



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

**“VALOR NUTRACÉUTICO Y NUTRICIONAL DE AGUAMIEL Y
MIEL DE MAGUEY OBTENIDA POR TRES MÉTODOS DE
DESHIDRATACIÓN”**

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN

CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA



DIRECCIÓN GENERAL DE
DIRECCIÓN DE
CIVIL Y DE

PRESENTA:

LYZBETH HERNÁNDEZ RAMOS



Chapingo, Estado de México, noviembre de 2014

VALOR NUTRACÉUTICO Y NUTRICIONAL DE AGUAMIEL Y MIEL DE MAGUEY OBTENIDA POR TRES MÉTODOS DE DESHIDRATACIÓN

Tesis realizada por **Lyzbeth Hernández Ramos** bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA

Director


Dra. María Teresa B. Colinas León

Co-Director


Dra. María del Rosario García Mateos

Asesor


Dra. Ma. Carmen Ybarra Moncada

Asesor


M.C. Armando Santos Morenos

Chapingo, Estado de México, noviembre de 2014

DEDICATORIAS

A mis padres: Dora Ramos Silva y Salomón Hernández Bautista
por su apoyo incondicional, ejemplo de superación y por sus sacrificios
realizados, gracias por motivarme a ser alguien en la vida.

A mi hermano Cristian por su paciencia, buen
humor y por estar siempre que lo necesito.

Lyz

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por haber financiado mis estudios de posgrado.

A la Universidad Autónoma Chapingo por abrirme sus puertas al conocimiento, haber sido mi casa estos diez años y por darme la oportunidad de cumplir una meta más en mi vida profesional.

Al Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de México (COMECyT) por el apoyo económico otorgado para concluir la tesis de posgrado.

A la Dra. María del Rosario García Mateos por su dirección, consejos, apoyo, confianza, paciencia, tiempo, conocimientos y ejemplo. Por la libertad que me dio, por guiarme cuando perdía el rumbo y hacerme ver que hay momentos en los que puedo hacer las cosas mejor; en definitiva, no pude tener mejor directora que usted.

A la Dra. Ma. Carmen Ybarra Moncada por su orientación, apoyo, confianza, por el tiempo que le destinó a esta investigación y la buena disposición siempre que la necesité, pero sobre todo por su amistad.

A la Dra. Ma. Teresa Colinas León y al M.C. Armando Santos Moreno por sus aportaciones a este trabajo, disposición, apoyo y tiempo destinado para la culminación de mi investigación de tesis.

A mis amigos del Posgrado y del laboratorio de Bioquímica Vegetal por escucharme, apoyarme, hacerme reír y por compartir desvelos y aventuras.

A Esperanza Salinas Banda por brindarme su amistad, por su paciencia, por escucharme y orientarme cuando era necesario y por su invaluable apoyo durante mi estancia en el posgrado. ¡Gracias Perita!

Aquellos que me brindaron su apoyo para desarrollar y culminar esta investigación:

A los productores de maguey pulquero que aportaron materia prima para la investigación: Indalecio Quiterio Serrano de Aguamieleros Unidos del Valle de Cardonal S.C. de R.L., Pedro de la Rosa, Juan Daniel y Olivia Nava, Pablo Zuñiga, Milpa de Maguey Tierno de la Mujer S.S.S., etc.

Al Dr. Abisaí García Mendoza del Instituto de Biología de la UNAM por haber realizado la identificación taxonómica de algunos ejemplares utilizados en esta investigación, pero sobre todo por sus sugerencias y asesoría.

Al M.C. Antonio Cortés Jiménez y al personal del Herbario de Preparatoria Agrícola, UACh, por la buena disposición, asesorías y apoyo brindado para la identificación taxonómica.

Al I.B.Q. Félix Esparza Torres y a Doris Pérez Ayala del Laboratorio de Análisis de Alimentos, por su calidez humana, buena disposición, facilidades y apoyo brindado para realizar los análisis bromatológicos.

Al M.C. Salvador Martínez Romero por sus consejos, apoyo incondicional y facilidades brindadas para la realización de algunos análisis.

Al Posgrado de Producción Animal del Departamento de Zootecnia por permitirme trabajar en el Laboratorio de Leche y al M.C. Pedro Meda Alducin por su buena disposición, asesoría y apoyo en la realización de los análisis de minerales.

A todos aquellos que no menciono por que me falla la memoria, pero que saben que contribuyeron en mi formación y en el desarrollo de esta tesis.

DATOS BIOGRÁFICOS

Lyzbeth Hernández Ramos es originaria de la ciudad de Tizayuca, Hidalgo. Realizó sus estudios de nivel medio superior y superior en la Universidad Autónoma Chapingo del 2004 al 2011. En el 2012, obtuvo el título de Ingeniero Agroindustrial con la tesis “Control del oscurecimiento no enzimático en miel de maguey (*Agave mapisaga*)”.

Ha presentado en modalidad de ponencia los siguientes trabajos: “Control del oscurecimiento no enzimático en miel de maguey (*Agave mapisaga*)” en el 1er Congreso Internacional y 3er Congreso Nacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas (noviembre de 2012), “La miel de maguey en el Estado de Hidalgo” en el IV Congreso Nacional del Maguey y el Pulque (octubre de 2013), “Potencial nutracéutico de aguamiel y miel de maguey (*Agave mapisaga* Trel)” en el II Congreso Internacional y XVI Congreso Nacional de Ciencias Agronómicas (abril de 2014) y “*Agave salmiana* drink (aguamiel): nutritional and nutraceutical values of four cultivars” en el II International Symposium on Agave (octubre de 2014).

De agosto de 2013 a febrero de 2014 colaboró en el “Proyecto estratégico territorial maguey” del Departamento de Fitotecnia, UACH y Sedagro, Delegación Teotihuacan.

VALOR NUTRACÉUTICO Y NUTRICIONAL DE AGUAMIEL Y MIEL DE MAGUEY OBTENIDA POR TRES MÉTODOS DE DESHIDRATACIÓN

NUTRACEUTIC AND NUTRITIONAL VALUE OF AGUAMIEL AND AGAVE HONEY OBTAINED BY THREE METHODS OF DEHYDRATION

Hernández-Ramos Lyzbeth, García-Mateos Ma. del Rosario, Colinas-León Ma. Teresa B., Ybarra-Moncada Ma. Carmen, Santos-Moreno Armando

RESUMEN

El maguey pulquero es un recurso muy importante en regiones semidesérticas de México; sin embargo, es poca la información sobre el valor nutricional y nutraceutico de los productos derivados del mismo (aguamiel, pulque y miel de maguey). El objetivo de esta investigación fue evaluar los componentes nutricionales y antioxidantes del aguamiel de diferentes cultivares de *Agave salmiana* y *A. mapisaga*; así como el efecto de tres métodos de elaboración de miel de maguey (liofilización, evaporación a presión reducida y método convencional) sobre el valor nutraceutico del aguamiel. Los resultados mostraron que el aguamiel y la miel de maguey son una buena fuente de proteínas, carbohidratos, minerales (K, Fe y Cu) y compuestos antioxidantes. El aguamiel más oscuro obtenido del cultivar *cerro* de *A. salmiana*, presentó mayor actividad antioxidante ($2576 \mu\text{M ET L}^{-1}$) asociada a su alto contenido de compuestos fenólicos ($478 \text{ mg EAG L}^{-1}$). El método convencional permitió obtener miel de maguey con el doble de actividad antioxidante (1215 ET/ 100 g) en comparación con el aguamiel (752 ET L^{-1}) y la miel de maguey elaborada por los otros métodos; pero, ocasionó la pérdida del contenido de vitamina C, debido a la alta temperatura de proceso. La miel de maguey más oscura presentó mayor capacidad antioxidante, asociada al contenido de fenoles y a la formación de compuestos antioxidantes (melanoidinas). En conclusión, la miel de maguey y el aguamiel podrían considerarse como productos con calidad nutraceutica, por su valor nutricional y compuestos antioxidantes.

Palabras clave: color, compuestos fenólicos, melanoidinas, antioxidantes.

ABSTRACT

In semidesert areas of Mexico, the maguey-pulquero is a very important resource; however, little information is available on the nutraceutical and nutritional value of its derived products (aguamiel, pulque and agave honey). The aim of this research was to evaluate nutritional and antioxidant compounds of aguamiel from different cultivars of *Agave salmiana* and *A. mapisaga*; as well as the effect of three processes to obtain agave honey (lyophilization, evaporation at reduced pressure and conventional method) on the nutraceutical value of aguamiel. The results showed that the aguamiel and agave honey are a good source of protein, carbohydrates, minerals (K, Fe and Cu) and antioxidant compounds. The darker aguamiel obtained from the *cerro* cultivar, showed better antioxidant activity ($2576 \mu\text{M ET L}^{-1}$) associated with a high content of phenolic compounds ($478 \text{ mg EAG L}^{-1}$). The conventional process yielded agave honey with double the antioxidant capacity (1215 ET/ 100 g) compared with that of aguamiel (752 ET L^{-1}) and agave honey obtained by other methods. It occasioned, however, a loss of vitamin C, due to the high temperature process. The darker agave honey showed higher antioxidant capacity, associated with a high content of phenolic compounds and with the formation of new antioxidant compounds (melanoidins). In conclusion, agave honey and aguamiel can be considered quality nutraceutical products because of their nutritional value and antioxidant compounds.

Key words: color, phenolic compounds, melanoidins, antioxidants.

CONTENIDO

DEDICATORIAS	I
AGRADECIMIENTOS	II
DATOS BIOGRÁFICOS	IV
RESUMEN.....	V
I.INTRODUCCIÓN.....	1
II.OBJETIVOS.....	4
III.MARCO TEÓRICO	5
3.1. Agaves	5
3.2. Maguey pulquero	5
3.2.1. Clasificación taxonómica	6
3.2.2. Diversidad genética.....	7
3.2.3. Etapa productiva del maguey pulquero.....	7
3.3. Aguamiel	8
3.3.1. Importancia nutricional	8
3.4. Miel de maguey	9
3.5. Oscurecimiento no enzimático	10
3.5.1. Reacción de Maillard	11
3.6. Compuestos fenólicos.....	13
3.6.1. Estructura química	13
3.6.2. Biosíntesis	14
3.7. Vitamina C.....	15
3.8. Estrés oxidativo	17
3.9. Sistemas antioxidantes.....	18
3.10. Nutraceuticos.....	19
Literatura citada	21
IV. COMPONENTES ANTIOXIDANTES Y CALIDAD NUTRICIONAL DE AGUAMIEL DE DIVERSOS CULTIVARES DE MAGUEY PULQUERO (<i>Agave salmiana</i> y <i>A. mapisaga</i>).....	24

RESUMEN.....	25
1.INTRODUCCIÓN	26
2.MATERIALES Y MÉTODOS	28
2.1. Material de estudio	28
2.2. Herborización e identificación de los agaves pulqueros	30
2.3. Caracterización físico-química del aguamiel	33
2.4. Análisis proximal.....	33
2.5. Contenido mineral	34
2.6. Cuantificación de vitamina C	34
2.7. Determinación de fenoles solubles totales.....	35
2.8. Cuantificación de flavonoides	35
2.9. Evaluación de la actividad antioxidante	36
2.10. Análisis estadístico	37
3.RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
3.1. Parámetros de color	39
3.2. Propiedades físico-químicas	40
3.3. Análisis proximal.....	43
3.4. Contenido de minerales	44
3.5. Contenido de fitoquímicos.....	47
3.6. Actividad antioxidante.....	53
3.7. Análisis de correlación canónica	56
3.8. Análisis de componentes principales.....	57
4.CONCLUSIONES.....	60
5.LITERATURA CITADA	61
V. VALOR NUTRICIONAL Y ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE DE MIEL DE MAGUEY OBTENIDA POR TRES MÉTODOS	66
RESUMEN.....	67
ABSTRACT	67
1.INTRODUCCIÓN	68
2.MATERIALES Y MÉTODOS	70
2.1. Material experimental.....	70
2.2. Procesos de elaboración de miel de maguey	70
2.3. Caracterización físico-química	72

2.4. Contenido de minerales	73
2.5. Índice de oscurecimiento	74
2.6. Cuantificación de vitamina C	74
2.7. Cuantificación de compuestos fenólicos totales	75
2.8. Cuantificación de flavonoides	76
2.9. Evaluación de la actividad antioxidante	76
2.10. Análisis estadístico	77
3.RESULTADOS Y DISCUSIÓN	79
3.1. Parámetros de color	79
3.2. Propiedades físico-químicas	81
3.3. Contenido de minerales	86
3.4. Contenido de fitoquímicos	88
3.5. Actividad antioxidante	93
3.6. Análisis de correlación	95
3.7. Análisis de componentes principales	97
3.8. Análisis de correlación canónica	100
4.CONCLUSIONES.....	102
5.LITERATURA CITADA	103
VI.CONCLUSIONES GENERALES	108
VII.RECOMENDACIONES.....	110

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Análisis nutrimental de aguamiel.....	9
Cuadro 2. Principales diferencias entre las reacciones de oscurecimiento no enzimático	11
Cuadro 3. Clasificación de los compuestos fenólicos.....	14
Cuadro 4. Especies reactivas del oxígeno.....	18
Cuadro 5. Identificación y localización geográfica de las especies de agave pulquero utilizadas para la obtención de aguamiel.	32
Cuadro 6. Atributos de color en aguamiel de <i>A. salmiana</i> (cultivares <i>xamini</i> , <i>cerro</i> , <i>cimarrón</i> , <i>penca ancha</i> y <i>manso</i>) y <i>A. mapisaga</i> (cultivares <i>carrizo</i> y <i>cenizo</i>), colectado en diferentes localidades del Estado de México e Hidalgo.....	40
Cuadro 7. Características físico-químicas del aguamiel de <i>A. salmiana</i> (cultivares <i>xamini</i> , <i>cerro</i> , <i>cimarrón</i> , <i>penca ancha</i> y <i>manso</i>) y <i>A. mapisaga</i> (cultivares <i>carrizo</i> y <i>cenizo</i>).	42
Cuadro 8. Composición proximal del aguamiel de <i>A. salmiana</i> (cultivares <i>xamini</i> , <i>cerro</i> , <i>cimarrón</i> , <i>penca ancha</i> y <i>manso</i>) y <i>A. mapisaga</i> (cultivares <i>carrizo</i> y <i>cenizo</i>), colectado en diferentes localidades del Estado de México e Hidalgo.	43
Cuadro 9. Composición mineral del aguamiel de <i>A. salmiana</i> (cultivares <i>xamini</i> , <i>cerro</i> , <i>cimarrón</i> , <i>penca ancha</i> y <i>manso</i>) y <i>A. mapisaga</i> (cultivares <i>carrizo</i> y <i>cenizo</i>), colectado en diferentes localidades del Estado de México e Hidalgo.	46
Cuadro 10. Porcentaje de inhibición de DPPH y actividad antioxidante en aguamiel de <i>A. salmiana</i> (cultivares <i>xamini</i> , <i>cerro</i> , <i>cimarrón</i> , <i>penca ancha</i> y <i>manso</i>) y <i>A. mapisaga</i> (cultivares <i>carrizo</i> y <i>cenizo</i>), colectado en el Estado de México e Hidalgo.	54
Cuadro 11. Correlación de Pearson entre la actividad antioxidante y fitoquímicos del aguamiel.	55
Cuadro 12. Atributos de color en miel de maguey (<i>A. mapisaga</i> y <i>A. salmiana</i>) elaborada por tres métodos (evaporación convencional, liofilización y evaporación a presión reducida).....	79

Cuadro 13. Características físico-químicas de la miel de maguey pulquero (<i>A. mapisaga</i> y <i>A. salmiana</i>) elaborada por tres métodos (evaporación convencional, liofilización y evaporación a presión reducida).	85
Cuadro 14. Composición mineral de la miel de maguey (<i>A. mapisaga</i> y <i>A. salmiana</i>) elaborada por tres métodos (evaporación convencional, liofilización y evaporación a presión reducida).	87
Cuadro 15. Componentes antioxidantes en miel de maguey (<i>A. mapisaga</i> y <i>A. salmiana</i>) elaborada por tres métodos (evaporación convencional, liofilización y evaporación a presión reducida).	88
Cuadro 16. Porcentaje de inhibición de DPPH y actividad antioxidante de miel de maguey (<i>A. mapisaga</i> y <i>A. salmiana</i>) elaborada por tres métodos (evaporación convencional, liofilización y evaporación a presión reducida).	94
Cuadro 17. Matriz de correlación (coeficiente de correlación de Pearson) entre la actividad antioxidante, fitoquímicos y algunos parámetros de la miel de maguey.....	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de la reacción de Maillard (Martins <i>et al.</i> , 2001).....	12
Figura 2. Biosíntesis de los compuestos fenólicos a partir de la vía del ácido shikimico y fenilalanina.	15
Figura 3. Oxidación del ácido ascórbico.....	16
Figura 4. Magueyal de <i>A. salmiana</i> , en la localidad de Durango Daboxtha, El Cardonal, Hidalgo, México.....	28
Figura 5. Plantación de <i>A. salmiana</i> cultivar <i>manso</i> , en la localidad de San Isidro del Progreso, Teotihuacan, Estado de México.....	29
Figura 6. Proceso de obtención de aguamiel: a) aguamiel en el cajete del maguey, b) “Tlachique” (cosecha de aguamiel), c) aguamiel obtenido de 10 plantas de maguey, d) muestra de aguamiel.	29
Figura 7. Agaves pulqueros utilizados para la obtención de aguamiel: <i>A. mapisaga</i> Trel (cultivar <i>cenizo</i> y <i>carrizo</i>) y <i>A. salmiana</i> Otto ex Salm-Dyck (cultivar <i>xamini</i> , <i>penca ancha</i> , <i>cerro</i> , <i>corriente</i> y <i>manso</i>).	30
Figura 8. Ejemplares de herbario de las especies de agave pulquero depositados para su identificación en los Herbarios “Jorge Espinosa Salas” (UACH) y MEXU (UNAM).	31
Figura 9. Aguamiel obtenido de <i>A. salmiana</i> (cultivares <i>xamini</i> , <i>cerro</i> , <i>cimarrón</i> , <i>penca ancha</i> y <i>manso</i>) y <i>A. mapisaga</i> (cultivares <i>carrizo</i> y <i>cenizo</i>).	39
Figura 10. Contenido de compuestos fenólicos en aguamiel de <i>A. salmiana</i> (cultivares <i>xamini</i> , <i>cerro</i> , <i>cimarrón</i> , <i>penca ancha</i> y <i>manso</i>) y <i>A. mapisaga</i> (cultivares <i>carrizo</i> y <i>cenizo</i>).	47
Figura 11. Contenido de flavonoides en aguamiel de <i>Agave salmiana</i> (cultivares <i>xamini</i> , <i>cerro</i> , <i>cimarrón</i> , <i>penca ancha</i> y <i>manso</i>) y <i>Agave mapisaga</i> (cultivares <i>carrizo</i> y <i>cenizo</i>), colectado en el Estado de México e Hidalgo.	50
Figura 12. Contenido de vitamina C en aguamiel de <i>A. salmiana</i> (cultivares <i>xamini</i> , <i>cerro</i> , <i>cimarrón</i> , <i>penca ancha</i> y <i>manso</i>) y <i>A. mapisaga</i> (cultivares <i>carrizo</i> y <i>cenizo</i>), colectado en el Estado de México e Hidalgo.	51
Figura 13. Correlación canónica de la primera variable canónica y la correlación simple con sus respectivas variables originales.	56

Figura 14. Agrupación de muestras de aguamiel de <i>A. salmiana</i> (cultivares <i>xamini</i> , <i>cerro</i> , <i>cimarrón</i> o corriente, <i>penca ancha</i> y <i>manso</i>) y <i>A. mapisaga</i> (cultivares <i>carrizo</i> y <i>cenizo</i>), colectado en el Estado de México e Hidalgo, con base en características físico-químicas, nutricionales y nutraceuticas.	59
Figura 15. Procesos de elaboración de miel de maguey: evaporación convencional (a), evaporación a presión reducida (b) y liofilización (c).	71
Figura 16. Miel de maguey (<i>A. mapisaga</i> y <i>A. salmiana</i>) elaborada por tres métodos: evaporación convencional (a), liofilización (b) y evaporación a presión reducida (c). ...	81
Figura 17. Contenido de compuestos fenólicos en miel de maguey obtenida por tres métodos (evaporación convencional, liofilización y evaporación a presión reducida). ..	90
Figura 18. Contenido de vitamina C en miel de maguey obtenida por tres métodos (evaporación convencional, liofilización y evaporación a presión reducida).	92
Figura 19. Actividad antioxidante en miel de maguey obtenida por tres métodos (evaporación convencional, liofilización y evaporación a presión reducida).	95
Figura 20. Agrupación de muestras de miel de maguey (<i>A. salmiana</i> y <i>A. mapisaga</i>) obtenidas por tres métodos (liofilización, evaporación convencional y a presión reducida), con base en características físico-químicas, nutricionales y nutraceuticas.....	98
Figura 21. Correlación canónica de la primera variable canónica y la correlación simple con sus respectivas variables originales.	100

I. INTRODUCCIÓN

La familia *Agavaceae* es endémica de América, el centro de mayor riqueza y diversidad de especies se encuentra en México, donde se distribuye el 75 % del total de las especies de esta familia. El género más grande y diverso es el *Agave*, el cual predomina en las provincias áridas y semiáridas del centro y norte del país, donde el crecimiento de las especies de agave como la del maguey pulquero es muy importante (García-Mendoza, 2007; José-Jacinto y García-Moya, 2000).

La savia del maguey ha sido consumida por los mexicanos desde la época prehispánica como una bebida llamada “aguamiel”, bebida con atributos nutricionales, substrato fermentable para la elaboración de pulque. El aguamiel ha sido considerado una alternativa de alimento y podría ser denominado como bebida nutracéutica (Santos-Zea *et al.*, 2012); sin embargo, actualmente su consumo ha disminuido por la presencia en el mercado de otras bebidas. Hace algunas décadas, el pulque tuvo importancia comercial; pero, ésta ha decaído debido a la preferencia del consumo de la cerveza, entre otros factores, que lo han desplazado y orillado a la casi extinción del maguey pulquero.

La tradición del "tlachique" (recolección de aguamiel), así como la siembra y el uso de maguey pulquero deben ser preservados como parte de la identidad cultural de nuestro país. Por lo tanto, la búsqueda de nuevas alternativas de industrialización del aguamiel podría ser una prioridad para los productores; así como, la determinación de las propiedades nutracéuticas del aguamiel y de otros productos derivados del agave, lo que

contribuiría a su revalorización coadyuvando al desarrollo económico de algunas comunidades productoras.

Una alternativa para el aprovechamiento del aguamiel es la obtención de la miel de maguey, producto que se obtiene tradicionalmente al concentrar el aguamiel por un proceso de evaporación convencional (altas temperaturas, presión atmosférica y tiempos prolongados). En la medicina tradicional, se le han atribuido diversas propiedades terapéuticas a la miel de maguey; no obstante, es poca la información que se tiene de sus características nutrimentales y nutracéuticas.

Durante los últimos años, nuevos conceptos han emergido en relación con la ciencia de la nutrición, como, por ejemplo, el creciente interés por los alimentos funcionales y nutracéuticos, debido a que representan una oportunidad para prevenir enfermedades (El Sohaimy, 2012). Por lo anterior, varios metabolitos (ingredientes nutracéuticos), presentes en los productos naturales y procesados, han empezado a tomar relevancia por sus beneficios a la salud, como son los compuestos fenólicos (flavonoides y ácidos fenólicos), carotenoides, ácido ascórbico, entre otros. Afortunadamente, varios alimentos y bebidas derivadas de algunas plantas, nativas o endémicas de México, pueden desempeñar un papel importante en la prevención de enfermedades crónicas y degenerativas, por lo cual están tomando relevancia.

A pesar de la diversidad de especies de agave a nivel nacional, poco se conoce sobre la calidad nutrimental y nutracéutica de varios productos derivados del mismo; así como, existen pocos estudios sobre la variación del valor nutracéutico del aguamiel durante diferentes técnicas de procesamiento. Por lo que es importante seleccionar aquellas

especies y cultivares de agave en función de sus atributos nutraceuticos y/o nutimentales, reevaluar la importancia económica del agave y sus productos, hacer un aprovechamiento agroindustrial eficiente y proveer nuevas alternativas económicas para el productor.

Actualmente, hay un creciente interés del consumidor en los alimentos nutraceuticos por los beneficios para la salud, lo cual se ha reflejado en el surgimiento de líneas y proyectos de investigación a nivel mundial para estudiar las propiedades y alteraciones que pueden sufrir estos ingredientes. Con base en lo antes señalado, esta investigación pretende determinar el valor nutricional y la actividad antioxidante del aguamiel y miel de maguey, asociada con el contenido de compuestos fenólicos y vitamina C, así como determinar el efecto de tres procesos de elaboración de miel de maguey (método convencional, liofilización y evaporación a presión reducida) sobre el valor nutraceutico.

II. OBJETIVOS

General

Determinar la calidad nutricional y contenido de compuestos antioxidantes en aguamiel de dos especies de agave pulquero (*Agave salmiana* y *A. mapisaga*); así como, evaluar el efecto de tres procesos de elaboración de miel de maguey sobre su valor nutracéutico.

Particulares

- Evaluar las características físico-químicas del aguamiel de *A. salmiana* y *A. mapisaga*; así como el contenido de vitamina C, flavonoides, compuestos fenólicos y actividad antioxidante, con el fin de determinar su potencial nutracéutico.
- Evaluar el efecto de tres métodos de elaboración de miel de maguey (liofilización, evaporación convencional y a presión reducida), sobre la actividad antioxidante asociada con el contenido de compuestos fenólicos, flavonoides y vitamina C.
- Realizar la caracterización físico-química, proximal y mineral de miel de maguey obtenida por tres métodos de concentración de aguamiel.

III. MARCO TEÓRICO

3.1. Agaves

El género *Agave* comprende alrededor de 166 especies, que naturalmente crecen en Norte y Centroamérica (Gentry, 2004; Good-Ávila *et al.*, 2006). México es considerado el centro de origen, debido a la gran riqueza y diversidad de agaves distribuidos en el territorio nacional, contándose con alrededor de 119 especies endémicas (García-Mendoza, 2011).

Los agaves son considerados patrimonio natural y cultural de México, su amplia distribución y diversidad biológica explican su uso por el hombre desde la época prehispánica hasta la actualidad. Algunas de estas especies son ampliamente utilizadas como fuentes de alimento, bebidas (con un elevado potencial e importancia económica y cultural), materiales de construcción y en la herbolaria regional, por sus propiedades medicinas (Arizaga y Ezcurra, 2002; Valenzuela, 1995). Sin embargo, hace diez años la FAO declaró a la planta “en peligro de extinción” y actualmente la población magueyera es muy reducida, se estima un poco más de 50 mil ejemplares, de los cuales casi la décima parte se conservan en jardines botánicos y reservas ecológicas (Flores *et al.*, 2007). Uno de los agaves de larga tradición es el maguey pulquero, recurso muy importante en las regiones áridas y semiáridas del país.

3.2. Maguey pulquero

El maguey “pulquero” se considera la planta más representativa de la altiplanicie central de México y su producto principal, el pulque (aguamiel fermentado), forma parte de la

tradición cultural del pueblo mexicano; distribuyéndose principalmente en los estados de Hidalgo, México, Puebla y Tlaxcala, y en menor proporción en San Luis Potosí, Michoacán, Querétaro, Morelos, Guanajuato y Veracruz (José-Jacinto y García-Moya, 2000).

3.2.1. Clasificación taxonómica

No existe ningún trabajo de clasificación que abarque todas las especies del género *Agave*. El sistema de clasificación más reciente fue elaborado por Gentry en 1982; sin embargo, su obra sólo incluye los agaves de Norteamérica continental y su delimitación de las especies emplea caracteres morfológicos, mencionando la amplia variación en las poblaciones. Gentry organizó el género por sus características florales y vegetativas, dividiéndolo en dos subgéneros: *Agave* conformado por doce secciones con 82 especies y *Littaea* (García Mendoza, 2007).

Las principales especies de magueyes pulqueros se encuentran dentro del subgénero *Agave* en la sección *Salmianae*. Los taxones que Gentry reconoció para formar dicho grupo son: *Agave macroculmis*, *A. mapisaga*, *A. salmiana* subsp. *Salmiana* (taxón más abundante), *A. salmiana* subsp. *angustifolia*, *A. salmiana* subsp. *ferox*, *A. salmiana* subsp. *crassispina* y *A. tecta* (Gentry, 2004; Mora-López *et al.*, 2011).

La clasificación taxonómica de las especies de agave estudiadas en esta investigación se resume a continuación:

Familia	<i>Agavaceae</i>
Género	<i>Agave</i>
Subgénero	<i>Agave</i>
Sección	<i>Salmianae</i>
Especies	<i>salmiana</i> (Otto ex Salm-Dyck) <i>mapisaga</i> (Trel)
Subespecie	<i>salmiana</i> <i>mapisaga</i>
Nombre común	pulquero, manso, xamini, penca ancha, cerro, cimarrón, etc. carrizo, mexicano o cenizo

3.2.2. Diversidad genética

La sección Salmianae del género *Agave* es un grupo con gran variabilidad morfológica y grados de domesticación, donde se encuentran dos de las principales especies pulqueras: *Agave salmiana* y *A. mapisaga*. El gradiente de domesticación va desde poblaciones espontáneas de maguey con atributos de plantas silvestres, hasta poblaciones con historial prolongado de cultivo, con atributos que pueden revelar su mayor grado de domesticación (Mora-López *et al.*, 2011).

En comparación con otros géneros y especies, el nivel de conocimiento de la diversidad genética en *Agave* es limitado y se basa principalmente en caracteres morfológicos y citológicos (Gil Vega *et al.*, 2001). El mayor número de variantes corresponde a *Agave salmiana*, encontrándose alrededor de 47 variantes con amplia variabilidad morfológica, siendo *Agave salmiana* subsp. *salmiana* la más diversa. Otra especie importante es *Agave mapisaga*, la cual presenta menor variación morfológica y se encuentra cultivada en ambientes muy humanizado (Mora-López *et al.*, 2011).

3.2.3. Etapa productiva del maguey pulquero

Como todos los miembros de las agaváceas, los magueyes pulqueros florecen una vez en su vida, después de ello comienza su muerte (Hinke, 2007); requiriéndose aproximadamente 10 años para alcanzar su madurez y poder ser aprovechado.

La etapa productiva del maguey pulquero inicia cuando éste es “capado”, es decir, cuando se le corta el conjunto de pencas más tiernas (meyolote) del centro de la planta para que al cabo de un periodo de cuatro a ocho meses (cuando se concentra mayor cantidad de azúcares) se efectúe el picado para que inicie a emanar aguamiel; después viene la operación de “raspa”, cuyo objetivo es limpiar el cajete, tallando sus paredes

para que se abran los vasos por donde fluirá el aguamiel (Hinke, 2007; Monterrubio, 2007).

