



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTADES DE CIENCIAS QUÍMICAS, INGENIERÍA Y MEDICINA
PROGRAMAS MULTIDISCIPLINARIOS DE POSGRADO EN CIENCIAS
AMBIENTALES

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES

**“ESTUDIOS SOBRE LOS SUBPRODUCTOS DE LA ELABORACIÓN DEL
MEZCAL, Y USOS ALTERNATIVOS DEL MAGUEY”**

PRESENTA:

M. C. Cesar Iván Godínez Hernández

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Juan Rogelio Aguirre Rivera

ASESORES:

Dra. Bertha Irene Juárez Flores

Dra. María Deogracias Ortiz Pérez

CRÉDITOS INSTITUCIONALES

PROYECTO REALIZADO EN:

**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DE ZONAS DESÉRTICAS
DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ**

CON FINANCIAMIENTO DE:

FAI: C14 - FAI - 04 - 61.61

A TRAVÉS DEL PROYECTO DENOMINADO:

**“EVALUACIÓN DE LAS DIFERENTES ETAPAS DEL PROCESO DE ELABORACIÓN
DE MEZCAL”**

AGRADEZCO A CONACyT EL OTORGAMIENTO DE LA BECA-TESIS

Becario No. 289510

**EI DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES RECIBE APOYO ATRAVÉS
DEL PROGRAMA NACIONAL DE POSGRADOS DE CALIDAD (PNPC)**

Agradecimientos

A mis profesores del Instituto de Investigación de Zonas Desérticas que alguna vez me dieron clase, y que siempre fueron motivación para llegar hasta este momento de mi vida profesional.

A mis asesoras Dra. Bertha Irene Juárez Flores y Dra. María Deogracias Ortiz Pérez porque siempre recibí de ustedes buenos consejos y mucho conocimiento.

En especial a mi director de tesis el Dr. Juan Rogelio Aguirre Rivera por tenerme tanta paciencia, por compartirme su conocimiento, por sus atinados puntos de vista y por ser tan bondadoso con sus enseñanzas, toda una persona honorable; a su esposa Araceli por su amistad sincera.

Al Dr. Jaime Becerra Jiménez por ser un buen amigo y por tener siempre esa disposición de ayudar y compartir su conocimiento especializado, por sus clases de inglés y sus sabios consejos.

A mí familia, mi esposa Verónica y nuestro hijo Iván Maximiliano que todos los días nos llena de alegrías, y espero que así sea siempre.

A mis padres José Ángel y Antonia y hermanos Paty, Luís, Néstor, Alan y Lorena por su apoyo incondicional.

A Josefina Acosta por su amistad, calidad humana y por su apoyo en el laboratorio y a Maru por sus consejos.

A mis amigos Evelyn Regalado, Octavio Negrete, Joab, Miguel Guerrero, Nereyda, Flor Tristán, Carmen Segura, Cynthia Zamora y Carlos Vázquez.

Al Dr. Rigoberto Castro y la Dra. Gisela Benítez por su amistad y abrirme las puertas su casa y por compartir momentos con su familia.

A todos los estudiantes de servicio social y prácticas profesionales porque siempre tuve apoyo de ellos Casandra, Norma, Lizet, Myriam González, Mónica, Karla, Carmen Mejía.

Al personal del Instituto de Investigación de Zonas Desérticas por su disposición y apoyo para el desarrollo de mi trabajo encomendado, especialmente a Juan Miguel que siempre me apoyó sin que fuera su obligación a trabajar lo que fuera con el maguey.

Al Ing. Manuel Pérez de la fábrica de mezcal Laguna Seca, Don Pablo Díaz del Castillo Fraga, Lidio, Paco, a Don Pancho alias el “Piporro” que siempre me reciben y apoyan cuando viajo a la mezcalera.

Al capitán de campo de la fábrica de mezcal Laguna Seca Don Fernando Rodríguez y su hijo David porque me ayudaron a desvirar y corta el maguey que necesité para trabajar en el laboratorio.

A la Dra. Rosa María Camacho Ruiz y a la Dra. Lorena Vilet del Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y diseño del Estado de Jalisco A.C. Plantel-Zapopan por su disposición en hacer una estancia corta y una colaboración, y quienes me motivaron a profundizar el tema de los fructanos.

A la Dra. Anne Gschaedler responsable técnico de la AGARED porque ha establecido los medios para conocer y vincularme con otros investigadores con diferentes puntos de vista.

A la Dra. María Elena García Arreola por ayudarme con los análisis de minerales por espectroscopia de plasma.

Al Dr. Juan Carlos García y al Dr. Manuel Núñez que con su apoyo se adquirió el equipo de cocción e impregnación al vacío.

A la Dra. Guadalupe Bárcenas y al Dr. Aguirre por compartirme el procedimiento para realizar la cata experimental.

A todas las personas que participaron como evaluadores de la cata experimental, gracias por su tiempo y disposición.

A las estudiantes de Ingeniería Agroindustrial que me apoyaron para realizar la cata experimental.

Por último, pero no por ello el menos importante, al pueblo de México que con sus impuestos han sustentado mis estudios de posgrado.

Gracias

CIGH

Índice general

Resumen general	1
1. Introducción general.....	5
1.1 Bibliografía citada.....	11
2. Importancia creciente de los fructanos de maguey-retos y perspectivas.....	13
2.1 Bibliografía citada.....	18
3. Extracción y caracterización de fructanos de <i>Agave salmiana</i> Otto ex Salm-Dyck	19
Resumen.....	20
3.1 Introducción	21
3.2 Materiales y métodos	23
3.2.1 Material biológico	23
3.2.2 Extracción del concentrado de fructanos (CF).....	24
3.2.3 Evaluación del rendimiento relativo y absoluto de fructanos	25
3.2.4 Contenido de humedad del tallo.....	25
3.2.5 Contenido de cenizas totales del extracto de fructanos.....	26
3.2.6 Cuantificación de saponinas del concentrado de fructanos.....	26
3.2.7 Cuantificación de carbohidratos por cromatografía líquida de alta resolución.....	26
3.2.8 Análisis estadístico.....	28
3.3 Resultados y discusión	28
3.3.1 Extracción de fructanos.....	28
3.3.2 Rendimiento absoluto y relativo de concentrado de fructanos.....	29
3.3.3 Calidad del concentrado de fructanos	31
3.4 Conclusiones	32
3.5 Bibliografía citada.....	33
4. Rendimiento y composición de fructanos de <i>Agave salmiana</i> Otto ex Salm-Dyck y <i>A. tequilana</i> F.A.C. Weber	37
Resumen.....	38
4.1 Introducción	39
4.2 Metodología	40
4.3 Resultados y discusión	41
4.4 Conclusiones	42
4.5 Bibliografía citada.....	43

5. Efecto de la madurez fisiológica en el rendimiento y calidad de los fructanos de <i>Agave salmiana</i> Otto ex Salm-Dyck	44
Resumen.....	45
5.1 Introducción	46
5.2 Materiales y métodos	48
5.2.1 Material vegetal.....	48
5.2.2 Extracción del concentrado de fructanos de <i>A. salmiana</i>	49
5.2.3 Contenido de materia seca (MS) del tallo	49
5.2.4 Composición de carbohidratos del CF	49
5.2.5 Estimación de la distribución de los pesos moleculares (M) y GP del CF.....	50
5.2.6 Contenido de cenizas totales	51
5.2.7 Análisis de macro y micro elementos de las cenizas.....	51
5.3 Resultados y discusión	52
5.3.1 Rendimiento y composición del CF.....	52
5.3.2 Grado de polimerización promedio (GGP) y otros parámetros del CF.....	55
5.3.3 Composición de las cenizas de los CF	58
5.4 Conclusiones	60
5.5 Bibliografía citada.....	61
6. Caracterización de las vinazas del mezcal potosino.....	64
Resumen.....	65
6.1 Introducción	66
6.1.1 Importancia de los aguardientes de maguey	67
6.1.2 ¿Que son las vinazas?.....	68
6.1.3 Volúmenes de vinazas de aguardientes de maguey.....	69
6.1.4 Usos actuales de las vinazas y propuesta para su reutilización	70
6.1.5 Proceso de elaboración de mezcal potosino	70
6.2 Materiales y métodos	73
6.2.1 Recolección de las muestras de vinaza	73
6.2.2 Separación del agua y lodo de vinaza	74
6.2.3 Caracterización del lodo de vinazas	77
6.3 Resultados y discusión	78
6.3.1 Características generales de las vinazas crudas.....	78
6.3.2 Características del agua de vinaza.....	80
6.3.3 Caracterización parcial del lodo de vinaza y de sus fracciones.....	83
6.4 Conclusiones	89

