejor respuesta fue de las plantas que recibieron abonado seguido de las que se fertilizaron; en variantes de *A. salmiana* no hubo significancia entre la var. *salmiana* y var. *ferox*. La ssp. *crassispina* cultivada con abono orgánico registra mayor diámetro.

Cuadro 15. Medias de diámetro (cm) de la planta de las variantes de *Agave salmiana* por efecto de los tratamientos.

Tratamiento	Diámetros		
	ssp. <i>crassispina</i>	var. <i>salmiana</i>	var. <i>ferox</i>
Abonado	37.54 a	35.11 b	34.3 bc
Fertilización	34.03 bc	33.78 c	33.12 c
Testigo	26.61 d	25.97 d	26.30 d

DHS=1.19; los valores reportados son el promedio de 9 mediciones mensuales; medias con la misma letra en una columna son estadísticamente iguales (Tukey, 0.05).

4.1.2.3 Longitud de penca

El **Cuadro 16** presenta los resultados del análisis estadístico del efecto de los tratamientos y variantes de *A. salmiana* sobre la longitud de penca. Se observa que hubo efecto del tratamiento ($p \leq 0.05$); en tanto, no hubo significancia entre la ssp. *crassispina* y la var. *salmiana*; las plantas más favorecidas fueron las que crecieron con fertilización.

Cuadro 16. Medias en longitud de pencas (cm) de las variantes de *Agave salmiana* por efecto de los tratamientos.

Tratamiento	Longitud de penca		
	ssp. <i>crassispina</i>	var. <i>salmiana</i>	var. <i>ferox</i>
Abonado	29.60 a	29.40 a	26.02 c
Fertilización	30.08 a	29.46 a	27.34 b
Testigo	20.29 d	19.71 de	18.85 e

DHS=1.29; los valores reportados son el promedio de 9 mediciones mensuales; medias con la misma letra en una columna son estadísticamente iguales (Tukey, 0.05).

Los tratamientos con abonado y fertilización, tuvieron incrementos significativos ($p \leq 0.05$) en relación al testigo.

4.1.2.4 Número de pencas

El **Cuadro 17** agrupa los resultados del análisis estadístico de los tratamientos y variantes de *A. salmiana*. Se observa que no hubo significancia ($p \leq 0.05$) entre el número de pencas en plantas cultivadas con abonado y el testigo, ambas tuvieron entre 8 y 9, el menor número de pencas la tuvieron las plantas fertilizadas con 7 y 8 pencas; entre variantes de *A. salmiana* no hubo significancia.

Cuadro 17. Medias en número de pencas de las variantes de *A. salmiana* por efecto de los tratamientos.

Tratamiento	Número de pencas		
	<i>ssp. crassispina</i>	<i>var. salmiana</i>	<i>var. ferox</i>
Abonado	8.3 bc	9.1 a	7.9 dc
Fertilización	8.4 bc	8.6 ab	8.6 ab
Testigo	8.3 bc	7.4 de	7.1 e

DHS=0.53; los valores reportados son el promedio de 9 mediciones mensuales; medias con la misma letra en una columna son estadísticamente iguales (Tukey, 0.05).

4.1.2.5 Pencas desplegadas

El **Cuadro 18** presenta los resultados del análisis estadístico de los tratamientos y variantes de *A. salmiana* sobre las pencas desplegadas. Se observa que no hubo significancia entre tratamientos y en general, no hubo significancia entre variantes de *A. salmiana* a excepción de la *var. ferox* testigo que fue la menos favorecida. Sin embargo, el mes afectó ($p \leq 0.01$) esta variable.

Cuadro 18. Medias en pencas desplegadas por variantes de *Agave salmiana* por efecto de los tratamientos.

Tratamiento	Pencas desplegadas		
	<i>ssp. crassispina</i>	<i>var. salmiana</i>	<i>var. ferox</i>
Abonado	0.43 a	0.45 a	0.41 a
Fertilización	0.45 a	0.41 a	0.40 a
Testigo	0.41 a	0.40 a	0.35 b

DHS=0.05; medias con la misma letra en una columna son estadísticamente iguales (Tukey, 0.05).

El promedio de pencas desplegadas fue en todos los casos inferior a 0.5, lo que nos indica que se requiere un poco más de 2 meses para que se despliegue una penca. La *var. salmiana* tuvo el mejor promedio en despliegue de pencas; sin embargo, no fue significativo con las otras dos variantes.

Los tratamientos evaluados no afectaron, de manera significativa, el despliegue de pencas, aunque Nobel *et al.* (1986a) encontraron que en *A. lechuguilla* con dosis nitrogenadas de 100 kg de N ha⁻¹, aumentó la cantidad de pencas desplegadas.

El **Cuadro 19** resume el despliegue mensual de pencas y el promedio de pencas desplegadas durante el período de febrero a septiembre de 2018.

Cuadro 19. Pencas desplegadas de febrero a septiembre de 2018.

Tratamiento	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Promedio*
Abonado	0.33	0.64	0.48	0.30	1.03	0.19	0.61	0.30	3.88
Fertilización	0.48	0.64	0.33	0.33	0.97	0.15	0.58	0.33	3.82
Testigo	0.48	0.52	0.42	0.33	0.67	0.24	0.52	0.36	3.55
Promedio	0.43	0.60	0.41	0.32	0.89	0.19	0.57	0.33	

*el valor corresponde al promedio al final del periodo.

En el mes de junio hubo mayor despliegue de pencas, aproximadamente una penca por planta (0.89) y en el mes de agosto 0.57 pencas, el mayor despliegue coincide con la temporada de lluvias como en la primera etapa evaluada. La precipitación promedio para junio fue de 154 mm siendo la máxima dentro de los meses evaluados y para agosto 150 mm. El promedio de pencas desplegadas para el último mes en mención coincidió con la primera etapa (0.57 y 0.60).

El número de pencas desplegadas durante la investigación, de enero a septiembre de 2018, fue en promedio 4 pencas. García-Moya *et al.* (2011) recopilaron de varios trabajos que el número de pencas desplegadas al año para *Agave salmiana* en San Luis Potosí fue de 4.4 y 4.9 y en el estado de Tlaxcala de 7.2 a 10.7.

4.1.2.6 Efecto de la interacción del tratamiento x variantes de *Agave salmiana*

La interacción es la influencia de dos o más factores y si los valores de la varianza son muy grandes, no se detecta la interacción.

Esta interacción generó significancia ($p \leq 0.05$) para la altura; muy significativas ($p \leq 0.01$) para el diámetro, longitud y número de pencas.

En la **Figura 15** se muestra la interacción correspondiente a tratamiento por variantes de *A. salmiana* (T*Vr) para las variables de crecimiento.

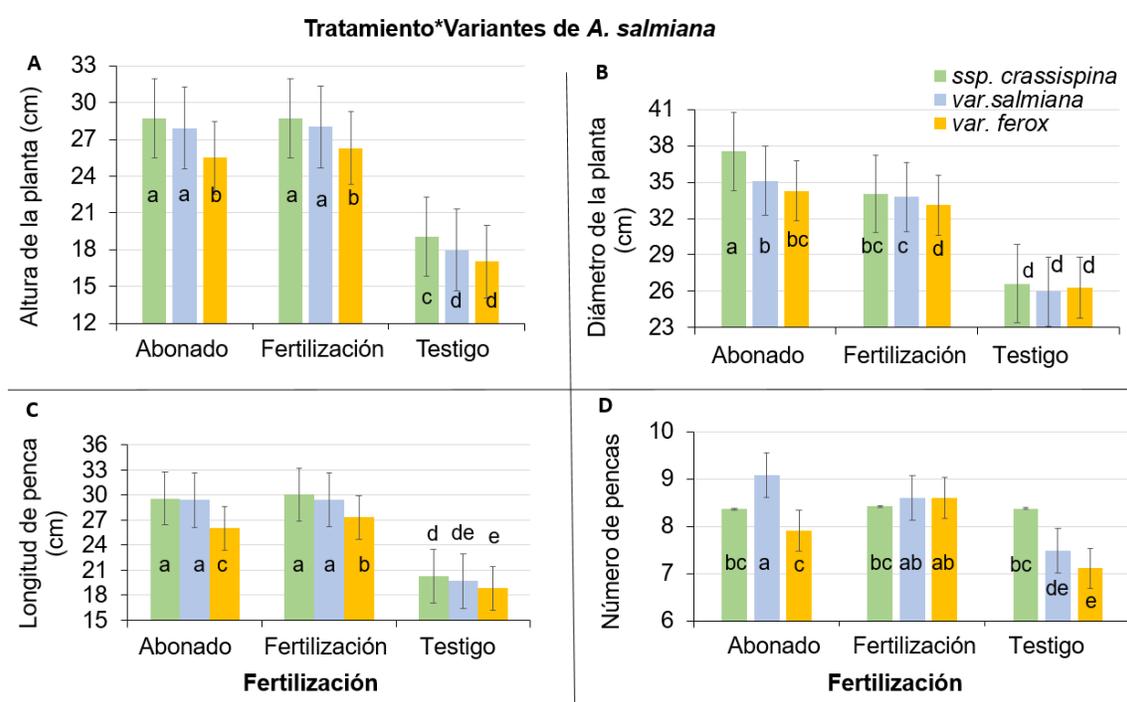


Figura 15. Efecto de la interacción T* Vr sobre las variables de crecimiento; **A)** altura de la planta; **B)** diámetro de la planta; **C)** Longitud de penca y **D)** número de pencas. Promedio de 11 repeticiones mensuales de enero a septiembre de 2018. Las barras verticales indican el error estándar, n=11.

La altura de la *ssp. crassispina* y *var. salmiana* cultivadas con abono y fertilización sobresalen y respondieron de manera similar; mientras que las plantas testigo tuvieron una respuesta poco favorable.

El diámetro de la ssp. *crassispina* cultivada con abono dio el mejor resultado seguido de la que creció con fertilización.

La longitud de pencas de la ssp. *crassispina* y var. *salmiana* cultivadas con abono y fertilizante sobresalen y sin significancia entre ellas. Esta variable, parece estar muy relacionada con la altura.

La mejor respuesta de la ssp. *crassispina* y var. *salmiana* al abonado, se debe a que éste aumenta el aprovechamiento de los elementos y mejora las características físicas del suelo (Alcántar y Trejo-Téllez, 2013). Mora-López *et al.* (2011) mencionan que esta práctica, es un indicador del grado de humanización, que se manifiesta mayor tamaño de la roseta. En cambio, la var. *ferox* se vio en lo general poco favorecida en el crecimiento; esto podría indicar la poca intervención humana o características de su variante reconocido por las rosetas pequeñas, pocas pencas (García-Mendoza, 2011), entre otras particularidades que se mencionan en el apartado de generalidades de cada variante de *A. salmiana* estudiadas en esta investigación.

El número de pencas de la ssp. *crassispina* no presenta sensibilidad a la fertilización; en cambio la var. *salmiana*, cultivada con abono respondió mejor, por lo que no está claro que esta variable sea un indicador de humanización.

4.1.2.7 Efecto de la interacción de tratamiento x mes

La interacción tratamiento x mes generó alta significancia ($p \leq 0.01$) en altura, diámetro, y longitud de penca y significancia ($p \leq 0.05$) en número de pencas; para pencas desplegadas no hubo significancia.

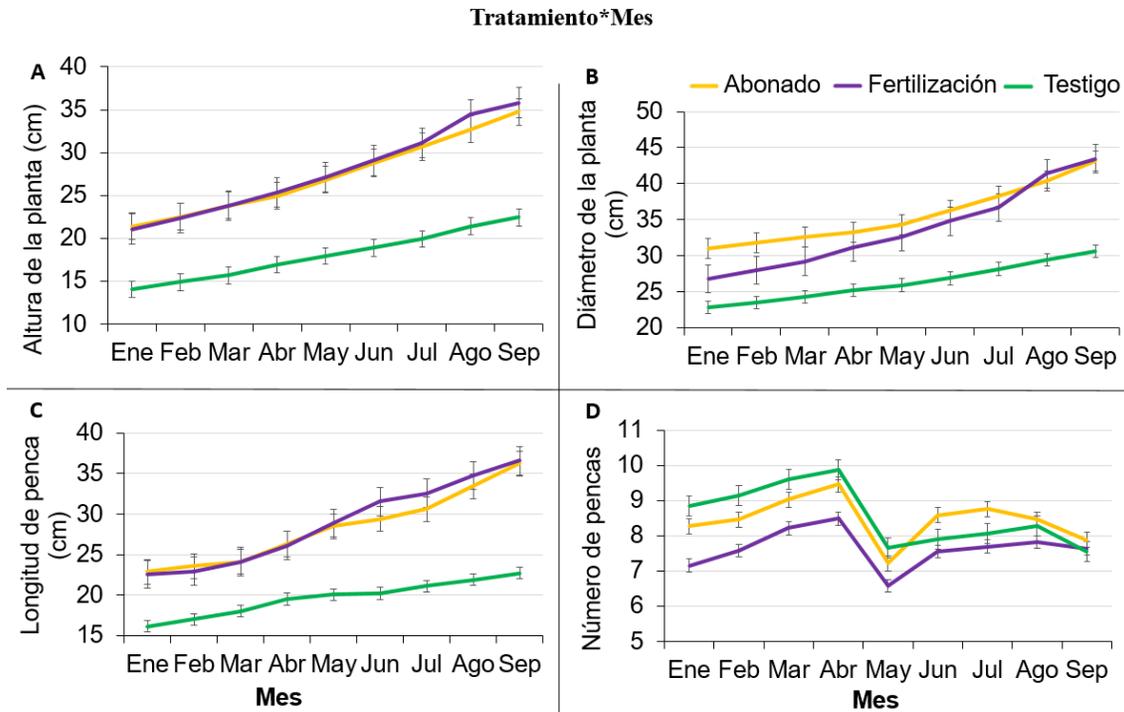


Figura 16. Efecto de la interacción T*M sobre las variables de crecimiento; A) altura de la planta; B) diámetro de la planta; C) longitud de penca y D) número de penca. Cada punto es el promedio de 11 repeticiones mensuales de enero a septiembre de 2018.

El abonado y la fertilización influyen en forma positiva en las variables de crecimiento; para altura y longitud de penca fue similar el crecimiento; el diámetro se vio favorecido por el abono hasta el mes de julio. Sin embargo, para agosto y septiembre, el diámetro de las plantas cultivadas con fertilización fue superior a las que recibieron abono. Lo cual coincide con lo mencionado por Cruz (2001) en *A. angustifolia* con abono y fertilización, se vieron favorecidas las variables altura y diámetro.

El número de penca (**Figura 16C**) presentadas en marzo y abril fue superior que en el resto de los meses; destacaron las plantas testigo. Se cree que, debido a las condiciones limitativas de precipitación presentadas en estos dos meses, las plantas se ven obligadas a conservar por más tiempo las penca, ya que es el medio para su fuente de alimentación (fotosíntesis). No obstante, en el mes de mayo hubo una disminución drástica de las mismas que rompen la tendencia creciente. Una explicación inmediata a este hecho podría ser, la sequía y las temperaturas extremas de 24 a 29 °C que se

presentaron en este mes, provocaron estrés en la planta y como mecanismo de sobrevivencia, senescieron las pencas para minimizar al máximo la pérdida de agua por transpiración y así mantener el balance hídrico en la planta. Sin embargo, se requiere más de una observación para aseverar este hecho. El mayor despliegue de pencas que se dio en el mes de junio y julio se ve reflejado en el número de pencas. En el mes de octubre de nuevo la tendencia es decreciente pese a las condiciones favorables de humedad.