De acuerdo con Ortiz-Basurto *et al.* (2008), la recolección de aguamiel se debe hacer 12 horas después de haber raspado el tallo del agave y la producción dura de cuatro a seis meses. El volumen de aguamiel fluctúa durante el periodo de cosecha, al inicio se colecta alrededor de $0.4 \text{ L} \cdot \text{planta}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$, cantidad que aumenta de 4 a $6 \text{ L} \cdot \text{planta}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$ durante los primeros dos meses, y decrece a $0.4 \text{ L} \cdot \text{planta}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$, al final de la producción de la planta.

3.3. Aguamiel

El aguamiel es el jugo que se obtiene mediante el raspado previo del cajete o cavidad central del maguey pulquero, cuando ha madurado, es un líquido translúcido, de color ambarino; su cantidad y calidad son variables, dependiendo del nivel de humedad y las condiciones topográficas donde se cultiva la planta. Cuando hay poca humedad los magueyes prolongan su periodo de maduración y dan poco aguamiel, con un alto porcentaje de azúcares; en cambio, donde hay mayor humedad la planta madura más rápido y produce más aguamiel, pero de menor contenido de azúcares (Secretaría de Economía, 1972; Monterrubio, 2007).

3.3.1. Importancia nutricional

El aguamiel es una bebida con propiedades nutrimentales específicas, siendo importante fuente de azúcares, proteínas, aminoácidos, vitaminas y minerales. El Cuadro 1 ilustra la composición nutrimental del aguamiel (Ortiz-Basurto *et al.*, 2008).

Cuadro 1. Análisis nutrimental de aguamiel.

Componente	Cantidad
Proteína	0.345
Cenizas	0.380
Aminoácidos libres	0.030
Fructooligosacáridos	1.173
Sólidos solubles totales (°Bx)	11-13
pH	4.5
Calcio (mg L ⁻¹)	35-126
Potasio (mg L ⁻¹)	960-1614
Hierro	1.1
Zinc	0.8
Ácido ascórbico	ND

3.4. Miel de maguey

Actualmente existen en el mercado diversas marcas comerciales de edulcorantes naturales obtenidos de algunas especies de agave, como son la miel de maguey pulquero y el jarabe de *Agave tequilana* Weber; este último elaborado por hidrólisis ácido-térmica del jugo extraído de la “piña” del agave y evaporación a vacío (López-Bonilla y Arenas-Ocampo, 2012). En cambio, la miel de maguey, también llamada néctar de aguamiel o agave, es el producto que se obtiene al concentrar aguamiel (76 a 78 °Bx) mediante un proceso de evaporación artesanal o convencional: altas temperaturas (más de 90 °C) y tiempos prolongados (cuatro a seis horas) (Patronato del Maguey, 1980; Hernández *et al.*, 2012).

La norma que estable las especificaciones de calidad que debe de cumplir el producto denominado jarabe de agave es la NMX-FF-110-SCFI (Secretaría de Economía, 2008); sin embargo, ésta norma sólo aplica para jarabe de agave 100% de las especies *A. salmiana* spp y *A. tequilana* Weber variedad azul, y considera un producto cuya

principal característica es el alto contenido de fructosa obtenido por hidrólisis ácido-térmica.

No obstante su popularidad, es poca la literatura disponible acerca de las características físico-químicas y antioxidantes de la miel de maguey pulquero y del jarabe de *Agave tequilana*, que permitan identificar las diferencias entre estos dos productos como consecuencia de su diferente método de elaboración. Se sabe que la miel de maguey pulquero, en comparación con el jarabe de *Agave tequilana*, se caracteriza por su color, el cual varía desde un café rojizo hasta negro; debido a que durante el tratamiento térmico a elevadas temperaturas, se produce oscurecimiento no enzimático (Lara Manzocco *et al.*, 2001).

3.5. Oscurecimiento no enzimático

Las reacciones de oscurecimiento son algunos de los fenómenos más importantes que se producen en los alimentos durante su transformación (tratamiento térmico) y almacenamiento, en donde se ven implicando diferentes compuestos y rutas metabólicas. El mayor grupo de reacciones de oscurecimiento en alimentos es el pardeamiento no enzimático, el cual se ve favorecido por los tratamientos térmicos e incluye un amplio número de reacciones tales como la reacción de Maillard, caramelización y degradación del ácido ascórbico (Lara Manzocco *et al.*, 2001). Las reacciones de oscurecimiento no enzimático dependen de muchos factores (Cuadro 2), como son la temperatura, actividad de agua, pH, contenido de humedad y composición química del alimento (Finot, 2005).

Cuadro 2. Principales diferencias entre las reacciones de oscurecimiento no enzimático.

Reacción	Presencia de O ₂	Presencia de -NH ₂	pH óptimo	Temperatura	a _w
Maillard	No	Si	Ácido/Base	Media	Media/alta
Caramelización	No	No	Ácido/Base	Alta	Baja
Degradación del ácido ascórbico	Si/No	No	Ligeramente ácido	Media	Media/alta

3.5.1. Reacción de Maillard

La reacción de Maillard implica la interacción de grupos amino (aminoácidos libres, péptidos y proteínas) con grupos carbonilo de los azúcares reductores (fructosa y glucosa) presentes en el alimento. Esta reacción de oscurecimiento no enzimático ocurre frecuentemente durante el tratamiento térmico y almacenamiento a temperatura ambiente de algunos productos alimenticios; aunque de forma mucho más moderada, a bajas temperaturas. En los alimentos, esta reacción ha sido ampliamente estudiada debido a que contribuye al desarrollo de color, aroma y a la formación de algunos precursores del flavor (Somoza, 2005; Wang *et al.*, 2011).

La gran complejidad química que entraña la reacción de Maillard, así como la frecuencia con la que se produce en los alimentos, ha suscitado un enorme interés. Este tipo de oscurecimiento implica una red compleja de reacciones químicas (Figura 1), que en las últimas etapas genera numerosas moléculas activas que se condensan con otras que contienen grupos amino, para formar polímeros marrones llamados melanoidinas (Martins *et al.*, 2001).

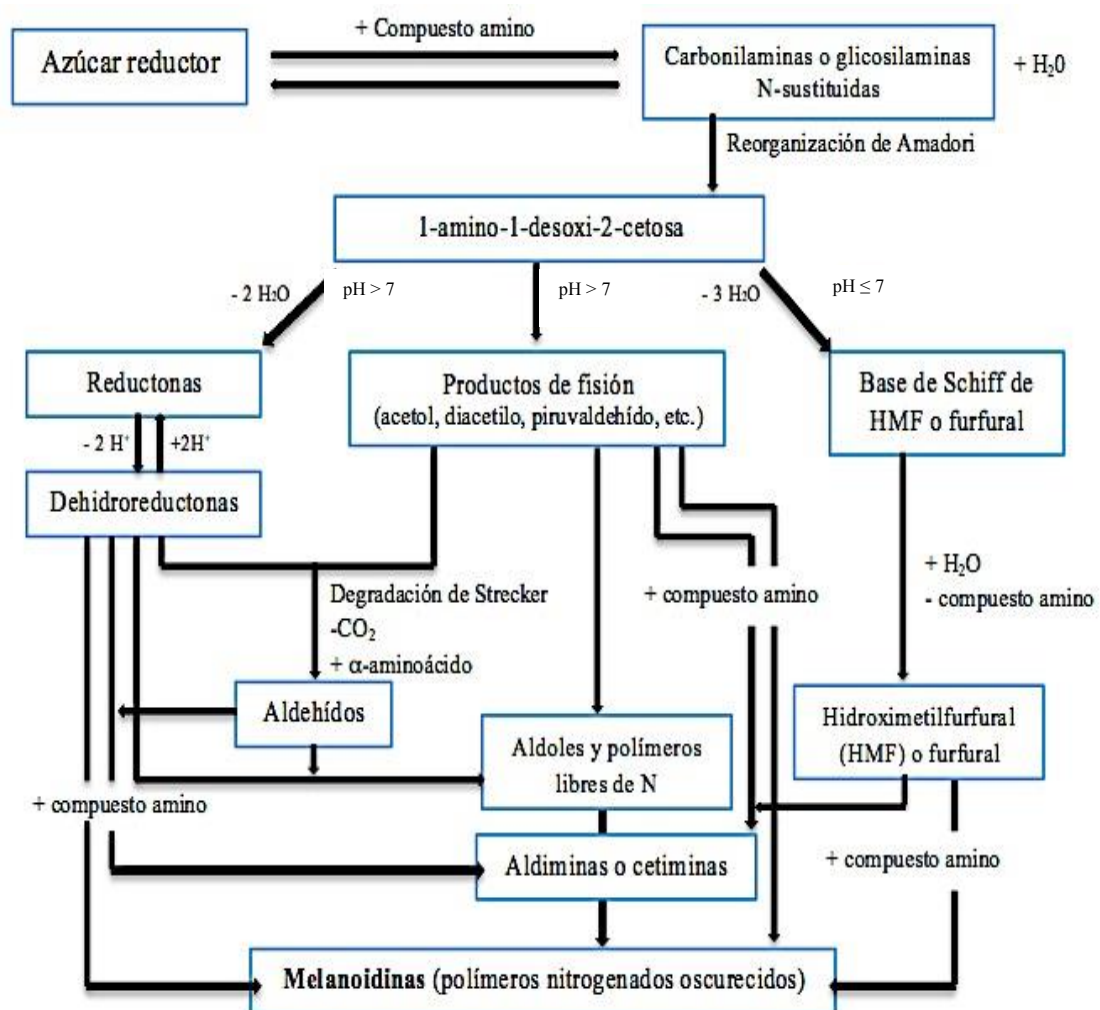


Figura 1. Esquema de la reacción de Maillard (Martins *et al.*, 2001).

Las melanoidinas son compuestos heterogéneos responsables del característico color marrón de alimentos, tales como café, pan, cacao y miel (Lindenmeier y Hofmann, 2003). La complejidad química de la reacción de Maillard ha dificultado la purificación e identificación de las melanoidinas, por lo que se desconoce su estructura química; sin embargo, pueden definirse como polímeros marrones basados en hidratos de carbono que contienen nitrógeno de alto peso molecular (Wang *et al.*, 2011; Borrelli *et al.*, 2002).

Actualmente, existe un gran interés de investigación en las propiedades biológicas de las melanoidinas, relacionadas con los efectos benéficos a la salud; debido al importante papel de estos compuestos en las características sensoriales de algunos alimentos. Se sabe que las melanoidinas ejercen diferentes actividades biológicas como: antimicrobiano, prebiótico, agente quelante y actividad genotóxica, citotóxica, antihipertensiva y antioxidante (Wang *et al.*, 2011; Pastoriza y Rufián-Henares, 2014).

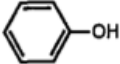
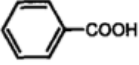
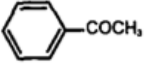
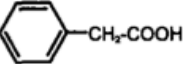
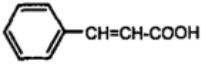
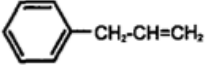
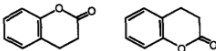
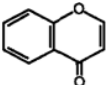
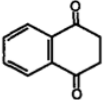
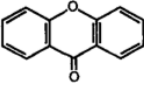
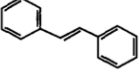
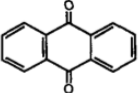
3.6. Compuestos fenólicos

Los compuestos fenólicos constituyen uno de los principales grupos de metabolitos secundarios sintetizados por las plantas durante su desarrollo (Pridham, 1960; Harborne, 1982). Constituyen un grupo muy diverso, con diferentes estructuras, englobando más de 8000 compuestos con diferentes funciones (alelopatía, fitoalexinas, pigmentación, astringencia y flavor de alimentos, etc.) y propiedades biológicas (Bravo, 1998; Naczki y Shahidi, 2004).

3.6.1. Estructura química

Químicamente, los fenoles pueden ser definidos como sustancias que poseen un anillo aromático, unido directamente a uno o más grupos hidroxilo incluyendo derivados funcionales (ésteres, metil ésteres, glicósidos, etc). Los compuestos fenólicos en plantas incluyen fenoles simples, ácidos fenólicos, cumarinas, flavonoides, estilbenos, taninos hidrolizables y condensados, lignanos y ligninas (Cuadro 3) (Shahidi y Naczki, 2004; Naczki y Shahidi, 2004).

Cuadro 3. Clasificación de los compuestos fenólicos.

Clase	Estructura básica	Clase	Estructura básica
Fenoles simples		Benzoquinonas	
Ácidos fenólicos		Acetofenonas	
Ácido fenilacético		Ácidos hidroxicinámicos	
Fenilpropenos		Cumarinas, isocumarinas	
Cromonas		Naftoquinonas	
Xantonas		Estilbenos	
Antraquinonas		Flavonoides	C ₆ -C ₃ -C ₆
Lignanós, neolignanós	(C ₆ -C ₃) ₂	Ligninas	(C ₆ -C ₃) _n

Fuente: *Saxena et al.*, 2013; *Naczky y Shahidi*, 2004.

3.6.2. Biosíntesis

Los fenoles en las plantas son sintetizados a partir de dos principales rutas metabólicas: la ruta del ácido shikímico la cual origina directamente fenilpropanoides como los ácidos hidroxicinámicos, producidos principalmente por vegetales, y la ruta del acetato malonato, la cual produce fenoles simples y algunas quinonas biosintetizados por hongos y bacterias y en menor proporción por vegetales. Uno de los grandes grupos de compuesto fenólicos son los flavonoides, los cuales se derivan de una combinación de las dos principales rutas biosintéticas (Figura 2) (Dey y Harborne, 1989; Shahidi y Naczky, 2004).

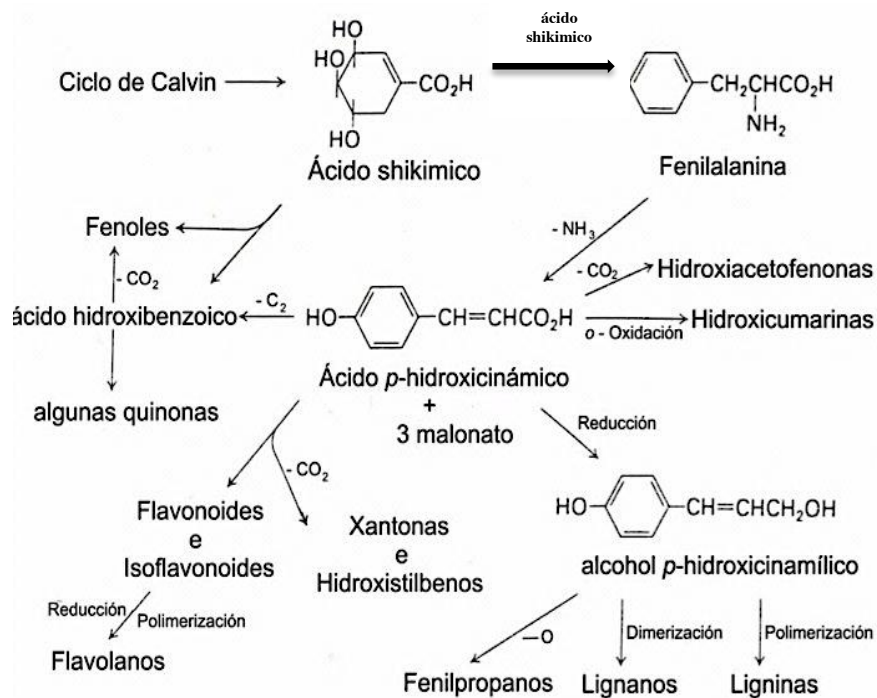


Figura 2. Biosíntesis de los compuestos fenólicos a partir de la vía del ácido shikímico y fenilalanina.

3.7. Vitamina C

La vitamina C es una de las más importantes vitaminas hidrosolubles, siendo esencial para la biosíntesis de colágeno, carnitina y neurotransmisor. La mayoría de las plantas y animales sintetizan esta vitamina para su propio beneficio; sin embargo, el ser humano no la puede sintetizar debido a la falta de la enzima L-gulonolactona oxidasa. Por lo tanto, el humano debe obtener la vitamina C por medio de su dieta, principalmente a través de frutas y verduras, o mediante suplementos alimenticios (Naidu, 2003).

La vitamina C es conocida trivialmente como ácido L-ascórbico y químicamente como ácido 2,3-enediol gulónico o 2-oxo-L-treo-hexono-1,4-lactona-2,3-enediol. Éste es un compuesto químicamente sencillo, derivado lactónico del ácido hexurónico y que

corresponde a una forma oxidada de la glucosa. En concreto es una δ -cetolactona de seis átomos de carbono que muestra un grupo enediol bifuncional entre los carbonos 2 y 3, que le hace un agente ácido y altamente reductor, por lo que se oxida fácilmente (Figura 3). El grupo enediol es esencial para su actividad biológica (Davey *et al.*, 2000; Gil Hernández, 2010; Badui Dergal, 2006).

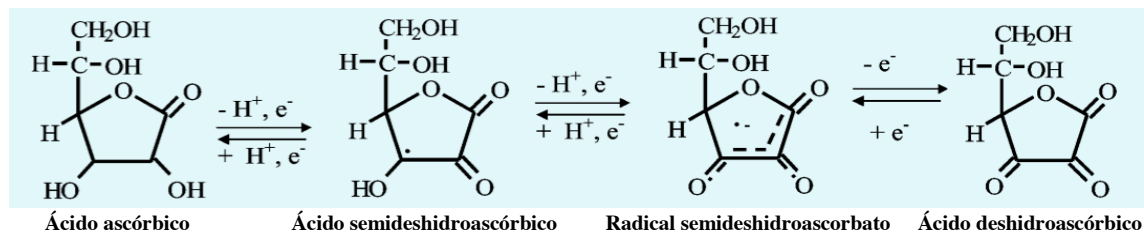


Figura 3. Oxidación del ácido ascórbico.

En general, tres tipos de actividades biológicas pueden ser definidas para la vitamina C: como un cofactor enzimático, como antioxidante y como donante/aceptor de electrones en la membrana plasmática o en los cloroplastos (Davey *et al.*, 2000). La importancia biológica del comportamiento antioxidante del ácido ascórbico se debe a que disminuye significativamente los efectos adversos de las especies reactivas del oxígeno (EROS) y nitrógeno, especies que están relacionadas con las enfermedades crónico-degenerativas. Además la vitamina C puede regenerar a otros antioxidantes, tales como la vitamina E (tocoferol), presentando ambas un mecanismo sinérgico (Naidu, 2003). La vitamina C es altamente susceptible a la oxidación, la cual está influenciada por la presencia de iones metálicos (Cu^{2+} y Fe^{3+}), por el calor, exposición a la luz, pH, concentración de oxígeno y la actividad de agua (Gregory, 1996).

3.8. Estrés oxidativo

El oxígeno es uno de los gases más importantes de la tierra, constituye el 21 % de la atmósfera, 89 % del peso del agua del mar y al menos el 47 % de la corteza terrestre; por lo cual, es un componente esencial para los organismos vivos. Sin embargo, a partir de esta molécula se forman moléculas más reactivas conocidas como especies reactivas del oxígeno (EROs). La generación de especies reactivas del oxígeno es inevitable en el metabolismo aeróbico, la mitocondria es el principal productor de EROs durante los procesos normales oxidativos del metabolismo, principalmente a través de las reacciones de óxido-reducción que ocurren en los complejos de transferencia de electrones y que tienen al oxígeno como el último aceptor de electrones (Macedo-Márquez, 2012).

Las especies reactivas del oxígeno incluyen radicales libres y ciertas especies no radicales que son oxidantes y que se convierten fácilmente en radicales libres (Cuadro 4). Estas especies oxidantes provocan daños acumulativos en moléculas fundamentales para el funcionamiento del organismo (proteínas, lípidos y ADN); resultando las EROs nocivas cuando se producen en grandes cantidades, llegando a dañar los constituyentes celulares e inducir la muerte celular. No obstante, el organismo tiene sus propios mecanismos de defensa para hacer frente a la acción de las especies oxidantes; sin embargo, en determinadas situaciones las defensas antioxidantes pueden verse desbordadas por la excesiva generación de EROs. Este desequilibrio entre especies oxidantes y antioxidantes se conoce como estrés oxidativo, el cual está asociado a numerosas enfermedades y al proceso normal de envejecimiento (Lee *et al.*, 2004).

Cuadro 4. Especies reactivas del oxígeno.

Radicales libres		No radicales	
Superóxido	$O_2^{\cdot-}$	Peróxidos orgánicos	ROOH
Hidroxilo	$OH^{\cdot}$	Peróxido de hidrógeno	H_2O_2
Hidroperoxilo	$HO_2^{\cdot}$	Oxígeno singlete	$O_2^1\Delta g$
Peroxilo	$RO_2^{\cdot}$	Ácido hipocloroso	HClO
Alcoxilo	$RO^{\cdot}$	Ácido hipobromoso	HBrO
Carbonato	$CO_3^{\cdot-}$	Ozono	O_3
Dióxido de carbono	$CO_2^{\cdot-}$	Peroxinitrito	ONOO $^{\cdot}$
		Ácido peroxinitroso	ONOOH

Fuente: Halliwell y Whiteman, 2004.

3.9. Sistemas antioxidantes

Un antioxidante es cualquier sustancia, que presente en bajas concentraciones con respecto a un sust rato oxidable, retrasa o previene significativamente la oxidación de este. Para proteger los sistemas biológicos de la toxicidad de las especies reactivas del oxígeno, las células tienen varios mecanismos de defensa antioxidante para salvaguardarse de la acumulación de EROs y eliminarlos del sistema. Estos mecanismo se encuentran integrados por sistemas enzimáticos y no enzimáticos, comprendiendo moléculas pequeñas con capacidad antioxidante (Frankel, 2007; Nordberg y Arner, 2001; Mello *et al.*, 2006).

Los antioxidantes, tanto de naturaleza enzimática como no enzimática, se hallan presentes tanto en el propio organismo como en la dieta ingerida. Los antioxidantes enzimáticos o endógenos incluyen superóxido dismutasa, catalasa, glutatión peróxidasa, glutatión reductasa, peroxidasa, entre otros, los cuales convierten las especies reactivas de oxígeno en especies no reactivas. Sin embargo, estos factores enzimáticos antioxidantes dependen de otros nutrientes esenciales; por ejemplo, la expresión de

superóxido dismutasa está en función de un aporte adecuado de cobre-zinc y la actividad de glutatión reductasa es supeditada a un consumo suficiente de riboflavina (Lee *et al.*, 2004).

El sistema antioxidantes no enzimático es un mecanismo de defensa paralelo al primero y especialmente útil cuando el sistema endógeno se satura, ya sea por producción excesiva de radicales o por descenso de la capacidad de los sistemas endógenos antioxidantes (alteración enzimática). El consumo de alimentos es una fuente importante de antioxidantes no enzimáticos, se ha estimado que una dieta cotidiana puede proporcionar más de 25 000 componentes bioactivos; este sistema comprende diversos metabolitos como son los fenoles, tocoferoles, ácido ascórbico y carotenoides. En general, los antioxidantes son abundantes en frutas y verduras, así como en cereales, legumbres, frutos secos y otros productos alimenticios (Zamora S., 2007; Rajendran *et al.*, 2014).

3.10. Nutracéuticos

Durante los últimos años los especialistas e investigadores han reconocido la importancia del estudio de los alimentos funcionales y nutracéuticos, debido a que representan una oportunidad para mejorar la salud o prevenir enfermedades de los consumidores, reducir los costos de salud y apoyar el desarrollo económico en las comunidades rurales (Myeong *et al.*, 2010).

Un nutracéutico puede ser definido como un alimento o parte de un alimento que proporciona beneficios para la salud, incluyendo la prevención y/o tratamiento de enfermedades (El Sohaimy, 2012). Los nutracéuticos son compuestos químicos de origen natural, biológicamente activos, que tienen efectos benéficos en la salud más allá

de lo que nos puede proporcionar la dieta básica; comprendiendo diversos grupos de metabolitos que contribuyen de manera importante en la nutrición y salud del consumidor, como son: la fibra dietética, los compuestos fenólicos, los carotenoides, los triglicéridos ricos en ácidos grasos omega 3, los fitoesteroles y micronutrientes como tocoferoles y tocotrienoles, fosfolípidos, ácido ascórbico, tiamina y niacina. El común denominador de la mayoría de los nutraceuticos es su capacidad antioxidante que contrarresta los radicales libres responsables de causar la oxidación de membranas y daño al ADN, lo que promueve enfermedades como cáncer, problemas cardiovasculares y envejecimiento (Pérez Leonard, 2006; Shahidi, 2012).

Los alimentos y bebidas derivadas de plantas nativas pueden desempeñar un papel importante en la prevención de enfermedades crónicas y degenerativas (El Sohaimy, 2012), debido al contenido de ingredientes nutraceuticos. El aguamiel de maguey pulquero, bebida que actualmente ha sido desplazada por otros productos, podría ser considerada como una producto nutraceutico (Tovar-Robles *et al.*, 2011); sin embargo, hacen falta estudios sobre el valor nutraceutico del aguamiel de diferentes especies y cultivares.

LITERATURA CITADA

- Arizaga, S.; Ezcurra, E. 1995. Insurance against reproductive failure in a semelparous plant: bulbil formation in *Agave macrocarpa* flowering stalks. *Oecologia* 101: 329-334.
- Badui Dergal, S. (2006). Química de los Alimentos, 4ª edición edición. México: Pearson Educación. 736 p.
- Borrelli, R. C.; Visconti, A.; Mennella, C.; Anese, M.; Fogliano, V. 2002. Chemical characterisation and antioxidant properties of coffee melanoidins. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50: 6527-6533.
- Bravo, L. 1998. Polyphenols: chemistry, dietary sources, metabolism, and nutritional significance. *Nutrition Reviews* 56 (11): 317-333.
- Davey, M.; Van Montagu, M.; Inze, D.; Sanmartin, M.; Kanellis, A.; Smirnoff, N.; Benzie, Iris J. J.; Strain, John J.; Favell, Derek; Fletcher, John. 2000. Plant L-ascorbic acid: chemistry, function, metabolism, bioavailability and effects of processing. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 80: 825-860.
- Dey, P.; Harborne, J. 1989. Methods in plant biochemistry (Vol. 1). (J. Harborne, Ed.) USA: Academic Press Inc. 552 p.
- El Sohaimy, S. A. 2012. Functional foods and nutraceuticals-modern approach to food science. *World Applied Sciences Journal* 20: 691-708.
- Finot, P. 2005. Historical perspective of the Maillard reaction in food science. *Annals New York Academy of Sciences* 1043 (1): 1-8.
- Flores Morales, A.; Mora Escobedo, R.; Romero Aguilar, L. 2007. Evaluación fisicoquímica del aguamiel de tres variedades de maguey pulquero (*Agave spp*). Tlaxcala, México: Tesis. Instituto Tecnológico del Altiplano de Tlaxcala y Escuela Nacional de Ciencias Biológicas.
- Frankel, E. N. 2007. Antioxidants in food and biology facts and fiction, Vol. 20. Bridgwater, England: Publisher Oily Press. 268 p.
- García-Mendoza, A. 2007. Los agaves de México. *Revista Ciencias* 87: 14-23.
- García-Mendoza, A. 2011. Fascículo 88. Agavaceae. En U. N. México, Flora del Valle de Tehuacán-Cuicatlán (págs. 1-95). D.F., México: Instituto de Biología.
- Gentry, H. S. 2004. Agaves of continental north America. USA: The University of Arizona Press. 670 p.
- Gil Vega, K.; González Chavira, M.; Martínez de la Vega, O.; Simpson, J.; Vandemark, G. 2001. Analysis of genetic diversity in *Agave tequilana* var. Azul using RAPD markers. *Euphytica* 119: 335-341.
- Good-Ávila, V. S.; Souza, V.; Gaut, S. B.; Eguiarte, E. L. 2006. Timing and Rate of Speciation in *Agave* (Agavaceae). *Proceedings of the National Academy of Science USA* 103 (24): 9124-9129.
- Gregory, J. F. 1996. Vitamins. *Food Chemistry*, 3ª edición: 431-530.

- Halliwell, B.; Whiteman, M. 2004. Review. Measuring reactive species and oxidative damage in vivo and in cell culture: how should you do it and what do the results mean? . British Journal of pharmacology 142: 231-255.
- Harborne, J. 1982. Introduction to ecological biochemistry, 2ª edición. New York, USA: Academic Press. 384 p.
- Hernández R., L.; Esparza Torres, F.; Ybarra Moncada, M. 2012. Control del oscurecimiento no enzimático en miel de maguey (*Agave mapisaga*). Texcoco, México: Tesis DIA, Universidad Autónoma Chapingo. 133 p.
- Hinke, N. 2007. Breve léxico del maguye. Ciencias 87: 24-26.
- José Jacinto, R.; García Moya, E. 2000. Remoción cuticular (mixiote) y desarrollo foliar en los agaves pulqueros (*Agave salmiana* y *Agave mapisaga*). Boletín de la Sociedad Botánica de México 66: 73-79.
- Lara Manzocco, S.; Dino Mastrocola, C.; Nicoli, M.; Lerici, C. 2001. Review of non-enzymatic browning and antioxidant capacity in processed foods. Food Science and Technology 11: 340-346.
- Lee, J.; Koo, N.; Min, D. 2004. Reactive oxygen species, aging, and antioxidative nutraceuticals. Comprehensive reviews in Food Science and Food Safety 3: 21-33.
- Lindenmeier, M.; Hofmann, T. 2003. Influence of baking conditions and precursor supplementation on the amounts of the antioxidant pronyl-Llysine in bakery products. Journal of Agricultural and Food Chemistry 52: 350-354.
- López-Bonilla, Argelia; Arenas-Ocampo, Martha Lucia. 2012. Elaboración y caracterización de jarabe rico en fructosa a partir de los agaves (*Agave tequilana* Weber y *Agave angustifolia* Haw). Yautepec, Morelos, México: Tesis de maestría, CEPROBI, IPN.
- Macedo-Marquez, Alain. 2012. La producción de especies reactivas de oxígeno (EROs) en las mitocondrias de *Saccharomyces cerevisiae*. Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas 15 (2): 97-103.
- Martins, S. I.; Jongen, W. M.; Van Boekel, M. A. 2001. A review of Maillard reaction in food and implications to kinetic modelling. Trends in Food Science and Technology 11: 364-373.
- Mello, L. D.; Hernandez, S.; Marrazza, G.; Mascini, M.; Kubota, L.T. 2006. Investigations of the antioxidant properties of plant extracts using a DNA-electrochemical biosensor. Biosensors and Bioelectronics 21: 1374-1382
- Monterrubio, A. L. 2007. Las haciendas pulqueras de México, 1ª edición. México, D.F., México: UNAM.
- Mora-López, J.; Reyes-Agüero, J.; Flores-Flores, J.; Peña-Valdivia, C.; Aguirre-Rivera, J. 2011. Variación morfológica y humanización de la sección *Salmianae* del género *Agave*. Agrociencia 43: 465-477.
- Myeong, H.; Lee, J.; Song Mi, J. 2010. Dietician's intentions to recommend functional foods: The mediating role of consumption frequency of functional foods. Nutrition Research and Practice 4: 75-81.
- Naczki, M.; Shahidi, F. 2004. Review. Extraction and analysis of phenolics in food. Journal of Chromatography 1054: 95-111.
- Naidu, K. A. 2003. Review: Vitamin C in human health and disease is still a mystery? An overview. Nutrition Journal 2 (7): 1-10.
- Nordberg, J.; Arner, E. S. 2001. Reactive oxygen species, antioxidants, and the mammalian thioredoxin system. Free Radical Biology and Medicine 31 (11): 1287-1312.