6.5	Bibliografía citada.....	89
7.	Uso del agua de vinaza para dilución del mezcal.....	92
	Resumen.....	93
7.1	Introducción	94
7.1.1	Problemática ambiental de vinazas de la industria de los aguardientes de maguey..	95
7.1.2	Usos actuales de las vinazas de las destilerías de aguardientes de maguey	95
7.1.3	Peculiaridades del agua de vinaza obtenida mediante evaporación a baja presión...	96
7.2	Materiales y métodos	96
7.2.1	Obtención del agua de vinazas	96
7.2.2	Diseño y preparación de las muestras	97
7.2.3	Cata experimental.....	97
7.2.4	Análisis estadístico.....	99
7.3	Resultados y discusión	99
7.4	Conclusiones	104
7.5	Bibliografía citada.....	104
8.	Recopilación de conclusiones por capítulo	106
8.1	Introducción general.....	107
8.2	Importancia creciente de los fructanos de maguey- Retos y perspectivas	107
8.3	Extracción y caracterización de fructanos de <i>Agave salmiana</i> Otto ex Salm Dyck.....	108
8.4	Rendimiento y composición de fructanos de <i>Agave salmaina</i> Otto ex Salm Dyck y <i>A. tequilana</i> F.A.C. Weber	108
8.5	Efecto de la madurez en el grado de polimerización y la composición de cenizas de fructanos de <i>Agave salmiana</i> Otto ex Salm Dyck.....	109
8.6	Caracterización de la vinaza de mezcal potosino	110
8.7	Uso del agua de vinazas para dilución del mezcal	111
	Anexos-I.....	112
	Anexo II	114

Índice de cuadros

Cuadro 1.1 Estimación de residuos que genera la fábrica de mezcal Laguna Seca por cada 41 600 L de mezcal ajustado a 40 °GL al año.....	8
Cuadro 3.1 Concentrado de fructanos (CF) obtenido (%) en cada etapa del método de extracción utilizado, a partir de tallos de <i>Agave salmiana</i>	28
Cuadro 3.2 Rendimiento absoluto y relativo de concentrado de fructanos (CF) del tallo de <i>Agave salmiana</i>	30
Cuadro 3.3 Contenido relativo de fructanos en <i>Agave salmiana</i> y otras especies.....	30
Cuadro 3.4 Calidad del concentrado de fructanos (CF) de <i>Agave salmiana</i> (libre de humedad).....	32
Cuadro 4.1 Proporción media (%) de CF recuperado durante el proceso de extracción.....	41
Cuadro 4.2 Peso medio (kg) fresco (TPF) y seco (TPS) de tallos de <i>A. salmiana</i> y <i>A. tequilana</i> , proporción (%) cabeza/tallo en fresco (PTF) y en seco (PTS) y concentrado de fructanos totales (CFT) y relativos (CFR) en la materia seca del tallo.....	41
Cuadro 4.3 Composición (%) del CF de <i>Agave salmiana</i> y <i>A. tequilana</i>	42
Cuadro 5.1 Rendimiento absoluto y relativo de CF (kg) del tallo de una cabeza estandarizada a 60 kg de <i>A. salmiana</i> en diferentes estadios de madurez	53
Cuadro 5.2 Composición y recuperación (mg/g) del CF de tallos de <i>A. salmiana</i> en diferentes estadios de madurez.....	54
Cuadro 5.3 Valores medios de las estimaciones de las distribuciones del peso molecular y GP del CF de tallos de <i>A. salmiana</i> en diferentes estadios de crecimiento.....	56
Cuadro 5.4 Estimaciones con base en la NOM-002-SAGARPA-2016 de las distribuciones medias del M y GP a partir de 3GP del CF de tallos de <i>A. salmiana</i> en tres estadios de madurez.....	57
Cuadro 5.5 Composición absoluta y relativa de los minerales del CF de <i>A. salmiana</i> en diferentes estadios de madurez.....	58
Cuadro 5.6 Valores medios del contenido de metales pesados (µg/g) del CF de tallos de <i>A. salmiana</i> en diferentes estadios de madurez	60
Cuadro 6.1. Producción de millones de litros (ML) de aguardientes puros de maguey durante los últimos años en México, ajustados a 40° GL.....	67
Cuadro 6.2 Volúmenes de vinazas (L) generados en la producción de aguardiente	

de maguey ajustado a 40° GL en 2016.....	70
Cuadro 6.3 Características de la vinaza de mezcal potosino derivada de dos procesos diferentes, y valores máximos permisibles por la NOM-001-ECOL-1994 para la descarga de aguas residuales en aguas y bienes nacionales (promedio mensual para descargas en embalses artificiales).....	79
Cuadro 6.4 Concentración (mg/L) y abundancia relativa (%) de minerales de la vinaza generadas por dos procesos diferentes.....	80
Cuadro 6.5 Características del agua de vinaza generada de la elaboración de mezcal.....	82
Cuadro 6.6 Composición absoluta (g MS/L) y relativa de las fracciones del lodo de vinaza (LV) de dos procesos de cocción diferentes y las cantidades que se generan por cada horno que se procesa y durante un año, con la capacidad actual de trabajo de la fábrica de mezcal Laguna Seca.....	84
Cuadro 6.7 Composición (% base seca) de las fracciones del lodo de vinaza de dos procesos de cocción diferentes.....	84
Cuadro 6.8 Composición media (mg/kg MS) del lodo de vinaza derivado de los dos procesos (maguey cocido con vapor y con leña), y composición relativa de minerales de sus fracciones.....	86
Cuadro 6.9 Comparación proteica y mineral de ingredientes o subproductos utilizados en la formulación de raciones para monogástricos (cerdos y aves).....	87
Cuadro 6.10. Necesidades nutricionales diarias de cerdos y pollos en diferentes etapas de crecimiento.....	88
Cuadro 7.1 Tratamientos para evaluar experimentalmente la dilución de aguardientes de maguey con agua de vinaza.....	98
Cuadro 7.2 Características de las aguas de vinaza usadas para la dilución de aguardientes de maguey.....	100
Cuadro 7.3. Acidez original de los tres aguardientes de maguey evaluados.....	100
Cuadro 7.4. Acidez de los tratamientos evaluados.....	100
Cuadro 7.5 Efecto del tipo de aguardiente de maguey (A) y el agua de dilución (B) en la apreciación de los atributos evaluados.....	101
Cuadro 7.6 Comparación múltiple de medias con la prueba de Tukey para la apreciación del aroma.....	102
Cuadro 7.7 Comparación múltiple de medias con la prueba de Tukey para la apreciación del sabor.....	103

Cuadro 7.8 Comparación múltiple de medias con la prueba de Tukey para la apreciación de la aceptación.....	103
---	-----

Índice de figuras

Fig. 1.1 Aprovechamiento integral y polivalente del maguey mezcalero potosino (<i>Agave salmiana</i> Otto ex Salm Dyck) y sus subproductos.....	10
Fig. 2.1 Importación de inulina a México. Datos de los anuarios estadísticos de comercio exterior de los Estados Unidos Mexicanos de 2000 a 2014.....	17
Fig. 2.2 Exportación de “inulina” (fructanos de <i>Agave</i>) de México. Datos de los anuarios estadísticos de comercio exterior de los Estados Unidos Mexicanos de 2001 a 2014.....	17
Fig. 3.1 Separación e identificación de azúcares del concentrado de fructanos de <i>Agave salmiana</i> con estándares externos por HPLC.....	27
Fig. 4.1 Sección longitudinal de cabezas maduras de a) <i>Agave salmiana</i> (quiotillo) y (b) <i>A. tequilana</i> (novillo).....	40
Fig. 5.1 Sección longitudinal de cabezas de <i>A. salmiana</i> (a) inmaduro (b) maduro y (c) quiotado.....	52
Fig. 5.2 Histogramas de los pesos moleculares, GGP, y la proporción de fructanos mayores y menores que 10 GP del CF de tallos de <i>A. salmiana</i>	56
Fig. 6.1 Proceso de elaboración de mezcal potosino de la fábrica “Laguna Seca” (Godínez, 2012).....	72
Fig. 6.2 Alambique de cobre (a) y recolección de las muestras de vinazas (b) en la fábrica de mezcal Laguna Seca	74
Fig. 6.3. Equipo de cocción e impregnación al vacío (J. P. Selecta Gastrovac, España) acondicionado con un condensador y dos trampas de condensación para trabajar como evaporador al vacío.....	74
Fig. 6.4. Vinaza cruda, agua y lodo húmedo de vinaza de la producción de mezcal potosino.....	75
Fig. 6.5 Proceso de separación de sólidos de las vinazas para la obtención de agua mediante evaporación parcial al vacío.....	75
Fig. 6.6 Sedimento fibroso (a), sedimento microbiano (b), melaza de vinaza (c) y lodo de vinaza (d).....	76
Fig. 7.1 Hojas de evaluación individual para cada parámetro a evaluar (aroma y sabor).....	98
Fig. 7.2 Aspectos de la cata ciega experimental de aguardientes de maguey.....	99