Las plantas que crecieron sin fertilización presentaron promedios bajos en las variables de crecimiento por lo que es un hecho evidente que el abonado orgánico y la fertilización favorecen el crecimiento de las plantas.

4.1.3 Peso fresco, seco, materia seca

El **Cuadro 20** presenta las medias de peso fresco, peso y materia seca en toneladas por hectárea para plantas crecidas con los tratamientos y por variante de *Agave salmiana*.

Cuadro 20. Peso fresco, peso seco y materia seca en *Agave salmiana*.

FV	Estratos	PF (g/p)	PF (ton*ha ⁻¹)	PS (g/p)	Ms (%)	Ms (ton*ha ⁻¹)
Tratamiento	Abonado	1507.89 a	1.13 a	205.89 a	13.82 a	0.15 a
	Fertilización	1561.44 a	1.17 a	222.78 a	14.59 a	0.17 a
	Testigo	779.78 b	0.58 b	121.67 b	16.0 a	0.09 b
Variantes de Agave salmiana	<i>crassispina</i>	1225.78 b	0.91 b	173.44 b	14.61 a	0.13 a
	<i>salmiana</i>	1507.22 a	1.1 a	214.22 a	14.58 a	0.16 a
	<i>ferox</i>	1116.11 b	0.83 b	162.67 b	14.53 a	0.12 a
DHS		253.86	0.19	44.23	4.6	0.08

PF: peso fresco en gramos por planta y toneladas por ha, **PS:** peso seco en gramos por planta, **MS:** materia seca; **DHS:** diferencia honesta significativa; Medias con la misma letra en una columna son iguales (Tukey, 0.05); n=3.

Los valores más altos y mejores en peso fresco, seco y área foliar fueron para plantas cultivadas con abono y fertilizante, sin significancia entre ellos; respuesta que era de esperarse ya que las plantas necesitan de nutrimentos para su crecimiento. Por lo tanto,

la biomasa fresca acumulada en estos 3 años 5 meses y con una densidad de 750 plantas por hectárea; las plantas que recibieron abonado acumularon 1.13 ton*ha⁻¹, las de fertilización 1.17 ton*ha⁻¹ y para el testigo fue de 0.58 ton*ha⁻¹. La var. *salmiana* cultivada con abono obtuvo el mejor valor con 1.39 ton*ha⁻¹, le sigue ssp.*crassispina* con fertilización (1.20 ton*ha⁻¹) y el menos favorecido fue ssp.*crassispina* sin fertilización con 0.54 ton*ha⁻¹, 50 % menos.

La producción de materia seca (MS) en promedio fue de 14.5 %, cifra cercana a lo informado por Gómez (2003) y por Silos espino *et al.* (2011) con 11.14 % y 10 %. Las plantas que crecieron con abonado obtuvieron de 0.15 ton*ha⁻¹ de MS, para las plantas que crecieron con fertilización 0.17 ton*ha⁻¹ y para los tratamientos que no recibieron fertilización fue de 0.09 ton*ha⁻¹. La var. *salmiana* con abonado orgánico obtuvo 0.18 ton*ha⁻¹.

El análisis por variantes de *Agave salmiana*, destacó la var. *salmiana* para peso fresco y seco, al acumular mayor biomasa.

Nobel *et al.* (1992) encontraron para *A. salmiana* de hasta 7 años, crecidas en condiciones naturales en Tequexquahuac Estado de México, una productividad en materia seca de 42 ton*ha⁻¹año⁻¹. Es el valor más alto, rebasa especies con metabolismo C3 y C4 agrícolas y forestales (García-Moya *et al.*, 2011). En *Agave tequilana* de 2.5 años se han referido incrementos en el peso de cabeza (“piña”) a los 18 meses después de fertilizar con el tratamiento 120-80-60, duplicándose el rendimiento comparado con el testigo (Valenzuela y González, 1995). Para la misma especie, Zúñiga *et al.* (2018) mencionan en plantas de 40 meses, una producción en Ms por planta en testigo absoluto 3.3 kg y hasta 16.7 kg con fertilización de base más fertigación. Ambos estudios refieren una alta producción de MS. Sin embargo, en el primero, la edad de las plantas es casi el doble de las plantas evaluadas en este estudio y en el segundo trabajo, el riego y el suministro constante de nutrimentos favoreció el desarrollo de las plantas pese a las condiciones drásticas de altas temperaturas donde crecen estas plantas.

4.1.4 Área foliar, índice de área foliar

El análisis de varianza para índice de área foliar (IAF), mostró alta significancia ($p \leq 0.01$) para tratamientos y variantes de *A. salmiana*. El **Cuadro 21** recopila las medias de área foliar por planta en cm^2 y el índice de área foliar por los dos factores de variación.

Cuadro 21. Índice de área foliar, materia seca por hectárea por cada tratamiento.

FV	Estratos	AF (cm^2)	IAF
Tratamiento	Abonado	1281.0 a	0.019 a
	Fertilización	1048.5 a	0.015 a
Variantes de <i>A. salmiana</i>	Testigo	600.8 b	0.009 b
	ssp. <i>crassispina</i>	881.4 a	0.013 a
	var. <i>salmiana</i>	1180.2 a	0.017 a
	var. <i>ferox</i>	868.7 a	0.013 a
DHS		253.86	0.004

Abonado orgánico: 3 kg de cerdaza por planta; **Fertilización química:** 100 g de triple 17 (17-17-17), 121 g de urea (46-00-00) y 182 g de Yara Star (21-17-3) por planta; **Testigo:** sin abonado ni fertilización; **FV:** Factor de variación, **AF:** área foliar, **IAF:** índice de área foliar; **DHS:** diferencia honesta significativa; Medias con la misma letra en una columna son iguales (Tukey, 0.05).

El área foliar de plantas cultivadas con abono y fertilización fue superior, en comparación con las plantas que crecieron sin fertilización. No hubo significancia entre las variantes de *A. salmiana*.

El índice de área foliar más alto es para la var. *salmiana* con abonado orgánico $\text{IAF}=0.26$ y el más bajo ssp. *crassispina* sin fertilizar con $\text{IAF}=0.008$. En general, las plantas que crecieron con abonado y fertilización fueron superiores, sin significancia ($p \leq 0.05$) entre ellos, con IAF de 0.019 y 0.015. No hubo significancia entre las variantes de *A. salmiana* para esta variable. Los índices aquí encontrados están por debajo de los recopilados por García-Moya *et al.* (2011), para las siguientes especies: *A. fourcroydes* maduros bajo cultivo con IAF de 3.8 a 8.4 (Nobel, 1985) y en plantaciones de *A. angustifolia* con 3.2 (José-Jacinto y García-Moya, 1995). Esto se debe, primero a la morfología de las plantas, las que tienen mayor índice poseen pencas alargadas y en mayor número que las

variantes de *A. salmiana*, la edad de la planta es otro factor a considerar y la densidad de plantación, que en esta investigación podría ser baja.

4.1.5 Rizomas emergentes y no emergentes

Los hijuelos son plantas que están expuestas sobre el suelo, algunos con pencas desplegadas o como un botón como se muestra en la **Figura 17 B**. El porcentaje de plantas con hijuelos hasta septiembre de 2018 se muestran en el **Cuadro 22**.

Cuadro 22. Hijuelos emitidos hasta septiembre de 2018.

Tratamiento	Variantes de <i>A. salmiana</i>	Porcentaje de plantas con hijuelos	Número de hijuelos	Total
Abonado	<i>ssp. crassispina</i>	54.5 b	136	314
	<i>var. salmiana</i>	54.5 b	136	
	<i>var. ferox</i>	36.4 c	41	
Fertilización	<i>ssp. crassispina</i>	72.7 ab	198	837
	<i>var. salmiana</i>	81.8 a	390	
	<i>var. ferox</i>	72.7 ab	248	
Testigo	<i>ssp. crassispina</i>	0.0 d	0	6
	<i>var. salmiana</i>	9.1 d	4	
	<i>var. ferox</i>	9.1 d	2	

Abonado orgánico: 3 kg de cerdaza por planta; **Fertilización química:** 100 g de triple 17 (17-17-17), 121 g de urea (46-00-00) y 182 g de Yara Star (21-17-3) por planta; **Testigo:** sin abonado ni fertilización; **DHS=18**; Medias con la misma letra en una columna son iguales (Tukey, 0.05).

La emisión de hijuelos a 2 años de establecimiento de las plantas en campo, destacaron las tres variantes que recibieron fertilización, en promedio el 75 % de las plantas presentaron hijuelos; el 81 % de las plantas de la *var. salmiana* crecidas con este tratamiento tuvieron de 1 a 5 hijuelos, dato que podría rebasar lo documentado por Toribio (2005) y Nieto *et al.* (2016), mencionan que una planta produce de 3 a 10 hijuelos en su vida.

El 48 % de las variantes que recibieron abono emitieron hijuelos, la var. *ferox* fue la menos favorecida con este tratamiento.

Sólo las variantes de *A. salmiana* en el tratamiento testigo tuvieron emisión de hijuelos; sin embargo, el porcentaje fue bajo, 9.1 %.

Los hijuelos de las plantas cultivadas con abono y fertilización se encontraron desde pegadas a la planta madre hasta 1.25 m de distancia. Sin embargo los hijuelos de las plantas testigo, brotaron desde pegadas a máximo 0.35 m, esto nos indica que debido a la escases de nutrientes disponibles en el suelo, la planta madre no puede sostener la demanda nutrimental del hijuelo.

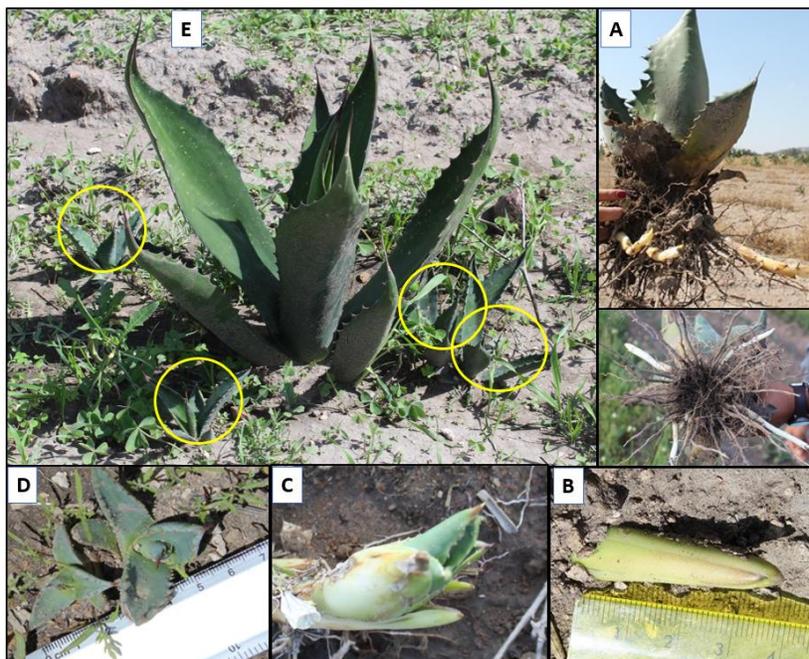


Figura 17. A) Raíces y rizomas no emergentes, B) Hijuelos emergiendo con 3-4 cm, C) Hijuelo con las primeras 3 pencas desplegadas, D) Hijuelos con pencas desarrolladas y extendidas, E) *A. salmiana* ssp. *crassispina* con 4 hijuelos completamente desarrollados.

El **Cuadro 23** presenta las medias en número de rizomas emergentes y no emergentes por tratamiento y variantes de *A. salmiana*.

Cuadro 23. Número de rizomas emergentes y no emergentes por planta.

FV	Estratos	RNE
Tratamiento	Abonado	3.77 a
	Fertilización	2.88 ab
	Testigo	2.55 b
Variantes de A. salmiana	<i>crassispina</i>	3.22 a
	<i>salmiana</i>	3.11 a
	<i>ferox</i>	3.11 a

RNE: rizomas no emergentes; **DHS= 1.05**; Medias con la misma letra en una columna son iguales (Tukey, 0.05).

El mejor resultado ($p \leq 0.05$) en número de rizomas no emergentes fue para las plantas que crecieron con abonado con una media de 3.77, seguido las fertilizadas con una media de 2.88 y para las testigo 2.5 rizomas. No hubo significancia entre las variantes de *A. salmiana*. El número de rizomas también puede estar relacionado con la humedad favorecido por la humedad provocada con el abono que funciona como un acolchado alrededor de la planta.

En el **Cuadro 24** se informan los valores de longitud radical y las proporciones parte aérea-radical, con base en el peso fresco.

Cuadro 24. Longitud de raíz, proporción parte aérea (PPA) y radical (PPR) respecto al peso total.

Fuente de variación	Estratos	LR (cm)	PPA (%)	PPR (%)
Tratamiento	Abonado	24.189 a	95.29 a	4.68 a
	Fertilización	26.68 a	95.32 a	4.70 a
	Testigo	23.94 a	94.92 a	5.07 a
Variantes de Agave salmiana	<i>crassispina</i>	25.50 a	95.16 a	4.83 a
	<i>salmiana</i>	24.68 a	95.53 a	4.46 a
	<i>ferox</i>	24.63 a	94.83 a	5.17 a
	DHS	4.16	1.39	1.39

DHS: diferencia honesta significativa; Medias con la misma letra en una columna son iguales (Tukey, 0.05).

Las variables LR, PPA y PPR no hubo significancia entre tratamientos ni entre las variantes de *Agave salmiana*. La parte área representó, en todos los casos, más del 94

% del peso total y la parte radical, solo del 4.46 al 5.17 %. Esta proporción raíz/vástago de las plantas MAC, es una respuesta fundamental de sobrevivencia, ya que limita la pérdida de agua hacia el suelo, además de la habilidad para la toma rápida de agua cuando están hidratadas (Nobel y Hartsock, 1986). Aunado a lo anterior, Martínez (1985) en una caracterización de la distribución de materia seca en *Agave salmiana* para plantas de alrededor de 1.5 kg en peso seco y 0.3 m de altura, menciona que estas tenían el 16 % de su peso seco total bajo tierra (raíces y rizomas). Algunos autores mencionan que la asignación de recursos entre órganos puede estar influenciado por otros factores como el agua, por ejemplo, Nobel *et al.* (1986) informan que a las plantas que se les proporcionó riego semanal, aumentaron su masa radical en un 74 % (de 43.2 g a 75.4) pero Ramírez-Tobías *et al.* (2014) mencionan que las proporciones de biomasa de la raíz y el vástago de *Agave americana* var. *marginata*, *A. duranguensis* y *A. salmiana* permanecieron sin cambios bajo riego constante y restringido. Otro factor podría ser la disponibilidad de nutrientes, aunque Reich (2002) refiere que el fertilizante tampoco influyó en la proporción, lo cual coincide con este trabajo. La baja proporción raíz: vástago no está determinada por humedad o fertilizante, sino por la respuesta de reducir al mínimo la pérdida de agua por las raíces.

La longitud promedio de la raíz principal, fue de 24 cm sin efecto de los tratamientos. Las raíces superficiales son una respuesta adaptativa a las condiciones de sequía, además de que los suelos son poco profundos. Nobel (1998) menciona que los agaves tienen raíces someras que responden rápido a las lluvias ligeras y así aprovechan al máximo la poca humedad y que en *Agave deserti* y *Ferocactus acanthodes*, pocas raíces rebasaban los 25 cm y por otro lado, Sánchez-Urdaneta *et al.* (2004) encontraron que la raíz de plántulas de *A. salmiana* toleran el déficit de humedad drástico y que su crecimiento continúa resultado del control de sus procesos fisiológicos y bioquímicos independiente del estrés.