- Ortiz-Basurto, R. I.; Pourcelly, G.; Dogo, T.; Williams, P.; Dornier, M.; Belleville, M. P. 2008. Analysis of the main components of the aguamiel produced by the maguey-pulquero (*Agave mapisaga*) throughout the harvest period. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 56: 3682–3687.
- Pastoriza, S., & Rufián-Henares, J. A. 2014. Contribution of melanoidins to the antioxidant capacity of the Spanish diet. *Food Chemistry* 164, 438-445.
- Patronato del Maguey. 1980. Jugo concentrado del maguey. México.
- Pérez Leonard, H. 2006. Nutracéuticos: componente emergente para el beneficio de la salud. *ICIDCA* 40 (3): 20-28.
- Pridham, J. 1960. Phenolics in plants in health and disease. New York, U.S.A: Pergamon Press. 131 p.
- Rajendran, Peramaiyan; Nandakumar, Natarajan; Rengarajan, Thamaraiselvan; Palaniswami, Rajendran; Nesamony Gnanadhas, Edwinoliver; Lakshminarasaiiah, Uppalapati; Gopas, Jacob; Nishigaki, Ikuo . 2014. Antioxidants and human diseases: review. *Clinica chimica acta* 436: 332–347.
- Santos-Zea, L.; Leal-Díaz, A. M., Cortes-Ceballos, E.; Gutiérrez-Urbe, A. J. 2012. Agave (*Agave spp.*) and its traditional products as a source of bioactive compounds. *Current bioactive compounds* 8 (3): 218-231.
- Saxena, M.; Saxena, J.; Nema, R.; Singh, D.; Gupta, A. 2013. Phytochemistry of medicinal plants. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry* 1 (6): 168-182.
- Secretaría de Economía. 1972. NMX-V-022-1972. Aguamiel. México, México: Dirección General de Normalización.
- Secretaría de Economía. 2008. NMX: Alimentos - Jarabe de agave 100 %. Especificaciones y métodos de prueba. Dirección General de Normas.
- Shahidi, F. 2012. Nutraceuticals, functional foods and dietary supplements in health and disease. *Journal of food and drug analysis* 20 (1): 226-230.
- Shahidi, F.; Naczek, M. 2004. Phenolics in food and nutraceuticals: sources, applications and health effects. USA: CRC Press. 576 p.
- Somoza, V. 2005. Review: five years of research on health risks and benefits of Maillard reaction products: an update. *Molecular Nutrition and Food Research* 49: 663 – 672.
- Tovar-Robles, C. L., Perales-Segovia, C., Nava Cedillo, A., Valera-Montero, L. L., Gómez-Leyva, J. F., Guevara-Lara, F., y otros. (2011). Effect of aguamiel (agave sap) on hematic biometry in rabbits and its antioxidant activity determination. *Italian Journal of Animal Science* 10, 21-24.
- Valenzuela, Z. A. G. 1995. La agroindustria del agave tequilero *Agave tequilana* Weber. *Bol. Soc. Bot. México* 55:15-25.
- Wang, H.-Y.; Qian, H.; Wei-Rong, Y. 2011. Melanoidins produced by the Maillard reaction: structure and biological activity. *Food Chemistry* 128: 573-584.
- Zamora S., J. D. 2007. Antioxidantes: micronutrientes en lucha por la salud. *Revista chilena de nutrición* 34 (1): 17-26.

**IV. COMPONENTES ANTIOXIDANTES Y CALIDAD NUTRICIONAL DE
AGUAMIEL DE DIVERSOS CULTIVARES DE Maguey Pulquero**

(Agave salmiana y A. mapisaga).

COMPONENTES ANTIOXIDANTES Y CALIDAD NUTRICIONAL DE AGUAMIEL DE DIVERSOS CULTIVARES DE MAGUEY PULQUERO (*Agave salmiana* y *A. mapisaga*)

ANTIOXIDANT COMPONENTS AND NUTRITIONAL QUALITY OF AGUAMIEL OF SOME CULTIVARS FROM MAGUEY-PULQUERO (*Agave salmiana* y *A. mapisaga*)

Hernández-Ramos Lyzbeth, García-Mateos Ma. del Rosario, Colinas-León Ma. Teresa B., Ybarra-Moncada Ma. Carmen, Santos-Moreno Armando

RESUMEN

La savia del maguey ha sido consumida por los mexicanos desde la época prehispánica como una bebida llamada “aguamiel”; sin embargo, actualmente su consumo ha disminuido. Poco se conoce sobre el valor nutricional y nutraceutico del aguamiel obtenido de diferentes especies y cultivares de maguey pulquero. Por ello, en esta investigación se evaluaron las características físico-químicas, componentes nutricionales y antioxidantes del aguamiel de diversos cultivares de *A. salmiana* y *A. mapisaga* (Estado de México e Hidalgo), con el fin de identificar aquellos de mayor atributo nutraceutico y revalorizar el consumo del aguamiel. La identificación taxonómica de cada cultivar se realizó en los Herbarios MEXU (UNAM) y “JES” (UACH). Los resultados mostraron que el aguamiel es fuente adecuada de azúcares (10.55 %), proteína (0.82 %), Fe (19.17 mg L⁻¹), Cu (5.12 mg L⁻¹), K (1829.78 mg L⁻¹), vitamina C (323.17 mg EAA L⁻¹) y compuestos fenólicos (325.66 mg EAG L⁻¹). La capacidad antioxidante del aguamiel fue moderada, siendo mayor en el aguamiel de *A. salmiana* del Estado de Hidalgo. Las muestras de aguamiel de color más oscuro (menor *hue*) presentaron mayor actividad antioxidante, la cual estuvo correlacionada significativamente con el contenido de compuestos fenólicos, proteína y Ca. El aguamiel del cultivar *cerro* de *A. salmiana* (Estado de Hidalgo) mostró los mayores niveles de actividad antioxidante (2576.29 µM ET L⁻¹), pero menor valor energético. En conclusión, el aguamiel podría ser considerado como bebida funcional por su calidad nutricional y contenido de componentes antioxidantes.

Palabras clave: *savia de agave, proteína, minerales, compuestos fenólicos, actividad antioxidante.*

ABSTRACT

Since the Prehispanic period, the sap of the maguey-pulquero has been consumed by Mexicans as a beverage called “aguamiel”; but nowadays it's very little consumed. Little is known about nutritional and nutraceutical value of the aguamiel of different species and maguey-pulquero cultivars. Therefore, the aim of this research was to evaluate physicochemical characteristics, nutritional and antioxidant compounds of aguamiel from different cultivars of *Agave salmiana* and *A. mapisaga* (State of Mexico and Hidalgo, Mexico). This information could help identify those cultivars with major nutraceutical properties and revalue aguamiel consumption. The botanical identification of each cultivar was carried out at the Herbarium MEXU (UNAM) and “JES” (UACH). The results showed that the aguamiel is a good source of sugars (10.55 %), protein (0.82 %), Fe (19.17 mg L⁻¹), Cu (5.12 mg L⁻¹), K (1829.78 mg L⁻¹), vitamin C (323.17 mg EAA L⁻¹) and phenolic compounds (325.66 mg EAG L⁻¹). Aguamiel showed moderate antioxidant capability, being higher in the aguamiel of *A. salmiana* from Estado de Hidalgo. The darker aguamiel (lower *hue*) showed higher antioxidant activity, associated with a strong significant correlation between phenolic content, protein and Ca. The aguamiel obtained from the *cerro* cultivar showed better antioxidant activity (2576.29 µM ET L⁻¹), but lower energy value. In conclusion, the aguamiel could be considered as a functional beverage because of its nutritional quality and content of antioxidant components.

Key words: *Agave sap, protein, minerals, phenolic compounds, antioxidant activity.*

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, los consumidores están cada vez más interesados en adquirir productos naturales que además del valor nutritivo aporten beneficios a la salud por su alto contenido de ingredientes antioxidantes. Se ha demostrado que el estrés oxidativo juega un papel importante en la aparición de enfermedades crónicas y degenerativas, por lo cual se ha incrementado la demanda de alimentos con propiedades antioxidantes (Soydinc *et al.*, 2007). Afortunadamente, los alimentos y bebidas derivadas de plantas nativas pueden desempeñar un papel importante en la prevención de enfermedades, debido al contenido de ingredientes nutraceuticos (El Sohaimy, 2012; Wildman, 2001).

El aguamiel es un producto natural con atributos nutricionales y potencial antioxidante atribuido a la presencia de compuestos fenólicos y vitamina C, que podría considerarse como bebida nutraceutica (Tovar-Robles *et al.*, 2011), con algunas propiedades terapéuticas (actividad antimicrobiana y prebiótica) (Santos-Zea *et al.*, 2012). El aguamiel es la savia que se obtiene mediante el raspado previo del cajete o cavidad central de varias especies de agave (maguey pulquero), su producción está principalmente reservada para la elaboración del pulque. Es una bebida fuente de azúcares, proteínas, aminoácidos, vitaminas y minerales (Patronato del Maguey, 1980), que podría ser una alternativa en lugares donde la calidad del agua es mala y el consumo de carne es limitado (Ortiz-Basurto *et al.*, 2008); sin embargo, actualmente su consumo ha disminuido.

A pesar de la diversidad de especies de agave en México, son pocos los estudios que se han realizado referentes al valor nutricional y contenido de ingredientes nutraceuticos del aguamiel de las diferentes especies y cultivares de maguey pulquero. Por tanto, es recomendable ampliar las investigaciones de la calidad nutricia y nutraceutica del aguamiel, para seleccionar aquellas especies y cultivares de agave por sus atributos antioxidantes y/o nutricionales. Esta información podría ayudar a revalorizar el consumo del aguamiel y el cultivo del maguey pulquero, patrimonio natural y cultural de México. Con base en lo anterior, el objetivo de esta investigación fue determinar las características físico-químicas, nutricias y nutraceuticas del aguamiel de diferentes cultivares de *A. salmiana* y *A. mapisaga*.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Material de estudio

Se caracterizaron nueve muestras de aguamiel de dos especies de maguey pulquero (*Agave mapisaga* Trel y *A. salmiana* Otto ex Salm-Dyck), las cuales fueron colectadas en febrero y marzo de 2014 en diferentes localidades de dos estados de la República Mexicana (Estado de México e Hidalgo) (Cuadro 5).

El aguamiel obtenido de los cultivares *xamini*, *cerro*, *penca ancha* y *cimarrón*, *A. salmiana*, fue recolectado en magueyales de El Cardonal, Hidalgo (Figura 4), donde el clima corresponde a un BS₁kw(w) semiseco templado con lluvias en verano y una temperatura media anual de 14.8 °C, con una precipitación anual de 543 mm (INEGI, 2005 y 2011).



Figura 4. Magueyal de *A. salmiana*, en la localidad de Durango Daboxtha, El Cardonal, Hidalgo, México.

Las muestras de aguamiel cultivar *manso*, *cenizo* y *carrizo* se obtuvieron de magueyales de diversas localidades de los municipios de Otumba, Teotihuacan, Axapusco y Texcoco, Estado de México (Figura 5), región con un clima C(w₁) (w) b(i') templado

subhúmedo y semifrío, con lluvias en verano y temperatura media anual entre 12° y 18 °C (García, 1988).



Figura 5. Plantación de *A. salmiana* cultivar *mango*, en la localidad de San Isidro del Progreso, Teotihuacan, Estado de México.

El aguamiel de cada cultivar fue obtenido de plantas en madurez comercial, raspadas por las mañanas, recolectando aproximadamente 10 L de aguamiel y tomando una muestra de 1 L para los análisis; el muestreo se realizó durante cinco días (Figura 6). Las muestras de aguamiel fueron colocadas en botellas de polipropileno, etiquetadas y refrigeradas para disminuir el metabolismo fermentativo. Inmediatamente fueron trasladadas al laboratorio para congelar el aguamiel a -18 °C hasta su análisis.

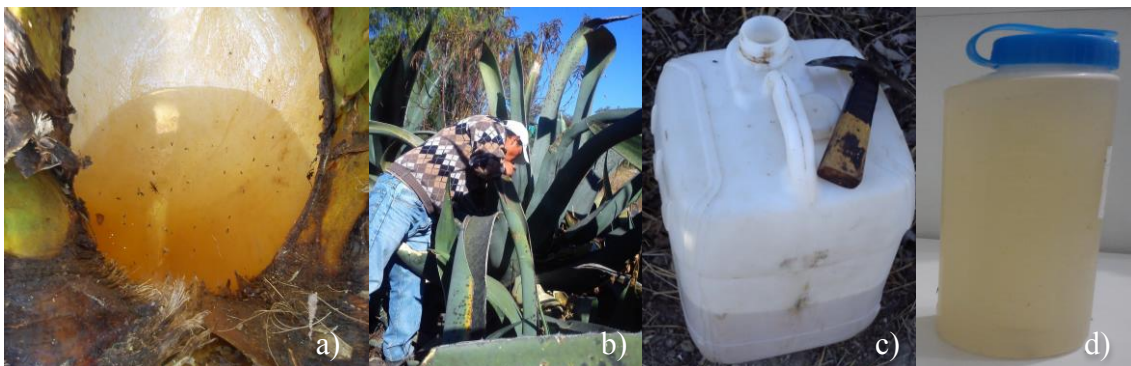


Figura 6. Proceso de obtención de aguamiel: a) aguamiel en el cajete del maguey, b) “Tlachique” (cosecha de aguamiel), c) aguamiel obtenido de 10 plantas de maguey, d) muestra de aguamiel.

2.2. Herborización e identificación de los agaves pulqueros

Se efectuaron recorridos de campo en cada una de las plantaciones donde se obtuvo aguamiel y se verificó que las muestras fueran obtenidas de agaves de la misma especie y cultivar (Figura 7).



Cultivar manso: ¹ Santa Ma. Aticpac, Axapusco, Edo. de México; ² Santiago Zacualupan, Teotihuacan, Edo. de México; ³ San Marcos, Otumba, Edo. de México.

Figura 7. Agaves pulqueros utilizados para la obtención de aguamiel: *A. mapisaga* Trel (cultivar *cenizo* y *carrizo*) y *A. salmiana* Otto ex Salm-Dyck (cultivar *xamini*, *penca ancha*, *cerro*, *corriente* y *manso*).

Durante los recorridos se recolectó material vegetal de plantas encontradas en floración o fructificación. Para cada ejemplar se registró su ubicación con coordenadas geográficas, altitud, tipo de vegetación y abundancia relativa del taxón. Se preparó un ejemplar de herbario para su identificación. La identificación taxonómica se realizó en el Herbario Jorge Espinosa Salas (JES) del Departamento de Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo, con apoyo del M.C. Antonio Cortés Jiménez, y en el Herbario Nacional de México (MEXU) del Instituto de Biología de la UNAM, por el Dr.

Abisai Josué García Mendoza. En el Cuadro 5 se enlistan las especies de agave pulquero utilizadas para la obtención de aguamiel y el número de registro de los ejemplares depositados en los Herbarios “JES” y “MEXU” (Figura 8).

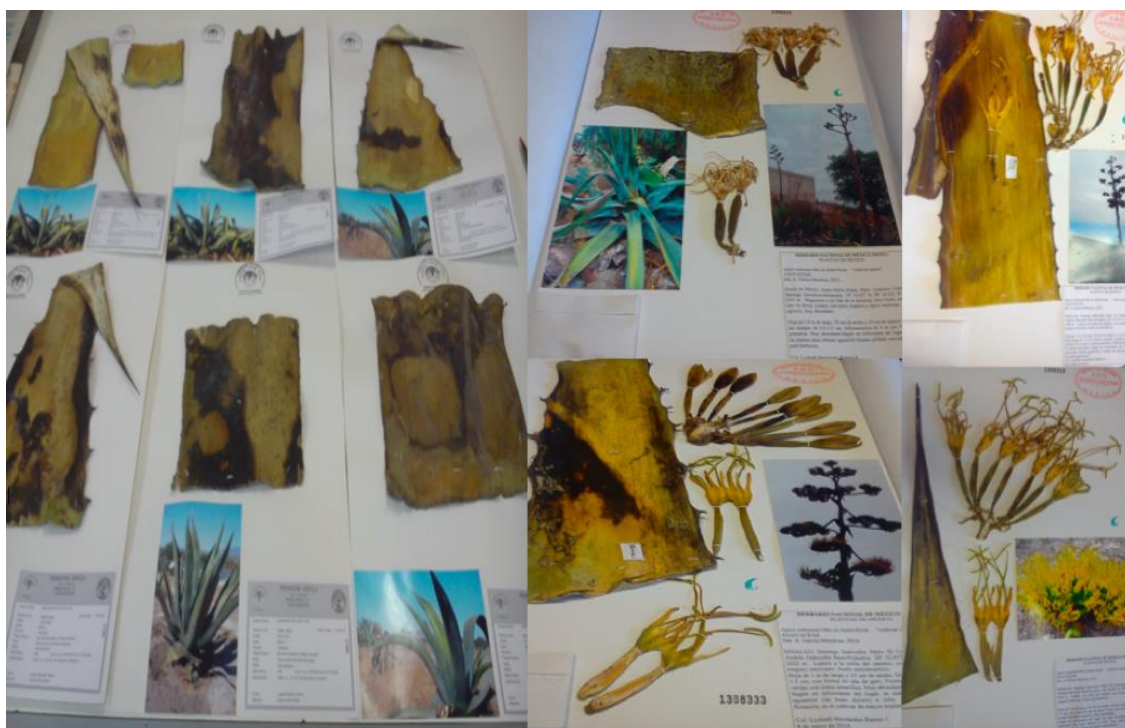


Figura 8. Ejemplares de herbario de las especies de agave pulquero depositados para su identificación en los Herbarios “Jorge Espinosa Salas” (UACH) y MEXU (UNAM).

Se utilizaron claves taxonómicas contenidas en *Agaves of Continental North America* (Gentry, 2004) y en *Flora del Valle de Tehuacán-Cuicatlán* (García-Mendoza, 2011).

Cuadro 5. Identificación y localización geográfica de las especies de agave pulquero utilizadas para la obtención de aguamiel.

Especie	Cultivar	Localidad	Municipio y estado	Longitud oeste	Latitud norte	Altitud (msnm)	Herbario y No. de registro
<i>A. salmiana</i>	Xamini	Durango Daboxtha	El Cardonal, Hgo.	99° 4.730	20° 32.657	2022	MEXU, UNAM 1388318, 1388332 y 1388333
<i>A. salmiana</i>	Cerro	Durango Daboxtha	El Cardonal, Hgo.	99° 4.409	20° 32.490	2015	Preparatoria Agrícola, UACH 31460
<i>A. salmiana</i>	Corriente o cimarrón	Durango Daboxtha	El Cardonal, Hgo.	99° 4.457	20° 32.450	1992	MEXU, UNAM 1388337 y 1388338
<i>A. salmiana</i>	Penca ancha	Durango Daboxtha	El Cardonal, Hgo.	99° 4.670	20° 32.751	1990	MEXU, UNAM 1388339 y 1388343
<i>A. salmiana</i>	Manso	San Marcos	Otumba, Edo. de México	98° 69.380	19° 68.330	2365	Preparatoria Agrícola, UACH
<i>A. salmiana</i>	Manso	Santiago Zacualuca	Teotihuacan, Edo. de México	98° 56.106	19° 42.232	2283	Preparatoria Agrícola, UACH 31391
<i>A. salmiana</i>	Manso	Santa Ma. Actipac	Axapusco, Edo. de México	98° 44.252	19° 52.027	2361	MEXU, UNAM 1388320 y 1388345
<i>A. mapisaga</i>	Cenizo	San Isidro del Progreso	Teotihuacan, Edo. de México	98° 54.860	19° 42.867	2323	Preparatoria Agrícola, UACH 31390
<i>A. mapisaga</i>	Carrizo	Tequexquahuac	Texcoco, Edo. de México	98° 55.670	19° 20'190	2365	Preparatoria Agrícola, UACH 30189

Fuente: elaboración propia.

2.3. Caracterización físico-química del aguamiel

pH. Se midió con un potenciómetro (HI 2221 Hanna Instruments, Woonsocket, RI, USA) según lo describió por la AOAC (2000).

Azúcares reductores directos y totales. Se utilizó el procedimiento de Lane-Eynon, con la modificación de Soxhlet de la solución de Fehling (AOAC, 2000). El porcentaje de sacarosa se calculó usando la Ecuación (1).

$$\text{Sacarosa (\%)} = (\text{azúcares totales} - \text{azúcares reductores directos}) \times 0.95 \quad (1)$$

Color. Se determinó mediante un colorímetro Hunter Lab MiniScan XE Plus (modelo 45/0-L RestonVa, USA), utilizando el iluminante D65, un ángulo del observador de 10° y la escala CIE $L^*a^*b^*$ (CYTED, 1997). El aguamiel se colocó en una cápsula de vidrio del Hunter Lab, especial para líquidos; la cápsula se situó sobre una base, la distancia entre ésta y el punto de emisión de luz del equipo está estandarizada. Se cubrió la cápsula con un cilindro de papel negro para evitar la incidencia de luz sobre el líquido.

Se calculó el índice de saturación del color (Croma) y el ángulo de tono (Hue) de acuerdo con lo descrito por McGuire (1992).

2.4. Análisis proximal

Los contenidos de humedad (%), cenizas (%) y proteína cruda (%) se determinaron de acuerdo a la metodología establecida por la AOAC (2000). El contenido de carbohidratos (%) se calculó por diferencia. El valor energético del aguamiel se determinó mediante los factores de Atwater (Hernández R. y Sastre Gallego, 1999).

2.5. Contenido mineral

Las muestras de aguamiel fueron sometidas a digestión húmeda en ácido nítrico al 50 % (v/v) (Blake *et al.*, 1988), siendo digeridas a 95 °C durante 45 min (Sistema de digestión Tecator, TD20 Digestion System Tubes and Racks, Foss, USA). Posteriormente, se realizó una segunda etapa de digestión/oxidación mediante la adición de peróxido de hidrógeno (30 % p/v), incubando las muestras a 95 °C (15 min). Después de la digestión total de la muestra, se adicionó agua desionizada hasta un volumen final de 50 mL. Se determinaron los contenidos de Cu, Zn, Fe, Ca, Mg, K y Na mediante espectrofotometría de absorción atómica (700 AAnalyst, PerkinElmer, USA).

2.6. Cuantificación de vitamina C

La concentración de vitamina C (ácido ascórbico) se determinó por espectrofotometría siguiendo el método descrito por Burdurlu *et al.* (2006), con algunas modificaciones. Se tomó 1 mL del aguamiel y se aforó a 10 mL con ácido metafosfórico al 3 % (p/v). En un matraz Erlenmeyer se colocaron 2 mL de la solución anterior, 2 mL de regulador de acetatos (solución buffer pH = 4, ácido acético glacial: acetato de sodio al 5 % p/v), 3 mL de 2,6-dicloroindofenol y 15 mL de xileno, en sucesión rápida y agitando vigorosamente. La solución se transfirió a embudos de separación para eliminar la fase acuosa. A la fase de xileno se le adicionaron cristales de Na₂SO₄ anhidro, para eliminar trazas de agua; posteriormente, se leyó su absorbancia a una longitud de onda de 520 nm en un espectrofotómetro (Genesys 10s, Thermo Scientific, USA). El contenido de Vitamina C fue calculado usando una curva estándar de ácido ascórbico dentro de un intervalo de concentración de 0 – 0.25 mg mL⁻¹ ($y = -2.666x + 0.567$, $R^2 = 0.995$),

los resultados fueron expresados en mg equivalentes de ácido ascórbico por litro de aguamiel (mg EAA L⁻¹).

2.7. Determinación de fenoles solubles totales

Las muestras de aguamiel fueron diluidas en metanol: ácido acético: agua (10: 1: 9 v/v/v), a una concentración del 10 % (v/v), y sonicadas durante 30 min (Cole Parmer 8892, Illinois, USA). El extracto se conservó en refrigeración hasta su análisis.

El contenido de compuestos fenólicos totales se determinó por el método de Folin-Ciocalteu (Singleton y Rossi, 1965). Una alícuota de 1 mL del extracto fenólico se mezcló con 10 mL de agua y 1 mL del reactivo de Folin-Ciocalteu (2 N, Sigma - Aldrich), se dejó reposar 2 min. Posteriormente, a la mezcla se le adicionaron 4 mL de una solución de carbonato de sodio (Na₂CO₃) al 7.5 % (p/v) y se dejó reposar en oscuridad a temperatura ambiente, durante una hora.

Finalmente, se tomó lectura de la absorbancia a 765 nm en un espectrofotómetro (Genesys 10s, Thermo Scientific, USA). La curva de calibración se construyó con ácido gálico como referencia (0 – 0.2 mg mL⁻¹, $y = 5.9332x - 0.0375$, $R^2 = 0.995$). El contenido total de fenoles se expresó en mg equivalentes de ácido gálico por litro de aguamiel (mg EAG 100 L⁻¹).

2.8. Cuantificación de flavonoides

Las muestras de aguamiel fueron diluidas en metanol al 80 % v/v, a una concentración de 40 % (v/v). El contenido de flavonoides se cuantificó de acuerdo al método Dowd, adaptado por Arvouet-Grand *et al.*, 1994. A 2 mL del extracto metanólico se le

agregaron 0.5 mL de AlCl_3 (2 % p/v) y agua destilada hasta un volumen final de 25 mL. La mezcla se homogeneizó en un vortex y se incubó durante 30 min a temperatura ambiente, en oscuridad. Se leyó la absorbancia a una longitud de onda de 425 nm en un espectrofotómetro (Genesys 10s, Thermo Scientific, USA). La curva estándar se construyó con quercetina como referencia ($0 - 0.025 \text{ mg mL}^{-1}$, $y = 5.4696x + 0.0018$, $R^2 = 0.996$). Los resultados se expresaron en mg equivalentes de quercetina en un litro de aguamiel (mg EQ L^{-1}).

2.9. Evaluación de la actividad antioxidante

El análisis de actividad antioxidante se determinó por el método del radical libre DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazil) descrito por Brand-Williams *et al.* (1995). El aguamiel fue diluido en metanol al 80 % v/v, a una concentración del 40 % (v/v).

Para la reacción de reducción del DPPH, 0.1 mL del extracto metanólico se mezcló con 2.9 mL de solución de DPPH ($6 \times 10^{-5} \text{ M}$). La mezcla se mantuvo en reacción en oscuridad durante 30 min a temperatura ambiente, después la absorbancia se midió a 517 nm en un espectrofotómetro (Genesys 10s). Se usó como referencia una curva estándar de Trolox ($y = 76.889x + 2.2556$, $R^2 = 0.997$). Los resultados se expresaron en μM equivalentes de trolox por litro de aguamiel ($\mu\text{M TE L}^{-1}$). La actividad antioxidante de cada muestra se determinó por el porcentaje de reducción de DPPH (Ecuación 2), como blanco se utilizó DPPH ($6 \times 10^{-5} \text{ M}$).

$$\% \text{ DPPH}_{\text{Inhibido}} = \frac{(\text{Abs}_{\text{blanco}} - \text{Abs}_{\text{muestra}}) \times 100}{\text{Abs}_{\text{blanco}}} \quad (2)$$

2.10. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico se consideró como tratamientos a cada uno de los diferentes tipos de aguamiel. El tamaño de la unidad experimental fue 250 mL. Los resultados son expresados como la media $\pm$ desviación estándar, correspondiendo al promedio de cinco repeticiones (cada una determinada por triplicado).

Análisis univariado

Los resultados de la caracterización de los diferentes tipos de aguamiel se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) de acuerdo con un diseño completamente al azar con nueve tratamientos (diferente especie, cultivar y origen) y comparación de medias de tratamientos (Tukey, $p \leq 0.05$). La relación entre las características físico-químicas, nutricionales y nutracéuticas del aguamiel fueron determinadas por el coeficiente de correlación de Pearson, mediante el programa SAS (Statistical Analysis System 9.0 for Windows).

Análisis multivariado

Se realizó un análisis de correlación canónica con el fin de cuantificar la asociación entre grupos de variables (Anderson, 2003), utilizando el programa Statistical Analysis System versión 9. Las variables respuestas se separaron en dos grupos: variables nutricionales (independientes) y nutracéuticas (dependientes). El primer grupo incluyó al contenido de K, Mg, Fe, Ca, proteína y azúcares totales, componentes más importantes del aguamiel. Mientras que el segundo grupo estuvo conformado por el contenido de flavonoides, fenoles totales, vitamina C y actividad antioxidante.

Se realizó un análisis de componentes principales con el fin de reducir la dimensionalidad del conjunto de datos (Jolliffe, 2005), agrupando a las muestras de aguamiel por características, lo cual se realizó con apoyo del programa The Unscrambler X 10.3 (Camo Process AS, Oslo, Norway).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Parámetros de color

El análisis estadístico mostró diferencias significativas en los atributos de color entre el aguamiel de los diferentes cultivares, especies y origen (Cuadro 6). En cuanto a la luminosidad (L^*), que indica brillantez de color, las muestras de aguamiel presentaron valores menores de 25 %, encontrándose dos grupos: aguamiel de color más claro ($12.5 \% < L^* < 25 \%$) (*manso*, *xamini*, *carrizo*, *cimarrón* y *penca ancha*) y aguamiel más oscuro ($L^* < 12.5\%$), obtenido de los cultivares *cenizo* y *cerro*.

Los valores de Hue, que están asociados con la percepción de color, fueron menores a 80° , observándose dos grupos: aguamiel color amarillo (cultivares *manso*, *cimarrón* y *carrizo*) y aguamiel color amarillo-rojizo (*xamini*, *penca ancha*, *cenizo* y *cerro*); sin embargo, todas las muestras de aguamiel presentaron bajos valores de croma, lo que indica poca pureza de color, es decir, que el color está más cerca del gris (Figura 9).

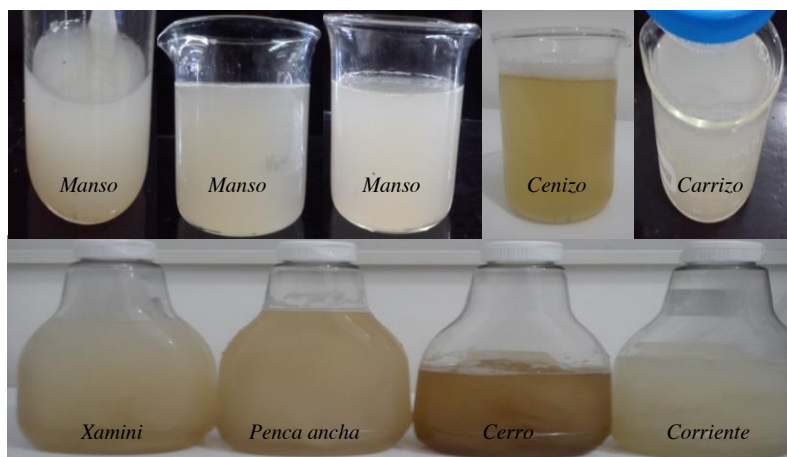


Figura 9. Aguamiel obtenido de *A. salmiana* (cultivares *xamini*, *cerro*, *cimarrón*, *penca ancha* y *manso*) y *A. mapisaga* (cultivares *carrizo* y *cenizo*).