Resumen general

La industria de los aguardientes de maguey (tequila y mezcal) genera grandes cantidades de residuos sólidos, como pencas de desvirado y bagazo, y líquidos como la vinaza de destilación, que parcialmente se aprovechan en algunas regiones; en general, su disposición final es a cielo abierto, por lo que representan un problema ambiental. Por ello, el objetivo del primer capítulo fue poner en contexto la generación de residuos de la industria mezcalera para diseñar un sistema de aprovechamiento integral de los subproductos de la elaboración de mezcal, así como diversificar los usos de la misma materia prima (*Agave salmiana* Otto ex Salm Dyck) para generar productos novedosos con demanda comercial a nivel local, regional, nacional e internacional (forraje, agua, compost, fructanos, jarabe de fructosa, etanol, ixtle, biogás y alcoholes industriales). De esta manera, el aprovechamiento de los residuos y subproductos puede beneficiar tanto a los campesinos y ganaderos proveedores de materia prima, como a los industriales productores de mezcal, y contribuir a la consolidación económica y a la mejora de las condiciones y rentabilidad de sus recursos naturales y a la vez contribuir a disminuir el problema ambiental que representa la generación y disposición final de los residuos y subproductos de esta agroindustria.

Así, el objetivo del segundo capítulo fue poner en contexto la importancia que tiene el comercio exterior de los fructanos, como ingrediente utilizado en la industria alimentaria por sus propiedades físicas, químicas, biológicas y funcionales; y cómo las especies del género *Agave* se reconocen por sintetizar fructanos como sustancias de reserva, con lo cual se han convertido en un recurso potencial y alternativo a los aguardientes. La importación de fructanos (inulina) en 2014 fue de 3815 t, esto es 292 veces lo que se empezó a importar en 2000. A la vez, la exportación de fructanos de maguey en 2014 fue de 1559 t; esta cantidad es 64 veces de lo exportado en 2000. Esta tendencia creciente que tiene el comercio exterior de fructanos a nivel nacional e internacional es una oportunidad para diversificar los usos de la materia prima utilizada para aguardientes de maguey, y puede contribuir a la estabilización de sus precios, particularmente de maguey tequilero. Sin embargo, el principal reto para la extracción de fructanos de maguey es a) controlar la

madurez para homogenizar la calidad, b) definir la estructura más adecuada para su extracción; y c) probar y estandarizar su proceso de extracción.

El objetivo del tercer capítulo fue extraer y caracterizar los fructanos de tallos de *A. salmiana* con madurez fisiológica plena, para documentar su rendimiento y calidad, ya que hasta la fecha no se habían extraído exclusivamente del tallo (órgano de almacenamiento de fructanos), sino de cabezas completas (tallo más bases foliares). Como estas dos estructuras de la planta tienen funciones fisiológicamente distintas, al procesar la cabeza de maguey, los fructanos del tallo se contaminan con compuestos de las bases foliares (ceras, clorofilas, saponinas y sacáridos que se consideran “contaminantes”), por lo que los extractos requieren de procesos de purificación innecesarios y costosos. Con el proceso de extracción desarrollado se puede obtener hasta 98 % de los fructanos de los tallos de manera simple, limpia y orgánica: extracción mecánica de jugo, prensado del bagazo y lavado del bagazo y evaporación parcial y secado del extracto de fructanos. El rendimiento relativo (en peso fresco) del concentrado de fructanos (CF) fue 21 %, mientras que en términos absolutos 78 % de la materia seca del tallo; así se obtiene cerca de un kilogramo de CF por tallo de peso medio de 5 kg correspondientes a una cabeza de peso medio de 57 kg. La composición del CF fue 80 % de fructanos mayores que cinco grados de polimerización (GP), y 87 % de fructanos mayores que tres GP. El contenido de monosacáridos no fue detectable (<0.002 %) y el contenido de cenizas fue 5 %.

El objetivo del cuarto capítulo fue comparar el rendimiento y la composición del CF de tallos *A. salmiana* y *A. tequilana* F.A.C. Weber de plantas en madurez fisiológica plena. Se reconoció la mayor riqueza de CF totales (3kg) de *A. tequilana* por tallo de peso medio (10 kg), superior a 1 kg por tallo de peso medio (5 kg) para *A. salmiana*. El rendimiento de concentrado de fructanos con base en el peso fresco fue 21.0 % y seco 75.5 % de los tallos de *A. salmiana*, y 27.5 % y 77.0 % de los tallos de *A. tequilana*, respectivamente. El contenido de cenizas fue 5 % en *A. salmiana*, superior a 1.7 % registrado para *A. tequilana*; el calcio representó 75 % de las cenizas en *A. salmiana*, y el 52 % en *A. tequilana*. La longitud de los cristales de oxalato de calcio (rafidios) fue 315 μm en *A. salmiana*, superior a 192 μm registrado para *A. tequilana*.

El objetivo del quinto capítulo fue comparar el efecto que tiene la madurez en el CF de tallos de un maguey inmaduro (MI), un maguey maduro o con madurez fisiológica plena (MM) y en un maguey quietado (MQ) en el rendimiento y calidad de su fructanos. El estadio de crecimiento MM dio mejor rendimiento y calidad de fructanos, pues contienen escasos monosacáridos y disacáridos, y mayor grado de polimerización; los estadios MI y MQ son menos deseables ya que se encuentran en etapas de síntesis incipiente y o consumo de fructanos, respectivamente. El grado de GP de los fructanos del MM fue cerca de 16, el del MI de 10 y el del MQ de 9. El contenido de cenizas fue superior en el MI (111.6 mg/g) que en el MM (57.7 mg/g) y el MQ (50.8 mg/g). El rendimiento en peso seco fue mayor en el MM (78 %) que en el MI (42 %) y el MQ (33 %). La composición del CF de fructanos mayores que cinco GP fue superior en el MM (786mg/g), seguido del MQ (552 mg/g) y el MI (214 mg/g). Por lo tanto, la edad cronológica supuesta es un indicador de madurez muy impreciso para el productor de planta y para el industrial de fructanos, pues les representa menor rendimiento y mayor variación en la calidad de sus fructanos. El planteamiento de usar exclusivamente los tallos de plantas en madurez fisiológica plena está encaminado a reducir esta variación en la calidad y rendimiento de los fructanos comerciales; pero también implica un reto tecnológico industrial para separar mecánicamente los tallos de las bases foliares. Esta quizás sea la mejor alternativa para la industria de los fructanos de maguey, puesto que, al utilizar las cabezas enteras, recurren a proceso de separación y purificación de los fructanos muy costosos que llegan a representar cerca del 60 % del valor del producto.

El objetivo del sexto capítulo fue caracterizar la vinaza del mezcal potosino, ya que es el residuo líquido con mayor impacto ambiental que genera la industria de los aguardientes de maguey, aunque sea sometida a tratamientos biológicos, pues la disposición final de los lodos que resultan de este tratamiento vuelve a ser un reto, como sucede con todos los desechos de los procesos de depuración de contaminantes. Esta vinaza está conformada principalmente de agua de lluvia captada por el maguey, compuestos de color (melanoidinas) no cuantificados en este trabajo, minerales en solución, materia orgánica en forma de residuos fibrosos (celulosa y hemicelulosa) y proteína microbiana. La conclusión a la que se llegó fue que el agua de vinaza obtenida mediante procesos de evaporación al vacío puede servir para usos distintos en la misma agroindustria, y que el

lodo de vinaza seco se pueda utilizar en la producción agropecuaria, como fuente de nutrientes (fibra y proteína) y minerales.