Los resultados obtenidos muestran, como lo mencionan Ramírez-Tobías *et al.* (2014) la carencia de un patrón en la asignación de biomasa entre órganos mostrada por las especies *Agave* que ellos estudiaron en respuesta a la restricción de humedad y en este caso en respuesta a la fertilización.

4.2 Variables fisiológicas

4.2.1 Acidez titulable

Las plantas objeto de estudio tenían edad de 3 años y un mes en marzo de 2018 y 3 años 5 meses en julio de 2018. En marzo la temperatura máxima y mínima diaria fue de 25 y 10 °C y una precipitación media mensual de 16 mm; en julio, la temperatura máxima y mínima diaria fue de 22 y 12 °C, con una precipitación media mensual de 127 mm.

La penca número 3 recolectada con edad promedio de 6 meses mostró, una respuesta significativa ($p \leq 0.05$) en el análisis de varianza para el porcentaje de acumulación de ácido málico, como indicador de la fotosíntesis MAC, entre las temporadas de estiaje y de lluvias, no así entre los tratamientos. La acumulación **nocturna** fue mayor en la temporada de lluvias, con una media de 0.55 % con un pH de 4.98 comparado con el mismo turno de la temporada de estiaje con una media de 0.30 % con un pH de 5.14. El porcentaje de acumulación **matutina** en temporada de estiaje fue mayor con una media de 1.31 % y un pH de 4.2, mientras que para la temporada de lluvias en el mismo turno una media de 1.21 % con un pH de 4.16.

La acidez titulable tuvo un mínimo (0.55 y 0.30 %) al anochecer y un máximo al amanecer (1.21 y 1.31 %), que difiere con la ruta MAC tradicional (Osmond *et al.*, 1994), con máximos al anochecer y mínimos al amanecer.

El **Cuadro 25** presenta el análisis por temporada y por tratamientos: **A) Sequía:** turno nocturno, no hubo significancia ($p \leq 0.05$) en el porcentaje de acumulación de ácido málico con una media de 0.29 %, ni para el pH (5.14); en cambio, en el turno matutino, la fertilización y abonado tuvieron mayor acumulación de ácido málico (AM) con una media de 1.4 % y 1.28 %, sin significancia ($p \leq 0.05$) entre ellas; para el pH no hubo significancia entre tratamientos (promedio 4.2). **B) Lluvias:** turno nocturno, tuvo mayor acumulación el testigo con una media de 0.72 %. Para el pH, resaltaron las plantas cultivadas con fertilización y abonado con un pH de 5.05 y 5.08; en el turno matutino, no hubo significancia ($p \leq 0.05$) entre tratamientos con una media de 1.21 % y para el pH destacaron el testigo y el abonado orgánico con 4.23 y 4.17.

Cuadro 25. Porcentaje de ácido málico (% A) y pH por temporada para tratamientos aplicados al considerar las tres variantes de *Agave salmiana*.

Tratamiento	Temporada							
	Sequía				Lluvias			
	p.m.		a.m.		p.m.		a.m.	
	%A	pH	%A	pH	%A	pH	%A	pH
Abonado	0.29 a	5.20 a	1.28ab	4.21 a	0.38 c	5.05 a	1.16 a	4.17 a
Fertilización	0.30 a	5.16 a	1.40 a	4.20 a	0.54 b	5.08 a	1.21 a	4.07 b
Testigo	0.29 a	5.07 a	1.25 b	4.19 a	0.72 a	4.8 b	1.27 a	4.23 a
DHS	0.06	0.13	0.12	0.07	0.03	0.16	0.15	0.13

Abonado orgánico: 3 kg de cerdaza por planta; **Fertilización química:** 100 g de triple 17 (17-17-17), 121 g de urea (46-00-00) y 182 g de Yara Star (21-17-3) por planta; **Testigo:** sin abonado ni fertilización; **DHS:** diferencia honesta significativa; Medias con la misma letra en una columna son iguales (Tukey, 0.05).

Los **Cuadros 26 y 27** concentran los análisis por variantes de *Agave salmiana* en relación con la acumulación de AM y el pH.

Cuadro 26. Porcentaje de ácido málico (% A) y pH por variantes de *A. salmiana* con los tres tratamientos en la temporada de sequía.

Variante de <i>Agave salmiana</i>	Abonado				Fertilización				Testigo			
	p.m.		a.m.		p.m.		a.m.		p.m.		a.m.	
	%A	pH	%A	pH	%A	pH	%A	pH	%A	pH	%A	pH
ssp. <i>crassispina</i>	0.2b	5.15	1.2a	4.21	0.3a	5.19	1.3a	4.25	0.3a	5.14	1.4a	4.11
var. <i>salmiana</i>	0.3a	5.09	1.4a	4.15	0.2a	5.09	1.2b	4.19	0.2a	5.45	1.0b	4.27
var. <i>ferox</i>	0.3a	4.98	1.1a	4.21	0.3a	5.19	1.6a	4.17	0.3a	5.02	1.2ab	4.24
DHS	0.06		0.12		0.06		0.3		0.06		0.35	

DHS: diferencia honesta significativa; medias con la misma letra en una columna son iguales (Tukey, 0.05); n=4.

El porcentaje de AM en la temporada de sequía fueron las siguientes: en el turno vespertino no hubo significancia ($p \leq 0.05$) entre las variantes de *Agave salmiana* ($\bar{X}=0.30$ %), para el pH resaltaron ssp. *crassispina* (5.16) y var. *salmiana* (5.21), en el turno matutino, sin significancia ($p \leq 0.05$) entre variantes de *A. salmiana* para acumulación de AM (media 1.31 %) y para pH (media 4.20).

Cuadro 27. Porcentaje de ácido málico (% A) y pH por variantes de *Agave salmiana* con los tres tratamientos en temporada de lluvias.

Variante de <i>Agave salmiana</i>	Abonado				Fertilización				Testigo			
	a.m.		p.m.		a.m.		p.m.		a.m.		p.m.	
	%A	pH	%A	pH	%A	pH	%A	pH	%A	pH	%A	pH
ssp. <i>crassispina</i>	1.06b	4.22	0.40a	5.26	1.10b	4.05	0.70a	4.96	1.06b	4.25	0.7b	4.64
var. <i>salmiana</i>	1.07b	4.22	0.36a	4.97	1.08b	4.14	0.39b	5.14	1.10b	4.44	1.0a	4.87
var. <i>ferox</i>	1.34a	4.06	0.39a	4.98	1.46a	4.04	0.54ab	5.16	1.65a	4.01	0.4c	4.95
DHS	0.06		0.12		0.06		0.3		0.06		0.35	

DHS: diferencia honesta significativa; medias con la misma letra en una columna son iguales (Tukey, 0.05).

El porcentaje de ácido málico fue significativa ($p \leq 0.05$) en el turno nocturno de la temporada de lluvias, así también los mejores valores fueron para la ssp. *crassispina* y var. *salmiana* con 0.60 y 0.59 %, sin significancia ($p \leq 0.05$) entre ellas; en el turno matutino, resaltó la var. *ferox* con 1.48 % de acumulación favorecida en fertilización y testigo, para el pH resaltaron ssp. *crassispina* y var. *salmiana* con 4.27 y 4.17 %.

Las variantes de maguey pulquero a la edad de 3 años y un mes; en temporada de **sequía**, la acidez osciló para el turno nocturno (19:30-20:30 h) de 0.25 a 0.35 % y para el matutino (5:30-6:30h) de 1.01 a 1.60 % y para la temporada de **lluvias** para el turno nocturno de 0.36 a 1.02 % y para el matutino de 1.06 a 1.65 %. Las concentraciones encontradas son similares a lo referido por Ruíz (2014) en penca cotiledonar y las primeras dos pencas laterales de plantas de dos meses y medio bajo condiciones de sequía, de 0.5 a 1.2 para las 6 a.m. y de 0.8-1.6 % para las 20:00 h. A la edad de plantas evaluadas se puede decir que la concentración de AM no difiere de plántulas a plantas juveniles con porcentajes menores al 2 %.

La menor acumulación en el turno nocturno fue en la temporada de sequía, comparado con la temporada de lluvias, esto debido a que los estomas se mantienen cerrados y aunque evitan la pérdida de agua, también disminuyen la fijación del CO₂ ambiental reducen la concentración de ácido málico. Gracias a esta respuesta, las plantas subsisten la sequía edáfica hasta la temporada de lluvias; este hallazgo concuerda con un estudio realizado en *Ferocactus histrix* (DC.) G.E. Linds. (Romero-H. *et al.*, 2017) con

suspensión de riego durante 3, 6 y 12 meses afectó la acumulación de ácido málico y disminuyó la síntesis de éste al aumentar el tiempo sin irrigación. A los 6 meses también fue atípico que el parénquima de estas plantas presentara el contenido menor de ácido a las 19:00 h, al inicio del periodo nocturno, y que la acumulación de ácido en las siguientes horas se mantuviera sin cambio. Esto se explica que, al finalizar la noche, la concentración de ácido málico alcanza un estado estacionario debido al agotamiento del complejo fosfoenol piruvato-fosfoenol piruvato carboxilasa (PEP-PEPasa) y la fijación de CO₂ desciende. *Ibidem* también mencionan que las plantas de esa especie que se cultivaron con riego, presentaron metabolismo MAC típico, pero cuando se encontraban en condiciones de estrés hídrico, después de 22 d, cambiaban su metabolismo a *MAC-inútil*. Es probable que la sequía en marzo y la canícula presentada en temporada de lluvias (22 de julio al 23 de agosto) con déficit hídrico, provocó el cierre de estomas de día y noche previno la toma de CO₂ y la pérdida de agua, pero aún con pequeñas fluctuaciones de ácidos de cuatro carbonos debido a la fijación de CO₂ respiratorio. En general, la inducción de MAC es considerada como una respuesta al estrés que mantiene un balance positivo del carbono (Dodd *et al.*, 2002).

Pimienta-Barrios *et al.* (2005) mencionan que *O. ficus-indica* en condiciones de sequía se modifican las fases diurnas por lo que el ajuste de las fases se ve influida por las condiciones de sequía y lluvia.

Vázquez *et al.*, (2011) refieren para tres variantes de *Agave salmiana* (blanco, liso y chino) bajo condiciones de invernadero y con riego, que las pencas laterales con edades de tres a cinco meses de las tres variantes mostraron los mayores promedios de acidez a las 8:00 y 4:00 h y la más baja al medio día 12:00 y 16:00 h. Para las pencas laterales con edad poco mayor a cinco meses, también se observó que la acidez acumulada se mantuvo menor a 2 % a lo largo de 24 horas.

Los resultados muestran que la acumulación de ácido málico se vio afectado por los factores ambientales relacionados con la disponibilidad de agua acorde a la temporada de estiaje o de lluvias (precipitación, intensidad luminosa, temperatura) que fluctúan con la época y la edad de la planta.

Las condiciones climáticas de las temporadas evaluadas, fueron diferentes: la temperatura, la precipitación y humedad relativa, por lo que estos factores afectan la activación o desactivación enzimática y también afectó en el horario de acumulación máxima. Osmond (1978) menciona que la temperatura óptima para la mayor absorción nocturna de CO₂ se da cuando los valores son cercanos a la media anual de los hábitats de la especie. Por lo que para este estudio, la temperatura media anual de Temascalapa es de 14 a 18 °C y en el mes de marzo la temperatura osciló de 10 a 23 °C y en julio de 12 a 22 °C.

4.2.2 Grados Brix

El **Cuadro 28** presenta las medias en grados Brix por tratamiento y variantes de *A. salmiana*.

Cuadro 28. Grados Brix por tratamiento y variantes de *Agave salmiana*.

Factor de variación		Grados Brix
Tratamiento	Abonado	6.9 a
	Fertilización	7.3 a
	Testigo	7.3 a
Variantes de <i>A. salmiana</i>	<i>crassispina</i>	7.9 a
	<i>salmiana</i>	7.1 a
	<i>ferox</i>	6.5 a

DHS=1.42; Medias con la misma letra en una columna son iguales (Tukey, 0.05).

Los tratamientos no afectaron el contenido de grados Brix; con medias de 6.9 a 7.3 y entre variantes de *A. salmiana* de 6.5 a 7.9. Aunque Martínez *et al.* (2012) mencionan que los sólidos solubles aumentaron con 50 kg de N ha⁻¹ en *Agave potatorum* Zucc. Los mismos autores mencionan que la edad es un factor importante, a mayor edad de las plantas, mayor contenido, por lo que es posible sugerir que las plantas estudiadas son jóvenes. En general, los valores obtenidos en este trabajo fueron bajos, respecto al contenido de sólidos solubles en agua miel mencionados por Espíndola-Sortres *et al.* (2018) de 13.3-15.67 °B y Flores *et al.* (2008) de 12.6 °B. Cabe aclarar que en el caso

de *Agave salmiana*, se requiere un proceso de “capado” (eliminación de la yema floral) y se deja añejar de 3 meses a un año para lograr la concentración de azúcares en el agua miel) para empezar con el raspado (Ramírez, 2015; González, 2017. Por lo anterior, es probable que esta variable no sea representativa en esta etapa fenológica de las plantas, dado que se aprovechan en madurez fisiológica, apenas empieza a emerger la inflorescencia, a la edad de 9 a 14 años (Madrigal-Lugo *et al.*, 2014).

Los °B se podrían evaluar en un futuro para saber si se mantiene sin variación o como mencionan Narváez *et al.* (2016), las plantas crecidas en condiciones, en general, en suelos de poca fertilidad, producen aguamiel de alta calidad y en suficiente cantidad y Ramírez *et al.* (2011) mencionan que la fertilización con 50 kg de N ha⁻¹ favoreció la concentración de sólidos solubles totales en penca, sobre todo en plantas de 5 años y Cruz (2001) reporta que el abono incidió en una mayor presencia azúcares (entre un 150 a 200 %) en pencas de agave mezcalero.

4.2.3 Tasa de intercambio de CO₂ en condiciones de riego

Las mediciones de fotosíntesis se hicieron el 8 y 10 de octubre del 2018. El tiempo se caracterizó como días con nublados parciales, con presencia de precipitación. La humedad relativa en el periodo nocturno osciló de 53 a 95 % y en el diurno de 28 al 70 %. La temperatura del aire osciló de 18 a 40 °C, siendo la mínima a las 6:00 h y la máxima a las 14:00 horas.

Los **Cuadros 29** y **30** presentan la tasa de fijación neta en un período de 24 horas por tratamiento y por variantes de *A. salmiana*.

Cuadro 29. Efecto del tratamiento y la hora de medición sobre la tasa de intercambio de CO₂ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en *Agave salmiana*, con humedad en el suelo a capacidad de campo.

Tratamiento	18:00	22:00	2:00	6:00	10:00	14:00	18:00
Abonado	-0.8 b	21.5 b	16.0 b	7.1 a	5.09 c	4.1 c	0.4 a
Fertilización	-2.5 c	24.7 a	18.2 a	8.3 a	13.1 b	9.9 b	-2.1 b
Testigo	4.2 a	24.1 a	20.5 a	5.1 a	17.8 a	20.2 a	-2.6b
DHS	1.7	2.6	3.1	3.7	3.6	5.2	1.2

Abonado orgánico: 3 kg de cerdaza por planta; **Fertilización química:** 100 g de triple 17 (17-17-17), 121 g de urea (46-00-00) y 182 g de Yara Star (21-17-3) por planta; **Testigo:** sin abonado ni fertilización; **DHS:** diferencia honesta significativa; Medias con la misma letra en una columna son iguales (Tukey, 0.05).