Cuadro 6. Atributos de color en aguamiel de *A. salmiana* (cultivares *xamini*, *cerro*, *cimarrón*, *penca ancha* y *manso*) y *A. mapisaga* (cultivares *carrizo* y *cenizo*), colectado en diferentes localidades del Estado de México e Hidalgo.

Especie	Cultivar*	Luminosidad (%)	Ángulo de tono (°hue)	Índice de saturación (Croma)
<i>A. salmiana</i>	Xamini ¹	20.22 ± 0.17 bcd	69.97 ± 5.31 abc	1.97 ± 0.46 cd
<i>A. salmiana</i>	Cerro ¹	12.04 ± 0.17 f	53.49 ± 4.35 d	1.12 ± 0.14 e
<i>A. salmiana</i>	Cimarrón ¹	18.63 ± 0.17 de	74.44 ± 1.67 ab	2.64 ± 0.04 bc
<i>A. salmiana</i>	Penca ancha ¹	16.94 ± 0.07 e	61.10 ± 3.98 cd	1.07 ± 0.04 e
<i>A. salmiana</i>	Manso ²	21.85 ± 0.04 ab	79.90 ± 0.58 a	4.66 ± 0.06 a
<i>A. salmiana</i>	Manso ³	19.46 ± 0.31 cd	74.76 ± 3.05 ab	2.31 ± 0.16 bc
<i>A. salmiana</i>	Manso ⁵	23.04 ± 0.50 a	78.02 ± 0.99 a	4.00 ± 0.27 a
<i>A. mapisaga</i>	Cenizo ⁴	11.83 ± 0.52 f	65.15 ± 7.49 bc	1.15 ± 0.20 de
<i>A. mapisaga</i>	Carrizo ⁶	20.95 ± 2.28 bc	76.12 ± 5.27 a	2.93 ± 1.00 b
	DHS [§]	1.9316	10.159	0.8168

Los valores reportados son la media de 5 repeticiones ± desviación estándar. [§]DSH: Diferencia significativa honesta (Tukey, 0.05). Medias con la misma letra, en una misma columna, son estadísticamente iguales.

*Aguamiel recolectado en: ¹Durango Daboxtha, El Cardonal, Hgo.; ²San Marcos, Otumba, Méx.; ³Santa Ma. Actipac, Axapusco, Méx.; ⁴San Isidro del Progreso, Teotihuacan, Méx.; ⁵Santiago Zacualuca, Teotihuacan, Méx.; ⁶Tequexquahuac, Texcoco, Méx.

La luminosidad y hue presentaron una correlación negativa significativa con el pH (-0.719 y -0.780, respectivamente), lo que indicó que las muestras más oscuras y de tonalidad amarillo-rojizo fueron de pH alcalino, correspondiendo al aguamiel de maguey *cenizo*, *xamini*, *penca ancha* y *cerro* (Cuadro 7).

3.2. Propiedades físico-químicas

Existieron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en las características físico-químicas (pH, SST, ARD, AT y sacarosa) del aguamiel entre los diferentes cultivares, especies y origen (Cuadro 7). El aguamiel del cultivar *cenizo* fue estadísticamente superior a los otros cultivares en el contenido de sólidos solubles totales y concentración de azúcares;

sin embargo, el 93.45 % de sus azúcares totales fue sacarosa, lo cual puede deberse a haber realizado el capado del maguey cuando aún éste no había madurado. En contraste, el aguamiel obtenido del cultivar *manso* (*Agave salmiana* de Axapusco, Edo. de México) presentó el mayor contenido de azúcares reductores directos (71.1-83.0 g L⁻¹). Las variaciones de SST y AT pudieron deberse a los diferentes tiempos de añejado del maguey (reposo de la planta después de ser “capada” para inducir la producción de aguamiel), práctica agrícola que permite la maduración de las hojas centrales y aumenta el contenido de azúcar de la savia (Loyola-Montemayor, 1956; Lappe-Oliveras *et al.*, 2008).

El pH del aguamiel se encontró en un intervalo de 4.56 a 8.23, la literatura reporta que el aguamiel normalmente presenta un pH alcalino cercano a 8, debido al contenido de fosfatos; sin embargo, el pH del aguamiel puede acidificarse por la acumulación de ácidos orgánicos producidos por la flora microbiana que se desarrolla espontáneamente desde que el aguamiel se encuentra en el cajete del maguey (Sánchez-Marroquín y Hope, 1953).

El pH mostró correlación negativa con el contenido de azúcares reductores directos (-0.607) y correlación positiva con el contenido de sacarosa (0.6379), debido a que el pH es una condición que favorece la hidrólisis de sacarosa. La sacarosa es un disacárido de glucosa y fructosa, estable en medio alcalino, que por medio de una reacción de hidrólisis se descompone en estas sustancias, para obtener como producto el azúcar invertido; sin embargo, un pH ácido es el óptimo para la hidrólisis de sacarosa y obtener como producto el azúcar invertido (Ávila Núñez *et al.*, 2012; Zamora Leitón *et al.*, 2011).

Cuadro 7. Características físico-químicas del aguamiel de *A. salmiana* (cultivares *xamini*, *cerro*, *cimarrón*, *penca ancha* y *manso*) y *A. mapisaga* (cultivares *carrizo* y *cenizo*).

Cultivar*	pH	Sólidos solubles totales (°Brix)	Azúcares reductores directos (g L ⁻¹)	Azúcares totales (g L ⁻¹)	Sacarosa (g L ⁻¹)
Xamini ¹	7.45 ± 0.38 ab	11.06 ± 0.63 bcde	22.036 ± 3.30 cd	96.594 ± 13.90 bcd	70.83 ± 16.18 c
Cerro ¹	6.91 ± 0.01 b	9.65 ± 0.17 de	14.313 ± 0.18 ef	96.220 ± 5.53 bcd	77.81 ± 5.42 bc
Cimarrón ¹	5.08 ± 0.01 cd	12.60 ± 0.19 b	15.503 ± 0.17 def	119.658 ± 10.03 b	98.95 ± 9.48 b
Penca ancha ¹	7.09 ± 0.01 b	11.56 ± 0.79 bcd	8.240 ± 0.22 fg	115.155 ± 17.14 bc	101.57 ± 16.40 b
Manso ²	4.57 ± 0.01 d	12.12 ± 0.10 bc	49.348 ± 3.86 b	93.279 ± 3.86 cd	41.74 ± 6.92 d
Manso ³	5.19 ± 0.01 c	10.32 ± 0.10 cde	76.830 ± 4.19 a	87.365 ± 2.20 d	10.01 ± 3.30 e
Manso ⁵	5.03 ± 0.02 cd	9.40 ± 0.10 e	27.116 ± 0.31 c	84.932 ± 12.34 d	54.93 ± 11.62 cd
Cenizo ⁴	7.77 ± 0.24 a	16.02 ± 1.23 a	2.668 ± 0.23 g	153.724 ± 9.09 a	143.50 ± 8.68 a
Carrizo ⁶	5.24 ± 0.50 c	11.19 ± 2.15 bcde	20.814 ± 6.58 cde	102.520 ± 6.80 bcd	77.62 ± 8.41 bc
DHS [§]	0.5531	2.0545	7.419	24.145	25.499

Los valores reportados son la media de 5 repeticiones ± desviación estándar. [§]DSH: Diferencia significativa honesta (Tukey, 0.05). Medias con la misma letra, en una misma columna, son estadísticamente iguales.

*Aguamiel recolectado en: ¹Durango Daboxtha, El Cardonal, Hgo.; ²San Marcos, Otumba, Méx.; ³Santa Ma. Actipac, Axapusco, Méx.; ⁴San Isidro del Progreso, Teotihuacan, Méx.; ⁵Santiago Zacualuca, Teotihuacan, Méx.; ⁶Tequexquinahuac, Texcoco, Méx.

3.3. Análisis proximal

Diversos estudios describen la composición proximal del aguamiel; sin embargo, existen pocos trabajos que señalan los contenidos de humedad, proteína, cenizas y carbohidratos en el aguamiel obtenido de los diferentes cultivares de las especies de agave pulquero, pese a la diversidad de agaves en México. El contenido proximal del aguamiel obtenido de dos especies de agave y diferentes cultivares se muestra en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Composición proximal del aguamiel de *A. salmiana* (cultivares *xamini*, *cerro*, *cimarrón*, *penca ancha* y *manso*) y *A. mapisaga* (cultivares *carrizo* y *cenizo*), colectado en diferentes localidades del Estado de México e Hidalgo.

Cultivar*	Humedad (%)	Proteína (%)	Cenizas (%)	Carbohidratos (%)	Valor energético (Kcal ·100 mL ⁻¹)
Xamini ¹	87.05 ± 0.62 b	0.76 ± 0.06 b	0.67 ± 0.21 ab	11.82 ± 0.81 b	44.95 ± 2.90 b
Cerro ¹	90.80 ± 0.91 a	1.20 ± 0.10 a	0.93 ± 0.11 a	7.08 ± 0.83 c	30.07 ± 3.27 c
Cimarrón ¹	87.32 ± 0.57 b	0.84 ± 0.07 b	0.64 ± 0.14 ab	11.12 ± 0.51 b	44.03 ± 1.80 b
Penca ancha ¹	88.52 ± 0.17 ab	0.61 ± 0.05 b	0.41 ± 0.26 b	10.47 ± 0.33 b	40.57 ± 1.11 bc
Manso ²	87.19 ± 1.70 b	0.75 ± 0.07 b	0.96 ± 0.14 a	11.11 ± 1.65 b	43.38 ± 6.20 b
Manso ³	87.42 ± 0.12 b	0.77 ± 0.04 b	0.78 ± 0.18 ab	11.03 ± 0.28 b	43.18 ± 0.90 b
Manso ⁵	89.08 ± 0.57 ab	0.82 ± 0.06 b	1.06 ± 0.31 a	9.04 ± 0.48 bc	36.02 ± 1.82 bc
Cenizo ⁴	79.43 ± 1.90 c	0.85 ± 0.06 b	0.67 ± 0.15 ab	19.05 ± 2.02 a	72.97 ± 7.38 a
Carrizo ⁶	89.17 ± 2.42 ab	0.77 ± 0.26 b	0.98 ± 0.28 a	9.08 ± 2.50 bc	36.02 ± 8.98 bc
DSH [§]	2.9821	0.2568	0.4928	3.0705	11.148

Los valores reportados son la media de 5 repeticiones ± desviación estándar. [§]DSH: Diferencia significativa honesta (Tukey, 0.05). Medias con la misma letra, en una misma columna, son estadísticamente iguales.

*Aguamiel recolectado en: ¹Durango Dabothia, El Cardonal, Hgo.; ²San Marcos, Otumba, Méx.; ³Santa Ma. Actipac, Axapusco, Méx.; ⁴San Isidro del Progreso, Teotihuacan, Méx.; ⁵Santiago Zacualuca, Teotihuacan, Méx.; ⁶Tequexquahuac, Texcoco, Méx.

El contenido de humedad fue estadísticamente diferente entre las muestras de aguamiel estudiadas, con los valores menores para el aguamiel del cultivar *cenizo* (75.84 – 81.22 %) y los mayores en el aguamiel del cultivar *cerro* (90.22 – 92.62 %). Algunos autores reportan que el contenido promedio de humedad del aguamiel varia entre 85 % y 88 % (Silos-Espino *et al.*, 2011; Flores Morales *et al.*, 2007), valores similares a lo encontrado en el presente estudio para el aguamiel de los otros cultivares.

Los carbohidratos representan el segundo componente más importante del aguamiel, presentando un contenido promedio de $11.06 \pm 3.4 \%$, de los cuales el 95.3 % fueron azúcares y el resto podrían ser carbohidratos complejos y/o fibra, pues se sabe que el aguamiel es fuente de fructooligosacáridos e inulina (Ortiz-Basurto *et al.*, 2008). El aguamiel del cultivar *cerro* presentó los valores más bajos de contenido de carbohidratos, por lo cual se podría considerar de menor calidad (bajo contenido de azúcares) para la elaboración de pulque.

Los valores de proteína encontrados en el aguamiel de los diferentes cultivares y especies analizadas ($8.1 \pm 1.4 \text{ g L}^{-1}$) superaron a lo reportado en aguamiel de *A. salmiana* (6.9 g L^{-1}) (Silos-Espino *et al.*, 2011) y *A. mapisaga* (3.5 g L^{-1}) (Ortiz-Basurto *et al.*, 2008). El consumo de un litro de aguamiel de los cultivares estudiados puede cubrir entre el 23 y 62 % de la cantidad diaria de proteínas recomendada en infantes de 1-13 años ($13 \text{ a } 34 \text{ g día}^{-1}$) (Brown, 2011), lo que sugiere que esta bebida podría ser una alternativa de consumo en aquellos lugares del país donde el agua y el consumo de carne son limitados. Los alimentos son fuente de proteína de diferente calidad, la cual depende de varios factores, uno de ellos es el perfil de aminoácidos esenciales; al respecto, Tovar-Robles *et al.* (2011) señalan que el aguamiel es fuente de todos los aminoácidos esenciales a excepción de metionina.

3.4. Contenido de minerales

Otros componentes nutritivos del aguamiel son los elementos minerales, que están implicados en varias funciones vitales del cuerpo humano. El Cuadro 9 muestra el

contenido de siete minerales en aguamiel. Los resultados mostraron que el aguamiel aparte de ser natural, es una bebida rica en Cu, Fe y K.

El mineral predominante en el aguamiel fue el potasio, con un contenido promedio ($1829.78 \pm 576.26 \text{ mg L}^{-1}$) equivalente al 51 % del potasio presente en plátano y hasta del 78 % en muestras de aguamiel obtenidas de *A. mapisaga* cultivar *cenizo*.

Actualmente, la carencia nutricional más generalizada en todo el mundo y la principal causa de anemia es por la falta de hierro (Ruíz González *et al.*, 2002). Por lo cual, es importante destacar el contenido de este elemento en el aguamiel de las especies y cultivares estudiados ($19.17 \pm 6.13 \text{ mg L}^{-1}$). La ingesta de un litro de esta bebida podría contribuir en una mujer embarazada a obtener hasta el 70 % de los requerimientos diarios de este mineral (27 mg día^{-1}) (Brown, 2011). El hierro presente en el aguamiel es “no hemínico”, dado su origen vegetal; la absorción de este tipo de Fe se favorece por la presencia de vitamina C (Sharma, 2003; Binagui J. *et al.*, 2008), siendo el aguamiel buena fuente de este compuesto antioxidante (Figura 12).

El Na, Mg y Zn se encontraron en niveles de 164.56 ± 28.97 , 114.02 ± 41.73 y $0.89 \pm 0.40 \text{ mg L}^{-1}$, respectivamente. El contenido de sodio fue estadísticamente igual ($p \leq 0.05$) entre todas las muestras estudiadas. Cabe señalar que las diferencias encontradas en las concentraciones de minerales en el aguamiel estudiado se pueden atribuir al origen botánico, características del suelo y agronómicas (Pohl, 2009; Santos-Zea *et al.*, 2012). Con base en los resultados, el consumo de aguamiel representa una alternativa económica de ingesta de algunos requerimientos mínimos de minerales para personas de zonas rurales marginadas del país.

Cuadro 9. Composición mineral del aguamiel de *A. salmiana* (cultivares *xamini*, *cerro*, *cimarrón*, *penca ancha* y *manso*) y *A. mapisaga* (cultivares *carrizo* y *cenizo*), colectado en diferentes localidades del Estado de México e Hidalgo.

Cultivar*	Minerales (mg L ⁻¹)						
	Cu	Zn	Fe	Mg	K	Ca	Na
Xamini ¹	4.33 ± 1.79 cd	0.59 ± 0.23 bc	25.60 ± 0.33 a	93.86 ± 28.51 bc	1650.97 ± 437.09 bc	154.68 ± 61.70 bc	161.19 ± 26.44 a
Cerro ¹	1.85 ± 0.17 d	0.87 ± 0.40 bc	25.91 ± 0.58 a	127.62 ± 32.29 abc	1944.04 ± 442.90 bc	409.97 ± 94.43 a	162.81 ± 6.40 a
Cimarrón ¹	4.73 ± 1.37 bcd	0.85 ± 0.06 bc	20.05 ± 0.03 cd	88.03 ± 4.08 bc	1442.29 ± 55.16 c	199.11 ± 26.49 b	140.55 ± 36.64 a
Penca ancha ¹	6.22 ± 1.47 abc	1.11 ± 0.35 ab	11.85 ± 0.65 e	65.13 ± 5.06 c	1499.68 ± 40.82 bc	123.75 ± 7.59 bc	155.49 ± 13.88 a
Manso ²	8.55 ± 0.96 a	1.53 ± 0.12 a	19.36 ± 1.07 cd	167.95 ± 2.69 a	2300.27 ± 183.89 ab	204.06 ± 13.60 b	170.46 ± 12.86 a
Manso ³	2.66 ± 0.48 cd	0.43 ± 0.15 c	18.34 ± 0.57 d	138.46 ± 7.08 ab	1993.34 ± 17.71 abc	70.22 ± 5.71 c	167.56 ± 43.66 a
Manso ⁵	3.70 ± 1.38 cd	0.68 ± 0.27 bc	21.71 ± 2.31 bc	112.46 ± 14.66 abc	1533.15 ± 66.76 bc	111.31 ± 51.11 bc	160.62 ± 37.51 a
Cenizo ⁴	8.21 ± 2.87 ab	0.95 ± 0.40 abc	23.17 ± 0.71 ab	148.09 ± 64.70 ab	2813.39 ± 798.17 a	99.57 ± 18.62 bc	186.20 ± 16.26 a
Carrizo ⁶	5.83 ± 2.18 abc	0.96 ± 0.13 abc	6.53 ± 2.54 f	84.59 ± 11.21 bc	1290.86 ± 151.44 c	64.66 ± 9.30 c	176.19 ± 14.10 a
DHS [§]	3.7458	0.6241	2.9359	64.449	830.39	104.53	64.875

Los valores reportados son la media de 5 repeticiones ± desviación estándar. [§]DHS: Diferencia significativa honesta (Tukey, 0.05). Medias con la misma letra, en una misma columna, son estadísticamente iguales.

*Aguamiel recolectado en: ¹Durango Daboxtha, El Cardonal, Hgo.; ²San Marcos, Otumba, Méx.; ³Santa Ma. Actipac, Axapusco, Méx.; ⁴San Isidro del Progreso, Teotihuacan, Méx.; ⁵Santiago Zacualuca, Teotihuacan, Méx.; ⁶Tequexquahuac, Texcoco, Méx.

3.5. Contenido de fitoquímicos

Compuestos fenólicos

Los fitoquímicos son compuestos bioactivos que se encuentran en los alimentos de origen vegetal, con diversos efectos benéficos para la salud. Los compuestos fenólicos son uno de los mayores grupos de fitoquímicos presentes en las plantas, destacando por sus propiedades antioxidantes y terapéuticas (Chew *et al.*, 2011). Los resultados del contenido de compuestos fenólicos demuestra que el aguamiel es una fuente de este tipo de metabolitos (215 – 500 mg EAG L⁻¹) (Figura 10).

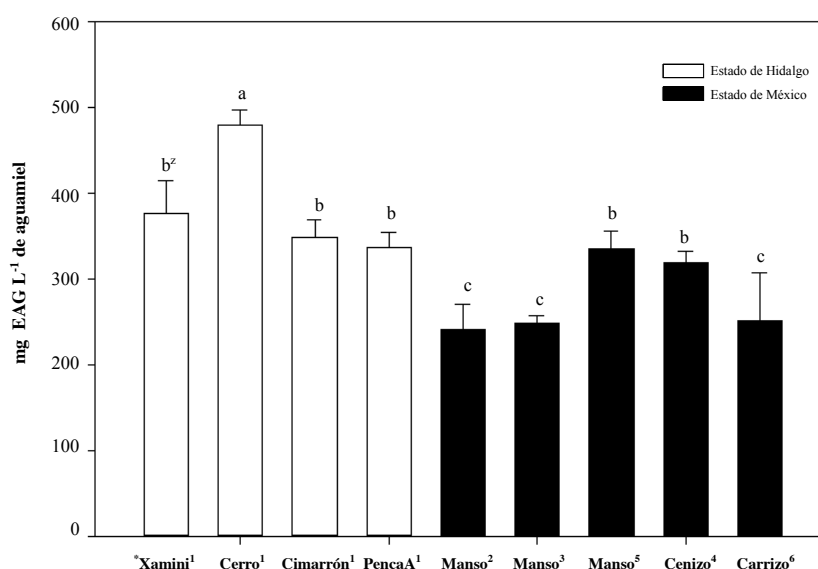


Figura 10. Contenido de compuestos fenólicos en aguamiel de *A. salmiana* (cultivares *xamini*, *cerro*, *cimarrón*, *penca ancha* y *manso*) y *A. mapisaga* (cultivares *carrizo* y *cenizo*).

Los valores reportados son la media de 5 repeticiones $\pm$ desviación estándar. ^zMedias con la misma letra, son estadísticamente iguales (Tukey, 0.05). EAG L⁻¹: equivalentes de ácido gálico por litro.

*Aguamiel recolectado en: ¹Durango Daboxtha, El Cardonal, Hgo.; ²San Marcos, Otumba, Méx.; ³Santa Ma. Actipac, Axapusco, Méx.; ⁴San Isidro del Progreso, Teotihuacan, Méx.; ⁵Santiago Zacualuca, Teotihuacan, Méx.; ⁶Tequexquinahuac, Texcoco, Méx.

El análisis estadístico mostró diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en la concentración de compuestos fenólicos entre las muestras de aguamiel estudiadas. Los valores menores de

fenólicos se encontraron en el aguamiel de *A. salmiana* cultivar *manso* (Otumba y Axapusco, Edo. de México) y *A. mapisaga* cultivar *carrizo* (Texcoco, México). Los valores mayores se observaron en el aguamiel de *Agave salmiana* cultivar *cerro* (Hidalgo) (447.295 - 506.311 mg EAG L⁻¹), el cual fue estadísticamente superior al de los otros cultivares debido a que presentó aproximadamente el doble de compuestos fenólicos en comparación con el aguamiel de maguey manso. Es importante destacar que el cultivar *cerro* también produjo el aguamiel con el mayor contenido de proteína y Ca.

Se encontraron correlaciones significativas entre el contenido de fenoles y algunas variables estudiadas (Cuadro 10). Los compuestos fenólicos mostraron una elevada correlación negativa con el ángulo de tono (*hue*) (-0.77), por lo que la presencia de estos metabolitos fue mayor en las muestras de aguamiel de tonalidad amarillo-rojizo. Tal condición fue causada posiblemente por la oxidación de este tipo de metabolitos, pues los fenoles tienen tendencia a autooxidarse y formar quinonas, responsables del color amarillo-rojizo (Rappoport, 2003; Spiker *et al.*, 1992); oxidación catalizada por la enzima polifenoloxidasas, cuyo pH óptimo es entre 6.7 y 8 (Saeidian, 2012). Las muestras de aguamiel de mayor contenido de compuestos fenólicos fueron de menor *hue* y pH alcalino.

También es importante señalar la correlación de los fenólicos con el contenido de calcio (0.759), observándose que el aguamiel de mayor contenido de calcio fue de alto contenido de fenoles; posiblemente debido a que este mineral estimula la síntesis de fenoles al incrementar la actividad enzimática (fenilalanina-amonioliasa) (Ngadze *et al.*, 2014). El aguamiel obtenido de *A. salmiana* cultivar *cerro* fue el de más alto contenido de calcio y fenoles, ubicándose en el mismo lugar que los cultivares *xamini*, *cimarrón* y

penca ancha, por lo que se supone que estas diferencias se debe a factores genéticos; pues *A. salmiana* presenta gran variabilidad genética (Mora-López *et al.*, 2011).

Otro aspecto importante fue la correlación de los compuestos fenólicos con el contenido de proteína. Lo anterior debido a que algunos fenoles tienen afinidad por las proteínas, al formar puentes de hidrógeno con los grupos carboxilo de las proteínas (Mulaudzi *et al.*, 2012). En el presente estudio se observó una correlación significativa y positiva entre los compuestos fenólicos y el contenido de proteína del aguamiel (Cuadro 11); sin embargo, se debe profundizar en esta relación debido a que algunos autores señalan que es insuficiente la información sobre los mecanismos y las consecuencias de la interacción fenol-proteína, encontrándose resultados contrastantes referentes al efecto de esta interacción sobre la capacidad antioxidante y la biodisponibilidad de los compuestos fenólicos (Ozidal *et al.*, 2013).

El aguamiel obtenido de *A. salmiana* cultivar *cerro* fue de tonalidad amarillo-rojizo y de mayor contenido de calcio, proteína y fenoles. Esto es un resultado importante, pues el maguey de cerro es poco cultivado y explotado por los productores debido a que consideran que su aguamiel es de baja calidad (poco contenido de azúcares) y por su color oscuro.

Flavonoides

Los flavonoides son un grupo amplio e importante dentro de los compuestos fenólicos (Lee *et al.*, 2004). En la Figura 11 se observa el contenido de flavonoides en aguamiel, presentando un porcentaje mínimo de este tipo de metabolitos (0.110- 6.692 mg EQ L⁻¹).

Ahumada-Santosa *et al.* (2013) señalan que varias especies de agave solo contienen trazas de flavonoides.

El análisis estadístico mostró diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en la concentración de flavonoides entre los nueve tipos de aguamiel estudiados. Los valores más altos de este tipo de metabolitos se encontraron en el aguamiel de *A. salmiana* cultivar *manso* (Axapusco, Estado de México), el cual fue estadísticamente diferente al resto de muestras y presentó más del triple de contenido de flavonoides en comparación con el aguamiel del Estado de Hidalgo.

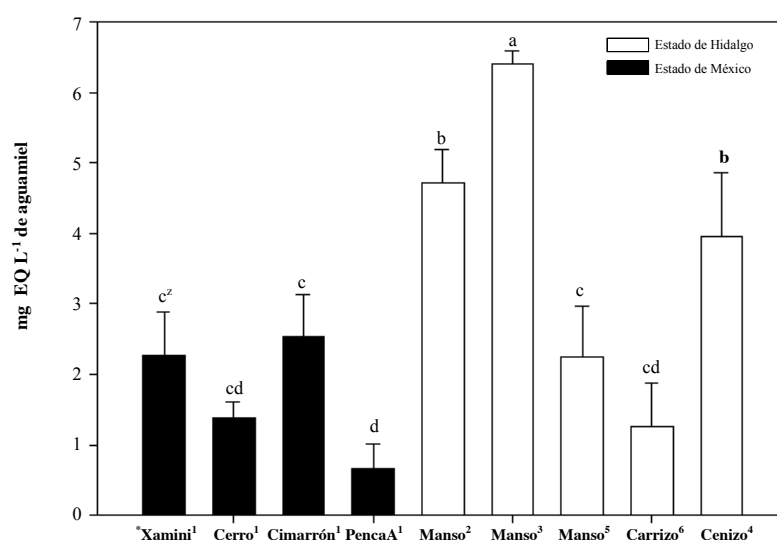


Figura 11. Contenido de flavonoides en aguamiel de *Agave salmiana* (cultivares *xamini*, *cerro*, *cimarrón*, *penca ancha* y *manso*) y *Agave mapisaga* (cultivares *carrizo* y *cenizo*), colectado en el Estado de México e Hidalgo.

Los valores reportados son la media de 5 repeticiones $\pm$ desviación estándar. ²Medias con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey, 0.05). EQ L⁻¹: equivalentes de quercetina por litro.

¹Aguamiel recolectado en: ¹Durango Daboxtha, El Cardonal, Hgo.; ²San Marcos, Otumba, Méx.; ³Santa Ma. Actipac, Axapusco, Méx.; ⁴San Isidro del Progreso, Teotihuacan, Méx.; ⁵Santiago Zacualuca, Teotihuacan, Méx.; ⁶Tequexquihuac, Texcoco, Méx.

La concentración encontrada de flavonoides en todas las muestras de aguamiel fue menor a la de compuestos fenólicos, lo cual podría deberse a la presencia de procianidinas (taninos condensados) y ácidos fenólicos como sucede en algunos frutos

(Cui *et al.*, 2006). Algunos autores han reportado evidencias cualitativas de la presencia de taninos en las hojas de algunas especies de agave (Ahumada-Santosa *et al.*, 2013; Ade-Ajayi *et al.*, 2001) y abundante presencia de ácidos fenólicos en el género agave (Almaraz-Abarca *et al.*, 2013 a y b); es importante señalar que el contenido de este tipo de compuestos no ha sido estudiado en especies de agave pulquero y sus productos derivados de las mismas, como es el aguamiel.

Vitamina C (ácido ascórbico)

El contenido de vitamina C en las muestras de aguamiel estudiadas varió entre 132.6 y 619.4 mg EAA L⁻¹ de aguamiel (Figura 12), lo cual es muy cercano a lo encontrado en el jugo de limón (486.1 mg EAA L⁻¹) (Alvarez *et al.*, 2005), mandarina y naranja (121.6 a 368.3, 325.6 a 727.2 mg EAA L⁻¹, respectivamente) (Del Caro *et al.*, 2004).

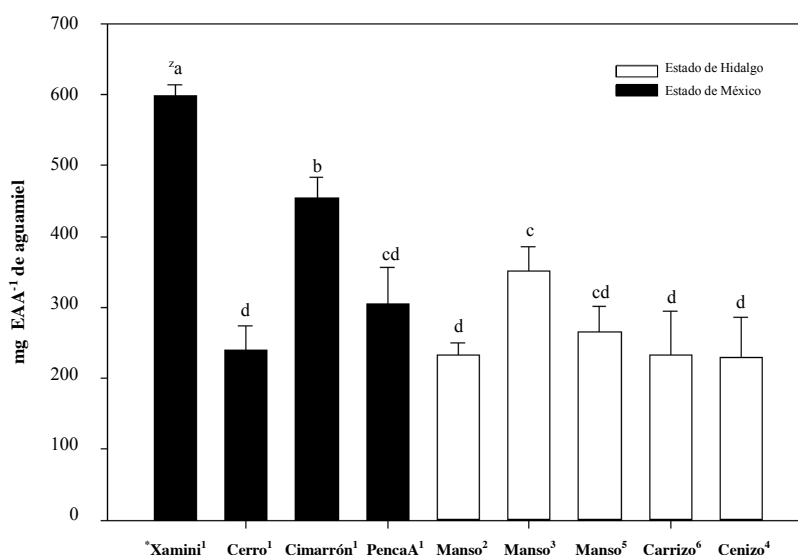


Figura 12. Contenido de vitamina C en aguamiel de *A. salmiana* (cultivares *xamini*, *cerro*, *cimarrón*, *penca ancha* y *manso*) y *A. mapisaga* (cultivares *carrizo* y *cenizo*), colectado en el Estado de México e Hidalgo.

Los valores reportados son la media de 5 repeticiones $\pm$ desviación estándar. ^zMedias con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey, 0.05). EAA L⁻¹: equivalentes de ácido ascórbico por litro.

*Aguamiel recolectado en: ¹Durango Dabothia, El Cardonal, Hgo.; ²San Marcos, Otumba, Méx.; ³Santa Ma. Actipac, Axapusco, Méx.; ⁴San Isidro del Progreso, Teotihuacan, Méx.; ⁵Santiago Zacualuca, Teotihuacan, Méx.; ⁶Tequexquihuac, Texcoco, Méx.