El objetivo del séptimo capítulo fue probar el uso del agua de vinaza para dilución del mezcal mediante el desarrollo de una cata experimental con un diseño factorial 3 x 3 de tratamientos, donde el factor A fue el tipo de aguardiente de maguey y el factor B el tipo de agua de dilución. Se utilizaron dos aguas de vinaza, una obtenida de un proceso donde el maguey fue cocido con vapor, y otra de un proceso de cocción con leña, y un agua comercial. Se utilizaron dos mezcales naturales obtenidos de dos procesos uno donde el maguey fue cocido con vapor, y otro cocido con leña, y un tequila natural comercial. El agua de vinaza obtenida mediante evaporación a baja presión puede ser igual o mejor que el agua comercial utilizada para ajustar el grado alcohólico del mezcal. Además, se observaron ciertas tendencias, aunque no significativas, en la mejora del aroma, sabor y aceptación de los tratamientos.

Aunque no se pudo cubrir el estudio de todos los residuos, el sistema de aprovechamiento integral de los subproductos de la elaboración de mezcal propuesto, abre la posibilidad de realizar diversas investigaciones que lo sustenten y lo complementen, con formas de aprovechamiento adecuadas y viables para que los usufructuarios de los recursos (ejidatarios y comunidades rurales) los valoren y aprovechen, y esto sirva como detonante del desarrollo económico de la región.

Palabras clave: *Agave salmiana*, aprovechamiento integral de residuos, fructanos, agua de vinaza.

Capítulo

1. Introducción general

Introducción general

El maguey mezcalero potosino (*Agave salmiana* Otto ex Salm Dyck) ha sido una fuente importante de alimentos y materiales, desde tiempos prehispánicos hasta la actualidad (Payno, 1964; Lobato, 1884; Sánchez, 1967; Aguirre *et al.*, 2001; Leach y Sobolik, 2010, Gschaedler *et al.*, 2017). Por su gran polivalencia y riqueza de especies de maguey en México, se considera a este país como centro de origen y humanización del género *Agave*.

En México el sector agroindustrial surge con el establecimiento de grandes complejos agroindustriales o haciendas de la Nueva España, las cuales se reconocían por su producción, condicionada por los recursos naturales aledaños a su establecimiento. Así, podían ser principalmente agrícolas, ganaderas, azucareras, ixtleras, pulqueras o mezcaleras, pero, en general eran complejos agroindustriales polivalentes (Cabrera, 1979). Estos sistemas de producción fueron muy importantes en su tiempo; sin embargo, con la reforma agraria y el reparto de tierras, se desarticularon por completo hasta desaparecer o quedar en el abandono (Aguirre *et al.*, 2001). En efecto, en algunas regiones sus recursos naturales, particularmente las poblaciones de maguey, dejaron de tener valor, cuando en su momento el comercio de los productos de estos recursos generaba fuertes ganancias a las haciendas. Ejemplo de ello fueron las grandes haciendas pulqueras de Hidalgo, henequeneras de Yucatán y mezcaleras en el altiplano potosino zacatecano (Aguirre *et al.*, 2001). En cambio, en otras regiones como Jalisco, persistió y evolucionó la producción del maguey tequilero y su aguardiente, a tal grado que a la industria del tequila se le reconoce como una de las más fuertemente consolidadas del país (Gutiérrez, 2001). Este tipo de agroindustrias o destilerías modernas, así como las destilerías rudimentarias de mezcal y las fábricas de mezcal de San Luis Potosí, se caracterizan por generar grandes cantidades de residuos líquidos y sólidos que sólo marginalmente se aprovechan en la actualidad.

Algunas fábricas de mezcal potosino en los años noventa del siglo pasado se reabrieron después estar un largo tiempo cerradas; sin embargo, sólo la fábrica Laguna Seca certificada por el COMERCAM (Consejo Regulador del Mezcal) del municipio de Charcas, SLP, continúa trabajado hasta la fecha de manera ininterrumpida, la cual procesa

dos hornos por semana durante todo el año. Esta capacidad mínima de operación se utilizó como base para calcular las cantidades de residuos que se generan de todo el proceso de elaboración de mezcal.

El proceso de elaboración de mezcal en este tipo de fábricas del altiplano potosino se caracteriza por contar con desarrollos tecnológicos de principios del siglo XVIII, intermedios entre los prehispánico-coloniales existentes en Oaxaca y Guerrero, por ejemplo, y los industriales modernos del tequila. Las fábricas de mezcal típicas del altiplano potosino tienen el diseño ingenieril y tecnológico más avanzado en su género hasta el primer tercio del siglo XX (Aguirre, 2004; Gschaedler, 2007; Godínez, 2012), ya que la disposición de cada sección o área del proceso está diseñada para reducir esfuerzos manuales y para que el movimiento canalizado de jugos sea por gravedad.

El proceso comienza con la recolecta de maguey silvestre maduro en los agostaderos aledaños a la fábrica, para lo cual se desvira (eliminación de las pencas) en pie y posteriormente se corta o tumba su cabeza. La fábrica procesa actualmente sólo dos hornos de 16 t de cabezas de maguey cada uno por semana. Esto equivale a generar 12 t de pencas de desvirado por horno o 1248 t de pencas de desvirado al año, las cuales quedan dispersas sobre el suelo sin ningún uso, y aplastando especies herbáceas de porte bajo.

En la fábrica las cabezas de maguey se someten a cocción con vapor (principal forma en la actualidad), en un horno elevado de mampostería, para hidrolizar (100 °C aproximadamente) sus polisacáridos de reserva (fructanos); después de 36 h de cocción, se cierra el vapor, y se deja enfriar para poder abrir y descargar el horno. Luego, se sacan las cabezas del horno y se llevan al molino o prensa tipo tahona para la extracción del jugo, el cual consiste de una piedra labrada y redonda (± 1.2 t), dispuesta para girar en un eje perpendicular al eje central de una pileta circular inclinada. Este movimiento es accionado actualmente por un tractor y el maguey troceado manualmente se va colocando al paso de la piedra. El bagazo prensado se lleva a una pila de lavado con agua caliente para disolver y extraer lo azúcares remanentes, y el bagazo vuelve a ser exprimido en una prensa de tornillo, antes de ser desechado en los patios de la fábrica. El bagazo prensado es el segundo residuo que se genera en el proceso; se estima que se generan 5 t de bagazo fresco por horno, lo que equivale a 520 t al año.

Los jugos azucarados de la molienda y de la pila de lavado se conducen al cuarto de fermentación por gravedad. En unas cubas o en piletas se induce la multiplicación del fermento seminal. Luego, el fermento se trasvasa a las pilas de fermentación en condiciones anaerobias. En esta etapa se genera principalmente etanol, CO₂, y otros compuestos congéneres como alcoholes superiores (butanol, propanol, isopropanol, etc.), y ácidos orgánicos (láctico y acético), entre otros. El vino generado en 36 h de fermentación se descarga en un canal de carga del alambique, el cual está situado en el siguiente espacio inferior de la fábrica. En estas fábricas tradicionalmente se realiza una sola destilación fraccionada, con la cual se separan los alcoholes según su punto de ebullición, por medio del calentamiento regulado con la presión de vapor, la temperatura al tacto de la olla y el caudal del condensado, y es reforzada con una serie de retornos y trampas de condensación en serie (cabezote, botella y rectificador de lentejas). Esta destilación fraccionada es típica en las fábricas del altiplano potosino, y permite la separación de las “cabezas” compuestas por el alcohol más ligero y tóxico (metanol), antes del “corazón”, alcohol comestible o mezcal verdadero (etanol), y al final de la destilación se separa otra fracción con mayor contenido de agua, denominada “colas”, compuestas por alcoholes pesados y otros compuestos de olor y sabor desagradable. La vinaza queda en la olla del alambique como residuo líquido que se descarga al suelo fuera de la fábrica sin ningún tratamiento. En la actualidad esta fábrica procesa sólo dos hornos de 16 t por semana, lo cual genera 11 000 L de vinaza por semana, equivalentes a 572 000 L al año (**Cuadro 1.1**). El volumen de mezcal producido al año apenas representa cerca del 1 % del total de residuos que se generan al producirlo; es una cantidad sorprendente de residuos que se desperdician, y que pierde la oportunidad en aprovecharlos en otros productos.