Como se puede apreciar en el **Cuadro 29**, las plantas de *A. salmiana* en condiciones de buena humedad del suelo, asimilaron CO₂ principalmente durante la noche, pero también de manera significativa durante el día. Al integrar el área bajo la curva por tratamiento se encontró que del total de CO₂ asimilado durante 24 h, la asimilación diurna fue del 23, 37 y 45 % para plantas con abonado orgánico, fertilización química y testigo, respectivamente.

Cuadro 30. Efecto del tratamiento y la hora de medición sobre la tasa de intercambio de CO₂ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en variantes de *Agave salmiana* con humedad en el suelo a capacidad de campo.

Variantes de <i>A. salmiana</i>	18:00	22:00	2:00	6:00	10:00	14:00	18:00
var. salmiana	-0.8 b	21.8 b	19.9 a	7.3 a	10.5 b	9.0 a	-1.2 a
ssp. crassispina	-0.5 b	24.8 a	16.0 b	7.5 a	11.2 ab	12.2 a	-0.4 a
var. ferox	2.2 a	23.7 ab	18.8 ab	5.8 a	14.3 a	13.0 a	-2.7 b
DHS	1.7	2.6	3.1	3.7	3.6	5.2	1.2

DHS: diferencia honesta significativa; medias con la misma letra en una columna son iguales (Tukey, 0.05).

La tasa de intercambio de CO₂ (TIC) en plantas de 3 años 7 meses, tuvo dos picos máximos dentro del ciclo circadiano, a las 22:00 h y entre las 10:00 y las 14 h. La comparación de medias mostró lo siguiente: en los intervalos nocturnos (22:00, 2:00 y 6:00 h) la TIC máxima de CO₂ se dio a las 22:00 h, sobresalen las plantas que crecieron

con fertilización y las testigo con 24.7 y $24.1 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ y a las 6:00 h se presentaron los valores más bajos; en los intervalos diurnos (10:00, 14:00 y 18:00 h), el mejor tratamiento fue el testigo con TIC máxima de CO_2 ($20.2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) fue a las 14:00 h, en seguida, las plantas que crecieron con fertilización, con una TIC máxima de CO_2 ($13.18 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) a las 10:00 h. Para variantes de *A. salmiana*: en los intervalos nocturnos la máxima TIC se dio a las 22:00 h para las tres variantes, la ssp. *crassispina* destacó con $24.8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, le sigue la var. *ferox* con $23.7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. A las 6:00 h descendió la tasa de fijación de 5.8 a $7.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; en los intervalos diurnos, la var. *ferox* obtuvo la máxima TIC a las 10:00 h con $14.3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; la ssp. *crassispina* tuvo la máxima tasa de fijación de CO_2 a las 14:00 h con $12.2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

La **Figura 18** muestra el comportamiento de cada una de las variantes de *Agave salmiana* cultivadas con abono orgánico.

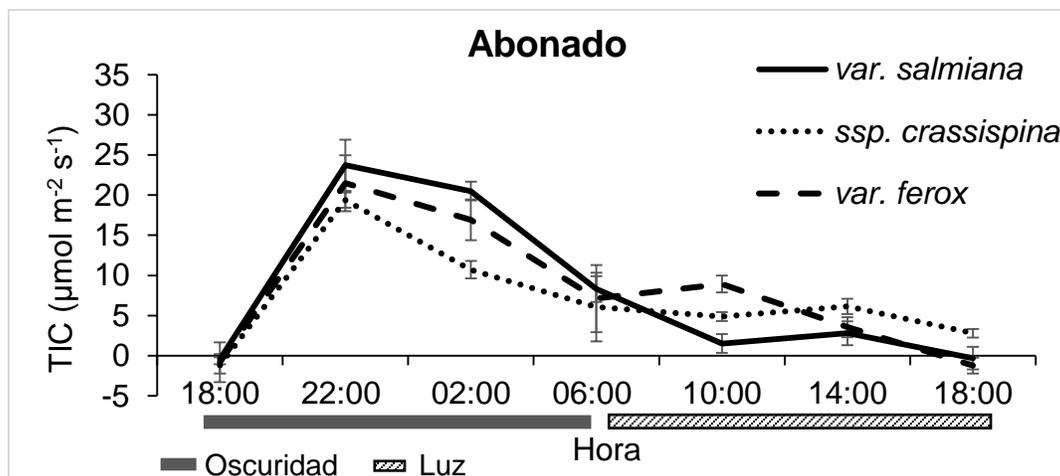


Figura 18. Tasa de intercambio de CO_2 en tres variantes de *Agave salmiana* con abonado orgánico con humedad en el suelo a capacidad de campo. Las barras verticales indican el error estándar, $n=3$.

Las tres variantes de *A. salmiana* tuvieron un pico máximo de la TIC a las 22:00 h; la var. *salmiana* obtuvo en promedio $23.7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, la var. *ferox* 21.5 y ssp. *crassispina* con $19.4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Las tres variantes mostraron un descenso y un mínimo a las 6:00 a.m. Sin embargo, la var. *ferox* tuvo un ligero ascenso a las 10:00 h. La var. *salmiana* y ssp.

crassispina mostraron un mínimo ascenso a las 14:00 h con un incremento de 1 a 2 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; de nuevo a las 18:00 p.m., las tres variantes presentaron valores cercanos a cero.

La **Figura 19** muestra el comportamiento de las tres variantes de *A. salmiana* que crecieron con fertilización.

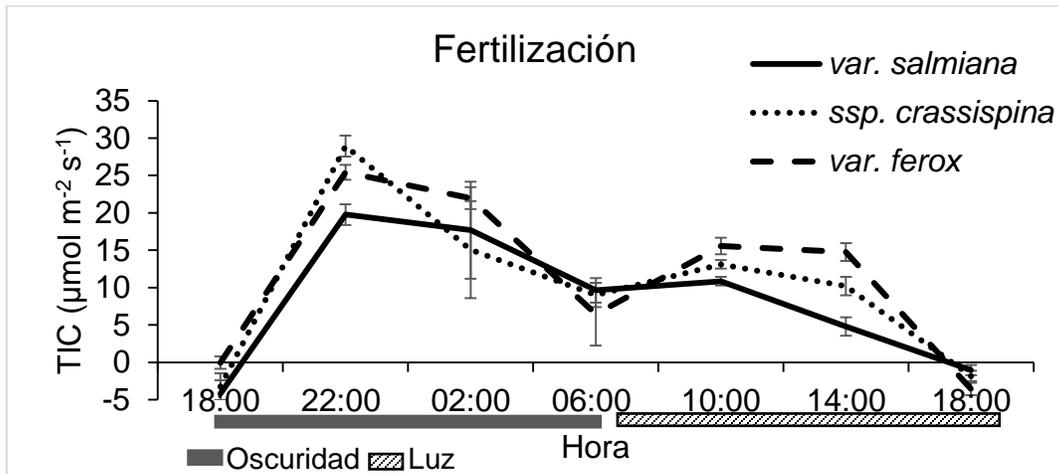


Figura 19. Tasa de intercambio de CO₂ en tres variantes de *Agave salmiana* con fertilización química con humedad en el suelo a capacidad de campo. Las barras verticales indican el error estándar, n=3.

Las plantas que crecieron con fertilización química, tuvieron también un pico máximo de TIC para las tres variantes de *A. salmiana* a las 22:00 h. La mayor TIC la obtuvo la ssp. *crassispina* con 28.9 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, le sigue la var. *ferox* con 25.4 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y la var. *salmiana* con 19.8 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Hubo un descenso mínimo entre las 22:00 y 2:00 h y luego un mínimo a las 6:00 h con valores de 6 a 10 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Las tres variantes tuvieron un repunte a las 10:00 en donde sobresale la var. *ferox* con 15.6 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, la var. *salmiana* con 10.9 y ssp. *crassispina* con 13.1 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Al final, un descenso a las 18:00 h con valores negativos de -1.0 a -4.0 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

La **Figura 20** muestra el comportamiento de las tres variantes de *A. salmiana* que crecieron sin fertilización.

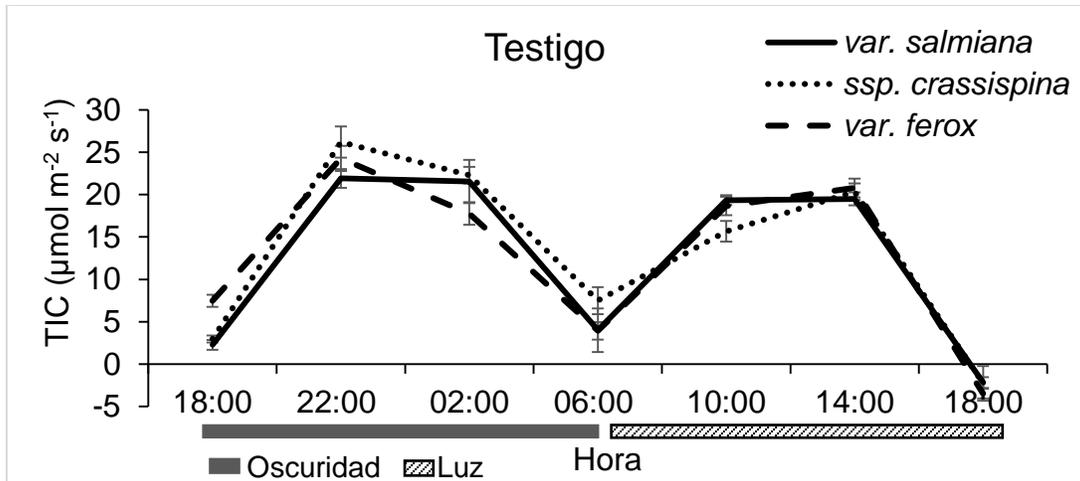


Figura 20. Tasa de intercambio de CO₂ en tres variantes de *Agave salmiana* testigo con humedad en el suelo a capacidad de campo. Las barras verticales indican el error estándar, n=3.

Las plantas testigo tuvieron también dos picos máximos de TIC, uno en el periodo nocturno y otro en el diurno; la máxima tasa de fijación nocturna de CO₂ para las tres variantes fue a las 22:00 h. La *ssp. crassispina* con 26.2 μmol m⁻² s⁻¹, las variedades *ferox* y *salmiana* con 24.3 y 21.9 μmol m⁻² s⁻¹. La *var. salmiana* mantuvo constante la TIC entre las 22:00 y 2:00 h. A las 6:00 h tuvieron una tasa promedio mínima de 4.0 a 7.5 μmol m⁻² s⁻¹. En el periodo diurno, se alcanza de nuevo una TIC máxima entre las 10:00 y las 14:00 h; la *var. ferox* alcanzó una máxima de 20.8 μmol m⁻² s⁻¹, la *ssp. crassispina* obtuvo 20.3 μmol m⁻² s⁻¹ y la *var. salmiana* 19.5 μmol m⁻² s⁻¹.

La máxima TIC para las tres variantes de *A. salmiana*, independientemente del tratamiento, ocurrió a las 22:00 h con una TIC promedio de 23.5 μmol m⁻² s⁻¹, lo cual es semejante a los estudios previos (Nobel *et al.*, 1992) en *A. salmiana* y *A. mapisaga* en condiciones de campo, con picos máximos de captura de CO₂ a las 20:00 h con 29 y 34 μmol m⁻² s⁻¹. En otro estudio en *A. angustifolia* de 4 años de edad, el pico se presentó entre 20:00 y 2:00 h con una tasa máxima de 30 μmol m⁻² s⁻¹ (José-Jacinto y García-Moya, 1995) y *A. tequilana* las tasas máximas reportadas fueron de 8 a 19 μmol m⁻² s⁻¹ en el periodo nocturno durante el año (Nobel, 1998; Pimienta-Barrios *et al.*, 2005b).

La TIC nocturna y diurna fue algo inesperado del metabolismo MAC típico, con fijaciones nocturnas de CO₂ controladas por un ritmo circadiano, donde la apertura estomática se da en condiciones de oscuridad evitar pérdidas excesivas de agua (Nobel, 2011), específicamente para las plantas fertilizadas y testigo donde la TIC diurna fue 37 % y 45 %, respectivamente. Sin embargo, se tienen registros similares en *A. tequilana* en condiciones de campo, con asimilación diurna y nocturna de CO₂ pero más del 80 % ocurrió en la noche (Pimienta-Barrios *et al.*, 2005b). La asimilación nocturna en *A. angustifolia* bajo condiciones de riego, contribuyó en un 70-85 % de la total diaria (Winter *et al.*, 2014). Se ha documentado la combinación de los metabolismos fotosintéticos C₃ (día) y MAC (noche) en *A. salmiana* en función del desarrollo y limitaciones de humedad como ejemplo de plasticidad fotosintética (Pimienta-Barrios *et al.*, 2006; Ruíz, 2014).

Los factores ambientales más relacionados con la TIC son: la temperatura y la humedad relativa (Pimienta-Barrios *et al.*, 2005b). Hartsock y Nobel (1976) informaron que cuando la humedad del suelo no fue un factor limitante en *A. deserti*, la apertura de estomas se registró durante el día, fijándose en el periodo de luz, el 97 % del CO₂ requerido por la planta. Por lo que es posible que las condiciones favorables de invernadero con alta humedad relativa diurna (28 al 70 %) y nocturna (53-95 %), temperaturas del aire mínima y máxima de 18 y 40 °C, favorecieron la asimilación neta de CO₂ durante día y noche. La TIC diurna, además de optimizar la ganancia de carbono, también podría ser un mecanismo de enfriamiento de la planta a través de la transpiración, mientras haya suficiente agua disponible en el suelo o dentro de las pencas (Lujan *et al.*, 2009).

El CO₂ capturado durante la noche se almacena en la vacuola y se libera al amanecer para entrar en los cloroplastos en los que se fija por RuBisCO mediante el ciclo de Calvin-Benson-Bassham (Borland *et al.*, 2009). Sin embargo, suponemos que la incorporación del CO₂ capturado en el día, se fue directo al ciclo de Calvin como ocurre en el metabolismo C₃, de otro modo, habría un gasto energético inútil. Por lo que se recomienda dar seguimiento a las moléculas CO₂ fijadas durante el día, con marcadores moleculares.

4.2.4 Tasa de intercambio de CO₂ en condiciones de baja humedad en el suelo

Las evaluaciones en plantas de *A. salmiana* con edad de 3 años 8 meses, correspondientes a una baja humedad del suelo (por abajo del punto de marchitez permanente, siete semanas sin riego), se llevaron al cabo los días 26 y 27 de noviembre, los cuales se caracterizaron por ser días con nublados parciales. La humedad relativa en el periodo diurno osciló de 35 a 82 % y en el nocturno de 54 a 74 %. Los valores más altos en humedad relativa se presentaron a las 10:00 y 14:00 h. La temperatura del aire osciló en la noche de 12 a 18 °C y en el día de 16 a 35 °C.

El **Cuadro 31** concentra la comparación de medias por tratamiento para las variantes de *A. salmiana*.

Cuadro 31. Efecto del tratamiento y la hora de medición sobre la tasa de intercambio de CO₂ (μmol m⁻² s⁻¹) en *Agave salmiana* con humedad del suelo por abajo del PMP.

Fertilización	14:00	18:00	22:00	2:00	6:00	10:00	14:00
Abonado	-1.7a	-0.4a	12.3a	13.8a	7.2a	-4.3b	-3.0a
Fertilización	-2.7a	-1.3ab	6.0ab	13.1a	6.8a	-1.6a	-2.5a
Testigo	-3.3a	-2.4b	2.0b	8.7b	6.7a	-5.5b	-3.2a
DHS	1.7	1.3	5.0	3.9	1.7	2.6	1.4

Abonado orgánico: 3 kg de cerdaza por planta; **Fertilización química:** 100 g de triple 17 (17-17-17), 121 g de urea (46-00-00) y 182 g de Yara Star (21-17-3) por planta; **Testigo:** sin abonado ni fertilización; **DHS:** diferencia honesta significativa; medias con la misma letra en una columna son iguales (Tukey, 0.05).