Existieron diferencias significativas en el contenido de vitamina C del aguamiel de las diferentes especies, cultivares y origen. El aguamiel obtenido de *A. salmiana* cultivar *xamini* presentó la concentración estadísticamente superior de este metabolito (598 a 620 mg EAA L⁻¹) (Figura 11). En el presente estudio, las concentraciones de ácido ascórbico de las muestras de aguamiel fueron superiores a lo descrito por Tovar-Robles *et al.* (2011), 140.4 mg EAA L⁻¹ de aguamiel de *A. Salmiana* (origen Aguascalientes), y sólo el aguamiel obtenido de *A. mapisaga* presentó concentraciones similares.

La vitamina C se degrada fácilmente por acción de la luz, actividad de agua, presencia de oxígeno y alta temperatura (Villota y Hawkes, 1992); sin embargo, se descarta la posible degradación de este metabolito por esas vías, debido a que todas las muestras se trasladaron en las mismas condiciones y se procesaron simultáneamente. Por lo tanto, las diferencias estadísticas encontradas entre los contenidos de vitamina C se podrían deber a factores genéticos; pues hay evidencia del rol de algunos genes en la biosíntesis de vitamina C en plantas (Conklin *et al.*, 1999).

De manera general, se puede afirmar que las variaciones observadas en el contenido de fitoquímicos (fenoles, flavonoides y vitamina C) del aguamiel, pueden deberse a factores genéticos y edafoclimáticos. Otro factor que pudo influir en el contenido de fitoquímicos fue el añejado del maguey, periodo de tiempo que permite la maduración de las hojas centrales y aumenta el contenido de azúcar de la savia (aguamiel); sin embargo, se desconoce cómo este periodo afecta a la calidad nutracéutica del aguamiel.

3.6. Actividad antioxidante

La actividad antioxidante que presenta un metabolito es aquella que se observa cuando éste neutraliza cualquier radical libre (Frei, 1994). En el Cuadro 10 se presenta la actividad antioxidante del aguamiel, observándose diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre el aguamiel de las diferentes especies y cultivares, destacando las muestras recolectadas en el Estado Hidalgo por su mayor capacidad antioxidante; lo cual pudo estar influenciado por las condiciones edafoclimáticas, ya que este aguamiel fue recolectado en magueyales del Valle de Mezquital Hidalgo, zona semiárida con clima semiseco (INEGI, 2011), cuyas condiciones pudieron favorecer la síntesis de fitoquímicos con actividad antioxidante. Se sabe que la síntesis de fitoquímicos representa una importante estrategia de las plantas para contrarrestar los factores de estrés (sequía, condiciones climáticas adversas, patógenos, etc) (Iriti y Faoro, 2006), lo cual pudo influir en el contenido fitoquímico y actividad antioxidante de las diferentes muestras de aguamiel.

El aguamiel de maguey de cerro (*A. salmiana*, Hidalgo) presentó la actividad antioxidante estadísticamente superior, mostrando el doble de porcentaje de inhibición de DPPH (82.79 a 83.57 %) en comparación con las otras muestras de aguamiel recolectadas en Hidalgo y más del triple que el aguamiel del Estado de México (Cuadro 10). El aguamiel de cerro presentó menor contenido de vitamina C, pero mayor contenido de compuestos fenólicos; por lo que su mayor actividad antioxidante puede estar asociada a su elevada concentración de fenoles.

Cuadro 10. Porcentaje de inhibición de DPPH y actividad antioxidante en aguamiel de *A. salmiana* (cultivares *xamini*, *cerro*, *cimarrón*, *penca ancha* y *manso*) y *A. mapisaga* (cultivares *carrizo* y *cenizo*), colectado en el Estado de México e Hidalgo.

Cultivar*	% DPPH Inhibido	Actividad antioxidante ($\mu\text{M ET L}^{-1}$)
Xamini ¹	38.378 $\pm$ 8.18 b	1208.314 $\pm$ 249.25 b
Cerro ¹	83.161 $\pm$ 0.25 a	2576.285 $\pm$ 7.77 a
Cimarrón ¹	37.840 $\pm$ 0.56 b	1191.801 $\pm$ 17.21 b
Penca ancha ¹	31.063 $\pm$ 0.21 bc	984.798 $\pm$ 6.41 bc
Manso ²	25.517 $\pm$ 0.59 cd	815.306 $\pm$ 17.98 cd
Manso ³	27.958 $\pm$ 1.00 c	892.327 $\pm$ 32.00 c
Manso ⁵	29.692 $\pm$ 2.43 bc	942.879 $\pm$ 74.34 bc
Cenizo ⁶	23.651 $\pm$ 3.45 cd	758.330 $\pm$ 105.26 cd
Carrizo ⁴	18.890 $\pm$ 6.26 d	612.885 $\pm$ 191.08 cd
DSH [§]	8.8183	269.47

Los valores reportados son la media de 5 repeticiones $\pm$ desviación estándar. [§]DSH: Diferencia significativa honesta (Tukey, 0.05).

^zMedias con la misma letra, en una misma columna, son estadísticamente iguales. DPPH: radical libre 1,1- difenilpicrilhidrazilo. $\mu\text{M ET L}^{-1}$: micromoles de equivalentes de Trolox por litro.

*Aguamiel recolectado en: ¹Durango Dabothia, El Cardonal, Hgo.; ²San Marcos, Otumba, Méx.; ³Santa Ma. Actipac, Axapusco, Méx.; ⁴San Isidro del Progreso, Teotihuacan, Méx.; ⁵Santiago Zacualuca, Teotihuacan, Méx.; ⁶Tequexquahuac, Texcoco, Méx.

En general, las muestras de aguamiel presentaron una actividad antioxidante promedio de $1109.21 \pm 560.97 \mu\text{M ET L}^{-1}$, valor similar a lo reportado por Tovar-Robles *et al.* (2011) ($1096.8 \mu\text{M ET L}^{-1}$) quien afirma que el aguamiel presenta de baja a moderada actividad antioxidante (menos del 20 %) en comparación con bebidas comerciales de café y jugo de uva; pero el doble de actividad antioxidante con respecto al pulque y más del triple que el jugo de naranja con nopal. Con base en esos resultados, se podría afirmar que el aguamiel del cultivar *cerro* presentó aproximadamente 41 % de actividad antioxidante en comparación con la bebida comercial de café y más del cuádruple que el pulque.

Análisis de correlación

Para obtener una perspectiva general de la capacidad antioxidante del aguamiel y la relación con sus componentes nutricionales y fitoquímicos, se determinó el coeficiente de correlación de Pearson (Cuadro 11). Se encontró una correlación significativa entre la actividad antioxidante y fenoles, lo que indica que el contenido alto de fenólicos (ácido fenólicos) contribuye principalmente a la actividad antioxidante del aguamiel, en comparación con los otros fitoquímicos.

Cuadro 11. Correlación de Pearson entre la actividad antioxidante y fitoquímicos del los aguamiel.

	Ca	Proteína	Flavonoides	Vitamina C	Fenoles	% DPPH _{Inhibido}	Actividad antioxidante
Hue	-0.5759	-0.5150	0.2581	-0.4153	-0.7719*	-0.7177*	-0.7176*
Ca		0.7909*	-0.1102	0.3446	0.7588*	0.9225*	0.9222*
Proteína			0.0658	0.2617	0.6931*	0.8544*	0.8389*
Flavonoides				-0.0140	-0.4158	-0.1365	-0.1355
Vitamina C					0.5740	0.5452	0.5454
Fenoles						0.8807*	0.8804*
% DPPH_{Inhibido}							1.000*

*Correlación estadísticamente significativa ($p \leq 0.05$).

Otro resultado importante fue la correlación de la actividad antioxidante con el contenido de proteína, lo cual se puede deber a que algunos aminoácidos, como es la prolina, presentan actividad antioxidante (Saxena *et al.*, 2010). Es valioso señalar que en el presente estudio se observó alta correlación entre fenoles, Ca, y proteína, por lo tanto la actividad antioxidante observada en aguamiel podría deberse a efectos sinérgicos de estos metabolitos, como sucede en algunas frutas y verduras (Brat *et al.*, 2007). Investigaciones han demostrado que los compuestos fenólicos presentan sinergismo con las proteínas (Bishov y Henick, 1975) y muchos minerales (donadores de electrones), aumentando la capacidad antioxidante (Sant'Ana *et al.*, 2012).

3.7. Análisis de correlación canónica

Para realizar el análisis de correlación canónica se separaron a las variables respuestas en dos grupos: nutricionales y nutraceuticas. En la Figura 13 se muestra una fracción de la estructura canónica de cada grupo con sus variables originales, observándose que la primera correlación canónica significativa explicó el 72 % de la variabilidad de los datos; las primeras dos correlaciones canónicas explicaron el 87.87 % de la variabilidad. La variable canónica “nutricional” estuvo altamente asociada con proteína y calcio. En la variable “nutracéutica”, el contenido de fenoles totales fue la variable original con mayor influencia.

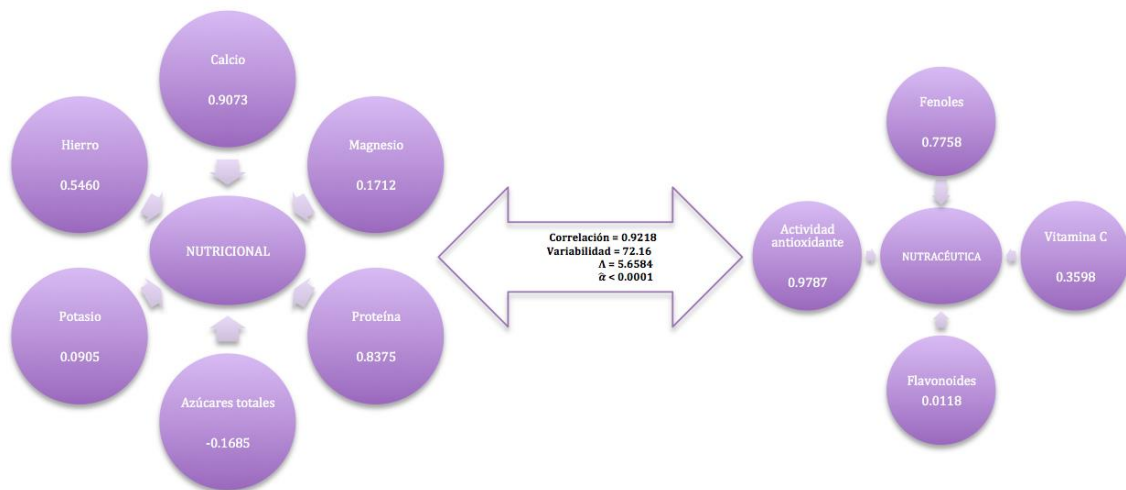


Figura 13. Correlación canónica de la primera variable canónica y la correlación simple con sus respectivas variables originales.

El análisis de redundancia mostró que el primer par de variables canónicas es el mejor predictor del grupo de variables opuestas, aportando la mayor cantidad a la proporción de la varianza: 0.2675 dentro de la variable nutricional y 0.3589 en las variables nutraceuticas.

La variable “nutricional” estuvo altamente asociada con la variable “nutracéutica” (0.92), lo que sugiere que un alto contenido proteína y Ca estará asociado a un mayor contenido de compuestos fenólicos y actividad antioxidante en el aguamiel; corroborándose los resultados obtenidos mediante el análisis univariado (correlación de Pearson). Investigaciones han reportado la participación directa del calcio en la biosíntesis de fenoles, la interacción proteína-fenoles, aminoácidos con actividad antioxidante, algunos minerales como donadores de electrones y las propiedades antioxidantes de los compuestos fenólicos (Ngadze *et al.*, 2014; Mulaudzi *et al.*, 2012; Saxena *et al.*, 2010; Sant’Ana *et al.*, 2012; Yeddes *et al.*, 2013).

3.8. Análisis de componentes principales

Una vez que se estudió el comportamiento individual de cada compuesto del aguamiel, se realizó un análisis de componentes principales (ACP) para agrupar las muestras de aguamiel de acuerdo a sus características físico-químicas, nutricionales y nutracéuticas. En el ACP se excluyeron las variables SST (°Brix), sacarosa, humedad, carbohidratos totales y valor energético, debido a su correlación altamente significativa ($p \leq 0.05$) con los azúcares totales; así como L^* y *croma* por su correlación con *hue*, y la actividad antioxidante, proteína y Ca por su fuerte correlación con fenoles totales.

Los primeros cuatro componentes explicaron el 84.49 % de la variabilidad de los datos. La gráfica de proyecciones del primer (CP1) y segundo componente (CP2) permitió separar en cuatro grupos a las muestras de aguamiel (Figura 14). El CP1 presentó asociación positiva con Hue y azúcares reductores directos (ARD), y asociación negativa con el contenido de fenoles, pH y vitamina C. El CP2 tuvo asociación positiva

con azúcares totales, cobre y potasio, y negativa con ARD. El CP3 se caracterizó por tener una fuerte asociación positiva con Mg (0.503) y negativa con Cu (-0.175). El CP4 mostró una asociación significativa con Zn (0.527) y ARD (-0.348) (datos no reportados).

Las muestras de aguamiel obtenidas de los cultivares *cerro*, *xamini*, *cimarrón* y *penca ancha* (*A. salmiana*), recolectadas en el Estado de Hidalgo, conformaron el Grupo I; que se caracterizó por agrupar muestras de aguamiel de tonalidad amarillo-rojizo (bajo valor de °*hue*), buen contenido de Fe (11.85-25.91 mg L⁻¹), mayor valor nutracéutico y actividad antioxidante. El aguamiel del cultivar *manso* (*A. salmiana*) de Otumba, Estado de México, conformó el Grupo II, el cual se caracterizó por su elevado contenido de azúcares reductores directos.

El grupo III estuvo conformado por el aguamiel de los cultivares *manso* (Teotihuacan y Axapusco, Estado de México) y *carrizo* (*A. mapisaga*, Texcoco, México), muestras de mayor *hue* (tono amarillo) y mayores valores de luminosidad; pero menor contenido de compuestos fitoquímicos y actividad antioxidante. El aguamiel del cultivar *cenizo* de *A. mapisaga* (Teotihuacan, Estado de México) formó el grupo IV, destacando por su mayor contenido de potasio, cobre y mayor concentración de azúcares totales, por lo cual podría ser de alta calidad para la elaboración de pulque; pero menor contenido de ARD, es decir, mayor contenido de sacarosa.

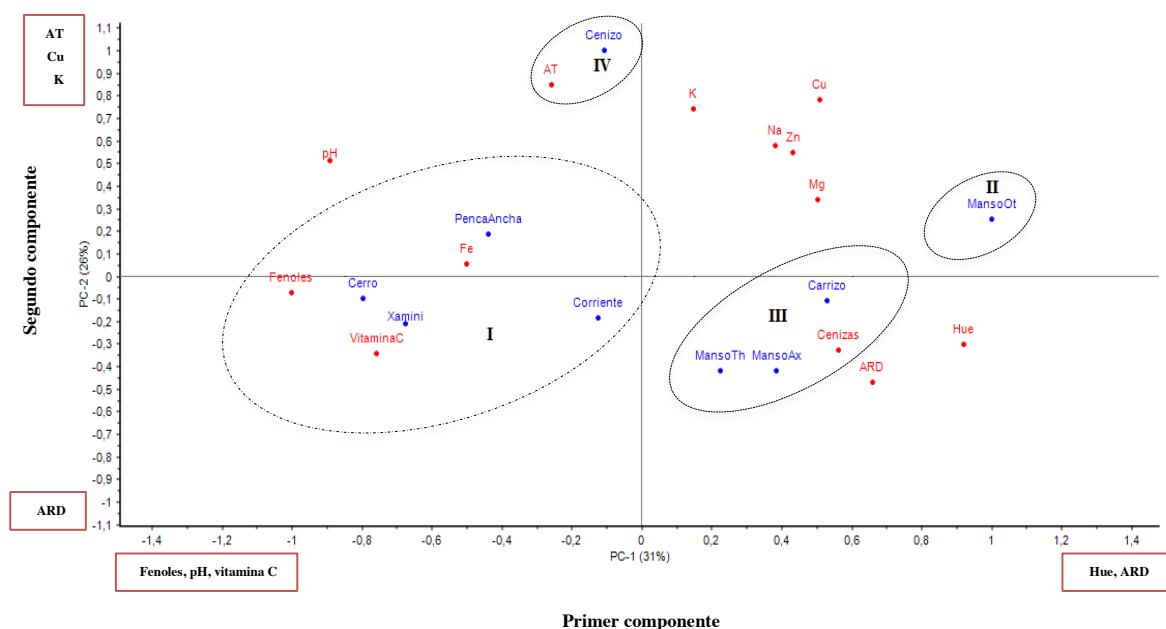


Figura 14. Agrupación de muestras de aguamiel de *A. salmiana* (cultivares *xamini*, *cerro*, *cimarrón* o *corriente*, *penca ancha* y *manso*) y *A. mapisaga* (cultivares *carrizo* y *cenizo*), colectado en el Estado de México e Hidalgo, con base en características físico-químicas, nutricionales y nutracéuticas.

*Aguamiel obtenido del cultivar: Cerro (*A. salmiana*, El Cardonal, Hgo), Xamini (*A. salmiana*, El Cardonal, Hgo), Corriente o cimarrón (*A. salmiana*, El Cardonal, Hgo); PencaAncha (*A. salmiana*, El Cardonal, Hgo); MansoTh (*A. salmiana*, Teotihuacan, Méx.), MansoAx (*A. salmiana*, Axapusco, Méx.), Carrizo (*A. mapisaga*, Texcoco, Méx.), MansoOt (*A. salmiana*, Otumba, Méx.), Cenizo (*A. mapisaga*, Teotihuacan, Méx.).

ARD: azúcares reductores directos, AT: azúcares totales, Hue: ángulo de tono, Cu: cobre, K: potasio, Na: sodio, Zn: zinc, Mg: magnesio, Fe: hierro, pH: potencial de hidrógeno.

En general, las diferencias observadas entre las muestras de aguamiel pueden deberse a factores genéticos, edafoclimáticos y a prácticas de manejo del maguey. Los resultados de esta investigación pueden contribuir a identificar los cultivares con mayor valor nutracéutico y/o nutricional; así como el tipo de uso que se le puede dar al aguamiel (bebida, elaboración de pulque o miel de maguey) con el fin de realizar un aprovechamiento agroindustrial eficiente. Actualmente, el aguamiel es poco consumido y muchas especies y cultivares de maguey pulquero están en peligro de extinción, por lo que esta información podría contribuir a la revalorización del cultivo del maguey y del consumo del aguamiel, pues son parte de la identidad cultural de nuestro país.

4. CONCLUSIONES

El aguamiel es buena fuente de azúcares, Cu, Fe, K, proteínas y compuestos antioxidantes; observándose diferencias estadísticamente ($p \leq 0.05$) significativas en las características físico-químicas, nutricionales y nutracéuticas de las diferentes muestras de aguamiel estudiadas debido a factores edafoclimáticos, genéticos y a prácticas de manejo del maguey.

Las muestras de aguamiel de color más oscuro (tonalidad amarillo-rojizo) presentaron mayor actividad antioxidante, asociada al contenido de compuestos fenólicos y vitamina C. Los compuestos fenólicos contribuyeron en mayor medida a la actividad antioxidante del aguamiel, en comparación con los otros fitoquímicos, debido a un posible efecto sinérgico con proteínas y calcio.

El aguamiel obtenido de *A. salmiana* cultivar *cerro* (Hidalgo) presentó el mayor contenido de proteína, Ca y compuestos fenólicos; así como, la mayor actividad antioxidante: cinco veces más que el aguamiel de *Agave mapisaga* y el doble que las otras muestras obtenidas de *A. salmiana*.

El aguamiel es una bebida subvalorada de buena calidad nutricional y funcional. El aguamiel de cerro presentó el mayor potencial para ser considerado como alimento funcional.

5. LITERATURA CITADA

- Ade-Ajayi, A. F.; Hammuel, C.; Ezeayanaso, C.; Ogabiela, E.E.; Udiba, U.U.; Anyim, B.; Olabanji, O. 2001. Preliminary phytochemical and antimicrobial screening of Agave sisalana Perrine juice (Waste). *Journal of Environmental Chemistry and Ecotoxicology* 3 (7): 180-183.
- Ahumada-Santosa, Y. P., Montes-Avila, J.; Uribe-Beltrán, M.; Díaz-Camacho, S. P., López-Angulo, G.; Vega-Aviña, R.; López-Valenzuela, J.A.; Herediac, J.B.; Delgado-Vargas, F. 2013. Chemical characterization, antioxidant and antibacterial activities of six Agave species from Sinaloa, Mexico. *Industrial Crops and Products* 49: 143-149.
- Almaraz-Abarca, N.; Delgado-Alvarado, E.; Ávila-Reyes, J.; Uribe-Soto, J.; Gonzále-Valdez, L. 2013a. The phenols of the genus Agave (Agavaceae). *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology* 4: 9-16.
- Almaraz-Abarca, N.; González-Elizondo, M. S.; Campos, M.G.; Ávila-Sevilla, Z. E.; Delgado-Alvarado, E.A.; Ávila-Reyes, J. A. 2013b. Variability of the foliar phenol pro-files of the Agave victoriae-reginae complex (Agavaceae). *Botanical Science* 91 (3): 295-306.
- Alvarez, A.; Jorrat, S.; Genta, M. 2005. Caracterización físico-química de jugo de limón de Tucumán. *Revista de Investigaciones Agropecuarias* 34 (2): 49-56.
- Anderson, T. W. 2003. An introduction to multivariate statistical analysis, 3rd ed. Wiley-Interscience. New York, New York, USA. 752 p.
- AOAC (Association of Official Analytical Chemists). 2000. *Methods of Analysis*. 17va. edición. Washington, Estados Unidos de América.
- Arvouet-Grand, A.; Vennat, B.; Pourrat, A.; Legret, P. 1994. Standardisation d'un extrait de propolis et identification des principaux constituants. *Journal of Pharmaceutical Sciences* 49: 462-468.
- Ávila Núñez, R.; Rivas Pérez, B.; Hernández Motzezak, R.; Chirinos, M. 2012. Contenido de azúcares totales, reductores y no reductores en Agave cocui Trelease. *Multiciencias* 12 (2): 129-135.
- Binagui J., D.; Greco, C.; López, L.; Ronayne de Ferrer, P.; Valencia, M. 2008. Biodisponibilidad de hierro en la dieta infantil. *Archivos Argentinos de Pediatría* 106 (5): 387-389.

- Bishov, S.; Henick, A. 1975. Antioxidant effect of proteine hidrolizates in freeze-dried model systems. Synergistic action with a series of phenolic antioxidants. *Journal of Food Science* 40: 345.
- Blake, C.; Cherix, G.; Bourqui, B. 1988. Recent developments in the determination of elements by partial hydrolysis of samples and atomic absorption or atomic emission analysis. *Laboratory News* 58: 5-8.
- Brand-Williams, W.; Culivier, M. E.; Berset, C. 1995. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT-Food Science and Technology* 28: 25-30.
- Brat, P.; Stephane, G.; Bellamy, A.; Du Chaffaut, L.; Scalbert, A.; Mennen, L.; Arnault, N; Amiot, M. J. 2007. Daily polyphenol intake in France from fruitand vegetables. *Journal of Nutrition and Nutritional Epidemiology* 136: 2368-2373.
- Brown, J. E. 2011. *Nutrition: through the life cycle*, 4ª edición. Minnesota, USA: Wadsworth, Cengage Learning. 516 p.
- Burdurlu, H. S.; Koca, N.; Karadeniz, Feryal. 2006. Degradation of vitamin C in citrus juice concentrates during storage. *Journal of Food Engineering* 74: 211–216.
- Chew, Y.L.; Ling Chan, E. W.; Ling Tan, P.; Yan Lim, Y.; Stanslas, J.; Kheng Goh, J. 2011. Assessment of phytochemical content, polyphenolic composition, antioxidant and antibacterial activities of Leguminosae medicinal plants in Peninsular Malaysia. *Complementary and Alternative Medicine* 11: 10.
- Conklin, P. L.; Norris, S. R.; Wheeler, G. L.; Williams, E. H.; Smirnoff, N.; Last, R. L. 1999. Genetic evidence for the role of GDP-mannose in plant ascorbic acid (vitamin C) biosynthesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 96 (7): 4198–4203.
- Cui, N.; Nakamura, K.; Tian, S.; Kayahara, H.; Tian, Y. 2006. Polyphenolic content and physiological activities of Chinese hawthorn extracts. *Bioscience Biotechnology and Biochemistry* 70: 2948-2956.
- CYTED. 1997. *Temas en tecnología de alimentos (Vol. I)*. IPN, México: Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología en Desarrollo.
- Del Caro, A.; Piga, A.; Vacca, V.; Agabbio, M. 2004. Changes of flavonoids, vitamin C and antioxidant capacity in minimally processed citrus segments and juices during storage. *Food Chemistry* 84: 9–105.
- El Sohaimy, S. A. 2012. Functional foods and nutraceuticals-Modern approach to food science. *World Applied Sciences Journal* 20: 691-708.

- Flores Morales, A.; Mora Escobedo, R.; Romero Aguilar, L. 2007. Evaluación físicoquímica del aguamiel de tres variedades de maguey pulquero (*Agave spp*). Tlaxcala, México: Tesis. Instituto Tecnológico del Altiplano de Tlaxcala y Escuela Nacional de Ciencias Biológicas.
- Frei, B. 1994. Natural antioxidants in human health and disease. Reino Unido: Academic Press. 592 p.
- García Mendoza, A. 2011. Agaváceas, flora del Valle de Tehuacán. UNAM, México: Fascículo: 159-169.
- García, E. 1988. Los climas del Valle de México según el sistema de clasificación climática de Köppen modificado por la autora. (C. Colegio de Postgraduados, Ed.) México: Instituto de Geografía de la UNAM.
- Gentry, H. S. 2004. Agaves of continental North America. USA: The University of Arizona Press.
- Hernández R., M.; Sastre Gallego, A. 1999. Tratado de nutrición. Ediciones Díaz de Santos, Madrid, España. 1496 p.
- INEGI. 2005. Mapa de climas. Recuperado el 05 de Agosto de 2014, de INEGI: inegi.gob.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/aee05/info/hgo/mapas.pdf
- INEGI. 2011. Mapa de Climas. Recuperado el 05 de Agosto de 2014, de INEGI: web.archive.org/web/20120603043847/http://mapserver.inegi.org.mx/geografia/espanol/estados/hgo/clim.cfm?c=444&e=!3
- Iriti, M.; Faoro, F. 2006. Grape phytochemicals: a bouquet of old and new nutraceuticals for human health. *Medical Hypotheses* 67 (4): 833–838.
- Jolliffe, I. 2005. Principal component analysis. *Encyclopedia of Statistics in Behavioral Science*. 2352 p.
- Lappe-Oliveras, P.; Moreno-Terrazas, R.; Arrizón-Gaviño, J.; Herrera-Suárez, T., García-Mendoza, A.; Gschaedler-Mathis, A. 2008. Yeasts associated with the production of Mexican alcoholic nondistilled and distilled Agave beverages. *FEMS Yeast Research* 8: 1037–1052.
- Lee, J.; Koo, N.; Min, D. 2004. Reactive oxygen species, aging, and antioxidative nutraceuticals. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 3: 21-33.
- Loyola-Montemayor, E. 1956. La industria del pulque. México: Departamento de Investigaciones Industriales. Banco de México SA.
- McGuire, R. G. 1992. Reporting of objecting color measurements. *HortScience* 27: 1254-1255.

- Mulaudzi, R. B.; Ndhlala, A.R.; Kulkarni, M.G.; Staden, J.V. 2012. Pharmacological medicinal plants used against cough and fever. *Journal of Ethnopharmacology* 143: 185–193.
- Ngadze, E.; Coutinho, T.A.; Icishahayo, D.; E. van der Waals, J. 2014. Effect of calcium soil amendments on phenolic compounds and soft rot resistance in potato tubers. *Crop Protection* 62: 40-45.
- Ortiz-Basurto, R.I.; Pourcelly, G.; Dogo, T.; Williams, P.; Dornier, M.; Belleville, M. P. 2008. Analysis of the main components of the aguamiel produced by the maguey-pulquero (*Agave mapisaga*) throughout the harvest period. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 56: 3682–3687.
- Ozdal, T.; Capanoglu, E.; Altay, F. 2013. A review on protein–phenolic interactions and associated changes. *Food Research International* 51: 954–970.
- Patronato del Maguey. 1980. Jugo concentrado del maguey. México.
- Pohl, P. 2009. Determination of metal content in honey by atomic absorption and emission spectrometries. *Trends in Analytical Chemistry* 28: 117-128.
- Rappoport, Z. 2003. *The Chemistry of Phenols* (Vol. 1). New York: Wiley An Interscience publications.
- Ruíz González, M.; Picó Bergantiños, M. V.; Rosich García, L.; Morales Lamadrid, L. 2002. El factor alimentario en la presencia de la deficiencia del hierro. *Revista Cubana de Medicina General Integral* 18 (1): 46-52.
- Saeidian, S. 2012. Demonstration and Modification of the pH Profile of Polyphenol Oxidase in *Solanum Lycopersicum*. *International Journal of Bioscience, Biochemistry and Bioinformatics* 2 (6): 385-388.
- Sánchez-Marroquín, A.; Hope, P. 1953. Agave juice. Fermentation and chemical composition. Studies of some species. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 1 (3): 246-249.
- Sant’Ana, L.; Sousa, J.; Salgueiro, F.; Affonso, M.C.; Castro, R. 2012. Characterization of monofloral honeys with multivariate analysis of their chemical profile and antioxidant activity. *Journal of Food Science* 71 (1): 135–140.
- Santos-Zea, L.; Leal-Díaz, E.; Cortes-Ceballos, E.; Gutiérrez-Urbe, A. J. 2012. Agave (*Agave* spp.) and its traditional products as a source of bioactive compounds. *Current Bioactive Compounds* 8: 1-14.
- Saxena, S.; Gautam, S.; Sharma, A. 2010. Physical, biochemical and antioxidant properties of some Indian honeys. *Food Chemistry* 118 (2): 391–397.