Cuadro 1.1 Estimación de residuos que genera la fábrica de mezcal Laguna Seca por cada 23 800 L de mezcal ajustado a 40 °GL al año.

Residuo	Cantidad
Pencas de desvirado (t)	1 248
Bagazo (t)	520
Vinazas (L)	572 000
Cabezas (L)	4 160
Colas (L)	1 040
Total (t)	2 345.2

La articulación del aprovechamiento integral y polivalente del maguey tanto como materia prima para la industria mezcalera y sus subproductos (pencas de desvirado, bagazo, vinaza y subproductos de destilación), como para la generación de productos nuevos y alternativos y sus subproductos, constituye el reto y objetivo general de este planteamiento.

El desarrollo científico y tecnológico actual y las exigencias ambientales globales demandan superar el enfoque tradicional de aprovechar un sólo tipo de material o compuesto de un recurso biótico espontáneo, pues se generan abundantes residuos y contaminantes y se desperdician oportunidades para el desarrollo económico. Así, este trabajo propone como ejemplo un sistema de aprovechamiento integral (**Figura 1.1**), y polivalente de un recurso natural de importancia ecológica, económica y social en el altiplano potosino, y en esta tesis se adelantan algunos resultados al respecto.

Así, se ha venido trabajando en la búsqueda y desarrollo de una serie de métodos y formas de aprovechamiento de tecnología simple y de bajo costo, para la generación de productos convencionales (ixtle, forraje, agua y mezcal) y no convencionales o biotecnológicos (gas, etanol, fructanos, jarabe de fructosa, saponinas, compost, alcoholes industriales, etc.), tanto para autoconsumo como para venta y enfoques acordes con el grado de consolidación de la empresa agroindustrial, la rentabilidad y la demanda en el mercado. El aprovechamiento de estos residuos, puede beneficiar tanto a los campesinos y ganaderos proveedores de materia prima como a los industriales productores de mezcal, y contribuir a la consolidación económica y a la mejora de las condiciones y rentabilidad de sus recursos naturales, con procesos de tecnología simple y de baja inversión. De manera paralela también se procura disminuir el problema ambiental que representa la generación y disposición final de los residuos y subproductos de la industria mezcalera, ya que, hasta la fecha, son generalmente dispuestos a cielo abierto.

Uno de los usos alternativos del maguey mezcalero potosino más prometedor es la extracción de fructanos (Aguirre *et al.*, 2001). Los fructanos de mayor importancia comercial a nivel mundial son la inulina, extraída de la raíz de achicoria (*Cichorium intybus* L.), y la oligofructosa obtenida de la hidrólisis enzimática parcial de la inulina. Bélgica y Holanda son los principales productores a nivel mundial de inulina y oligofructosa, pero su creciente demanda por la industria alimentaria como ingrediente prebiótico, ha superado su

capacidad de producción, por lo que además de intensificar el cultivo con fertilizantes y variantes genéticamente modificadas, lo han expandido a otros países.

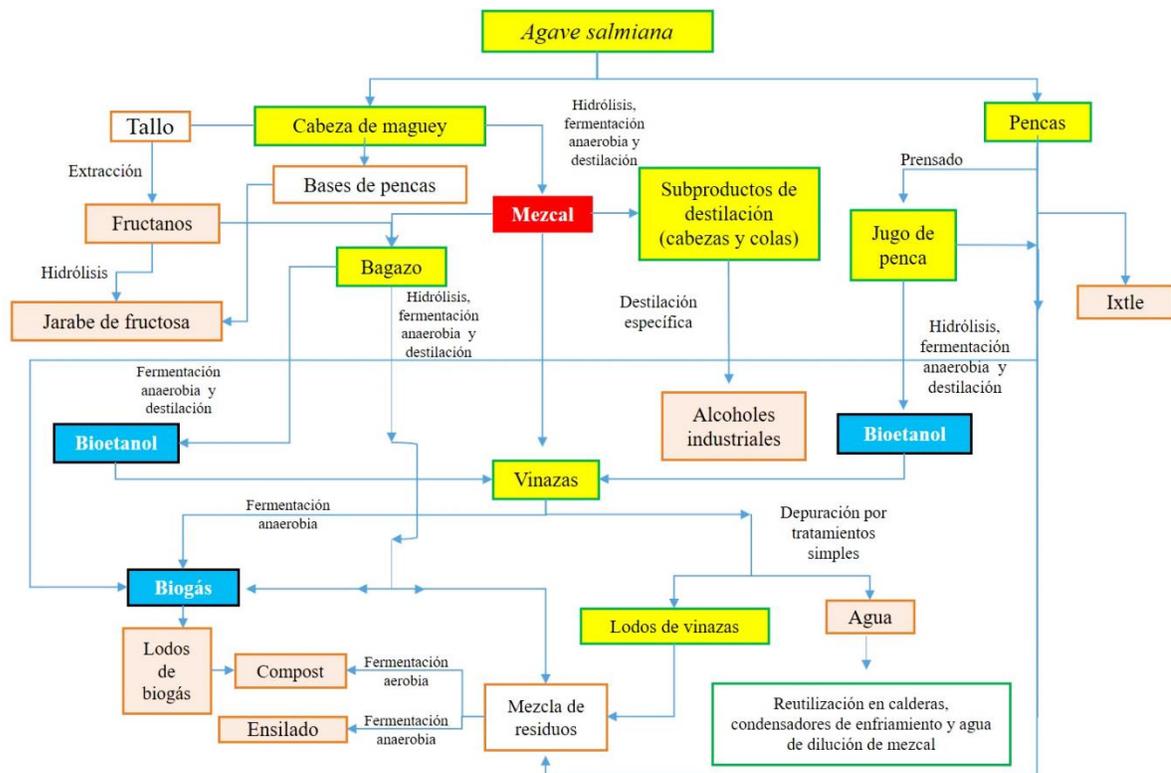


Fig.1.1 Aprovechamiento integral y polivalente del maguey mezcalero potosino (*Agave salmiana* Otto ex Salm Dyck) y sus subproductos

Sin embargo, existen otras fuentes de fructanos menos conocidas, pero con gran potencial, como las especies de *Agave* abundantes en México, las cuales los almacenan en el tallo como sustancias de reserva. De las especies que se encuentran en México al menos diez, entre silvestres y cultivadas, son actualmente importantes en cuanto a su distribución y abundancia por utilizarse para la elaboración de tequila o mezcal. Por ello, de *Agave tequilana* F.A.C. Weber, mayormente cultivada en México para la producción de tequila, se han comenzado a extraer fructanos a nivel industrial con lo cual se comienza a diversificar el uso de la materia prima del tequila. Sin embargo, en estos procesos aún se utiliza la cabeza entera de maguey como materia prima, sin separar las bases de las pencas, lo cual repercute en procesos más complejos y por ende más costosos requeridos para eliminar monosacáridos, saponinas, ceras, clorofilas y sales minerales mediante uso de filtros y

resinas de intercambio iónico. Como los carbohidratos en las plantas se encuentran en formación, polimerización, despolimerización y consumo a lo largo de su vida, es imprescindible establecer la madurez fisiológica plena para evitar la variación en la calidad de fructanos de maguey a nivel industrial (Camacho, 2016). Además, como en la región del tequila predomina el criterio de cosecha basado en la madurez cronológica de las plantaciones, lo cual es relativo e impreciso, con los fructanos comerciales de maguey tequilero es difícil probar rigurosamente sus propiedades biológicas y funcionales, de los fructanos pobremente caracterizados. En el altiplano potosino *Agave salmiana* es un recurso natural abundante que actualmente se utiliza casi exclusivamente para elaborar mezcal, y es una de las diez especies de maguey más importantes en México. Por ello, la elaboración de usos nuevos y productos novedosos derivados de este maguey, con alto valor añadido, puede hacerlo más rentable y atractivo tanto para los productores de planta como de mezcal, y con ello se puede contribuir a diversificar el aprovechamiento de las magueyeras silvestres de la región (Aguirre *et al.*, 2001).