Posterior a la restricción de humedad, la tasa de intercambio de CO₂ disminuyó en el periodo nocturno y en el día no hubo.

La mayor TIC se dio a las 2:00 h, sin diferencia entre plantas que recibieron abonado y fertilización con 13.8 y 13.1 μmol m⁻² s⁻¹, pero sí hubo diferencia con plantas testigo (8.7 μmol m⁻² s⁻¹). A las 22:00 h la mayor TIC se dio en plantas que recibieron abonado con 12.3 μmol m⁻² s⁻¹.

El **Cuadro 32** menciona la comparación de medias por variantes de *A. salmiana*.

Cuadro 32. Efecto del tratamiento y la hora de medición sobre la tasa de intercambio de CO₂ (μmol m⁻² s⁻¹) por variantes de *Agave salmiana* con humedad del suelo por abajo del PMP.

Variantes de <i>A. salmiana</i>	14:00	18:00	22:00	2:00	6:00	10:00	14:00
<i>ssp. crassispina</i>	-3.8b	-0.4a	5.3a	12.8a	7.7a	-4.9a	-2.3a
<i>var. salmiana</i>	-1.8a	-1.7ab	9.6a	11.6a	6.8a	-2.8a	-2.9a
<i>var. ferox</i>	-2.2a	-1.9b	3.3a	11.2a	6.3a	-3.7a	-3.5a
DHS	1.7	1.3	5.0	3.9	1.7	2.6	1.4

DHS: diferencia honesta significativa; medias con la misma letra en una columna son iguales (Tukey, 0.05).

El análisis por variantes de *A. salmiana* mostró que en el periodo nocturno (22:00, 2:00 y 6:00 h) no hubo significancia ($p \leq 0.05$) entre ellas y en el periodo diurno (10:00, 14:00 y 14:00 h), sólo hubo significancia a las 14:00 y 18:00 h del primer día.

La **Figura 21** presenta el comportamiento de las tres variantes de *A. salmiana* tratadas con abono orgánico.

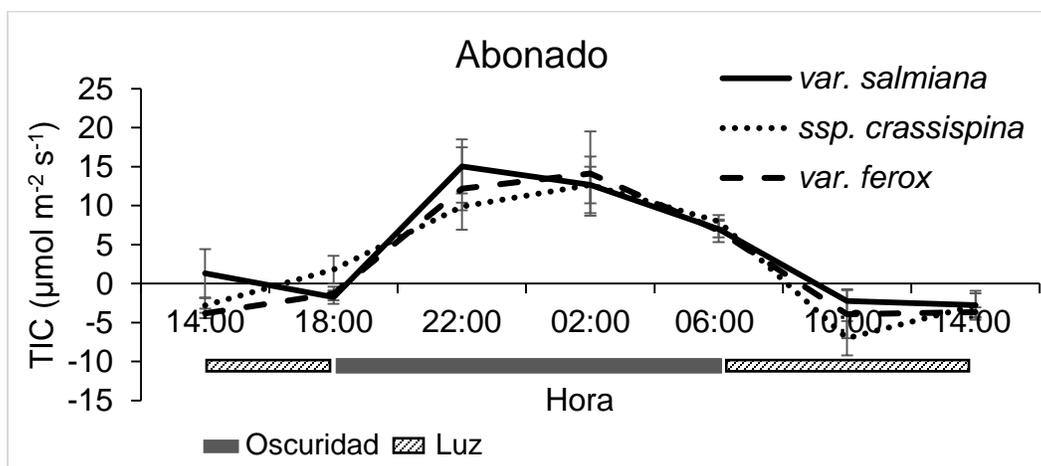


Figura 21. Tasa de intercambio de CO₂ en tres variantes de *A. salmiana* con abono orgánico y con humedad en el suelo por debajo de PMP. Las barras verticales indican el error estándar, n=3.

Las plantas cultivadas con abono orgánico tuvieron el pico máximo de TIC entre las 22:00 y 2:00 h (**Figura 21**). La var. *salmiana*, la var. *ferox* y ssp. *crassispina* obtuvieron en promedio 15.04, 12.6 y 12.2 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

La **Figura 22** presenta las respuestas de las tres variantes de *Agave salmiana* crecidas con fertilización química.

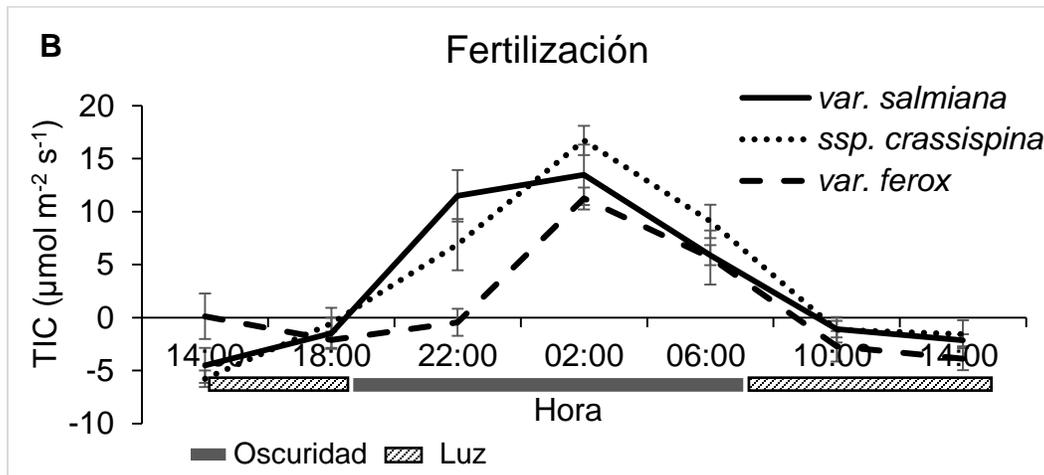


Figura 22. Tasa de intercambio de CO₂ en tres variantes de *Agave salmiana* con fertilización química y con humedad en el suelo por debajo de PMP. Las barras verticales indican el error estándar, n=3.

Las variantes de *A. salmiana* fertilizadas tuvieron la TIC máxima a las 2:00 h, la ssp. *crassispina* obtuvo los mejores valores con una máxima de 16.7 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, las variedades *salmiana* y *ferox* con 13.5 y 11.3 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Durante el día se presentaron valores cercanos a cero y negativos.

La **Figura 23** presenta el comportamiento de las tres variantes de *A. salmiana* testigo.

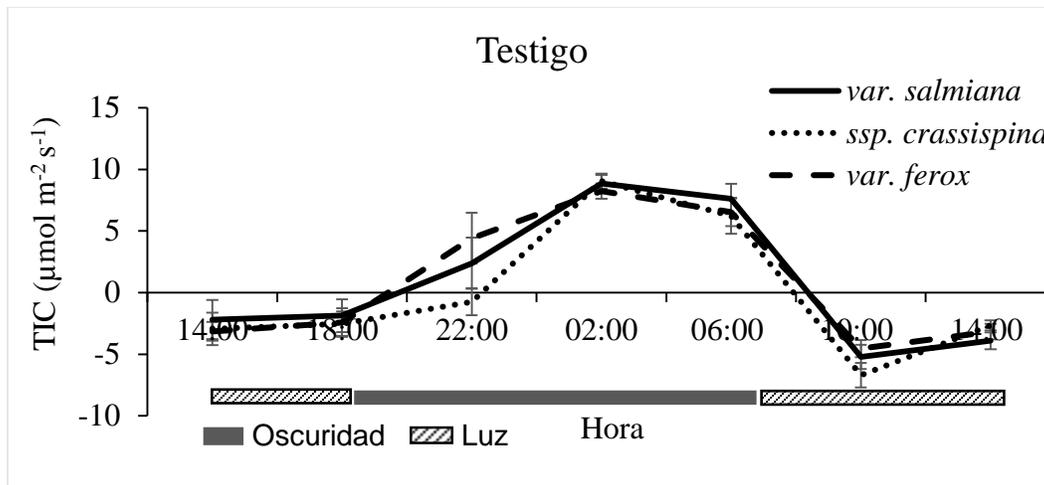


Figura 23. Tasa de intercambio de CO₂ en tres variantes de *Agave salmiana* testigo y con humedad en el suelo por debajo de PMP. Las barras verticales indican el error estándar, n=3.

Las plantas testigo presentaron un máximo de TIC a las 2:00 h; la ssp. *crassispina* y var. *salmiana* con 9.0 y 8.8 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y la var. *ferox* de 8.2 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. A diferencia de las plantas abonadas y fertilizadas, en las plantas testigo la TIC a las 6:00 h apenas disminuyó ligeramente ($\approx 23\%$) en comparación con la de las 2:00 h.

Los valores obtenidos en la TIC máxima posterior a una restricción en la humedad del suelo durante 7 semanas provocó tasas menores comparadas a las que se presentaron en la primera medición con humedad del suelo, lo cual concuerda con lo referido por Nobel (1985) para *A. fourcroydes* y por Winter *et al.* (2014) para *A. angustifolia* después de 11 días para la primera especie y dos semanas para la segunda especie, del cese de la irrigación. El estrés por sequía se manifestó como una disminución continua en la tasa de intercambio de CO₂. También, las plantas mostraron sólo asimilación nocturna, típico de plantas MAC, donde la apertura de estomas en las horas de oscuridad minimiza la pérdida de agua por transpiración, como ha sido reportado previamente (Casierra-Posada y González, 2009; Nobel, 2011).

El promedio de la tasa de intercambio de CO₂ máxima en plantas cultivadas con abono orgánico fue de 13.1 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y con fertilización química de 13.8 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, mientras que las plantas testigo tuvieron en promedio 8.7 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($\approx 40\%$ menos). Estos

resultados sugieren que el abonado y la fertilización son importantes en la productividad de las variantes de *A. salmiana* en condiciones de sequía. Las plantas fertilizadas no mostraron síntomas de estrés cuando la humedad del suelo fue inferior al PMP, mientras que en plantas C3 y C4, una vez que se alcanza el PMP (-1.5 MPa), sólo algunas plantas pueden recuperarse (Nobel, 2009), lo cual también está relacionado con la succulencia foliar, lo que refuerza la importancia de este suministro interno de agua para garantizar un alto rendimiento fotosintético durante el todo el año (Pimienta-Barrios *et al.*, 2001).

El metabolismo CAM demuestra una eficiencia de uso del agua (EUA) alta, lo que permite que estas plantas colonicen ambientes precarios de humedad, altas temperaturas y suelos pobres en nutrientes; logran incluso valores de productividad elevados en estos lugares (Matiz *et al.*, 2013; Winter *et al.*, 2014); lo que es importante considerar ante el panorama del cambio climático mundial que advierte la intensificación de la aridez, con la posible desertificación en todo el mundo (Matiz *et al.*, 2013), y donde los agaves juegan un papel importante por su resistencia a las condiciones extremas de temperatura y su alta productividad en condiciones de escases de agua.

4.3. Estado nutrimental en pencas

4.3.1 Concentración nutrimental en pencas

La concentración nutrimental en pencas de *A. salmiana* sólo fue afectada por el tratamiento. El **Cuadro 33** muestra la concentración de macro y algunos micronutrientes. La menor concentración de Mn en pencas provenientes de plantas abonadas se atribuye a la adsorción del Mn^{2+} por superficies coloidales con carga de la misma materia orgánica del abono, por lo que la cantidad intercambiable es baja (AGRO 4037, 2017). Además, los metales como el Mn aumentan la conductividad eléctrica (CE) por ser cationes divalentes que interactúan con cargas negativas generadas por las reacciones oxidativas de los compuestos orgánicos (García *et al.*, 2009).

Cuadro 33. Concentración de nutrimentos en *Agave salmiana* por efecto del tratamiento.

Tratamiento	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Zn	Mn	Cu	B
	g/kg						mg/kg				
Abonado	16.7a	1.5a	12.9 ^b	37.6a	9.1a	1.2a	157.7a	16.8a	12.1 ^b	3.9a	44.3a
Fertilización	18.8a	1.1 ^b	12.9 ^b	39.1a	7.9 ^b	1.1a	188.3a	14.4a	15.5a	4.9a	46.4a
Testigo	12.1 ^b	1.2 ^b	15.5a	35.7a	9.6a	0.8 ^b	172.6a	13.7a	11.9 ^b	3.5a	42.1a
Promedio	15.9	1.2	13.8	37.5	8.9	1.0	172.9	15.0	13.2	4.1	44.3
DHS	2.8	0.2	1.6	4.9	1.0	0.17	48.1	3.5	2.5	4.0	5.2

Abonado orgánico: 3 kg de cerdaza por planta; **Fertilización química:** 100 g de triple 17 (17-17-17), 121 g de urea (46-00-00) y 182 g de Yara Star (21-17-3) por planta; **Testigo:** sin abonado ni fertilización; el valor reportado para cada elemento es el promedio de 9 repeticiones; **DHS:** diferencia honesta significativa; Medias con la misma letra en una columna son iguales (Tukey, 0.05).

Las variantes de maguey pulquero que recibieron abono presentaron valores superiores ($p \leq 0.05$) en la concentración de 9 elementos, excepto en K y Mn; las plantas cultivadas con fertilización concentraron menos P, K y Mg y las plantas testigo concentraron menos N, P, S y Mn.

No hubo diferencia en la concentración de N entre plantas que recibieron fertilización química (18.8 g/kg) y las que recibieron abono orgánico (16.7 g/kg). La concentración de P, K, Mg, S y Mn fue diferente entre tratamientos. La mayor concentración de P se obtuvo en plantas abonadas, 1.5 g/kg. La mayor concentración de K se encontró en plantas testigo con 15.5 g/kg. La mayor concentración de Mg se encontró en plantas que recibieron abonado orgánico y testigo: 9.1 y 9.6. La mayor concentración de S se obtuvo en plantas abonadas y fertilizadas: 1.2 y 1.1 g/kg. La mayor concentración de Mn se obtuvo en plantas fertilizadas: 15.5 mg/kg.

El **Cuadro 34** informa la concentración de elementos por variante de *Agave salmiana*.

Cuadro 34. Concentración de nutrimentos en las tres variantes de *Agave salmiana*.

Variantes de <i>A. salmiana</i>	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Zn	Mn	Cu	B
	g/kg						mg/kg				
ssp. <i>crassispina</i>	16.6a	1.3a	15.3a	36.8a	8.1 ^b	1.0a	175.7a	15.9a	13.6a	3.9a	46.5a
var. <i>salmiana</i>	15.1a	1.2a	12.3 ^b	36.6a	8.6 ^b	1.0a	164.5a	14.3a	11.8a	5.1a	42.4a
var. <i>ferox</i>	16.0a	1.2a	13.8 ^{ab}	39.0a	9.9a	1.1a	178.6a	14.7a	14.1a	3.2a	43.9a
Promedio	15.9	1.2	13.8	37.5	8.9	1.0	172.9	15.0	13.2	4.1	44.3
DHS	2.8	0.2	1.6	4.9	1.0	0.17	48.1	3.5	2.5	4.0	5.2

El valor mencionado para cada elemento es el promedio de 9 repeticiones; **DHS:** diferencia honesta significativa; Medias con la misma letra en una columna son iguales (Tukey, 0.05).