- Sharma, K. 2003. Improving bioavailability of iron in Indian diets through food-based approaches for the control of iron deficiency anemia. *Food, Nutrition and Agriculture* 32: 51-61.
- Silos-Espino, H.; Tovar-Robles, C. L.; González-Cortés, N.; Méndez-Gallegos, S.; Rossel-Kipping, D. 2011. Estudio integral del maguey (*Agave salmiana*): propagación y valor nutricional. *Revista Salud Pública y Nutrición, Edición especial* (5): 75-82.
- Singleton, V.L.; Rossi, J.A. 1965. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture* 16: 144-158.
- Soydinc, S.; Çelik, A.; Demiryürek, S.; Davutoglu, V.; Tarakctoglu, M.; Aksoy, M. 2007. The relationship between oxidative stress, nitric oxide, and coronary artery disease. *European Journal of General Medicine* 4: 62-66.
- Spiker, J. K.; Crawford, D. L.; Thiel, E. C. 1992. Oxidation of phenolic and non-phenolic substrates by the lignin peroxidase of *Streptomyces viridosporus* T7A. *Applied Microbiology and Biotechnology* 37 (4): 518-523.
- Tovar-Robles, C. L.; Perales-Segovia, C.; Nava Cedillo, A.; Valera-Montero, L. L.; Gómez-Leyva, J.F.; Guevara-Lara, F.; Hernández-Duque, J.L.M.; Silos-Espino, H. 2011. Effect of aguamiel (agave sap) on hematic biometry in rabbits and its antioxidant activity determination. *Italian Journal of Animal Science* 10: 21-24.
- Villota, R.; Hawkes, J. 1992. Reaction kinetics in food systems. In handbook of food engineering. En D. L. Heldman, In handbook of food engineering. New York: Marcel Dekker.
- Wildman, R. E. 2001. Handbook of nutraceuticals and functional foods, 1ª edición. CRC Series in Modern Nutrition. 560 p.
- Yeddes, N.; Cherif, J. K.; Guyot, S.; Helene, S.; Ayadi, M. 2013. Comparative study of antioxidant power, polyphenols, flavonoids and betacyanins of the peel and pulp of three *Tunisian Opuntia* forms. *Antioxidants*: 37-51.
- Zamora Leitón, M. M.; Molina Córdoba, M.; Chacón Valle, G. 2011. Evaluación del efecto de la temperatura, concentración y flujo volumétrico en la hidrólisis de sacarosa mediante una invertasa inmovilizada en un reactor esférico. *Ingeniería* 21 (1): 61-74.

**V. VALOR NUTRICIONAL Y ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE DE MIEL DE
MAGUEY OBTENIDA POR TRES MÉTODOS**

VALOR NUTRICIONAL Y ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE DE MIEL DE MAGUEY OBTENIDA POR TRES MÉTODOS

NUTRITIONAL VALUE AND ANTIOXIDANT ACTIVITY OF AGAVE HONEY OBTAINED BY THREE METHODS

Hernández-Ramos Lyzbeth, García-Mateos Ma. del Rosario, Colinas-León Ma. Teresa B., Ybarra-Moncada Ma. Carmen, Santos-Moreno Armando

RESUMEN

El aguamiel es un producto natural con atributos nutricionales; sin embargo, es poco su consumo. Una alternativa para su mejor aprovechamiento es la obtención de miel de maguey. Poco se conoce sobre el efecto de los diferentes procesos de elaboración de miel de maguey en sus compuestos bioactivos. Por ello, se evaluó el valor nutricional y la estabilidad de los compuestos antioxidantes del aguamiel de dos especies (*A. salmiana* y *A. mapisaga*) después de ser sometido a tres procesos de elaboración de miel de maguey (lío-filización, evaporación convencional y a presión reducida). Los resultados mostrarán que la miel de maguey es un endulzante rico en proteína (3.33 %), hierro (6.41 mg/100 g), potasio (993.50 mg/100 g), compuestos fenólicos (109-1040 mg EAG/100 g) y vitamina C (118 mg EAA/100 g), en comparación con lo reportado para miel de abeja; pero de menor contenido de azúcares reductores (6-63 %). La miel de maguey obtenida por lío-filización conservó el valor nutracéutico del aguamiel; sin embargo, su actividad antioxidante fue estadísticamente igual a la de la miel obtenida a presión reducida, pese a que este método causó una disminución del contenido de vitamina C. La miel de maguey obtenida por evaporación convencional y a presión reducida presentaron diferentes grados de oscurecimiento no enzimático, generándose compuestos con actividad antioxidante, producto de la reacción de Maillard (melanoidinas). El método convencional permitió obtener miel de maguey con el doble de actividad antioxidante, respecto al aguamiel y a los otros métodos de elaboración de miel de maguey. Una miel de maguey más oscura presenta mayor actividad antioxidante asociada a la formación de melanoidinas y al contenido de compuestos fenólicos.

Palabras clave: color, compuestos fenólicos, melanoidinas, actividad antioxidante.

ABSTRACT

Aguamiel is a natural product with nutritional attributes, but its consumption is very limited. Agave honey is an alternative for better use of the aguamiel. Little is known about the effect of different processes to obtain agave honey on its bioactive compounds. Therefore, in this work was to evaluate the nutritional value and antioxidant compounds stability of aguamiel of two species (*A. salmiana* y *A. mapisaga*) after three processes to obtain agave honey (lyophilization, evaporation at reduced pressure and conventional method). The results showed that the agave honey is a sweetener rich in protein (3.33 %), iron (6.41 mg/100 g), potassium (993.50 mg/100 g), phenolic compounds (109-1040 mg EAG/100 g) and vitamin C (118 mg EAA/100 g) compared with that reported for honey; but its lower reducing sugar content (6-63 %). Agave honey obtained by lyophilization was the only that preserved nutraceutic value of aguamiel; however, its antioxidant activity was statistically equal to the agave honey obtained by evaporation at reduced pressure, although this method caused a decrease in the vitamin C content. Agave honey obtained by conventional method and evaporation at reduced pressure showed different degrees of non-enzymatic browning. It generated compounds with antioxidant activity of Maillard reaction products (melanoidins). The conventional process yielded agave honey with double the antioxidant capacity compared with that of aguamiel and agave honey obtained by other methods. The darker agave has higher antioxidant activity associated with the formation melanoidins and a high content of phenolic compounds.

Key words: color, phenolic compounds, melanoidins, antioxidants.

1. INTRODUCCIÓN

Estudios epidemiológicos sugieren que las dietas ricas en ingredientes nutraceuticos contribuyen a prevenir enfermedades neurodegenerativas y mejorar la salud de los consumidores, debido a sus propiedades antioxidantes (Igual *et al.*, 2013). Las sustancias antioxidantes neutralizan los radicales libres, los cuales son especies reactivas que generan enfermedades crónico-degenerativas y envejecimiento (Ames *et al.*, 1993). Algunos metabolitos antioxidantes (fenoles, terpenoides, ácido ascórbico y tocoferoles, entre otros), presentes en vegetales, evitan principalmente los daños de las membranas celulares, del ADN y proteínas, atribuidas específicamente a los radicales libres (Lee *et al.*, 2004; Dillard y German, 2000).

Pocos son los estudios que se realizan en nuestro país sobre la calidad nutraceutica y la actividad antioxidante de alimentos frescos y procesados. Asimismo, se desconoce el potencial nutraceutico de numerosas especies, debido probablemente a la gran riqueza y diversidad que existe en nuestro país, sobre todo de aquellas subutilizadas, como las especies de la familia *Agavaceae*. A pesar de la diversidad de especies de agave (119 especies endémicas) a nivel nacional y ser considerado el centro de origen (García-Mendoza, 2011), poco se conoce sobre la calidad nutrimental y nutraceutica de los productos derivados del mismo (aguamiel, pulque y miel de maguey).

Una alternativa para el aprovechamiento de algunas especies de agave subutilizadas, es la obtención de la miel de maguey (néctar de aguamiel) a partir del aguamiel. La miel de maguey es un producto que comúnmente se obtiene al concentrar el aguamiel por un proceso de evaporación convencional (altas temperaturas, presión atmosférica y tiempos prolongados). Este proceso implica un impacto en el color y el sabor de la miel debido al largo tiempo y temperatura de proceso del aguamiel, obteniéndose una miel con diferentes coloraciones (café-rojizo hasta negro). También se desconoce el impacto en la calidad nutricia y nutracéutica de la miel debido a las condiciones de su elaboración (evaporación), a la fuente de origen (características fisicoquímicas del aguamiel) y al tipo de agave (maguey pulquero).

Las diferentes técnicas de elaboración de miel de maguey pueden afectar el contenido de los compuestos bioactivos presentes. Existe poca información de las características nutrimentales y nutracéuticas de la miel de maguey pulquero; así como, la variación del valor nutracéutico del aguamiel durante diferentes técnicas para la elaboración de miel. Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue determinar la actividad antioxidante de la miel de maguey pulquero de las especies *A. salmiana* y *A. mapisaga*, asociada con el contenido de compuestos fenólicos y vitamina C; así como, determinar el efecto de tres procesos de elaboración de miel de maguey sobre el valor nutricional y nutracéutico, con la finalidad de contribuir a un aprovechamiento agroindustrial eficiente del producto. Asimismo, este trabajo contribuirá a identificar el proceso de deshidratación del aguamiel con la menor afectación en la calidad del producto final (miel de maguey) en función del tipo de biactivos o antioxidantes.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Material experimental

Se utilizaron muestras de aguamiel de dos especies de agaves pulqueros: *Agave mapisaga* Trel cultivar “carrizo” de Tequexquahuac, Texcoco (19° 20'190 N, 98° 55.670'O) y *Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck cultivar “manso” de Santa María, Actipac, Axapusco, México (19° 52.027'N, 98° 44.252'O), las cuales fueron colectadas en febrero y marzo de 2014.

El aguamiel de cada especie fue obtenido de plantas en madurez comercial, raspadas por las mañanas; colocado en botellas de polipropileno e inmediatamente refrigerado (5 °C) y trasladado al laboratorio. El aguamiel fue almacenado a -18 °C hasta ser sometido al método de elaboración de miel de maguey.

2.2. Procesos de elaboración de miel de maguey

Se aplicaron tres procesos de elaboración con el fin de obtener una miel de maguey con un contenido promedio de sólidos solubles totales (75-85 °Bx) similar al que se reporta en jarabes comerciales de agave y miel de abeja (Mellado-Mojica y López-Pérez, 2013); por ello, se realizaron pruebas para definir el tiempo de proceso en cada método. Los procesos de elaboración de miel de maguey fueron: evaporación convencional, liofilización y evaporación a presión reducida (Figura 15). Se evaporaron 250 mL de aguamiel, que corresponde al tamaño de la unidad experimental.

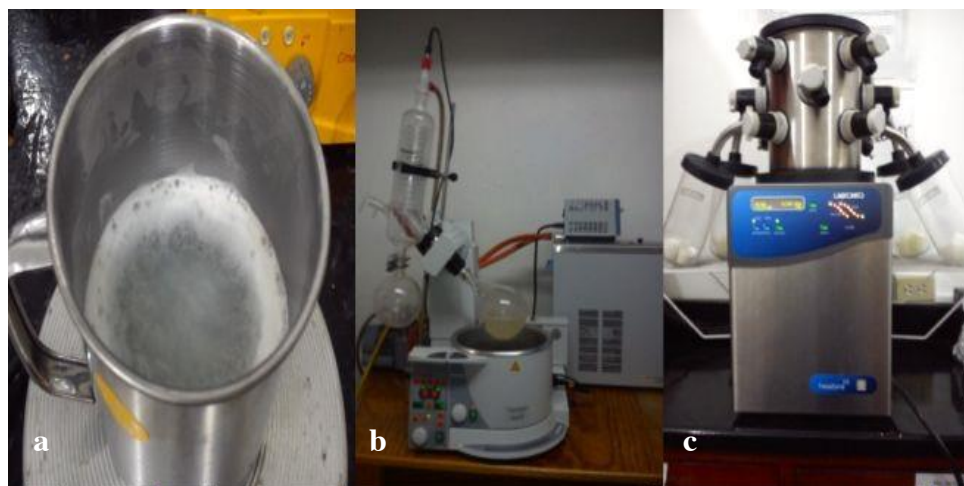


Figura 15. Procesos de elaboración de miel de maguey: evapuración convencional (a), evaporación a presión reducida (b) y liofilización (c).

Evaporación convencional

El aguamiel fue evaporado en una parrilla eléctrica (SP46925, Thermolyne, USA) durante 75 min a una temperatura de 90-93 °C y presión atmosférica de 780 mbar. Este proceso se realizó a las mismas condiciones que el método convencional que usan los productores.

Liofilización

El aguamiel se congeló en vasos de plástico por inmersión en nitrógeno líquido durante 10 min. Las muestras congeladas fueron inmediatamente liofilizadas (Labconco, Kansas, USA) a - 48 °C y 0.20 mbar, durante 26 h.

Evaporación a presión reducida

El aguamiel (250 mL) fue sometido a evaporación a presión reducida, con ayuda de un evaporador rotativo (Laborota 4003 Control, Heidolph Instruments, Alemania), a una temperatura de vaporización de 55 °C y una presión de vacío de 157 mbar (valor

calculado mediante la ecuación de Antoine para agua pura, dado el alto contenido de humedad del aguamiel), durante 25 min. El evaporado rotativo se programó en el modo “P const”, con el fin de garantizar un proceso estándar.

2.3. Caracterización físico-química

pH. En un vaso de precipitados se pesó 1 g de miel de maguey y se disolvió con 7.5 mL de agua destilada, el pH de la muestra se midió con un potenciómetro HI 2221 Hanna Instruments (USA) (Secretaría de Economía, 2008).

Sólidos solubles totales y humedad. Estas variables se determinaron empleando los métodos 969.38 y 940.38 establecidos por la AOAC (2000). Para determinar el contenido de sólidos solubles totales (°Brix) se colocaron unas gotas de miel de maguey en un refractómetro (PAL-3, Pocket refractometer ATAGO, Tokyo, Japan), posteriormente se calculó el contenido de humedad (%) empleando las tablas de conversión reportadas para esta técnica (Cuadro 940.39: relación entre índice de refracción y contenido de humedad en miel).

Azúcares reductores directos y totales. Se utilizó el método volumétrico de Lane-Eynon con la modificación de Soxhlet de la solución de Fehling: métodos oficiales 920.183 (azúcares reductores en miel) y 920.184 (sacarosa en miel) de la (AOAC, 2000).

Contenido de proteína, cenizas y carbohidratos. Estos nutrientes se determinaron de acuerdo a metodología de la AOAC (2000). El contenido de carbohidratos (%) se calculó por diferencia, mediante la Ecuación 3.

$$\text{Carbohidratos} = 100 - (\text{humedad} + \text{proteína} + \text{cenizas}) \quad (3)$$

Color. El color de las muestras se determinó mediante un colorímetro Hunter Lab MiniScan XE Plus (modelo 45/0-L, RestonVa, USA), utilizando el iluminante D65 (luz de día), un ángulo de observador de 10° y la escala CIE L*a*b* (Tuberoso *et al.*, 2014).

Se determinó el color mediante la evaluación de L* (luminosidad), el ángulo de tono (Hue) y la pureza de color o índice de cromaticidad (Croma) de la miel de maguey. El cálculo de Hue y Croma se realizó mediante las Ecuaciones 4 y 5 (McGuire, 1992).

$$\text{Hue (H}^*) = \arctan \frac{b^*}{a^*} \quad (4)$$

$$\text{Croma (C}^*) = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (5)$$

Viscosidad. La medición de viscosidad en las muestras de miel de maguey se llevó a cabo a temperatura ambiente (22 °C), con un viscosímetro digital (RV-DV II Pro, Brookfield, USA) de acuerdo a lo describió por Oroian (2013).

Actividad de agua. La actividad acuosa (a_w) de la miel fue determinada a 25 °C utilizando un sensor de punto de rocío, Aqualab Series 3 modelo TE (Decagon Devices, Washington, USA).

2.4. Contenido de minerales

Las muestras de miel de maguey fueron sometidas a digestión húmeda usando un programa de control de temperatura (Sistema de digestión Tecator, TD20 Digestion System Tubes and Racks, Foss, USA). Las muestras primero fueron digeridas con ácido nítrico (R.A.) a 95 °C durante 45 min. Posteriormente, se realizó una segunda etapa de

digestión/oxidación mediante la adición de peróxido de hidrógeno (30 % p/v), incubando las muestras a 95 °C durante 5 min (Alves *et al.*, 2013).

Después de que se concluyó la digestión, a la muestra se le adicionó agua desionizada hasta aforar a un volumen final de 50 mL. Se determinaron los contenidos de Fe, Ca, Mg, K y Na mediante espectrofotometría de absorción atómica (700 AAnalyst, PerkinElmer, USA).

2.5. Índice de oscurecimiento

El contenido de los productos (melanoidinas) de la reacción de Maillard (oscurecimiento no enzimático) usualmente se determina espectrofotométricamente entre longitudes de onda de 420 a 470 nm (Brudzynski y Miotto, 2011).

Por lo anterior, se determinó el índice de oscurecimiento (formación de pigmentos marrones) siguiendo la metodología de Turkmen *et al.* (2006). Las muestras de miel de maguey fueron diluidas con agua destilada hasta obtener extractos de 4 °Bx. La absorbancia de los extractos se leyó en un espectrofotómetro (Genesys 10s) a una longitud de onda de 420 nm; los resultados son expresados como unidades de absorbancia (UA).

2.6. Cuantificación de vitamina C

La concentración de vitamina C (ácido ascórbico) se determinó por espectrofotometría siguiendo el método descrito por Burdurlu *et al.* (2006), con algunas modificaciones. A 1 g de miel de maguey se le adicionaron 3 mL de ácido metafosfórico al 3 % (p/v), la mezcla se filtró. Se tomó 1 mL del filtrado y se aforó a 10 mL con ácido metafosfórico

al 3 % (p/v). En un matraz Erlenmeyer se colocaron 2 mL de la solución anterior, 2 mL de regulador de acetatos (solución buffer pH = 4, ácido acético glacial: acetato de sodio al 5 % p/v), 3 mL de 2,6-dicloroindofenol y 15 mL de xileno, en sucesión rápida y agitando vigorosamente. La solución se transfirió a embudos de separación para eliminar la fase acuosa. A la fase de xileno se le adicionaron cristales de Na_2SO_4 anhidro, para eliminar trazas de agua; posteriormente, se leyó su absorbancia a una longitud de onda de 520 nm en un espectrofotómetro (Genesys 10s, Thermo Scientific, USA). El contenido de Vitamina C fue calculado usando una curva estándar de ácido ascórbico dentro de un intervalo de concentración de 0 – 0.25 mg mL⁻¹ ($y = -2.666x + 0.567$, $R^2 = 0.995$), los resultados fueron expresados en mg equivalentes de ácido ascórbico por 100 g de miel de maguey (mg EAA 100 g⁻¹).

2.7. Cuantificación de compuestos fenólicos totales

Las muestras de miel de maguey fueron diluidas en metanol: ácido acético: agua (10: 1: 9 v/v/v), a una concentración de 0.1 g mL⁻¹. El contenido de compuestos fenólicos totales se determinó por el método de Folin-Ciocalteu (Singleton y Rossi, 1965). Una alícuota de 1 mL del extrato fenólico se mezcló con 10 mL de agua y 1 mL del reactivo de Folin-Ciocalteu (2 N, Sigma - Aldrich), se dejó reposar 2 min. Posteriormente, a la mezcla se le adicionaron 4 mL de una solución de carbonato de sodio (Na_2CO_3) al 7.5 % (p/v) y se dejó reposar en oscuridad a temperatura ambiente, durante una hora.

Finalmente, se tomó lectura de la absorbancia a 765 nm en un espectrofotómetro (Genesys 10s, Thermo Scientific, USA). La curva de calibración se construyó con ácido

gálico como referencia ($0 - 0.2 \text{ mg mL}^{-1}$, $y = 5.9332x - 0.0375$, $R^2 = 0.995$). El contenido total de fenoles se expresó en mg equivalentes de ácido gálico por 100 g de miel de maguey ($\text{mg EAG } 100 \text{ g}^{-1}$).

2.8. Cuantificación de flavonoides

La miel de maguey se diluyó con metanol al 80 % v/v, para obtener una concentración de 0.1 g mL^{-1} . El contenido de flavonoides se cuantificó de acuerdo al método Dowd, adaptado por Arvouet-Grand *et al.* (1994). A 2 mL del extracto metanólico se le agregaron 0.5 mL de AlCl_3 (2 % p/v) y agua destilada hasta un volumen final de 25 mL. La mezcla se homogeneizó en un vortex y se incubó durante 30 min a temperatura ambiente, en oscuridad. Se leyó la absorbancia a una longitud de onda de 425 nm en un espectrofotómetro (Genesys 10s, Thermo Scientific, USA); se utilizó como blanco una solución de extracto metanólico: agua: metanol (2: 22.5: 0.5), libre de AlCl_3 (Tornuk *et al.*, 2013). La curva estándar se construyó con quercetina como referencia ($0 - 0.025 \text{ mg mL}^{-1}$, $y = 5.4696x + 0.0018$, $R^2 = 0.996$). Los resultados se expresaron en mg equivalentes de quercetina en 100 g de miel de maguey ($\text{mg EQ } 100^{-1}$).

2.9. Evaluación de la actividad antioxidante

El análisis de actividad antioxidante se determinó por el método del radical libre DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazilo) descrito por Brand-Williams *et al.* (1995). La miel de maguey fue diluida en metanol al 80 % v/v, a una concentración de 0.1 g mL^{-1} . Para la reacción de reducción del DPPH, 0.1 mL del extracto metanólico se mezcló con 2.9 mL de solución de DPPH ($6 \times 10^{-5} \text{ M}$). La mezcla se mantuvo en reacción en oscuridad

durante 30 min a temperatura ambiente, después la absorbancia se midió a 517 nm en un espectrofotómetro (Genesys 10s). Se usó como referencia una curva estándar de Trolox ($y = 76.889x + 2.2556$, $R^2 = 0.997$). Los resultados se expresaron en μM equivalentes de trolox por 100 g de miel de maguey ($\mu\text{M TE } 100 \text{ g}^{-1}$). La actividad antioxidante de cada muestra se determinó por el porcentaje de reducción de DPPH (Ecuación 6), como blanco se utilizó DPPH ($6 \times 10^{-5} \text{ M}$).

$$\% \text{ DPPH}_{\text{Inhibido}} = \frac{(\text{Abs}_{\text{blanco}} - \text{Abs}_{\text{muestra}}) \times 100}{\text{Abs}_{\text{blanco}}} \quad (6)$$

2.10. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico se consideró como tratamientos a cada uno de los diferentes métodos de elaboración de miel de maguey (liofilización, evaporación a presión reducida y convencional). El tamaño de la unidad experimental correspondió a 250 mL de aguamiel. Los resultados son expresados como la media $\pm$ desviación estándar, correspondiendo al promedio de cinco repeticiones (cada una determinada por triplicado).

Se realizó un análisis de varianza con comparación de medias mediante el método de la diferencia significativa honesta (Tukey, 0.01). La relación entre las características físico-químicas, nutricionales y nutracéuticas de la miel de maguey fueron determinadas por el coeficiente de correlación de Pearson, mediante el programa SAS (Statistical Analysis System 9.0 for Windows).

Se aplicó un análisis combinado de serie de experimentos para determinar la magnitud de la interacción métodos-especie y poder formular conclusiones generales aplicables a a

distinta especies de agave (Martínez Garza, 1994). Por lo cual, los tres métodos de elaboración de miel de maguey se ensayaron con aguamiel obtenido de *A. salmiana* y *A. mapisaga*; considerando como tratamientos a cada uno de los métodos de elaboración de miel de maguey y al aguamiel.

Se realizó un análisis de componentes principales con el fin de reducir la dimensionalidad del conjunto de datos (Jolliffe, 2005), agrupando a las muestras de miel por características en común, lo cual se realizó con apoyo del programa The Unscrambler X 10.3 (Camo Process AS, Oslo, Norway).

Se realizó un análisis de correlación canónica con el fin de cuantificar la asociación entre grupos de variables (Anderson, 2003), utilizando el programa Statistical Analysis System versión 9. Las variables respuestas se separaron en dos grupos: variables nutricionales (independientes) y nutraceuticas (dependientes). El primer grupo incluyó al contenido de proteína, Na, K, azúcares reductores directos y totales, componentes más importantes de la miel de maguey. Mientras que el segundo grupo estuvo conformado por el contenido de flavonoides, fenoles totales, vitamina C, índice de oscurecimiento (melanoidinas) y actividad antioxidante.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Parámetros de color

El color de la miel se utiliza a menudo como factor de calidad, siendo una característica física que puede ayudar a determinar su origen botánico, el grado de tratamiento térmico y el tiempo de almacenamiento (Hutchings *et al.*, 2012; Doner, 2003). Los parámetros de color de la miel de maguey pulquero elaborada por tres métodos se muestran en el Cuadro 12.

Cuadro 12. Atributos de color en miel de maguey (*A. mapisaga* y *A. salmiana*) elaborada por tres métodos (evaporación convencional, liofilización y evaporación a presión reducida).

Especie	Método	Luminosidad (%)		Ángulo de tono (°hue)		Índice de saturación (croma)		Índice de oscurecimiento (UA)	
<i>A. salmiana</i>	P. reducida	20.61	± 0.59 a [§]	85.69	± 1.45 a	12.84	± 3.13 a	1.363	± 0.82 a
<i>A. salmiana</i>	Liofilización	30.13	± 5.38 a	74.84	± 13.04 a	4.52	± 2.62 b	0.922	± 0.17 a
<i>A. salmiana</i>	Convencional	9.74	± 2.88 b	68.76	± 12.23 a	4.77	± 2.15 ab	2.412	± 0.98 a
<i>A. mapisaga</i>	P. reducida	16.99	± 1.98 a	84.85	± 3.85 a	6.71	± 1.52 a	1.050	± 0.15 a
<i>A. mapisaga</i>	Liofilización	23.53	± 3.22 a	79.73	± 5.80 a	4.53	± 1.77 a	0.576	± 0.19 a
<i>A. mapisaga</i>	Convencional	8.64	± 3.86 b	64.52	± 16.96 a	5.00	± 1.84 a	1.839	± 0.79 a
AC [†]	P. reducida	18.80	± 2.32 b	85.27	± 2.94 a	9.78	± 3.93 a	0.99	± 0.17 a
AC	Liofilización	26.83	± 5.43 a	77.28	± 10.39 ab	4.53	± 2.24 b	0.97	± 0.71 a
AC	Convencional	9.19	± 3.45 c	66.64	± 14.93 b	4.89	± 2.00 b	2.13	± 0.93 a

Los valores expresados son la media de 5 repeticiones ± desviación estándar. [†]AC: análisis de varianza combinados, valores obtenidos mediante el análisis combinado de serie de experimentos. [§]Medias con la misma letra, en una misma columna y especie, son estadísticamente iguales (Tukey, 0.01).

Los valores de hue para la miel de maguey se ubicaron entre los ángulos 38.5° y 88.8°, que representan los colores rojizo y amarillo, respectivamente; ambos colores tuvieron poca intensidad, de acuerdo con los valores de croma. La luminosidad (L^*), que indica brillantez de color, mostró un rango de 3.6 a 36.6 %, siendo de color más oscuro (cercano a negro) la miel de maguey obtenida por el método convencional. González-Miret *et al.* (2005), clasificaron a la miel en dos grupos, tomando como referencia la L^* : mieles claras ($L^* > 50$) y mieles oscuras ($L^* < 50$); por lo tanto, las muestras de miel de maguey, obtenidas por los tres métodos, se pueden considerar oscuras con respecto a la miel de abeja. Las muestras de miel de *A. salmiana* fueron de mayor porcentaje de luminosidad (L^*) que las obtenidas de *A. mapisaga*, debido a las diferencias en L^* entre el aguamiel producido por cada especie.

El análisis combinado de series de experimentos mostró que hubo diferencias significativas por efecto del método de deshidratación sobre dos de los atributos cromáticos de la miel de maguey (luminosidad y hue) (Cuadro 12). Los métodos de liofilización y evaporación a presión reducida permitieron obtener muestras de miel de maguey estadísticamente iguales ($P > 0.01$) en ángulo de tono (hue), siendo de tonalidad amarilla (Figura 15); sin embargo, la miel de maguey por liofilización fue de mayor luminosidad, lo cual se debe a que este método permite obtener productos con estabilidad relativa de color al usar bajas temperaturas que evitan las reacciones de oscurecimiento (Krokida *et al.*, 2001).

La miel de maguey obtenida por evaporación a presión reducida mostró mayor oscurecimiento (valores menores de L^*) que el método de liofilización, pero menor oscurecimiento que la miel obtenida por el tratamiento convencional (Figura 16); pues se

ha reportado que el oscurecimiento no enzimático es menor cuando se disminuye la temperatura de deshidratación de 90 a 55 °C (Shi *et al.*, 1999).

La miel de maguey obtenida por el método convencional presentó el porcentaje de luminosidad estadísticamente inferior ($p \leq 0.01$), lo que indicó oscurecimiento con respecto al aguamiel ($L = 20.2 \%$). Lo anterior, debido a que la alta temperatura (≈ 93 °C) ocasionó cambios de color (mayor índice de oscurecimiento); pues durante el tratamiento térmico las proteínas y azúcares reductores del aguamiel (Ortiz-Basurto *et al.*, 2008) participaron en reacciones de oscurecimiento no enzimático (reacción de Maillard) que generan pigmentos marrones (melanoidinas) (Wang *et al.*, 2011; Turkmen *et al.*, 2006).

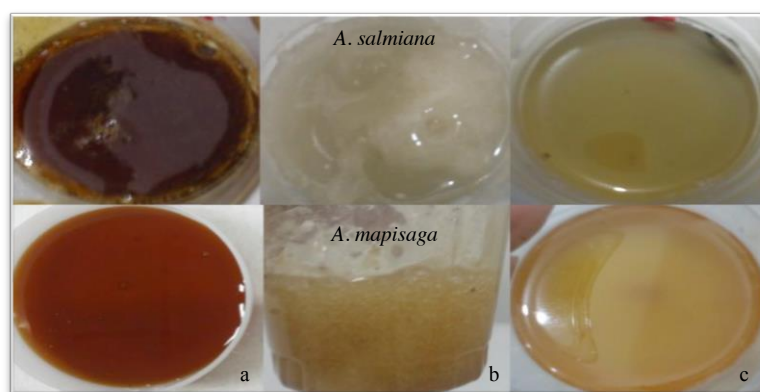


Figura 16. Miel de maguey (*A. mapisaga* y *A. salmiana*) elaborada por tres métodos: evaporación convencional (a), liofilización (b) y evaporación a presión reducida (c).

3.2. Propiedades físico-químicas

Los resultados del análisis físico-químico de la miel de maguey elaborada por tres métodos se muestran en el Cuadro 13. El rendimiento promedio fue de 130 g de miel por litro de aguamiel.

Cuadro 13. Características físico-químicas de la miel de maguey pulquero (*A. mapisaga* y *A. salmiana*) elaborada por tres métodos (evaporación convencional, liofilización y evaporación a presión reducida).