1.1 Bibliografía citada

- Aguirre R., J. R.; H. Charcas S.; J. L. Flores F. 2001. El maguey mezcalero potosino. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Consejo Potosino de Ciencia y Tecnología. San Luis Potosí, SLP. México. 78 p.
- Aguirre R., J. R. 2004. Peculiaridades de las fábricas de mezcal del altiplano potosino zacatecano. En: Simposio Internacional sobre Agaveaceae Nolinaceae. Los agaves de importancia económica en México. Mérida Yucatán, México. p.27.
- Cabrera I. O. 1979. Doscientas haciendas potosinas y su triste fin. Editado por el autor. San Luis Potosí, SLP. 200 p.
- Camacho R., R. M. 2016. Fructanos de *Agave*. Retos en la estandarización. *Tecnoagave*. 41:62-63.
- Gschaedler M., A. C. 2007. La industria del mezcal en el altiplano potosino: tradiciones y retos tecnológicos. *ciencia@sanluispotosi.mx*. 3(30):5.
- Gschaedler M., A. C. 2017. Panorama del aprovechamiento de los Agaves en México. CONACyT, CIATEJ, AGARED. Guad. Jalisco, México. 300 p.
- Gutiérrez G., S. 2001. Realidad y mitos del tequila. Agata. Jalisco, México. 340 p.
- Godínez H., C. I. 2012. Caracterización y eficiencia de la fermentación en la elaboración de mezcal potosino. Tesis de maestría. Programas de Posgrado en Ciencias Ambientales. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, SLP. México. 88 p.

- Leach, J. D.; K. D. Sobolik, 2010. High dietary intake of prebiotic inulin-type fructans in the prehistoric Chihuahuan Desert. *British Journal of Nutrition*. 103: 1558-1561.
- Lobato, J. G. Productos del maguey mexicano. 1884. Oficina Tipográfica de la Secretaría de Fomento. México. 191 p.
- Sánchez M. A. 1979. Los agaves de México en la industria alimentaria. Centro de Estudios Económicos y Sociales del Tercer Mundo. México. 526.
- Payno, M. 1864. Memoria sobre el maguey mexicano y sus diversos productos. A. Boix. México. 132 p.

Capítulo

2. Importancia creciente de los fructanos de maguey-retos y perspectivas

Importancia creciente de los fructanos de maguey-retos y perspectivas

César Iván Godínez Hernández¹; Juan Rogelio Aguirre Rivera²; Bertha Irene Juárez Flores²

¹Programas Multidisciplinarios de Posgrado en Ciencias Ambientales, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México, San Luis Potosí, SLP, Manuel Nava 201, 2º piso Zona Universitaria, C.P. 78210.b

²Instituto de Investigación de Zonas Desérticas, UASLP, México, San Luis Potosí, SLP, Altaír, 200, Del Llano, C.P. 78377.

Este artículo de divulgación se publicó en la revista Tecnoagave No. 40. Marzo–Abril, 2016

Los fructanos son polímeros de fructosa sintetizados y almacenados por algunas especies de plantas como sustancias de reserva, las cuales les permite sobrevivir a los periodos desfavorables para su crecimiento o sustentar su reproducción al culminar su ciclo vital (Hendry, 1993); en estas últimas especies su acumulación máxima determina el cambio de estado de vegetativo a reproductor. Al igual que con las plantas que acumulan almidón como energía de reserva, el humano también ha aprovechado los órganos vegetales de especies que acumulan fructanos, pues al cocinarlos se obtiene de ellos agua y azúcares y también bebidas alcohólicas fermentadas. Este consumo indirecto de fructanos por nuestros antepasados se ha documentado en estudios arqueológicos y etnobotánicos tanto en Europa como en América (Leach y Sobolik, 2010).

A diferencia del almidón, los fructanos son indigeribles por la acción de enzimas humanas, ya que su estructura molecular presenta enlaces tipo β (2-1) y β (2-6) que impiden su hidrólisis, y por lo tanto no aportan directamente fuentes de energía a la sangre; sin embargo, son un sustrato específico para la microbiota deseable del colon (Gibson y Robertfroid, 1995). Por sus propiedades físicas y químicas, los fructanos pueden reemplazar a las grasas y almidones como ingredientes mejoradores del aspecto y consistencia de alimentos procesados, pero al ser indigeribles reducen el contenido de calorías, y a la vez favorecen el funcionamiento del tracto digestivo y la salud del colon, por lo cual son considerados como ingredientes funcionales.

El uso de fructanos (particularmente inulina) como ingrediente en la elaboración de productos alimentarios tiene poco más que 30 años, pues a mediados de los ochentas del siglo pasado en Europa se comenzaron a estudiar y a descubrir las propiedades de los fructanos de inulina que se extraen de la raíz de achicoria. Luego, se comenzaron a producir de manera industrial y a establecer sus parámetros de calidad hasta reconocerse oficialmente como ingrediente inocuo. Así, en la actualidad los fructanos de mayor importancia comercial en nivel mundial son la inulina y la oligofructosa que se obtiene de la hidrólisis enzimática parcial de la inulina extraída de la raíz de achicoria (Gupta *et al.*, 2003; Franck, 2009).

Bélgica y Holanda han sido los principales países productores de inulina y oligofructosa; por su creciente demanda, la capacidad de producción de estos países se ha visto superada, por lo que además de intensificar el cultivo de la achicoria con variantes genéticamente modificadas, lo han expandido a otros países con clima mediterráneo propio para este cultivo, particularmente a Chile. En diversos países las empresas globales más importantes de la industria alimentaria, como Bimbo, Danone, Heinz, Müller Dairy, Nestlé y Unilever (Kays y Nottingham, 2007), demandan de manera creciente fructanos comerciales (inulina y oligofructosa de achicoria) para utilizarlos como ingredientes en la elaboración de sus alimentos procesados de consumo diario catalogados como funcionales.

Venturosamente existen otras fuentes de fructanos menos conocidas, pero con gran potencial, como son las especies de *Agave* abundantes en México, las cuales almacenan fructanos (orgánicos) en el tallo como sustancias de reserva, órgano donde alcanzan su máxima acumulación en la etapa de transición del estado vegetativo al reproductor de la planta (Aguirre *et al.*, 2001).

De las casi 150 especies de *Agave* que se encuentran en México, al menos 10, entre silvestres y cultivadas, son actualmente importantes en cuanto a su distribución y abundancia, por utilizarse para la elaboración de tequila, mezcal y otros aguardientes de maguey (Aguirre *et al.*, 2001); estas especies podrían en forma complementaria o alternativa al uso actual, ser fuentes de materia prima para la obtención de fructanos.

En México durante los últimos 12 años se han realizado estudios sobre los fructanos de maguey para conocer sus propiedades químicas (López *et al.*, 2003) y evaluar sus efectos biológicos en modelos *in vivo* e *in vitro*. Por otro lado, en Jalisco se comienza a diversificar el uso de la materia prima para tequila (cabezas de *Agave tequilana* F.A.C. Weber) con la extracción de fructanos en nivel industrial para su comercialización en nivel nacional e internacional, como tales o hidrolizados en forma de jarabes.

El comercio exterior de fructanos en México, según datos oficiales (INEGI), comenzó en 2000 con la importación de inulina, con una tendencia creciente y gradual hacia 2014, que equivale a un incremento cercano a 292 veces de lo que se comenzó a exportar en el 2000. De Chile procede más que 90 % del producto importado en los últimos años (**Figura 2.1**), ya que la empresa Belga más importante en producción de inulina y oligofructosa (Beneo Orafiti) instaló una fábrica subsidiaria en dicho país. A la vez, en 2001 se comenzó a exportar “inulina” (fructanos de maguey) con una tendencia creciente exponencial al incrementarse 64 veces de lo que se empezó a exportar hace 10 años; a EE.UU. se ha exportado más que 80 % de este producto (**Figura 2.2**). Cabe aclarar que en estos datos oficiales no se hace distinción de la especie de la cual se extrae la inulina que se importa o se exporta. Pero sin duda se puede deducir que la inulina importada es de achicoria, y que la exportada son fructanos de maguey, principalmente de maguey tequilero, mal denominados “inulina de *Agave*”. La tendencia creciente de la demanda de fructanos en nivel nacional e internacional, justifica la búsqueda de fuentes alternativas locales, como son las especies de *Agave*, que puedan llegar a ser competitivas globalmente.