La extracción de nutrimentos fue mayor en la var. *ferox* y la ssp. *crassispina* excepto en K y Mg. La var. *salmiana* tuvo menor concentración de K y Mg.

La concentración de nutrimentos en la materia seca foliar de las variantes de *Agave salmiana* a la edad de 3 años 5 meses, son los siguientes: para los macronutrimentos se informa en g/kg, el Ca presentó los valores más altos de concentración en la materia seca con 37.5, le sigue N: 15.9, K: 13.8, Mg: 8.9 y S: 1.0. De los micronutrientes cuantificados, en mg/kg, el Fe tuvo mayor concentración con 172.9, B con 44.3, Zn y Mn con 15 y 13.2, por último, el Cu: 4.1. Las concentraciones encontradas concuerdan con las referidas por INIFAP (2013) para las plantas de *A. tequilana*, donde la concentración de Ca también fue mayor y en orden descendente le siguieron $K > N > Mg > P$.

La alta concentración de Ca en las plantas cultivadas con abonado, fertilización y testigo, evidencia que mientras este elemento se encuentre en el suelo (como parte de la reserva del suelo), las plantas de maguey tienen la capacidad de disolverlo de la matriz del suelo por medio de mecanismos activos (exudación de compuestos de la raíz o solubilización del mismo por acidificación de la rizósfera).

Las comparaciones de las concentraciones nutrimentales de *A. salmiana*, y dado que no hay investigaciones previas, se tomaron como referencia los intervalos normales sugeridos para *A. tequilana* de 5 a 6 años de edad; cuando se encuentra bien nutrida y con un perfil óptimo de rendimiento; establecido por Laboratorios A-L de México (West Analítica y Servicios S.A. de C.V. S/a), los cuales se muestran en el **Cuadro 35**.

Cuadro 35. Concentración nutrimental en *Agave salmiana* por efecto del tratamiento.

Valores de referencia (LAB A-L)		Concentración nutrimental		
Elemento	Intervalo	Testigo	Fertilización	Abonado
N (%)	1.5-3.5	1.21 ^{NC}	1.88	1.67
P (%)	0.1-0.2	0.12	0.11	0.15
K (%)	1.8-3.0	1.55 ^B	1.29 ^B	1.29 ^B
Ca (%)	3.0-4.0	3.57	3.91	3.76
Mg (%)	0.5-1.0	0.96	0.79	0.91
S (%)	0.1-0.25	0.08 ^{NC}	0.11	0.12
Fe (ppm)	50-200	172.62	188.35	157.72
Zn (ppm)	15-50	13.73	14.41	16.77
Mn (ppm)	30-100	11.85 ^{NC}	15.48 ^{NC}	12.13 ^{NC}
Cu (ppm)	8-20	3.50 ^{NC}	4.88 ^{NC}	3.86 ^{NC}
B (ppm)	20-80	42.10	46.37	44.35

B: intervalo de suficiencia establecido por Bennet (1997); **NC:** nivel crítico.

La concentración de N en plantas testigo fue inferior al intervalo de referencia; en cambio, las plantas que recibieron abonado y fertilización están dentro del intervalo. Los elementos que están dentro de la amplitud de suficiencia tanto en plantas cultivadas abonadas, fertilizadas y testigo son: P, Ca, Mg, Fe y B. El K está por debajo del intervalo de referencia. Sin embargo, está dentro del intervalo de suficiencia para las plantas según Bennet (1997), con amplitudes del 1 a 5 %. El Zn está un poco por abajo del límite inferior en plantas fertilizadas y testigo. La concentración de N y S en plantas testigo están por debajo de la referencia y al considerar las amplitudes óptimas de Bennet, están en nivel crítico. Mn y Cu están en nivel crítico en las plantas de los tres tratamientos.

El crecimiento normal de las plantas requiere que los nutrimentos se encuentren en niveles de suficiencia. En los agaves y cactus Nobel (1989) ha definido un índice de productividad ambiental (IPA) que representa la fracción de la captación neta máxima de CO₂, con base en las condiciones ambientales, y dentro de éste incluye un índice de nutrimentos como un factor multiplicativo. Menciona que si se eleva en un 50 % el nivel de N, P, K, la productividad general de los agaves aumenta de 15 a 20 % con N; en un 10 % con P en un suelo infértil, tienen un efecto menor en terrenos más fértiles; en un 5 % con K en un suelo infértil con poco efecto en el terreno más fértil. Nobel (1998) hace énfasis en que los agaves absorben N en mayor cantidad y es el elemento que tiene

mayor influencia en el crecimiento. El K tiene cerca de 70 % del efecto sobre el crecimiento de las plántulas de *A. deserti* en hidroponía como lo hace P cuando estos nutrientes se aumentan de 0.01 a 1 veces su nivel en la solución de Hoagland (1950), con una respuesta logarítmica (Nobel y Hartsock, 1986).

Debido a la falta de información en concentración nutrimental de *A. salmiana*, se consideraron valores reportados para otros agaves. Para *A. angustifolia* (maguey mezcalero) con abono, Cruz (2001) informó una concentración de 0.88 % de N. Sin embargo, Hernández (2003) reportó para la misma especie abonada con composta, una concentración en N de 1.8 %; valor similar al obtenido en esta investigación en plantas abonadas y fertilizadas con concentraciones de 1.6 y 1.8 % respectivamente. Para la misma especie (*A. angustifolia*) Sánchez (2010) informó valores muy altos de concentración de nutrimentos con diferentes fertilizantes de liberación lenta, para N de 6.5 %, Ca con 3.3 %. En *A. tequilana* se ha referido que a los 40 meses del trasplante y con fertigación, las plantas concentraron en la materia seca total de la planta 0.7 % de N, 0.3 % de P, 1.5 % de K y 3.9 % de Ca (INIFAP, 2013).

Los estudios antes mencionados, apuntan que el N podría no estar en nivel crítico, en las plantas testigo. Sin embargo, la suficiencia de este elemento al ser uno de los elementos limitativos en la actividad metabólica de los agaves (Nobel *et al.*, 1992) y aunado a lo mencionado por Alcántar y Trejo-Téllez (2013) que las plantas con deficiencias de N, manifiestan reducción de crecimiento. Esto concuerda con los resultados obtenidos en las variables de crecimiento (altura, diámetro y longitud de pencas) al ser 50 % menores comparados con las plantas abonadas y fertilizadas.

Las concentraciones encontradas también pueden estar ligadas con otros factores como: edad de las plantas, la especie, la disponibilidad de elementos y las proporciones de diversos elementos en el suelo (Nobel y Hartsock, 1986; Nobel, 1989); y de las técnicas de la aplicación, la interacción del fertilizante con el suelo (INIFAP, 2013) y condiciones ambientales.

4.3.2 Contenido nutrimental en *Agave salmiana*

El empleo del promedio de materia seca (MS) en gramos por planta y por tratamiento, obtuvo el contenido nutrimental que se menciona en el **Cuadro 36**.

Cuadro 36. Contenido nutrimental, en gramos por planta (g/planta), de tres variantes de *Agave salmiana* con abonado, fertilización y testigo.

Tratamiento	Variantes de <i>A. salmiana</i>	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Zn	Mn	Cu	B
Abonado	<i>ssp. crassispina</i>	3.12 ab	0.31 ab	2.90 ab	6.96 ab	1.61 ab	0.22 ab	0.032 ab	0.004 ab	0.003 ab	0.001 a	0.009 ab
	<i>var. salmiana</i>	3.96 a	0.36 a	2.92 ab	8.93 ab	2.18 a	0.28 a	0.034 ab	0.004 a	0.003 ab	0.001 a	0.011 ab
	<i>var. ferox</i>	3.20 ab	0.26 ab	2.12 ab	7.16 ab	1.83 ab	0.26 a	0.030 ab	0.003 ab	0.002 ab	0.001 a	0.008 ab
	Promedio	3.43	0.31	2.65	7.68	1.87	0.253	0.032	0.003	0.002	0.001	0.009
	<i>ssp. crassispina</i>	4.44 a	0.21 ab	2.72 ab	8.66 ab	1.63 ab	0.21 ab	0.035 ab	0.003 ab	0.003 a	0.001 a	0.010 ab
Fertilización	<i>var. salmiana</i>	4.73 a	0.28 ab	3.49 a	9.84 a	1.84 ab	0.30 a	0.058 a	0.004 ab	0.003 a	0.003 a	0.011 a
	<i>var. ferox</i>	3.16 ab	0.21 ab	2.28 ab	7.51 ab	1.74 ab	0.20 ab	0.031 ab	0.003 ab	0.003 a	0.001 a	0.009 ab
	Promedio	3.72	0.27	2.72	8.11	1.81	0.25	0.036	0.003	0.003	0.001	0.010
	<i>ssp. crassispina</i>	1.45 b	0.15 c	2.13 c	3.85 b	0.98 c	0.10 b	0.023 b	0.002 b	0.002 b	0.000 a	0.005 c
Testigo	<i>var. salmiana</i>	1.41 b	0.13 c	1.52 c	4.59 ab	1.24 c	0.11 b	0.017 b	0.002 b	0.002 b	0.000 a	0.005 c
	<i>var. ferox</i>	1.56 b	0.15 c	2.06 c	4.65 ab	1.28 c	0.10 b	0.022 b	0.002 b	0.001 b	0.000 a	0.005 c
	Promedio	1.47	0.14	1.90	4.36	1.17	0.102	0.021	0.002	0.001	0.000	0.005
DHS		2.8	0.2	1.6	4.9	1.0	0.17	48.1	3.5	2.5	4.0	5.2

El valor mencionado para cada elemento es el promedio de 3 repeticiones. **DHS:** diferencia honesta significativa; Medias con la misma letra en una columna son iguales (Tukey, 0.05).

El contenido nutrimental en las variantes de *A. salmiana* cultivadas con abono, sólo sobresalieron ($p \leq 0.05$) en el contenido N, P, Mg, S y Zn. En las plantas que crecieron con fertilización hubo respuesta ($p \leq 0.05$) en N, Ca, K, S y Fe. Las plantas testigo, en general, obtuvieron los valores más bajos en la mayoría de los elementos excepto en Ca y Cu, lo cual incide en un menor crecimiento.

En virtud de lo antes mencionado, y debido al hábitat del maguey pulquero, al crecer en suelos poco profundos y derivados de rocas calizas o sedimentarias, donde la precipitación media anual es inferior a 700 mm, se ve favorecido la acumulación de carbonato de calcio en los horizontes del suelo, por lo que las plantas lo aprovechan del

suelo. Aunado a esto, el Ca interviene en la estabilidad de la membrana plasmática y en la integridad de la célula; además se deposita en particular en las pencas y participa en varios procesos metabólicos. El Cu participa en la síntesis de clorofila y es parte de numerosas enzimas como la plastocianina, la cual tiene por función la transferencia de electrones en el fotosistema I (Rodríguez y Flores, 2004).

El contenido de Mn, Cu y B, en plantas cultivadas con abono y las testigo, no fue significativo entre las variantes de *A. salmiana*. Sin embargo, el contenido en las plantas cultivadas con fertilización, fue significativo ($p \leq 0.05$) entre variantes; la var. *salmiana* tuvo mayor contenido.

La var. *salmiana* cultivada con abono orgánico y fertilización química obtuvo, en promedio, los valores más altos en el contenido de cinco elementos, cuatro macros y un micronutriente. La var. *salmiana* cultivada con abonado destacó en el contenido de N con 3.96, P con 0.36, Mg con 2.18, S con 0.28 y Zn con 0.004 g/planta. La misma variedad cultivada con fertilización destacó en contenido de N con 4.37, Ca con 3.49, K con 9.48, S con 0.3 y Fe con 0.58 g/planta.

El contenido de N no fue significativo ($p \leq 0.05$) entre la var. *salmiana* (4.7 g/planta) y la ssp. *crassispinga* (4.4 g/planta) bajo fertilización. Para el resto de los elementos, tampoco hubo significancia en el contenido para la ssp. *crassispinga* y la var. *ferox* con abonado y fertilización.

A pesar de los bajos contenidos nutrimentales de los 3 kg de cerdaza aplicados a cada planta (N=3, P=2.2, K=11.6 y Ca=23.7 g/planta), comparado con los 303 g de fertilizante aplicados por planta (N=110.9, P=20.8, K=4.1 g/planta), el abono es más valioso por su contenido de materia orgánica; ya que éste constituye en el suelo un almacén de nutrimentos para las plantas y microorganismos del suelo. La materia orgánica aumenta la cantidad de microorganismos del suelo, y estos a su vez incrementan la cantidad de nutrimentos y otros compuestos orgánicos disponibles para las plantas (Cruz, 2001). En cambio, la fertilización tiene ventajas como suministros exactos y en menos tiempo, pero también presenta desventajas: la volatilización o lixiviación ocasionan contaminación del aire, del suelo y del agua, además de los riesgos potenciales de afectación a la salud humana (Peña *et al.*, 2002).

4.4 Actividades de mantenimiento

Los cultivos requieren de diversas actividades de mantenimiento tales como deshierbe, control de plagas y fertilización entre las más importantes.

4.4.1 Deshierbe

Las labores de deshierbe pueden ser manual o con herbicidas; la primera opción es más costosa, no obstante, es la mejor opción ecológica, para la segunda opción, González (2017) menciona que se puede aplicar glifosato, no obstante, los herbicidas tienen repercusiones posteriores en cuando a diversidad florística y faunística.

4.4.2 Chinicuiles

Las plantas extraídas para el análisis nutrimental y peso fresco-seco, dos de nueve repeticiones del tratamiento con abonado, albergaban chinicuiles, las plantas corresponden a la var. *salmiana* y la var. *ferox*. Diversas investigaciones han intentado reproducir las larvas de manera masiva, sin embargo, no se ha logrado este objetivo. Llanderal-Cázares *et al.* (2010) informan que tienden a agregarse en lugares húmedos. Por lo que se podría aludir que la aplicación de residuos orgánicos, retiene la humedad y además, el excremento animal, favoreció este fenómeno.

Otra observación que se tuvo en las plantas infestadas es que no presentaron ningún síntoma de debilitamiento (**Figura 24**) característico como lo mencionan los productores, planta débil y con pencas amarillentas.



Figura 24. *Agave salmiana* var. *salmiana* abonada con presencia de chinicuiles.

La presencia de estas larvas, las cuales carecen de ojos y despiden un olor peculiar penetrante. La larva procede de una mariposa nocturna de color pardo en su parte superior y cenizo en su parte inferior; el protórax es robusto y de forma cilíndrica y sus alas son cortas en relación a su cuerpo. Esta mariposa deposita sus huevecillos entre abril y mayo en las raíces y tallos de los magueyes. A los diez o doce días nacen las larvas y se introducen en las piñas o mezontetes donde permanecen alimentándose de la pulpa, causando la destrucción de la planta (Ramírez, 2004).

4.5. Costos

Los **Cuadros 37** y **38** registran los precios del año 2018 de los fertilizantes químicos y el abono orgánico (cerdaza) empleados en los tratamientos.

Cuadro 37. Costos por fertilización química en tres variantes de *Agave salmiana*.

Fertilizante	g/planta	kg/ha	Bultos de 50 kg	Costo \$ unitario	Costo \$ total
Triple 17	100.0	75.0	1.5	400.00	600.00
Urea 46-00-00	121.2	90.9	2.0	500.00	1,000.00
Yara Star 21-17-3	181.8	136.35	2.73	465.00	1,395.00
Mano de obra (2)	-	-	-	200.00	400.00
Transporte	-	-	-	300.00	300.00
Total Aplicado	403.0	302.25	6.23	-	\$3,695.00

Cuadro 38. Costos por abonado orgánico en tres variantes de *Agave salmiana*.