Variable	<i>A. salmiana</i>			<i>A. mapisaga</i>		
	P. reducida	Liofilización	Convencional	P. reducida	Liofilización	Convencional
Humedad (%)	24.80 ± 2.40 a [§]	19.40 ± 4.00 b	16.99 ± 2.79 b	20.52 ± 3.00 a	20.78 ± 6.78 a	20.97 ± 5.27 a
pH	5.49 ± 0.08 a	5.47 ± 0.06 a	5.26 ± 0.22 a	5.78 ± 0.73 a	5.45 ± 0.55 a	5.34 ± 0.45 a
SST* (°Bx)	73.54 ± 2.59 a	79.10 ± 3.24 a	83.88 ± 5.64 a	76.50 ± 3.88 a	78.16 ± 9.20 a	79.48 ± 2.71 a
ARD (g · 100 g ⁻¹)	52.58 ± 1.77 a	55.69 ± 5.49 a	55.47 ± 2.74 a	9.57 ± 2.79 b	23.21 ± 4.78 a	14.44 ± 3.15 b
AT (g · 100 g ⁻¹)	54.03 ± 1.59 b	61.18 ± 4.70 ab	69.42 ± 3.45 a	69.20 ± 5.01 a	63.89 ± 5.39 a	75.00 ± 7.04 a
Sacarosa (g · 100 g ⁻¹)	1.53 ± 0.82 b	5.22 ± 1.32 b	13.25 ± 4.44 a	56.40 ± 6.31 ab	38.56 ± 8.76 b	57.56 ± 8.82 a
Proteína (g · 100 g ⁻¹)	3.60 ± 0.59 a	3.61 ± 0.22 a	3.85 ± 0.27 a	3.02 ± 0.07 a	2.76 ± 0.38 a	3.12 ± 0.34 a
Cenizas (g · 100 g ⁻¹)	3.07 ± 1.09 a	3.05 ± 0.77 a	3.06 ± 0.87 a	2.40 ± 0.19 a	2.85 ± 0.77 a	2.00 ± 0.68 a
Carbohidratos (g · 100 g ⁻¹)	68.53 ± 1.56 b	73.94 ± 0.97 a	76.10 ± 1.05 a	74.06 ± 0.21 a	73.62 ± 0.71 a	73.91 ± 0.50 a
a _w	0.73 ± 0.03 a	0.65 ± 0.08 a	0.62 ± 0.62 a	0.72 ± 0.06 a	0.71 ± 0.13 a	0.67 ± 0.05 a
Viscosidad (Pa·s)	2.05 ± 1.33 a	7.34 ± 3.93 a	5.98 ± 3.46 a	7.50 ± 3.16 b	7.90 ± 2.30 b	15.68 ± 2.34 a

Los valores reportados son la media de 5 repeticiones ± desviación estándar. [§]Medias con la misma letra, en una misma fila y especie, son estadísticamente iguales (Tukey, 0.01).

*SST = sólidos solubles totales; ARD = azúcares reductores directos; AT = azúcares totales; a_w = actividad acuosa.

El principal componente de la miel de maguey son los carbohidratos, presentando un contenido promedio de 73.36 %, de los cuales 89 % fueron azúcares y el resto podrían ser carbohidratos complejos y/o fibra (Brown, 2011); pues, el aguamiel (materia prima) es fuente de fructooligosacáridos e inulina (Ortiz-Basurto *et al.*, 2008). No se encontraron diferencias estadísticas significativas ($P \geq 0.01$) en el

contenido de carbohidratos y azúcares de la miel de maguey entre los distintos métodos de elaboración. La miel elaborada a partir de aguamiel de *A. salmiana* presentó mayor contenido de azúcares reductores directos (47-63 %), en contraste con la obtenida de *A. mapisaga* que presentó valores menores; estas diferencias son debidas al distinto contenido de azúcares en el aguamiel, el cual se ve afectado por prácticas culturales como son: el momento idóneo del capado y el añejado del maguey (Loyola-Montemayor, 1956; Lappe-Oliveras *et al.*, 2008). La miel elaborada a partir de aguamiel de *A. mapisaga* presentó 15.74 % de azúcares reductores directos y el 77.30 % de sus azúcares totales fueron sacarosa. La NMX-FF-110-SCFI-2008 indica un máximo de 4 % de sacarosa para ser denominada jarabe de agave 100 % (Secretaría de Economía, 2008), por lo tanto, ninguna de las mieles de maguey pulquero elaboradas en esta investigación podría ser considerada jarabe 100 % de agave; por lo que se trata de mieles o jarabes de agave parcialmente hidrolizados. La Norma Mexicana para “Jarabe de agave” da las especificaciones de calidad para un producto rico en fructosa, por lo que si se quisiera que la miel de agave pulquero fuera rica en este azúcar, se debe modificar la metodología de elaboración considerando realizar una hidrólisis ácido-térmica de sus carbohidratos como se realiza en la elaboración de jarabe a partir de *Agave tequilana* y *A. angustifolia* (López-Bonilla y Arenas-Ocampo, 2010).

El porcentaje de humedad de la miel es un parámetro de calidad muy importante, un alto contenido de humedad puede acelerar la cristalización de la miel y favorecer el crecimiento de ciertos microorganismos (Yanniotis *et al.*, 2006). Los resultados obtenidos por los tres métodos para las muestras de miel de maguey mostraron contenidos de humedad entre 16.99 y 24.8 %, valores aceptables por la Norma

Mexicana para jarabe de agave que señala como máximo un 25 % (Secretaría de Economía, 2008) y comparables con lo obtenido para muestras comerciales de jarabe de agave, jarabe de maíz y miel de abeja (Mellado-Mojica y López-Pérez, 2013; Alves *et al.*, 2013). Sin embargo, algunas muestras de miel de maguey obtenidas por evaporación a presión reducida (*A. salmiana*) excedieron el 25 % de humedad, por lo que podrían presentar cristalización y niveles de fermentación.

Otros elementos importantes de la miel de maguey pulquero fueron los contenidos de proteína y de cenizas, los cuales fueron estadísticamente iguales ($P > 0.01$) para todos los tratamientos. El contenido de proteína de la miel de maguey fluctuó entre 2.30 y 4.42 % (Cuadro 13), valores superiores a lo reportado para miel de abeja; este componente se encuentra en muy bajas concentraciones en la miel de abeja (0.59 a 1.0 %) y está ausente en los jarabes de agave (Gupta y Sharma, 2009; Secretaría de Economía, 2008); el contenido de proteína fue estadísticamente superior en las muestras obtenidas de *A. salmiana*.

El contenido promedio de cenizas en la miel de maguey fue 2.74 %, superior a lo reportado en miel de abeja (0.18 %) y en jarabe de agave (máximo 0.5 %) (Escuredo *et al.*, 2013; Secretaría de Economía, 2008). La concentración mayor de sales minerales en la miel de maguey se podría asociar con el color de las muestras, pues fueron más oscuras que la miel de abeja y el jarabe comercial de agave; pues cuanto mayor sea la cantidad de estos elementos, el color de la miel será más oscuro (González-Miret *et al.*, 2005).

El pH y la a_w son parámetros que están relacionados con el tiempo de almacenamiento y con el crecimiento de microorganismos que pueden cambiar la textura y estabilidad de la miel (Fe´as *et al.*, 2010; Chirife *et al.*, 2006). Los valores de pH para las muestras de miel de maguey fueron ligeramente ácidos (Cuadro 13), encontrándose en el intervalo especificado por la Norma Mexicana FF-110-SCFI para jarabe de agave. Los niveles de a_w de las muestras de miel de maguey variaron entre 0.50 y 0.73, similar a lo reportado en miel de abeja (0.50 a 0.69); sin embargo, los niveles de a_w excedieron 0.60, lo que puede proporcionar un medio adecuado para el crecimiento de levaduras (Tornuk *et al.*, 2013), por lo que es importante cuidar las condiciones de almacenamiento de la miel para disminuir los cambios físicos que pudieran sufrir. No existieron diferencias significativas en los valores de pH y a_w entre métodos elaboración y especies.

Otra variable importante en la miel de maguey fue la viscosidad, propiedad reológica que influye en la calidad sensorial del producto (Yanniotis *et al.*, 2006). Las muestras de miel de maguey presentaron altos valores de viscosidad, que variaron entre 1 y 20 Pa·s. Estos resultados fueron similares a lo reportado por Oroian (2013), quien menciona que la viscosidad de la miel de abeja varía entre 5 y 15 Pa·s para concentraciones de 79 a 82 °Bx. La viscosidad de la miel de *A. mapisaga* fue estadísticamente superior a la de *A. salmiana*; lo cual se puede deber al diferente perfil físico-químico de las muestras de miel de maguey (humedad, sólidos solubles totales y tipos de azúcares); pues la viscosidad de la miel está influenciada por el contenido de humedad, concentración de sólidos solubles y por la especie (Yanniotis *et al.*, 2006; Orain, 2013).

3.3. Contenido de minerales

Otros componentes nutritivos de la miel de maguey son los elementos minerales, que están implicados en varias funciones vitales del cuerpo humano. En el Cuadro 14 se presenta el contenido de cinco minerales en miel de maguey pulquero de dos especies de agave. La miel de agave presentó mayor concentración de estos minerales en comparación con lo reportado en la miel de abeja (0.7 mg de Fe, 7 mg de Mg, 188 mg de K, 11.8 mg de Ca y 7 mg de Na en 100 g de miel) (Escuredo *et al.*, 2013).

Se observaron diferencias significativas en el contenido de Fe y Na entre las dos especies utilizadas para la elaboración de miel de maguey. Los valores más altos de hierro se encontraron en la miel elaborada con aguamiel de *A. salmiana*, los cuales fueron estadísticamente superiores a lo encontrado en miel de *A. mapisaga*, presentando más del triple de contenido de este mineral. En contraste, la miel de maguey de *A. mapisaga* fue estadísticamente superior en el contenido de sodio. La cantidad y variedad de minerales que están presentes en la miel dependen de los nutrientes que han sido absorbidos por la planta, su disponibilidad en el suelo, los contaminantes ambientales y de factores genéticos (González-Miret *et al.*, 2005). De esta manera, el exceso o deficiencia de minerales en el suelo tendrá repercusiones en la composición de la savia de agave y, por consiguiente, en la miel de maguey.

El elemento mineral más importante en la miel de maguey fue el K, encontrándose en una concentración promedio de 993.5 mg por 100 g de miel, tres veces más a lo

reportado para la miel de abeja (De Alda-Garcilope *et al.*, 2012); por lo que la miel de agave pulquero puede ser considerada como un endulzante rico en K.

Cuadro 14. Composición mineral de la miel de maguey (*A. mapisaga* y *A. salmiana*) elaborada por tres métodos (evaporación convencional, liofilización y evaporación a presión reducida).

Especie	Método	Minerales (mg 100 g ⁻¹)									
		Fe		Mg		K		Ca		Na	
<i>A. salmiana</i>	P. reducida	8.93	± 0.34 a [§]	70.08	± 2.53 b	921.98	± 46.78 b	31.27	± 1.46 b	70.26	± 12.42 a
<i>A. salmiana</i>	Liofilización	10.19	± 0.70 a	86.72	± 9.09 ab	1053.96	± 52.77 ab	43.88	± 2.85 a	81.90	± 4.00 a
<i>A. salmiana</i>	Convencional	9.60	± 0.35 a	88.90	± 4.71 a	1101.00	± 62.60 a	41.50	± 2.11 a	76.15	± 4.13 a
<i>A. mapisaga</i>	P. reducida	3.19	± 1.17 a	71.24	± 3.69 a	957.11	± 102.47 a	43.25	± 7.29 a	123.34	± 17.68 a
<i>A. mapisaga</i>	Liofilización	3.20	± 1.47 a	76.13	± 11.82 a	813.90	± 357.99 a	37.81	± 5.02 a	120.28	± 27.25 a
<i>A. mapisaga</i>	Convencional	3.35	± 1.28 a	73.48	± 7.63 a	1113.05	± 171.07 a	38.45	± 2.69 a	98.16	± 2.67 a

Los valores reportados son la media de 5 repeticiones ± desviación estándar. [§]Medias con la misma letra, en una misma columna y especie, son estadísticamente iguales (Tukey, 0.01).

3.4. Contenido de fitoquímicos

Los fitoquímicos son compuestos bioactivos de origen natural que proporcionan efectos benéficos para la salud de los consumidores, más allá de las atribuidas a los nutrientes tradicionales (Saxena *et al.*, 2013). La miel es fuente de compuestos bioactivos como son vitamina C, flavonoides y otros compuestos fenólicos; metabolitos con diversas propiedades biológicas como es la actividad antioxidante (Yao *et al.*, 2004; Meda *et al.*, 2005); sin embargo, se desconoce el contenido de estos metabolitos en la miel de maguey pulquero. En el Cuadro 15 se muestran los contenidos de los componentes antioxidantes presentes en miel de maguey de dos especies elaborada por tres métodos, observándose que este producto es una buena fuente de compuestos fenólicos y vitamina C.

Cuadro 15. Componentes antioxidantes en miel de maguey (*A. mapisaga* y *A. salmiana*) elaborada por tres métodos (evaporación convencional, liofilización y evaporación a presión reducida).

Especie	Método	Flavonoides (mg EQ 100 g ⁻¹)	Fenoles totales (mg EAG 100 g ⁻¹)	Vitamina C (mg EAA 100 g ⁻¹)
<i>A. salmiana</i>	P. reducida	0.57 ± 0.21 a	136.69 ± 11.75 b	171.55 ± 41.60 a
<i>A. salmiana</i>	Liofilización	0.70 ± 0.09 a	186.73 ± 23.63 ab	197.05 ± 40.44 a
<i>A. salmiana</i>	Convencional	1.00 ± 0.19 a	593.74 ± 250.06 a	0 ± 0 b
<i>A. mapisaga</i>	P. reducida	1.16 ± 0.22 ab	146.54 ± 14.68 a	108.39 ± 22.24 b
<i>A. mapisaga</i>	Liofilización	1.49 ± 0.18 a	191.54 ± 65.76 a	226.07 ± 55.03 a
<i>A. mapisaga</i>	Convencional	0.65 ± 0.10 b	480.17 ± 306.38 a	6.03 ± 12.06 c

Los valores reportados son la media de 5 repeticiones ± desviación estándar. ^aMedias con la misma letra, en una misma columna y especie, son estadísticamente iguales (Tukey, 0.01).

Compuestos fenólicos

Los fenoles son metabolitos con propiedades antioxidantes y terapéuticas (Yeddes *et al.*, 2013). Los resultados del contenido de compuestos fenólicos en las muestras de miel de maguey variaron entre 109.18 y 1039.50 mg EAG por 100 g de miel, valores superiores a lo reportado para muestras de miel de abeja consideradas de alto contenido fenólico (114.2 ± 4.1 mg EAG 100 g⁻¹) (Rodríguez *et al.*, 2012).

El análisis combinado de series de experimentos mostró que no hubo diferencias significativas en el contenido de fenoles entre las dos especies de agave pulquero; pero, existieron diferencias significativas ($p \leq 0.01$) entre los diferentes métodos de elaboración de miel de maguey (Cuadro 15).

La liofilización fue el único método de elaboración de miel de maguey que conservó el valor nutracéutico del aguamiel, debido a que la baja temperatura de proceso permitió conservar las propiedades nutracéuticas del producto original (Ciurzyńska y Lenart, 2011). En contraste, la miel de maguey obtenida por evaporación a presión reducida presentó una pérdida de compuestos fenólicos de 26 %; probablemente debido al aumento de la actividad enzimática, ya que la velocidad de reacción se incrementa con la temperatura, lo que pudo favorecer la degradación de estos metabolitos (Levén y Schnürer, 2005). Sin embargo, no hubo diferencias estadísticas significativas en el contenido de fenoles entre la miel obtenida por liofilización y mediante evaporación a presión reducida (Figura 17); resultado importante, debido a que el método de deshidratación por liofilización es costoso para los productores a causa del alto consumo

de energía y a los altos costos de operación y mantenimiento (Ciurzyńska y Lenart, 2011; Flink, 1977).

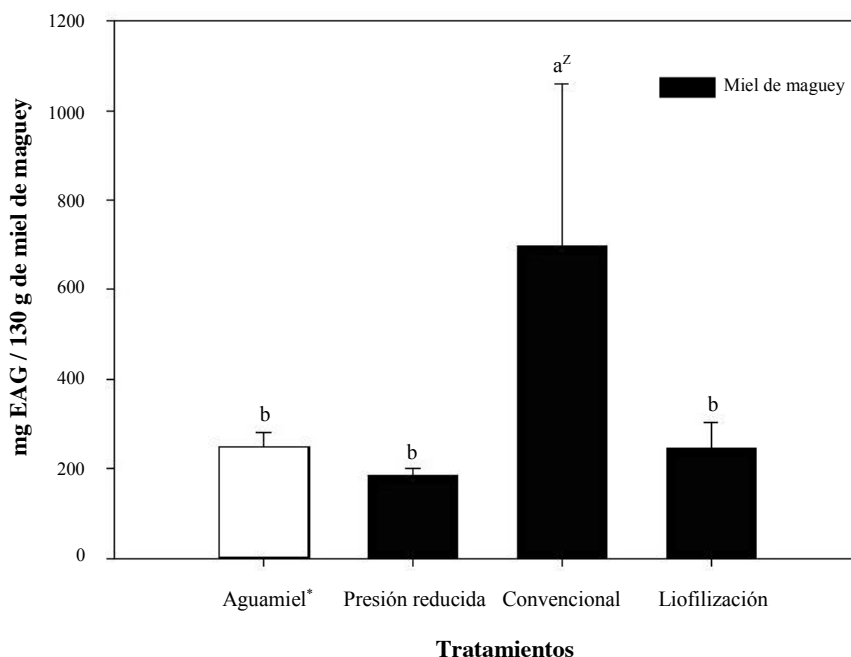


Figura 17. Contenido de compuestos fenólicos en miel de maguey obtenida por tres métodos (evaporación convencional, liofilización y evaporación a presión reducida).

Los valores reportados son la media $\pm$ desviación estándar, obtenidos mediante el análisis combinado de serie de experimentos. ^zMedias con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey, 0.01). *La concentración de fenóles totales se reporta en mg equivalentes de ácido gálico por litro de aguamiel. EAG: equivalentes de ácido gálico.

El contenido de compuestos fenólicos en la miel de maguey convencional fue estadísticamente superior al obtenido por los otros métodos de elaboración y al encontrado en aguamiel, aproximadamente tres veces mayor (Figura 17); sin embargo, originó la mayor variación en el contenido de estos metabolitos (200 y 1039 mg EAG en 100 g de miel), posiblemente a que es un método donde es difícil de controlar las condiciones de proceso (temperatura constante). El mayor contenido de compuestos fenólicos encontrado por este método se podría deber a la formación melanoidinas por las altas temperaturas de proceso, polímeros nitrogenados (marrones) generados durante

el tratamiento térmico del aguamiel como resultado de la reacción de Maillard (Hodge, 1953; Wang *et al.*, 2011). Estos pigmentos también pueden reaccionar con el reactivo de Folin-Ciocalteu, debido a que los compuestos fenólicos son componentes de la estructura de las melanoidinas (Pérez-Martínez *et al.*, 2010; Pastoriza y Rufián-Henares, 2014). Algunas investigaciones reportan melanoidinas presentes en la miel de abeja y en el grano de café, donde también los compuestos fenólicos contribuyen a la actividad funcional de estos compuestos (Brudzynski y Miotto, 2010; Gniechwitz *et al.*, 2008; Pastoriza y Rufián-Henares, 2014).

Flavonoides

Los flavonoides son uno de los grupos más abundantes y estudiados en los productos de origen vegetal (Drago Serrano *et al.*, 2006); sin embargo, en la miel de maguey se presentó un porcentaje mínimo de este tipo de metabolitos (Cuadro 15). El contenido medio de flavonoides fue 0.927 mg EQ 100 g⁻¹ de miel de agave. El contenido de fenoles totales fue estadísticamente superior en la miel de *A. mapisaga* (0.63-1.80 mg EQ 100 g⁻¹); sin embargo, fue menor a lo encontrado en miel de abeja (5.30 a 26.75 mg EQ 100 g⁻¹) (Escuredo *et al.*, 2013; Tornuk F. *et al.*, 2013). Ahumada-Santosa *et al.* (2013) señalan que varias especies de agave solo contienen trazas de flavonoides.

El análisis estadístico no mostró diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en la concentración de flavonoides entre los diferentes métodos de elaboración de miel de maguey. La concentración encontrada de flavonoides en miel de maguey fue menor a la de compuestos fenólicos, lo cual podría deberse a la abundante presencia de ácidos fenólicos como sucede en algunos frutos (Cui *et al.*, 2006). Almaraz-Abarca *et al.*

(2013 a y b) señalan que varias especies del género agave son una importante fuente de ácidos fenólicos.

Vitamina C

La vitamina C (ácido ascórbico) es un componente importante en los alimentos, debido a sus propiedades antioxidantes y terapéuticas (Naidu, 2003). Los resultados del contenido de vitamina C (Cuadro 15) demuestran que la miel de maguey es una buena fuente de este metabolito, en comparación con la miel de abeja (4.4 a 14.32 mg EAA 100 g⁻¹) (Escuredo *et al.*, 2013; Ferreira *et al.*, 2009); a excepción de la miel obtenida por el método convencional.

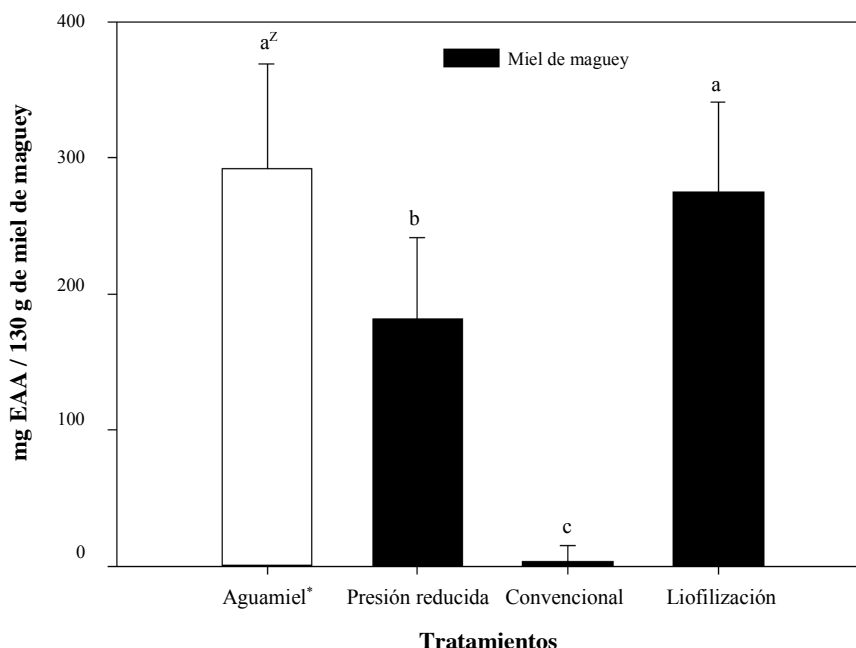


Figura 18. Contenido de vitamina C en miel de maguey obtenida por tres métodos (evaporación convencional, liofilización y evaporación a presión reducida).

Los valores reportados son la media $\pm$ desviación estándar, obtenidos mediante el análisis combinado de serie de experimentos. ^zMedias con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey, 0.01). *La concentración de vitamina C se expresó en mg equivalentes de ácido ascórbico por litro de aguamiel. EAA: equivalentes de ácido ascórbico.

No existieron diferencias significativas ($P > 0.01$) en el contenido de vitamina C entre la miel de maguey obtenida a partir de aguamiel de las dos especie de agave. El contenido

de este metabolito sólo estuvo determinado por el método de elaboración (Figura 18), debido a las diferentes condiciones de proceso (temperatura, presión y tiempo), ya que este compuesto es muy sensible y se degrada fácilmente por acción de diversos factores (alta temperatura, exposición a la luz, presencia de oxígeno, entre otros) (Gregory, 1996; Villota y Hawkes, 1992). La miel de maguey obtenida por evaporación a presión reducida (55°C y 157 mbar) presentó una pérdida de 37.70 %, con respecto a la concentración del aguamiel; sin embargo, se observó una pérdida mayor (98.66 %) cuando la miel se obtuvo por el método convencional (≈ 93 °C y presión atmosférica) (Figura 18). En cambio, la liofilización fue el único tratamiento que conservó el contenido de vitamina C del aguamiel en todas las muestras, debido a que este método conserva eficientemente los compuestos termosensibles al hacer uso de bajas temperaturas (Franks, 1998).

3.5. Actividad antioxidante

La miel de maguey mostró mayor actividad antioxidante (245-1122 $\mu\text{M ET } 100 \text{ g}^{-1}$) en comparación con la miel de abeja (130-460 $\mu\text{M ET kg}^{-1}$) (Tenore *et al.*, 2012), debido a la presencia de mayor contenido de compuestos antioxidantes (vitamina C y compuestos fenólicos).

Se encontraron diferencias significativas ($p \leq 0.01$) en la actividad antioxidante de la miel de maguey entre los diferentes métodos de deshidratación y especies de agave utilizadas para la obtención de aguamiel (Cuadro 16). La actividad antioxidante de la miel de *A. salmiana* fue estadísticamente superior a la encontrada en miel de *A. mapisaga*, presentando mayores porcentajes de inhibición del radical libre DPPH. El diferente valor nutracéutico del aguamiel de cada especie de agave determinó el

potencial antioxidante de la miel de maguey, pues el origen botánico (especie) determina la presencia de diferentes compuestos antioxidantes (Al-Mamarya *et al.*, 2002; Beretta *et al.*, 2005).

Cuadro 16. Porcentaje de inhibición de DPPH y actividad antioxidante de miel de maguey (*A. mapisaga* y *A. salmiana*) elaborada por tres métodos (evaporación convencional, liofilización y evaporación a presión reducida).

Especie	Método	% DPPH Inhibido		Actividad antioxidante ($\mu\text{M ET } 100 \text{ g}^{-1}$)	
<i>A. salmiana</i>	P. reducida	45.72	$\pm 4.58 \text{ b}^{\S}$	573.003	$\pm 55.98 \text{ b}$
<i>A. salmiana</i>	Liofilización	48.83	$\pm 1.06 \text{ b}$	610.991	$\pm 12.99 \text{ b}$
<i>A. salmiana</i>	Convencional	79.62	$\pm 12.73 \text{ a}$	987.235	$\pm 155.58 \text{ a}$
<i>A. mapisaga</i>	P. reducida	33.14	$\pm 5.19 \text{ a}$	419.309	$\pm 63.36 \text{ b}$
<i>A. mapisaga</i>	Liofilización	33.96	$\pm 7.06 \text{ a}$	429.308	$\pm 86.26 \text{ b}$
<i>A. mapisaga</i>	Convencional	71.07	$\pm 17.04 \text{ b}$	882.746	$\pm 208.20 \text{ a}$

Los valores reportados son la media de 5 repeticiones $\pm$ desviación estándar. § Medias con la misma letra, en una misma columna y especie, son estadísticamente iguales (Tukey, 0.01). DPPH: radical libre radical 1,1-difenil-2-picrilhidrazilo. ET: equivalentes de Trolox.

La Figura 19 muestra el efecto de los diferentes tratamientos sobre el potencial antioxidante del aguamiel. Las muestras de miel de maguey obtenidas por liofilización y evaporación reducida fueron estadísticamente iguales al aguamiel en la capacidad antioxidante. La evaporación a presión reducida conservó la actividad antioxidante, pese a que este método causó la disminución del contenido de vitamina C durante el proceso. El método convencional causó un incremento en la actividad antioxidante de aproximadamente el 61.50 %, con respecto al aguamiel; mostrando el doble de porcentaje de inhibición del radical libre DPPH en comparación con los otros métodos (Cuadro 16), pese a que originó la pérdida del contenido de vitamina C. La actividad antioxidante de la miel de maguey obtenida por evaporación a presión reducida y por el

método convencional se pudo mantener o incrementar debido a que las altas temperaturas de proceso promovieron la formación de melanoidinas, pigmentos antioxidantes producto de la reacción de Maillard, como sucede en el proceso de tostado del café (Del Castillo *et al.*, 2002; Votavova *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2011).

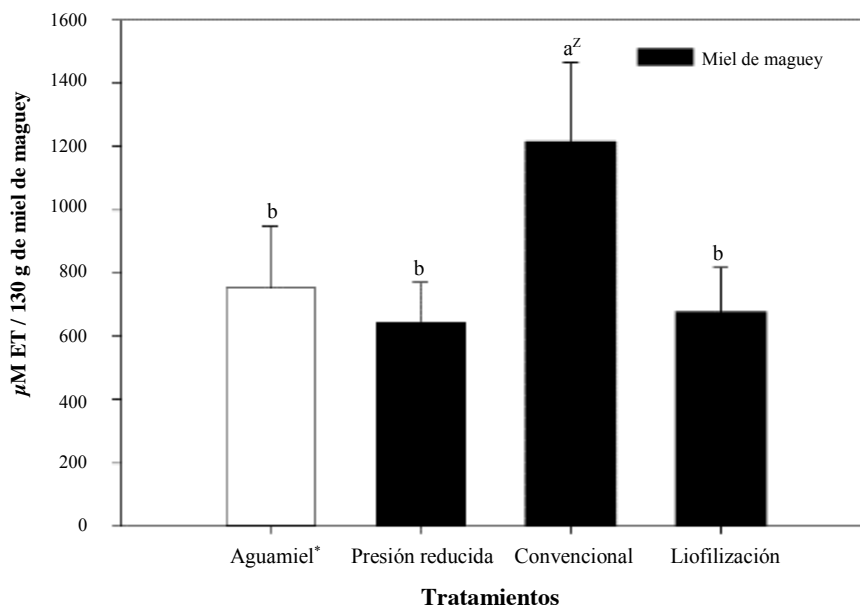


Figura 19. Actividad antioxidante en miel de maguey obtenida por tres métodos (evaporación convencional, liofilización y evaporación a presión reducida).

Los valores reportados son la media $\pm$ desviación estándar, obtenidos mediante el análisis combinado de serie de experimentos. ^zMedias con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey, 0.01). *La actividad antioxidante del aguamiel es reportada en μ M de equivalentes de Trolox por litro.

3.6. Análisis de correlación

Para obtener una perspectiva general del grado de asociación entre la capacidad antioxidante de la miel de maguey con algunos de sus componentes nutricionales y fitoquímicos, se determinó el coeficiente de correlación de Pearson (Cuadro 17).

Los resultados mostraron que existe una correlación altamente significativa entre el contenido de fenoles y el índice de oscurecimiento (productos de la reacción de Maillard), a causa de que los compuestos fenólicos son parte de la estructura de las melanoidinas (Adams *et al.*, 2005); por lo que una miel más oscura presentó mayor contenido de fenólicos y, por consiguiente, melanoidinas.

El contenido de vitamina C presentó una correlación negativa con el índice de oscurecimiento y luminosidad (Cuadro 17), por lo que el contenido de esta vitamina fue menor en las mieles más oscuras: miel de maguey convencional. Lo anterior, debido a que la degradación del ácido ascórbico proporciona grupos carbonilos que actúan como precursor del oscurecimiento no enzimático, siendo un mecanismo para la formación de pigmentos marrones (melanoidinas) (Fustier *et al.*, 2011; Nagy, 1980; Löschner *et al.*, 1990).

La correlación entre la actividad antioxidante con el contenido de fenoles, vitamina C, índice de oscurecimiento, proteína y K fue estadísticamente significativa. Debido a que la actividad antioxidante de la miel es producto del efecto combinado de diversos compuestos, como son fenoles, enzimas, productos de la reacción de Maillard y otros compuestos menores (minerales) (Baltrušaityte *et al.*, 2007; Escriche *et al.*, 2014).

La capacidad antioxidante de la miel de maguey está correlacionada positivamente con el contenido de proteína, K y luminosidad, debido a que algunos aminoácidos presentan actividad antioxidante (Saxena *et al.*, 2010) y a que ciertos minerales pueden actuar como donadores de electrones (Sant'Ana *et al.*, 2012). Así mismo, el color de la miel refleja el contenido de pigmentos con propiedades antioxidantes (Frankel *et al.*, 1998).