Para que los fructanos de maguey puedan competir globalmente con los de achicoria o inulina propiamente dicho, se tiene que demostrar de manera fehaciente que son iguales o superiores como ingredientes alimentarios funcionales que dicha inulina. La achicoria es una sola especie, pero hay muchas especies de maguey importantes con grandes diferencias morfológicas entre ellos. En la achicoria el órgano de almacenamiento es una raíz engrosada y su ciclo de desarrollo está bien definido estacionalmente; en los magueyes el órgano de almacenamiento es el tallo o corazón, pero desde la prehistoria se le

sigue cosechando junto con las bases de las hojas o pencas, y ambos tipos de órganos presentan estructura, composición y función muy diferentes.

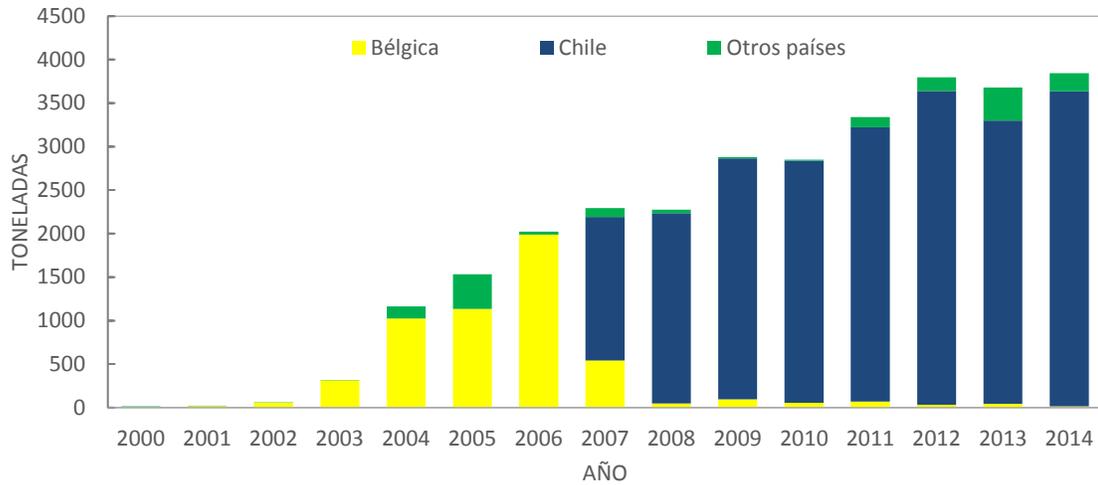


Fig. 2.1 Importación de inulina a México. Datos de los anuarios estadísticos de comercio exterior de los Estados Unidos Mexicanos de 2000 a 2014.

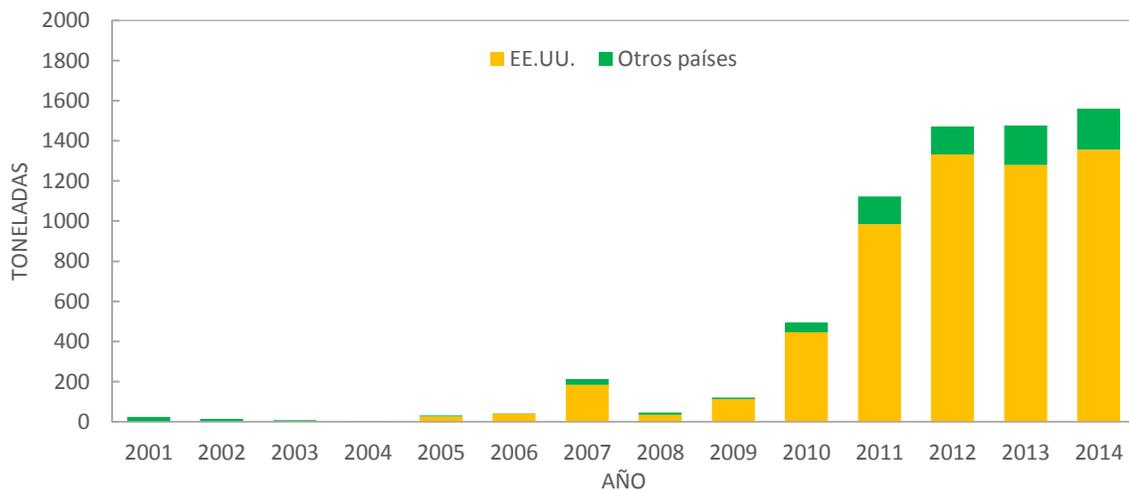


Fig. 2.2 Exportación de "inulina" (fructanos de *Agave*) de México. Datos de los anuarios estadísticos de comercio exterior de los Estados Unidos Mexicanos de 2001 a 2014.

La acumulación de reservas o fructanos en el tallo de los magueyes es un proceso fisiológico variable entre individuos y dependiente del ambiente prevaleciente durante la vida del individuo, lo cual puede estar poco relacionado con el tiempo que tiene de plantado y la edad cronológica real de dicho individuo; así, la madurez fisiológica no sólo

puede afectar el rendimiento de los fructanos sino también su calidad. Los métodos actuales de extracción industrial de fructanos son caros y complejos, pues se han diseñado para usar las cabezas como materia prima; es decir, en su extracción los fructanos primero se contaminan y luego se descontaminan. Finalmente, mientras no se controlen estas variables o factores será difícil obtener resultados repetibles en la evaluación biológica de los fructanos de maguey. Por ejemplo, resultados preliminares de materia prima estandarizada de *Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck indican que el grado de polimerización estimado de sus fructanos es diferente al de otras especies de maguey, y que puede llegar a ser al menos igual o mejor que el de la inulina plenamente estandarizado y caracterizado.

2.1 Bibliografía citada

- Aguirre R., J. R.; H. Charcas S.; J. L. Flores F. 2001. El maguey mezcalero potosino. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Consejo Potosino de Ciencia y Tecnología. San Luis Potosí, SLP. México. 78 p.
- Franck, A. 2009. Inulin and oligofructose. In S. Jardine (Ed.). *Prebiotics and probiotics* (pp. 3-30). Wiley-Blackwell. United Kingdom.
- Gibson, G. R.; M. Roberfroid. 1995. Dietary modulation of the human colonic microflora: introducing the concept of prebiotics. *Journal of Nutrition*. 125:1401-1412.
- Gupta, A. K.; N. Kaur; N. Kaur. 2003. Preparation of inulin from chicory roots. *Journal of Scientific & Industrial Research*. 62:916-920.
- Hendry, G. 1993. Evolutionary origins and natural functions of fructans - a climatological, biogeographic and mechanistic appraisal. *New Phytol*. 123: 3-14.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2001 a 2012. Anuarios estadísticos de comercio exterior de los Estados Unidos Mexicanos. Importación y exportación.
- Kays, S. J.; S. F. Nottingham. 2007. *Biology and chemistry of Jerusalem artichoke*. CRC. Boca Raton, Florida USA. 492 p.
- Leach, J. D.; K. D. Sobolik, 2010. High dietary intake of prebiotic inulin-type fructans in the prehistoric Chihuahuan Desert. *British Journal of Nutrition*. 103: 1558-1561.
- López, M. G.; N. A. Mancilla M.; G. Mendoza D. 2003. Molecular structures of fructans from *Agave tequilana* Weber var. azul. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*.

Capítulo

3. Extracción y caracterización de fructanos de *Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck

Extracción y caracterización de fructanos de *Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck

César I. Godínez-Hernández^{1,2*}; Juan R. Aguirre-Rivera²; Bertha I. Juárez-Flores²;
María D. Ortiz-Pérez³; Jaime Becerra-Jiménez².

¹Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), Programas Multidisciplinarios de Posgrados en Ciencias Ambientales. Av. Manuel Nava 201, 2° piso Zona Universitaria. C. P. 78210. San Luis Potosí, S. L. P. México.

²UASLP, Instituto de Investigación de Zonas Desérticas. Altair 200, col. Del Llano. C. P. 78377. San Luis Potosí, S. L. P. México. Correo-e: navingod_@hotmail.com Tel.: (52) (444) 8 42 23 59 (*Autor para correspondencia).