Fertilizante	kg/planta	kg/ha	Costo unitario	Costo \$ total
Cerdaza	3.0	2,250	\$500/ton	1,125.00
Mano de obra (2)	-	-	200	400.00
Transporte	-	-	300.00	300.00
Total Aplicado	3.0	2,250	-	\$1,825.00

El precio de los residuos orgánicos depende en gran medida de cada productor, ya que la mayoría tiene ganado vacuno, porcino, caprino o aves de corral. Cabe aclarar que el estiércol no se sometió al proceso de compostaje, sin embargo, en futuras aplicaciones es recomendable el composteo del estiércol para evitar posibles plagas y enfermedades que se pudieran generar. Si se desea comprar composta, el precio es de alrededor de \$1,200.00 la tonelada más el costo de traslado.

V. CONCLUSIONES

La aplicación de abono orgánico o fertilizante químico en maguey pulquero mejora el crecimiento de la planta durante el ciclo anual.

El abonado orgánico es una alternativa ecológica que favorece el crecimiento de las tres variantes de *A. salmiana* estudiadas.

La subespecie *A. salmiana* ssp. *crassispina* cultivada con abonado orgánico se vio favorecida en crecimiento y *A. salmiana* var. *salmiana* cultivada con fertilización química tuvo alto porcentaje de emisión de hijuelos.

El crecimiento de plantas *A. salmiana* con humedad del suelo a capacidad de campo modifica el metabolismo fotosintético de las variantes y causa tasas de intercambio de CO₂ positivas durante el periodo nocturno y diurno. En cambio, las variantes de *A. salmiana* en condiciones de baja humedad de suelo solo realizaron asimilación de CO₂ durante la noche.

La aplicación de abono orgánico o fertilizante químico en maguey pulquero aumenta la tasa intercambio de CO₂ en condiciones de estrés hídrico.

VI. BIBLIOGRAFÍA

Agro 4037. (2012). Fertilidad de Suelos y Abonos 9- Micronutrientes (Hierro, Manganese, Zinc, Cobre. [08/11/2018] Disponible en: http://academic.uprm.edu/dsotomayor/agro4037/handouts/Agro4037_Pres_9A.pdf

Aguilar, J. B., Enríquez, J. R., Rodríguez-Ortiz, G., Granados, S. D., Martínez, C. B. (2014). El estado actual de *Agave salmiana* y *A. mapisaga* del Valle de México. Revista Mexicana de Agroecosistemas, 1(2): 106-120.

- Aguirre, R. J. R., Charcas, S. H., Flores, F. J. L. (2001). El maguey mezcalero potosino San Luis Potosí, México: Instituto de Investigación de Zonas Desérticas. 87 p.
- Alcántar, G. G., y Sandoval, V. M. (1999). Manual de Análisis Químico de Tejido Vegetal. Texcoco, México: Chapingo. 150 p.
- Alcántar, G. G. y Trejo-Téllez, L. I. (2013). Nutrición de cultivos. Texcoco, México: Colegio de Postgraduados. 454 p.
- Alfaro, R. G., Legaria, J. P. y Rodríguez, P. J. E. (2007). Diversidad genética en poblaciones de agaves pulqueros (*Agave* spp.) del nororiente del estado de México. *Fitotecnia Mexicana*, 30: 1-12.
- Álvarez- Duarte, M. C., García-Moya, E., Suárez-Espinosa, J., Luna-Cavazos, M. y Rodríguez-Acosta, M. (2018). Conocimiento tradicional, cultivo y aprovechamiento del maguey pulquero en los municipios de Puebla y Tlaxcala. *Polibotánica*, 45: 205-222.
- Arteaga, L. L. F. (2017). Fabricación de material de empaque a base de pectina-alginato adicionado con polímeros de agave para su uso en la industria alimentaria (Tesis de licenciatura). Instituto Politécnico Nacional, Campus Zacatecas, México. 62 p.
- Ávila, S. Z. E. (2010). Caracterización molecular y química de *Agave victoriae-reginae* T. Moore (Agavaceae) (Tesis de maestría). Instituto Politécnico Nacional, México. 136 p.
- Azcón, B. J. y Talón, M. (2013). Fundamentos de Fisiología Vegetal. 2^{da} Ed. España: McGraw-Hill – Interamericana. 650 p.
- Baraza, E., Ángeles, S., García, Á., Valiente-Banuet, A. (2008). Nuevos recursos naturales como complemento de la dieta de caprinos durante la época seca, en el Valle de Tehuacán. *Interciencia*, 33(12): 891-896.
- Barrios, R. E. J. (2016). Pulque de Chignahuapan, Puebla, buscará conquistar Rusia y Japón. *El sol de Puebla en línea*. 18 de agosto de 2016. [15/05/2018] Disponible en: <https://www.elsoldepuebla.com.mx/local/estado/buscan-comercializar-pulque-poblano-en-mercados-de-japon-y-rusia-833978.html>
- Bando municipal Temascalapa, Estado de México. (2017). 29 /06/2018] Disponible en: <http://legislacion.edomex.gob.mx/sites/legislacion.edomex.gob.mx/files/files/pdf/bdo/bdo2017/bdo086.pdf>
- Bennet, W. F. (1997). Nutrient deficiencies and toxicities in crop plants. Minnesota, EE. UU.: APS Press. pp. 56-75.

- Becerril, E. (2015). Maguey el árbol maravilla. Hidalgo, México: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. 18 p.
- Bidwell, R.G.S. (1990). Fisiología Vegetal. Ontario, Canadá: A.G.T. Editor, S.A. pp. 157-206.
- Borland, A. M., Griffiths, H., Hartwell, J. and Smith, J.A.C. (2009). Exploiting the potential of plants with crassulacean acid metabolism for bioenergy production on marginal lands. *Journal of Experimental Botany*, 60: 2879-2896.
- Casierra-Posada, F. y González, D. M. (2009). Cambio circadiano de pH y acidez titulable en la savia de fique (*Furcraea castilla* y *F. macrophylla*). *Orinoquia*, 13(1): 5-13.
- Chagoya-Méndez, V. M. (2004). Diagnóstico de la cadena productiva del sistema producto maguey-mezcal. Oaxaca, México: SAGARPA. 167 p.
- Cruz, J. E. (2001). Fertilización Química y Orgánica del agave mezcalero (*Agave angustifolia* Haw) en Oaxaca (Tesis de licenciatura). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, México. 138 p.
- Cruz, L. J. D., Tarango, A. L. A., Alcántara, C. J .L., Pimentel, L. J., Ugalde, L. S., Ramírez, V. G. y Méndez G. S. J. (2014). Uso del hábitat por la hormiga "Escamolera" (*Liometopum apiculatum* Mayr) en el centro de México. *Agrociencia*, 48 (6): 569-582.
- Dodd, A., Borland, A., Haslam, R., Griffiths, H., Maxwell, K. (2002). Metabolismo del ácido Crasuláceo: Plástico, Fantástico. *Journal of Experimental Botany*, 53: 559-580.
- Erlwein, S., Mira-Tapia, R. J. y Velasco-Pegueros, A. (2013). Proceso de elaboración del pulque, su importancia económica y concepción social en Apan, Hidalgo. *In: Ejercicios etnográficos, aprendiendo a investigar*. pp. 59–103.
- Escamilla, T. L. L. (2011). Potencial of plants from Genus *Agave* as Bioenergy Crops *BioEnergy Research*, 5 (1): 1-9.
- Escobar, G. R. C. (2009). Estudio de la biología reproductiva y análisis molecular de la reproducción sexual y asexual de *Agave tequilana* Weber var. azul (Tesis doctoral). Instituto Politécnico Nacional, Unidad Irapuato, Guanajuato, México. 114 p.
- Espíndola-Sotres, V., Trejo-Márquez, Ma. A., Lira-Vargas, A. A., Pascual-Bustamante, S. (2018). Caracterización de aguamiel y jarabe de agave originario del Estado de México, Hidalgo y Tlaxcala. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 3 (1): 522-528.

- Fernández, Ma. E. y Gyenge, J. E. (2010). Cap. 7. Sistemas IRGA en la medición de Intercambio gaseoso. *In: Técnicas de Medición en Ecofisiología Vegetal*. San Carlos, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. pp. 89-108.
- Figueroa-Barrera, A., Álvarez-Herrera, J. C., Forero, A. F., Salamanca, C., Pinzón L. P. (2012). Determinación del Nitrógeno potencialmente mineralizable y la tasa de mineralización de Nitrógeno en materiales orgánicos. *Temas Agrarios*, 17 (1): 32 - 43.
- Flores, A., Mora, R. y Romero, L. (2008). Evaluación fisicoquímica del aguamiel de tres variedades de maguey pulquero (*Agave spp*). *RESPYN*, 1: 1-9.
- Flores, M., Castañeda, H., Sánchez, P., Romero, A. y Ruíz, L. (2009). Mecanismos de conservación y uso del maguey pulquero *Agave salmiana* en el Altiplano Mexicano. *SOMAS A. C.*, 6: 1-10.
- García, F., Gil, P., Carrillo A. (2009). Caracterización y calidad de un abono orgánico fermentado AOF preparado con residuos del proceso de industrialización de la papa (*Solanum tuberosum* L). *Logos, Ciencia y Tecnología*, 1(1): 69-80.
- García-Mendoza, A. (2007). Los Agaves de México. *Ciencias*, 87:14-23.
- García-Mendoza, A. J. (2011). Flora del Valle de Tehuacán-Cuicatlán. Fascículo 88. AGAVACEAE. Instituto de Biología. UNAM. México. 95 p.
- García-Moya, E., Romero-Manzanares, A. and Nobel, P. S. A. 2011. Highlights for Agave Productivity. *CGB Bioenergy*, 3: 4-14.
- Gentry, H. S. 1982. *Agaves of Continental North America*. Tucson, Arizona, EE. UU. : The University of Arizona Press. 670 p.
- Gobierno del Estado de México, Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda. 2005. Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Temascalapa. [12/09/2018]. Disponible en: <http://seduym.edomex.gob.mx/temascalapa>
- Godoy, A., Herrera, T., y Ulloa, M. (2003). Más allá del pulque y del tepache, las bebidas alcohólicas no destiladas indígenas de México. México: Instituto de Investigaciones Antropológicas, UNAM. pp. 44-54.
- Goncalves, D.L.O. (1978). El maguey y el pulque en los códigos mexicanos. México: Fondo de Cultura Económica. 275 p.
- Gómez, V. A. (2003). Digestibilidad “in vitro” de dos variedades de Maguey (*Agave salmiana* y *Agave americana*) (Tesis de Licenciatura). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, México. 85 p.

- González N., M. (1971). Historia moderna de México. El porfiriato, vida política interior. El colegio de México 20 (3): 470-473.
- González M., J. D. (2017). Pulque, la bebida de los dioses al alcance de todos. Tlaxcala, México: Corporativo Magueyero San Isidro, S. A. de C. V. 25 p.
- Granados S.D. (1993). Los Agaves de México. México: Universidad Autónoma de Chapingo. 252 p.
- Guerrero, G. R. (1980). El pulque. Religión, cultura, folklore. México: SEP/INAH, p. 329.
- Hartsock, L. T. and Nobel, S. P. (1976). Watering converts a CAM plant to daytime CO₂ uptake. Nature, 262(8): 574-576.
- Heredia-Solis, A., Esparza-Ibarra, E., Romero-Bautista, L., Cabral-Arellano, F., Bañuelos-Valenzuela R. (2014). Bagazos de *Agave salmiana* y *Agave weberi* utilizados como sustrato para producir *Pleurotus ostreatus*. Revista Iberoamericana de Ciencias, 1 (5): 103-110.
- Hernández, G. E. (2003). Crecimiento en vivero de vitroplantas de *Agave angustifolia* Haw bajo efectos de sustratos orgánicos y fertirriego (Tesis de maestría). Instituto del Valle de Oaxaca. México. 129 p.
- Hernández, M., Terrazas, T., Delgado, A. A. y Luna-Cavazos, M. (2007). Los estomas de *Myrtillocactus geometrizans* (Mart. ex. Pfeiff) Console (Cactaceae): variación en su área de distribución. Revista Fitotecnia Mexicana, 30: 235-240.
- Herrera, S. (2003). Forjadores de la ciencia en la UNAM Ciclo de conferencias «Mi vida en la ciencia. México: Universidad Nacional Autónoma de México. 30 p.
- Hoagland, D.R. and Arnon, D.L. (1950). The water culture methods for growing plants without soil. The College of Agriculture, University of California, EE. UU. : California Agriculture Experiment Station. 32 p.
- INEGI. (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Temascalapa, México. Clave geoestadística 15084.
- INIFAP. (2013). Nutrición de *Agave tequilana* y manejo de los fertilizantes en un sistema de producción intensiva (riego por goteo). Folleto Técnico No. MX-0-310391-33-03-14-09-32. 58 p.
- Jordan P. W. y Nobel, P. S. (1979). Infrequent Establishment of Seedlings of *Agave deserti* (Agavaceae) in the Northwestern Sonoran Desert. American Journal of Botany 66 (9): 1079-1084.

- José-Jacinto, R. y García-Moya, E. (1995). Fijación de CO₂ en *Agave angustifolia* Haw. Boletín de la Sociedad Botánica de México, 57: 5–10.
- José-Jacinto, R. y García-Moya, E. (2000). Remoción cuticular ("Mixiote") y desarrollo foliar en los Agaves Pulqueros (*Agave Salmiana* y *A. mapisaga*). Boletín de la Sociedad Botánica de México 66: 73-79.
- Lambers, H., Chapin, F.S. and Pons, T.L. (1998). Plant Physiological Ecology. New York, EE. UU.: Springer. pp. 10-153.
- Lara-Ávila J. P. (2005). Obtención de la huella génica de agaves mezcalero de San Luis Potosí por RAPD y AFLP (Tesis Maestría). Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica. S. L. P. México. 112 p.
- Lara, J. P., Aguirre, R. J. R., Castillo, L. P., Reyes, A. J. A. (2015). Biología y aprovechamiento de la hormiga de escamoles, *Liometopum apiculatum* Mayr (Hymenoptera: Formicidae). Acta Zoológica Mexicana, 31 (2): 251-264.
- Leal, L. V. M. (1999). Estudio fisiológico y anatómico de la proliferación en maíz (*Zea mays* L.). (Tesis Doctoral). Colegio de Postgraduados, México. pp. 26-51.
- Lira, S. R.H. (2007). Fisiología Vegetal. México: Trillas. 237 p.
- Llenderal-Cázares, C., De los Santos, P. H. M., Almanza-Valenzuela, I., Nieto-Hernández, R. y Castillejos, C. C. (2010). Establecimiento del gusano rojo en plantas de maguey en invernadero. Acta Zoológica Mexicana, 26 (1): 25-31.
- López, V. (2013). Exportan 100 mil latas de pulque a Estados Unidos. Milenio diario S.A. de C.V en línea 24 -07-2013. Negocios. [15/05/2018] Disponible en: http://www.milenio.com/negocios/Exportan-mil-latas-pulque-Unidos_0_122387800.html
- Lujan, R., Lledías, F., Martínez, L., Barreto, R., Cassab, G., Nieto-Sotelo, J. (2009). Small Heat-Shock Proteins and leaf cooling capacity account for the unusual heat tolerance of the central spike leaves in *Agave tequilana* var. Weber. Plant, Cell & Environment, 32(12): 1791-1803.
- Luna V., B. (2012). Caracterización socioeconómica de los recolectores de insectos comestibles asociados al maguey en Pinos, Zacatecas (Tesis Maestría). Universidad Autónoma Chapingo México, México. 199 p.
- Macedo, E. M. (1950). Manual del Magueyero. México: Ediciones agrícolas Trucco. 157 p.
- Madrigal-Lugo, R., Velázquez-Loera, A., García-Moya, E., Sánchez-Lozada, O. y Ramírez-González, X. (2014). El Maguey, cultivo y cultura en la región centro del