Se encontró una fuerte correlación positiva entre la actividad antioxidante, contenido de fenoles e índice de oscurecimiento (determinación indirecta del contenido de melanoidinas), lo que indicó que los compuestos fenólicos (ácido fenólicos) y las melanoidinas contribuyen principalmente a la actividad antioxidante de la miel de maguey, en comparación con los otros metabolitos; los cuales se ha demostrado que poseen fuerte actividad antioxidante (Shahidi y Naczk, 2004; Morales y Jiménez-Pérez, 2004).

Cuadro 17. Matriz de correlación de Pearson entre la actividad antioxidante, fitoquímicos y algunos parámetros físico-químicos de la miel de maguey.

	K	Proteína	Índice de oscurecimiento	Vitamina C	Fenoles	Actividad antioxidante
Luminosidad (L*)	-0.4057	-0.1023	-0.4851*	0.7955*	-0.6449*	-0.6432*
Potasio (K)		0.4484	0.3935	-0.3386	0.3892	0.4829*
Proteína			0.4367	-0.1169	0.3640	0.4973*
Índice de oscurecimiento				-0.6033*	0.8273*	0.7579*
Vitamina C					-0.5949*	-0.6846*
Fenoles						0.7820*
Flavonoides						-0.3368
Calcio						-0.0438
Hierro						0.3361
Magnesio						0.4174
Sodio						-0.5102*
Carbohidratos						0.2982

*Correlación estadísticamente significativa ($p \leq 0.01$).

3.7. Análisis de componentes principales

Una vez que se estudió el comportamiento individual de cada compuesto de la miel de maguey, se realizó un análisis de componentes principales (ACP) para tratar de agrupar las muestras de miel de acuerdo a sus características físico-químicas, nutricionales y nutraceuticas. En el ACP se excluyeron las variables SST (°Brix), sacarosa, humedad y

carbohidratos totales, debido a su correlación altamente significativa con el contenido de azúcares totales; así como *croma* por su correlación con *hue* y la actividad antioxidante, K y el índice de oscurecimiento por su fuerte correlación con fenoles totales.

Los primeros dos componentes explicaron el 79.65 % de la variabilidad de los datos. El CP1 presentó asociación positiva con el contenido de fenoles, azúcares totales y viscosidad, y asociación negativa con *hue*, vitamina C y luminosidad (L^*). El CP2 tuvo fuerte asociación positiva con Fe, azúcares reductores y proteína, y negativa con viscosidad y azúcares totales.

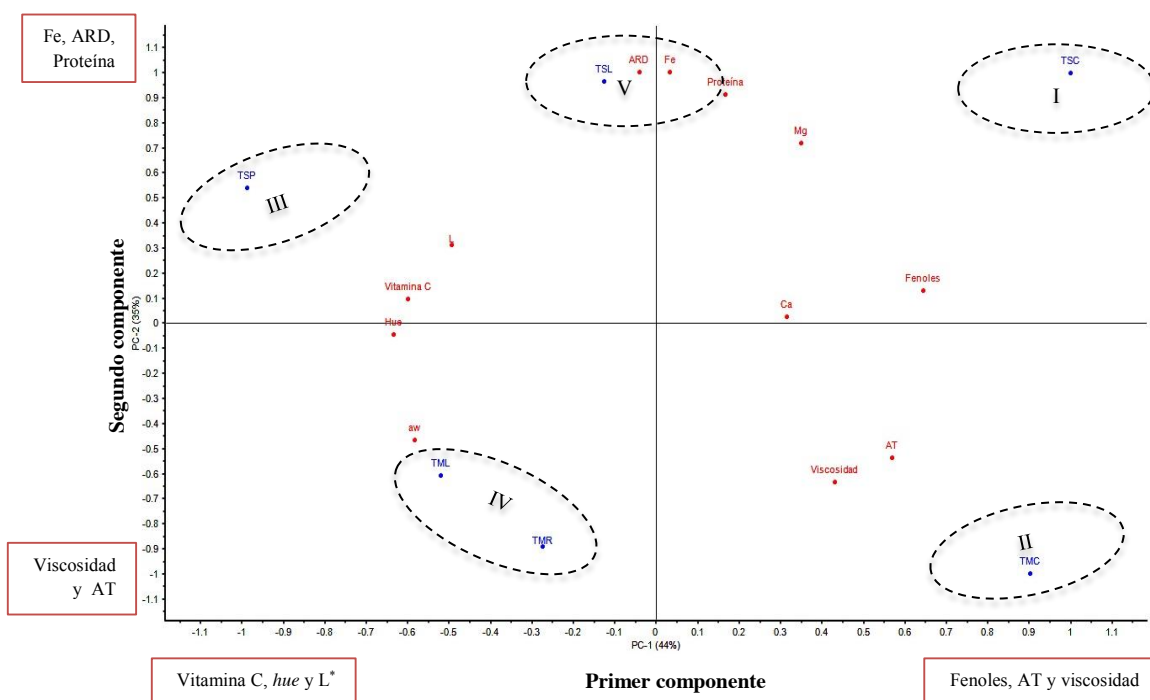


Figura 20. Agrupación de muestras de miel de miel de maguey (*A. salmiana* y *A. mapisaga*) obtenidas por tres métodos (liofilización, evaporación convencional y a presión reducida), con base en características físico-químicas, nutricionales y nutraceuticas.

Tratamientos: TSP (Miel de *A. salmiana* obtenida por evaporación a presión reducida), TSL (Miel de *A. salmiana* obtenida por liofilización), TSC (Miel de *A. salmiana* obtenida por evaporación convencional), TMR (Miel de *A. mapisaga* obtenida por evaporación a presión reducida), TML (Miel de *A. mapisaga* obtenida por liofilización) y TMC (Miel de *A. mapisaga* obtenida por evaporación convencional).

ARD: azúcares reductores directos, AT: azúcares totales, Hue: ángulo de tono, L: luminosidad, a_w: actividad de agua, Fe: hierro, Mg: magnesio y Ca: calcio.

La gráfica de proyecciones del primer (CP1) y segundo componente (CP2) permitió separar en cinco grupos a las muestras de miel de maguey (Figura 20), lo que indicó que no fue posible agrupar a las muestras de miel de las dos especies de agave, debido a las diferentes características físico-químicas del aguamiel obtenido de los diversos maguey pulqueros.

No fue posible agrupar a la miel de *Agave salmiana* obtenida por los diferentes métodos de deshidratación, debido a su diferente valor nutracéutico; sin embargo, se caracterizó por su mayor contenido de Fe (8.43 a 11.41 mg 100 g⁻¹), proteína (2.99 a 4.42 %) y azúcares reductores directos (47 a 63 %), en contraste con la miel de *A. mapisaga*. La miel obtenida por el método convencional conformó el grupo I, que se distinguió por su mayor contenido de compuestos fenólicos. Las muestras de miel obtenidas por liofilización y evaporación a presión reducida conformaron los grupos V y III, respectivamente. La miel de maguey del grupo III presentó el menor contenido de compuestos fenólicos; pero mayor contenido de Vitamina C que el grupo I. La miel del grupo V presentó mayor contenido de vitamina C, en comparación con los grupos I y III.

La miel de *Agave mapisaga* integró los grupos II y IV, el cual fue de mayor contenido de azúcares totales en comparación con la miel de *A. salmiana*. Las muestras de miel obtenidas por liofilización y evaporación a presión reducida integraron el grupo I, el cual se caracterizó por ser de mayor contenido de vitamina C, *hue* y *L**; pero menor contenido de compuestos fenólicos que el grupo IV. Las muestras de miel de maguey de los grupos I y II fueron más oscuras (menor *L**), asociado a la formación de productos de la reacción de Maillard, y de mayor actividad antioxidante.

3.8. Análisis de correlación canónica

Para realizar el análisis de correlación canónica se separaron a las variables respuestas en dos grupos: nutricionales y nutraceuticas. La Figura 21 muestra una fracción de la estructura canónica de cada grupo con sus variables originales, observándose que la primera correlación canónica significativa explico el 59 % de la variabilidad de los datos; las primeras dos correlaciones canónicas explicaron el 96 % de la variabilidad.

La variable canónica “nutricional” estuvo altamente asociada con proteína, potasio y, en menor medida, con azúcares reductores directos y totales; en cambio, el contenido de sodio se asoció negativamente con el valor nutricional. En la variable “nutraceutica” estuvo únicamente asociada positivamente con la actividad antioxidante, contenido de fenoles totales e índice de oscurecimiento.

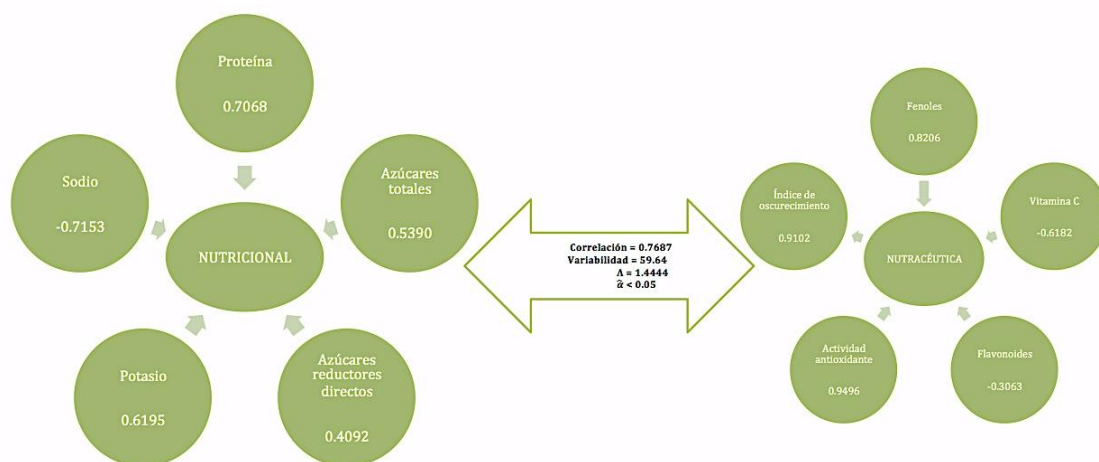


Figura 21. Correlación canónica de la primera variable canónica y la correlación simple con sus respectivas variables originales.

El análisis de redundancia mostró que el primer par de variables canónicas es el mejor predictor del grupo de variables opuestas, aportando la mayor cantidad a la proporción

de la varianza: 0.2267 dentro de la variable nutricional y 0.4489 en las variables nutraceuticas.

La variable “nutricional” estuvo fuertemente asociada con la variable “nutracéutica” (0.76), lo que sugiere que un alto contenido de proteína y potasio, así como la presencia de azúcares, estarán asociados a un mayor contenido de compuestos fenólicos, índice de oscurecimiento (melanoidinas) y actividad antioxidante en la miel. Estos resultados coinciden con lo obtenido mediante la correlación de Pearson; sin embargo, el análisis multivariado mostró una ligera asociación estadística entre el contenido de azúcares y la variable “nutracéutica”. Lo anterior debido a que los azúcares reductores reaccionan con grupos amino (aminoácidos libres y proteínas), a causa de las altas temperaturas de proceso (reacción de Maillard), formándose melanoidinas (Wang *et al.*, 2011); compuestos antioxidantes que contribuyen al valor nutraceutico de la miel de maguey.

4. CONCLUSIONES

La miel de maguey es un producto rico en azúcares, proteína, minerales y compuestos antioxidantes. Los atributos nutricionales y nutracéuticos de la miel de maguey dependieron del método de elaboración y de la especie de agave utilizada para la obtención de aguamiel. El aguamiel obtenido de *A. salmiana* permitió obtener miel de maguey con mayor contenido de azúcares reductores directos, compuestos fenólicos, vitamina C y actividad antioxidante, por lo que fue la mejor por su calidad nutracéutica.

La liofilización fue el método que conservó los compuestos antioxidantes del aguamiel; sin embargo, presentó la misma capacidad antioxidante que la miel de maguey obtenida por evaporación a presión reducida. La capacidad antioxidante de la miel de maguey obtenida por evaporación a presión reducida y por el método convencional se pudo mantener e incrementar, respectivamente; posiblemente debido a la formación de melanoidinas (compuestos antioxidantes).

La miel de maguey más oscura, obtenida por el método convencional, presentó mayor actividad antioxidante, asociada a alto contenido de compuesto fenólicos y productos de la reacción de Maillard (melanoidinas), así como al efecto sinérgico con algunos otros nutrientes (minerales y proteína); pero, causó la pérdida de vitamina C.

5. LITERATURA CITADA

- Adams, A.; Borrelli, R.S.; Fogliano, V.; De Kimpe, N. 2005. Thermal degradation studies of food melanoidins. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 53 (10): 4136–4142.
- Ahumada-Santosa, Y. P., Montes-Avila, J.; Uribe-Beltrán, M.; Díaz-Camacho, S. P., López-Angulo, G.; Vega-Aviña, R.; López-Valenzuela, J.A.; Herediac, J.B.; Delgado-Vargas, F. 2013. Chemical characterization, antioxidant and antibacterial activities of six Agave species from Sinaloa, Mexico. *Industrial Crops and Products* 49: 143-149.
- Al-Mamarya, M.; Al-Meerib, A.; Al-Habori, M. 2002. Antioxidant activities and total phenolics of different types of honey. *Nutrition Research* 22: 1041–1047.
- Almaraz-Abarca, N.; Delgado-Alvarado, E.; Ávila-Reyes, J.; Uribe-Soto, J.; Gonzále-Valdez, L. 2013a. The phenols of the genus Agave (*Agavaceae*). *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology* 4: 9-16.
- Almaraz-Abarca, N.; González-Elizondo, M. S.; Campos, M. G.; Ávila-Sevilla, Z. E.; Delgado-Alvarado, E. A.; Ávila-Reyes, J. A. 2013 b. Variability of the foliar phenol profiles of the *Agave victoriae-reginae* complex (*Agavaceae*). *Botanical Science* 91 (3): 295-306.
- Alves, A.; Ramos, A.; Gonçalves, M.; Bernardo, M.; Mendes, B. 2013. Antioxidant activity, quality parameters and mineral content of Portuguese monofloral honeys. *Journal of Food Composition and Analysis* 30: 130–138.
- Ames, B. N.; Shigenaga, M. K.; Hagen, T. M. 1993. Oxidants, antioxidants, and the degenerative diseases of aging. *Proceedings of the National Academy of Science* 90: 7915–7922.
- Anderson, T. W. 2003. An introduction to multivariate statistical analysis, 3rd ed. Wiley-Interscience. New York, New York, USA. 752 p.
- AOAC (Association of Official Analytical Chemists). 2000. *Methods of Analysis*. 17va. edición. Washington, Estados Unidos de América.
- Arvouet-Grand, A.; Vennat, B.; Pourrat, A.; Legret, P. 1994. Standardisation d'un extrait de propolis et identification des principaux constituants. *Journal of Pharmaceutical Sciences* 49: 462–468.
- Baltrušaityte, V.; Rimantas-Venskutonis, P.; Čeksteryte, V. 2007. Radical scavenging activity of different floral origin honey and beebread phenolic extracts. *Food Chemistry* 101(2): 502–514.
- Beretta, G.; Granata, P.; Ferrero, M.; Orioli, M.; Maffei Facino, R. 2005. Standardization of antioxidant properties of honey by a combination of spectrophotometric/fluorimetric assays and chemometrics. *Analytica Chimica Acta* 533: 185–191.
- Brand-Williams, W.; Culivier, M. E.; Berset, C. 1995. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT-Food Science and Technology* 28: 25-30.
- Brown, J. E. 2011. *Nutrition: through the life cycle*, 4ª edición. Minnesota, USA: Wadsworth, Cengage Learning. 516 p.
- Brudzynski, K.; Miotto, D. 2010. The relationship between the content of Maillard reaction-like products and bioactivity of Canadian honeys. *Food Chemistry* 124: 869–874.

- Brudzynski, K.; Miotto, D. 2011. Honey melanoidins: analysis of the compositions of the high molecular weight melanoidins exhibiting radical-scavenging activity. *Food Chemistry* 127: 1023–1030.
- Burdurlu, H. S.; Koca, N.; Karadeniz, F. 2006. Degradation of vitamin C in citrus juice concentrates during storage. *Journal of Food Engineering* 74: 211–216.
- Chirife, J.; Zamora, M. C.; Motto, A. 2006. The correlation between water activity and % moisture in honey: fundamental aspects and application to Argentine honeys. *Journal of Food Engineering* 72: 287–292.
- Ciurzyńska, A.; Lenart, A. 2011. Freeze-Drying: application in food processing and biotechnology—A Review. *Polish Journal Of Food And Nutrition Sciences* 61 (3): 165–171.
- Cui, N.; Nakamura, K.; Tian, S.; Kayahara, H.; Tian, Y. 2006. Polyphenolic content and physiological activities of chinese hawthorn extracts. *Bioscience Biotechnology and Biochemistry* 70: 2948–2956 .
- De Alda-Garcilope, C.; Gallego-Picó, A.; Bravo-Yagüe, J.; Garcinuño-Martínez, R.; Fernández-Hernando, P. 2012. Characterization of Spanish honeys with protected designation of origin “miel de Granada” according to their mineral content. *Food Chemistry* 135: 1785–1788.
- Del Castillo, M.D.; Ames, J.M.; Gordon, M.H. 2002. Effect of roasting on the antioxidant activity of coffee brews. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50: 3698–3703.
- Dillard, C. J.; German, J. B. 2000. Phytochemicals: nutraceuticals and human health. Review. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 80 (12): 1744–1756.
- Doner, L. 2003. Honey. En Caballero, B.; Trugo, L.; Finglas, P. *Encyclopedia of food sciences and nutrition*, 2ª edición. Oxford, UK: Academic Press. 3125–3130 pp.
- Drago Serrano, M. E.; López López, M.; Sainz Espuñes, T. D. 2006. Componentes bioactivos de alimentos funcionales de origen vegetal. *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas* 37 (4): 58–68.
- Escriche, I.; Kadar, M.; Juan-Borrás, M.; Domenech, E. 2014. Suitability of antioxidant capacity, flavonoids and phenolic acids for floral authentication of honey. Impact of industrial thermal treatment. *Food Chemistry* 142: 135–143.
- Escuredo, O.; Míguez, M.; Fernández-González, M.; Seijo, M. C. 2013. Nutritional value and antioxidant activity of honeys produced in a European Atlantic area. *Food Chemistry* 138: 851–856.
- Féas, X.; Pires, J.; Estevinho, M.; Iglesias, A.; Araújo, J. 2010. Palynological and physicochemical data characterisation of honeys produced in the Entre-Douro e Minho region of Portugal. *International Journal of Food Science and Technology* 45: 1255–1262.
- Ferreira, I. C.; Aires, E.; Barreira, J. C.; Estevinho, L. M. 2009. Antioxidant activity of Portuguese honey samples: different contributions of the entire honey and phenolic extract. *Food Chemistry*, 114: 1438–1443.
- Flink, J. 1977. Energy analysis in dehydration processes. *Food Technology*, 31: 76–83.
- Frankel, S.; Robinson, G.E.; Berenbaun, M.R. 1998. Antioxidant capacity and correlated characteristics of 14 unifloral honeys. *Journal of Apicultural Research* 37: 27–31.
- Franks, F. 1998. Freeze-drying of bioproducts: putting principles into practice. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics* 45: 221–229.
- Fustier, P.; St-Germain, F.; Lamarche, F.; Mondor, M. 2011. Non-enzymatic browning and ascorbic acid degradation of orange juice subjected to electroreduction and electro-oxidation treatments . *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 12: 491–498.

- García-Mendoza, A. 2011. Fascículo 88. Agavaceae. En Flora del Valle de Tehuacán-Cuicatlán. D.F., México: Instituto de Biología, UNAM. 95 p.
- Gniechwitz, D.; Reichardt, N.; Ralph, J.; Blaut, M.; Steinhart, H.; Bunzel, M. 2008. Isolation and characterisation of a coffee melanoidin fraction. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 88: 2153–2160.
- González-Miret, M. L.; Terrab, A.; Herranz, D.; Fernández-Recamales, M. A.; Heredia, F. J. 2005. Multivariate correlation between color and mineral composition of honey and by their botanical origin. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 53 (7): 2574–2580.
- Gregory, J. 1996. Vitamins. En *Food Chemistry*, 3ª edición. New York: Marcel Dekker. 431–530 pp.
- Gupta, J.; Sharma, R. 2009. Production technology and quality characteristics of mead and fruit-honey wines: a review. *Natural Product Radiance* 8 (4): 345-355.
- Hodge, J. E. 1953. Chemistry of browning reactions in model systems. *Journal Agricultural and Food Chemistry* 1 (15): 928–943.
- Hutchings, J. B.; Luo, M. R.; Ji, W. 2012. Food appearance and expectations in color. En *Color in Food: Technological and Psychophysical Aspects*: 3-10.
- Igual, M.; García-Martínez, E.; Camacho, M. M. N. 2013. Jam processing and storage effects on β -carotene and flavonoids content in grapefruit. *Journal of Funtional Foods* 5: 736-744.
- Jolliffe, I. 2005. Principal component analysis. *Encyclopedia of Statistics in Behavioral Science*. 2352 p.
- Krokida, M. K.; Maroulis, Z. B.; Saravacos, G. D. 2001. The effect of the method of drying on the colour of dehydrated products. *International Journal of Food Science and Technology* 36: 53-59.
- Lappe-Oliveras, P.; Moreno-Terrazas, R.; Arrizón-Gaviño, J.; Herrera-Suárez, T.; García-Mendoza, A.; Gschaedler-Mathis, A. 2008. Yeasts associated with the production of Mexican alcoholic nondistilled and distilled Agave beverages. *FEMS Yeast Research* 8: 1037–1052 .
- Lee, J.; Koo, N.; Min, D. 2004. Reactive oxygen species, aging and antioxidative nutraceuticals. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 3: 21-33.
- Levén, G.; Schnürer, A. 2005. Effects of temperature on biological degradation of phenols, benzoates and phthalates under methanogenic conditions. *International Biodeterioration and Biodegradation* 55 (1): 153-160.
- López Bonilla, A.; Arenas Ocampo, M. L. 2010. Elaboración y caracterización de jarabe rico en fructosa a partir de los agaves (*Agave tequilana* Weber y *Agave angustifolia* Haw). Yautepec, Morelos. Tesis: Maestría en Ciencias en Desarrollo de Productos Bióticos, CEPROBI, IPN.
- Löschner, J.; Kroh, L.; Vogel, J. 1990. L-Ascorbic acid: a carbonyl component of non-enzymatic browning reactions. Browning of L-ascorbic acid in aqueous model system. *Z Lebensm Unders Forsch Journal* 191: 302-305.
- Loyola-Montemayor, E. 1956. La industria del pulque. México: Departamento de Investigaciones Industriales. Banco de México SA.
- Martínez Garza, A. 1994. Experimentación agrícola: métodos estadísticos. Universidad Autónoma Chapingo, México. 357 p.
- McGuire, R. G. 1992. Reporting of objecting color measurements. *HortScience* 27: 1254-1255.

- Meda, A.; Lamien, C.; Romito, M.; Millogo, J.; Nacoulma, O. 2005. Determination of the total phenolic, flavonoid and proline contents in Burkina Fasan honey as well as their radical scavenging activity. *Food chemistry* 91: 571-577.
- Mellado-Mojica, E.; López-Pérez, M. G. 2013. Análisis comparativo entre jarabe de agave azul (*Agave tequilana* Weber var. azul) y otros jarabes naturales. *Agrociencia* 47 (3): 233-244.
- Morales, F. J.; Jiménez-Pérez, S. J. 2004. Peroxyl radical scavenging activity of melanoidins in aqueous systems. *European Food Research and Technology* 218: 515-520.
- Nagy, S. 1980. Vitamin C contents of citrus fruit and their products: a review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 28: 8-18.
- Naidu, K. A. 2003. Review: vitamin C in human health and disease is still a mystery? An Overview. *Nutrition Journal* 2 (7): 1-10.
- Oroian, M. 2013. Measurement, prediction and correlation of density, viscosity, surface tension and ultrasonic velocity of different honey types at different temperatures. *Journal of Food Engineering* 119: 167-172.
- Ortiz-Basurto, R. I.; Pourcelly, G.; Dogo, T.; Williams, P.; Dornier, M.; Belleville, M. P. 2008. Analysis of the main components of the aguamiel produced by the maguey-pulquero (*Agave mapisaga*) throughout the harvest period. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 56: 3682-3687.
- Pastoriza, S.; Rufián-Henares, J. A. 2014. Contribution of melanoidins to the antioxidant capacity of the Spanish diet. *Food Chemistry* 164: 438-445.
- Pérez-Martínez, M.; Caemmerer, B.; Paz de Peña, M.; Cid, C.; Kroh, L. 2010. Influence of brewing method and acidity regulators on the antioxidant capacity of coffee brews. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 58: 2958-2965.
- Rodríguez, B. A.; Mendoza, S.; Iturriga, H. M.; Castaño-Tostado, E. 2012. Quality parameters and antioxidant and antibacterial properties of some mexican honeys. *Journal of Food Science* 71: 22-27.
- Sant'Ana, L.; Sousa, J.; Salgueiro, F.; Affonso, M. C.; Castro, R. 2012. Characterization of monofloral honeys with multivariate analysis of their chemical profile and antioxidant activity. *Journal of Food Science* 71 (1): 135-140.
- SAS Institute. 2002. Statistical Analysis System Version 9.2. SAS Institute Inc., Cary, North Carolina, USA.
- Saxena, S.; Gautam, S.; Sharma, A. 2010. Physical, biochemical and antioxidant properties of some Indian honeys. *Food Chemistry* 118 (2): 391-397.
- Saxena, M.; Saxena, J.; Nema, R.; Singh, D.; Gupta, A. 2013. Phytochemistry of medicinal plants. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry* 1 (6): 168-182.
- Secretaría de Economía. 2008. NMX: Alimentos - Jarabe de agave 100 %. Especificaciones y métodos de prueba. Dirección General de Normas, México.
- Shahidi, F.; Nacz, M. 2004a). Phenolics in food and nutraceuticals: Sources, Applications and Health Effects. USA: CRC Press.
- Shi, J.; Le Maguer, M.; Kakuda, Y.; Liptay, A.; Kiekamp, F. 1999. Lycopene degradation and isomerisation in tomato dehydration. *Food Research International* 32: 15-21.
- Singleton, V. L.; Rossi, J. A. 1965. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture* 16: 144-158.
- Tenore, G. C.; Ritieni, A.; Campiglia, P.; Novellino, E. 2012. Nutraceutical potential of monofloral honeys produced by the Sicilian black honeybees (*Apis mellifera* ssp. *sicula*). *Food and Chemical Toxicology* 50: 1955-1961.

- Tornuk, F.; Karaman, S.; Ozturk, I.; Toker, O. S.; Tastemur, B.; Sagdic, O.; Dogan, M.; Kayacier, A. 2013. Quality characterization of artisanal and retail Turkish blossom honeys: determination of physicochemical, microbiological, bioactive properties and aroma profile. *Industrial Crops and Products* 46: 124–131.
- Tuberoso, C. I.; Jerkovic, I.; Sarais, G.; Congiu, F.; Marijanovic', Z.; Marek Kus', P. 2014. Color evaluation of seventeen European unifloral honey types by means of spectrophotometrically determined CIE L*C*h° chromaticity coordinates. *Food Chemistry* 145: 284–291.
- Turkmen, N.; Sari, F.; Poyrazoglu, E. S.; Velioglu, Y. S. 2006. Effects of prolonged heating on antioxidant activity and colour of honey. *Food Chemistry* 95: 653–657 .
- Villota, R.; Hawkes, J. 1992. Reaction kinetics in food systems. In *Handbook of Food Engineering*. New York: Marcel Dekker.
- Votavova, L.; Voldrich, M.; Sevcik, R.; Cizkova, H.; Mle-jnecka, J.; Stolar, M.; Fleisman, T. 2009. Changes on the antioxidant capacity of robusta coffee during roasting. *Czech Journal of Food Science* 27: S49-S52.
- Wang, H.-Y.; Qian, H.; Wei-Rong, Y. 2011. Melanoidins produced by the Maillard reaction: structure and biological activity. *Food Chemistry* 128: 573-584.
- Yanniotis, S.; Skaltsi, S.; Karaburnio, S. 2006. Effect of moisture content on the viscosity of honey at different temperatures. *Journal of Food Engineering* 72: 372–377.
- Yao, L. H.; Jiang, Y. M.; Shi, J.; Tomás-Barberán, F. A.; Datta, N.; Singanusong, R.; Chen, S. S. 2004. Flavonoids in food and their health benefits. *Plant Foods for Human Nutrition* 59 (3): 113–122.
- Yeddes, N.; Cherif, J. K.; Guyot, S.; Helene, S.; Ayadi, M. 2013. Comparative study of antioxidant power, polyphenols, flavonoids and betacyanins of the peel and pulp of three *Tunisian Opuntia* forms. *Antioxidants*: 37-51.

VI. CONCLUSIONES GENERALES

El aguamiel y la miel de maguey son buena fuente de azúcares, proteína, K, Fe y compuestos antioxidantes. El valor nutricional y potencial nutraceutico de estos productos está determinado por la especie de agave, condiciones de manejo y condiciones edafoclimáticos.

El aguamiel más oscuro, obtenido del cultivar *cerro* de *A. salmiana* (Estado de Hidalgo), presentó mayor actividad antioxidante; asociada a su alto contenido de compuestos fenólicos y a un efecto sinérgico por la presencia de diversos nutrientes (proteína y minerales).

La miel de maguey presentó mayor contenido de proteínas, minerales, vitamina C, compuestos fenólicos y actividad antioxidante en comparación con mieles comerciales de abeja; pero menor contenido de azúcares reductores directos.

El método convencional ocasionó la pérdida del contenido de vitamina C en la miel de maguey; sin embargo, la actividad antioxidante de esta miel de maguey fue mayor que la del aguamiel y que la miel obtenida por liofilización y evaporación a presión reducida. El contenido de fenoles y la formación posibles melanoidinas (pigmentos oscuros) contribuyen principalmente a la actividad antioxidante de la miel de maguey; por lo que, una miel más oscura tiene mayor valor nutraceutico.

La miel de *A. salmiana* presentó mayor contenido de Fe, proteína, azúcares reductores directos y actividad antioxidante en comparación con la miel de *A. mapisaga*.

El aguamiel y la miel de maguey pulquero pueden considerarse como alimentos con calidad nutraceutica, debido a su valor nutricional y su contenido de compuestos antioxidantes.

VII. RECOMENDACIONES

Se sugiere evaluar el efecto de diferentes tiempos de añejado del maguey en la calidad nutracéutica del aguamiel.

Se recomienda realizar un análisis sensorial para conocer el punto de vista de los consumidores potenciales, sobre las características del aguamiel de los diferentes cultivares y especies de agave. Asimismo, evaluar que método de elaboración de miel de maguey permite obtener una miel con mayor aceptabilidad global.

Es necesario evaluar el efecto de cada método de elaboración de miel de maguey en la posible formación de compuestos dañinos para la salud, como es el hidroximetilfurfural que se puede formar durante el tratamiento térmico de carbohidratos.