- país; primera etapa. México: Fideicomiso de Desarrollo Regional Centro País. 24 p.
- Martínez, M. R. (1985). Demografía en una población silvestre de maguey mezcalero (*Agave salmiana* spp. *crassispina* Trel. Gentry) bajo condiciones de utilización intensiva (Tesis Licenciatura). Facultad de ciencias Agrícolas, Universidad Veracruzana. México. 61 p.
- Martínez, R. S., Trinidad, S. A., Robles, C., Galvis, S. A., Hernández, M. T. M., Santizo, R. J. A., Bautista, S. G. y Pedro, S. E. C. (2012). Crecimiento y sólidos solubles de *Agave potatorum* Zucc. inducidos por riego y fertilización. Revista fitotecnia Mexicana, 35 (1): 61-68.
- Matiz, A., Tamaso, P., Yepes, A., Freschi L., and Mercier H. (2013). Chapter 4. CAM Photosynthesis in Bromelias and Agaves: What Can We Learn from These Plants?. In: Photosynthesis. London, United Kingdom: Dubinski Z. pp. 91-134.
- Mendoza-Mendoza, B., Gómez-Hernández, E., Ávila-Ramírez, M. C., Hernández-Domínguez, E. M., Rodríguez-Marín, M. L. (2016). Aprovechamiento Integral de Maguey (*Agave* spp.) en el Altiplano Hidalguense. In: Biotecnología y alimento en Hidalgo: Transitado a la bioeconomía. Ciudad de México, México: Amalgama Arte Editorial S. A. de C. V. pp. 57-71.
- Medina, G. G., Cabañas, C. B., Ruiz, C. J. A., Madero, T. J., Rubio, D. S., Rumayor, R. A., Luna, F.M., Gallegos, V. C., Gutiérrez, S. R., Bravo, L. A. (2003). Potencial productivo de especies agrícolas en el Estado de Zacatecas. Libro Técnico No. 2. Zacatecas, México: INIFAP. 157 p.
- Mora-López, J. L., Reyes-Agüero, J.A., Flores-Flores, J.L., Peña-Valdivia, C. B., Aguirre-Rivera J. R. (2011). Variación morfológica y humanización de la sección Salmianae del género *Agave*. Agrociencia, 45: 465-477.
- Muñiz-Márquez, D.B. Rodríguez-Jasso, R. M. Rodríguez-Herrera, R. Contreras-Esquivel, J. C. y Aguilar-González, C. N. 2013. Producción Artesanal del Aguamiel: Una Bebida Tradicional Mexicana. Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila, 5(10): 12-19.
- Narváez, S. A., Martínez, S. T., Jiménez, V. M. (2016). El cultivo de maguey pulquero: opción para el desarrollo de comunidades rurales del altiplano mexicano. Revista de Geografía Agrícola, 56: 33-44.
- Nieto, A. R., Vargas, M. J., Nieto, A. J. C., Rodríguez, O. A., Jiménez, P. V .M., Hernández, C. J., Ortiz, B. M. (2016). El cultivo de maguey pulquero (*Agave salmiana*) en el valle del mezquital. Hidalgo, México: Universidad Politécnica de Francisco I. Madero. 52 p.

- Nobel, P. S. (1985). PAR, water, and temperature limitations on the productivity of cultivated *Agave fourcroydes* (henequen). *Journal of Applied Ecology*, 22: 157-173.
- Nobel, P. S. (1989). A nutrient index quantifying productivity of agaves and cacti. *Journal of Applied Ecology*, 26: 635-645.
- Nobel, P. S. (1998). *Los Incomparables Agaves y Cactus*. México: Trillas. 211 p.
- Nobel, P. S. (2005). *Physicochemical and Environmental Plant Physiology*. 3th ed. San Diego, EE. UU.: Elsevier Academic Press. 571 p.
- Nobel, P. S. (2009). *Physicochemical and Environmental Plant Physiology*, 4th ed. San Diego California, EE. UU. : Academic Press/Elsevier. 582 p.
- Nobel, P. S. (2011). *Sabiduría del desierto, agaves y cactus: CO₂, agua, cambio climático*. García M. E. 2ed. Texcoco, México: Colegio de Postgraduados. 160 p.
- Nobel, P.S. and Quero, E. (1986). Environmental productivity indices for a Chihuahuan desert CAM plant, *Agave lechuguilla*. *Ecology*, 67: 1–11.
- Nobel, P. S. and Hartsock, T. L. (1986b). Temperature, Water, and PAR influences on predicted and measured productivity of *Agave deserti* at various elevations. *Oecologia*, 68: 181-185.
- Nobel, P.S. Garcia, M.E. and Quero, E. (1992). High annual productivity of certain agaves and cacti under cultivation. *Plant, Cell and Environment*, 15: 329-335.
- Osmond C.B., Adams III W.W. and Smith S.D. (1994). Crassulacean acid metabolism. *In: Plant Physiological Ecology*. London, U. K.: Chapman y Hall. pp. 255-280
- Pérez, R. A., Rodríguez, O. A., Nieto, A. J. C., Callejas, H. J., Portillo M. L. (2017). Comparación de dos sistemas de siembra de Maguey (*Agave salmiana*). Hidalgo, México: Universidad Politécnica Francisco I. Madero. 69 p.
- Peña, T. E., Ramírez, C. M., Martínez, F., Rodríguez, N. A., Companioni, C. N. (2002). *Manual para la producción de abonos orgánicos en la agricultura urbana*. La Habana Cuba: INIFAT. 65 p.
- Pimienta-Barrios, E, Robles, M. C, Nobel, P. S. 2001. Net CO₂ uptake for *Agave tequilana* in a warm and temperate environment. *Biotropica*, 33(2): 312-318.
- Pimienta-Barrios, E., Zañudo-Hernández, J. and Nobel, P. S. (2005). Effects of young cladodes on the gas exchange of basal cladodes of *Opuntia ficus-indica* (Cactaceae) under wet and dry conditions. *International Journal Plant Science*, 166: 961-968.

- Pimienta-Barrios, E., Zañudo-Hernández, J., Nobel, P.S. y García-Galindo J. (2005b). Respuesta fisiológica a factores ambientales del agave azul (*Agave tequilana* Weber). *scientia-CUCBA*, 7(2): 85-97.
- Pimienta-Barrios, E., Zañudo-Hernández, J. y García-Galindo, J. (2006). Fotosíntesis estacional en plantas jóvenes de *Agave tequilana*. *Agrociencia*, 40: 699-709.
- Pinos-Rodríguez, J. M., Zamudio, M. and González, S.S. (2008). The effect of plant age on the chemical composition of fresh and ensiled *Agave salmiana* leaves. *Southern African Journal of Animal Science*, 38 (1): 43-50.
- Ramos-Elorduy, J. (1999). Insectos comestibles. *Arqueología Mexicana*, 6(35): 68-73.
- Ramos-Elorduy, J., Pino, J. M., Conconi, M. (2006). Ausencia de una reglamentación y normalización de la explotación y comercialización de insectos comestibles en México. *Folia Entomológica Mexicana*, 45: 291-318.
- Ramírez, M. S. I. (2015). Conocimiento, etnotaxonomía y aprovechamiento del maguey pulquero en rancho San Isidro, Nanacamilpa, Tlaxcala, México (Tesis de Maestría). Colegio de Postgraduados, campus Montecillo, México. 91 p.
- Ramírez Rancaño, M. (2000). Ignacio Torres Adalid y la industria pulquera, México: UNAM-IIS/Plaza y Valdés. pp. 87-90.
- Ramírez, R. R. (2004). El Maguey y el Pulque: Memoria y tradición convertida en historia, 1884-1993 (Tesis de Licenciatura). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. México. 358 p.
- Ramírez-Tobías, H. M., Peña-Valdivia, C. B., Aguirre, J. R., Reyes- Aguero, R. J. A., Sánchez- Urdaneta, A. B. y Valle-Guadarrama, S. (2011). Seed germination temperatures of eight Mexican *Agave* species with economic importance. *Plant Species Biology*, 27: 124-137.
- Ramírez-Tobías, H. M., Peña-Valdivia, C. B. y Aguirre, J. R. (2014). Respuestas bioquímico-fisiológicas de especies de *Agave* a la restricción de humedad. *Botanical Science*, 92 (1): 131-139.
- Reich, P. B. (2002). Root-shoot relations: Optimality in acclimatation and adaptation or the "Emperor's new clothes"? *In: Plant Roots, The Hidden Half*, 3a ed. Nueva York, EE. UU. : Marcel Dekker. pp. 314-338.
- Riva P., Vicente. (1987). México a través de los siglos, T. IV. México: Editorial Cumbre. p. 254.

- Robert, M. L., Herrera, J. L. y Arce-Monya, M. (2007). La biotecnología aplicada al mejoramiento genético de los agaves. *In: En lo ancestral hay futuro: del tequila, los mezcales y otros agaves*. México: Instituto Nacional de Ecología. pp 369-387.
- Rodríguez, S. M. y Flores, R. V. (2004). Elementos esenciales y beneficiosos. *In: Ferti-Riego: Tecnologías y Programación en Agroplasticultura*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. pp.25-36.
- Romero-H., M. E., Peña-Valdivia, C. B., García-N., R., y Campos, H. (2017). Efecto de la restricción de agua edáfica en el potencial de agua y acidez diurna y nocturna de *Ferocactus histrix* y *F. pilosus*. *Polibotánica*, 44: 167-183.
- Romero, L. (2018). Descubren en Oaxaca cuatro especies más de agave. *Gaceta digital UNAM*. Consultado el 07/03/2018. Disponible en: <http://www.gaceta.unam.mx/20180208/descubren-en-oaxaca-cuatro-especies-mas-de-agave/>
- Ruiz, G. Ma. G. (2014). Variación de la fotosíntesis CAM de dos especies de *agave* influida por el desarrollo y el ambiente (Tesis de licenciatura). Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México. 38 p.
- Ruvalcaba, M. J. (1984). El maguey manso: historia y presente de Epazoyucan, Hgo. México: Universidad Autónoma Chapingo. 122 p.
- SabersinfinTV. (2017). Pulcatta, destilado de pulque. Consultado el 23/01/2019. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=Jko4wnbCmCo>
- Salomón A. (2005). La industria de bebidas alcohólicas en México. México: Comercio Exterior 55. pp.1098-1104.
- Sánchez, M. S. (2010). Tensión de humedad del suelo y efecto de fertilizantes de liberación lenta en maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw.) (Tesis de maestría). Instituto Politécnico Nacional. México. 73 p.
- Sánchez-Urdaneta, A.B., Peña-Valdivia, C. B., Aguirre, R. J. R., Trejo, C. y Cárdenas, E. (2004). Efectos del potencial de agua en el crecimiento radical de plántulas de *Agave salmiana* Otto Ex Salm-Dyck. *Interciencia*, 29 (11): 626-631.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2016). Cultivo- Maguey pulquero Nacional y Estado de México por municipio. Fecha de consulta 30/01/2018. Disponible en: http://nube.siap.gob.mx/cierre_agricola/
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2018). Maguey: un agave que nos provee diversos productos agroalimentarios nativos. Fecha de consulta 30/01/2018. Disponible en: (<https://www.gob.mx/siap/articulos/maguey-un-agave-que-nos-provee-diversos-productos-agroalimentarios-nativos?idiom=es>)

- Silos-Espino, H., Tovar-Robles, C. L., González-Cortés, N., Méndez-Gallegos S.J., y Rossel-Kipping, D. (2011). Estudio integral del maguey (*Agave salmiana*): propagación y valor nutricional. *Revista de Salud Pública y Nutrición*, 5 (1): 75-82.
- Swenson, L.J., Dahnke, W.C., and Patterson D.D. (1984). Sampling for soil testing. Dakota, EE. UU.: North Dakota State University. 97 p.
- Taiz, L. and Zeiger, E. (2010). Chapter 8: Photosynthesis. *In: Plant Physiology*. 5th ed. underland: Sinauer Associates Inc., Publishers. pp. 200-235.
- Tello, B. J.J. (1988). Análisis gráfico-tabular de dos poblaciones silvestres de maguey mezcalero (*Agave salmiana* Otto ex Salm, ssp. *crassispina* (Trel.) Gentry) en el altiplano Potosino-Zacatecano (Tesis de maestría). Chapingo, México. 123 p.
- Tello, B. J.J. y García, M. E. (1988). El maguey (Agave, subgénero Agave) en el Altiplano Potosino Zacatecano. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 48: 119-134.
- Toribio, R. H. (2005). Comportamiento de explantes de agave pulquero (*Agave atrovirens*) en la interacción de dos reguladores de crecimiento (Tesis de maestría). Instituto Politécnico Nacional. México. 39 p.
- Trejo-Salazar, R. E., Scheinvar, E., Eguiarte, L. E. (2015). ¿Quién poliniza realmente los agaves? Diversidad de visitantes florales en 3 especies de Agave (Agavoideae: Asparagaceae). *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 86: 358–369.
- Vázquez, D. E. García, N. R. J. Peña, V. C. B. Ramírez, T. H. M. y Morales, R. V. (2011). Tamaño de la semilla, emergencia y desarrollo de la plántula de maguey (*Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyc). *Revista Fitotecnia Mexicana*, 34: 167-173.
- Vásquez, G. A. (2018). Usos, prácticas culturales y capital natural del maguey pulquero (*Agave salmiana*) en dos grupos étnicos, en el territorio del altiplano central mexicano (Tesis de maestría). Colegio de Postgraduados, Campus, Puebla, México. 151 p.
- Weather Spark. (2018). El clima promedio en Temascalapa, México. Fecha de consulta 20/09/2018. Disponible en: <https://es.weatherspark.com/y/6604/Clima-promedio-en-Temascalapa-M%C3%A9xico-durante-todo-el-a%C3%B1o#Sections-Precipitation>
- Wen, H., Wagner, J. and Larcher, W. (1996). Growth and nocturnal acid accumulation during early ontogeny of *Agave attenuata* grown in nutrient solution and in vitro culture. *Biologia plantarum*, 39: 1-11.

- West Analítica y Servicios S.A. de C.V. S/a. El Cultivo de Agave. [08/11/2018] Disponible en: <http://westanalitica.com.mx/wp-content/uploads/2018/05/El-Cultivo-de-AGAVE.pdf>
- Winter, K., Garcia, M. and Holtum, J. A. M. (2014). Nocturnal versus diurnal CO₂ uptake: how flexible is *Agave angustifolia*?. *Journal of Experimental Botany*, 65 (13): 3695–3703.
- Zamora, M. L. E. (1997). Respuesta de *Agave salmiana* a la fertilización y riego en la región de San Antonio de las Alazanas (Tesis de licenciatura). Universidad Autónoma Antonio Narro, Saltillo, México. 41 p.
- Zempoalteca, J. (2017). En peligro, la exportación del pulque. *El sol de México*. En línea. 30 de enero de 2017. [15/05/2018] Disponible en: <https://www.elsoldemexico.com.mx/republica/dos-mil-millas/en-peligro-la-exportacion-de-pulque-141696.html>
- Zúñiga, E. L. (2013). Nutrición de *Agave tequilana* y manejo de los fertilizantes en un sistema de producción intensiva (riego por goteo). INIFAP, Coyoacán, México. 58 p.