³UASLP, Facultad de Medicina. Av. Venustiano Carranza 2405, Zona Universitaria. C. P. 78210. San Luis Potosí, S. L. P. México.

Publicado como artículo en la Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 22(1):59-72. 2016.

Resumen

Los fructanos son polímeros de fructosa con grandes aplicaciones en la industria de alimentos funcionales. Aunque los fructanos de *Agave angustifolia* spp. *tequilana* ya se producen industrialmente y comienzan a tener demanda en EE. UU., para su extracción se sigue utilizando la cabeza de maguey (tallo y bases foliares) con madurez variable, lo cual repercute en la calidad y en procesos que encarecen la producción. En este trabajo se describe un método alternativo para la extracción de fructanos de tallos de *Agave salmiana*, el cual es más simple y facilita la obtención de manera natural u orgánica. Se evaluaron los rendimientos absoluto y relativo del concentrado de fructanos (CF), referidos tanto al tallo como a la cabeza de maguey, así como su calidad mediante el análisis por cromatografía líquida de alta resolución (HPLC). El rendimiento de CF (95 % MS de materia seca) del tallo fresco fue de 21 % y casi 80 % del tallo seco. El CF libre de humedad está compuesto por cerca de 80 % de fructanos y el resto por trisacáridos (cerca de 9.5 %), cenizas (5 %), sacarosa (1 %) y sapogeninas (0.85 %); cantidades de glucosa y fructosa no fueron detectables (< 0.002 %).

Palabras clave: Maguey mezcalero potosino, uso alternativo de maguey, madurez fisiológica de maguey, rendimiento y calidad de extracto.

3.1 Introducción

Los fructanos son polisacáridos de reserva que algunas plantas sintetizan a partir de sacarosa y moléculas de fructosa (Banguela & Hernández, 2006). Los fructanos de origen vegetal presentan menor grado de polimerización (GP, ≤ 200 moléculas de fructosa) que los de origen microbiano y estructuras más complejas (Olvera, Castillo, & López-Munguía, 2007), y se diferencian entre sí por su estructura y GP (López, Mancilla-Margalli, & Mendoza-Díaz, 2003; Chalmers *et al.*, 2005; Mancilla-Margalli, & López, 2006; Waleckx, Gschaedler, Colonna-Ceccaldi, & Monsan, 2008).

Los fructanos han estado presentes en la alimentación humana por miles de años, a través del consumo de órganos vegetales donde dichos polisacáridos se almacenan como sustancias de reserva (Leach, 2007; Leach & Sobolik, 2010). Actualmente, los fructanos de mayor importancia comercial a nivel mundial son la inulina y la oligofructosa. Esta última se obtiene de la hidrólisis enzimática parcial de la inulina extraída de la raíz de achicoria (*Cichorium intybus* L.) (Coussement, 1999). La inocuidad de la inulina y la oligofructosa para su uso en la elaboración de alimentos se ha catalogado dentro de las denominadas “sustancias generalmente reconocidas como inocuas” (GRAS, por sus siglas en inglés) en EE. UU., y como “ingredientes alimentarios y no como aditivos” en la Unión Europea (Coussement, 1999).

Existe una demanda creciente de fructanos comerciales como ingredientes de alimentos procesados de consumo diario catalogados como funcionales (Kays & Nottingham, 2007). Además, los fructanos se utilizan como ingredientes mejoradores de textura y consistencia de productos alimentarios, en sustitución de almidón y grasa, con lo cual, a la vez, se reduce el contenido energético del alimento (Franck, 2002). Los fructanos pasan por el tracto digestivo intactos sin aporte calórico a la sangre (Niness, 1999); además tienen propiedades prebióticas, pues constituyen el sustrato específico para bacterias de los géneros *Lactobacillus* y *Bifidobacterium* del colon, las cuales producen cambios que favorecen la salud del hospedero (Gibson & Roberfroid, 1995). Así, el consumo de fructanos mejora el funcionamiento del tracto digestivo, favorece la regulación de la glucosa y el perfil lipídico en la sangre, evita el estreñimiento, ayuda a la absorción de

algunos minerales como el calcio y reduce el riesgo de enfermedades cardiovasculares, diabetes y cáncer de colon (Greg, 2009).

En México, la inulina se comenzó a importar en el año 2000 (13.3 t) (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2001) y ya en 2011 se registraron 3,338.24 t (INEGI, 2012). A la vez, en 2001 se exportaron 24.5 t de inulina y 1,123.07 t en 2011. Las importaciones y exportaciones quedaron registradas como inulina, pero se deduce que la inulina importada es de achicoria y la exportada son fructanos de maguey, principalmente de *Agave angustifolia* Haw. spp. *tequilana* Valenzuela-Zapata & Nabhan, mal denominados “inulina de *Agave*”.

Las primeras evidencias de la presencia de polisacáridos de fructosa en especies de *Agave* las aportaron Sánchez- Marroquín y Hope (1953). Luego, López *et al.* (2003) establecieron la estructura molecular de los fructanos del maguey tequilero y encontraron que presentan estructuras ramificadas y mayor grado de polimerización que los de achicoria. Esto desencadenó una serie de trabajos sobre las propiedades, procesos de extracción, variación y evaluación biológica de los compuestos de reserva de las especies de *Agave*, particularmente del maguey tequilero (López, Huazano-García, García- Pérez, & García-Vieyra, 2014). En los magueyes, la edad cronológica o el tamaño son menos útiles que la madurez fisiológica para reconocer su máxima acumulación de sustancias de reserva (fructanos) y, a la vez, su menor contenido de saponinas (Aguirre, Charcas, & Flores, 2001). El inicio del escape floral (quiote) marca el final de la formación de hojas (pencas) y el comienzo de la despolimerización de los fructanos; es decir, el consumo de las sustancias de reserva en la formación y sostenimiento de los órganos reproductores (Aguirre *et al.*, 2001). Así, para el aprovechamiento racional del maguey es fundamental reconocer el cambio de estado vegetativo a reproductor, a lo cual se le denomina maguey quiotillo en el altiplano potosino (Aguirre *et al.*, 2001). Otro factor muy importante para la calidad de los fructanos es si se utiliza la cabeza entera del maguey (conformada por el tallo y las bases de las pencas) como materia prima, en vez de solamente el tallo, órgano de la planta donde se acumulan las sustancias de reserva (Michel-Cuello, Juárez-Flores, Aguirre-Rivera, & Pinos-Rodríguez, 2008). Al procesarse la cabeza entera, como ha sido lo adecuado para

otros propósitos, se requieren operaciones más complejas y costosas para eliminar otros compuestos existentes en la base de las pencas.

De acuerdo con Mora-López, Reyes-Agüero, Flores-Flores, Peña-Valdivia, y Aguirre-Rivera (2011), *Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck es la especie de maguey con más amplia distribución en el altiplano mexicano. En particular, en las regiones semiáridas del altiplano potosino, este maguey es un recurso espontáneo abundante y subutilizado, y a sus productos, como los fructanos, se les pueden añadir fácilmente atributos naturales que incrementen su valor (Aguirre *et al.*, 2001). Algunos trabajos recientes sobre fructanos de *A. salmiana* se han enfocado en investigar su hidrólisis enzimática (Michel- Cuello *et al.*, 2012), depuración de monosacáridos (Moreno, 2013), secado del extracto de fructanos, así como su evaluación funcional *in vitro* (Moreno-Vilet *et al.*, 2014) y en un modelo animal (Dávila-Céspedes *et al.*, 2014). Sin embargo, aún falta simplificar y estandarizar su extracción, y caracterizar el producto final. Con base en lo anterior, el objetivo de este trabajo fue evaluar el rendimiento y calidad del concentrado de fructanos de tallos de plantas maduras de *A. salmiana*, extraído de la forma más simple y natural posible.

3.2 Materiales y métodos

El proceso de extracción se basó en la alta solubilidad de los fructanos en agua, lo cual permite obtener un extracto natural, ya que no requiere de procesos y reacciones químicas para separarlos. En todo el proceso se aplicaron temperaturas menores de 55 °C para evitar hidrólisis térmica.

3.2.1 Material biológico

En el potrero de recolecta de maguey del ejido Miguel Hidalgo (Charcas, San Luis Potosí), que abastece a la fábrica de mezcal Laguna Seca, se seleccionaron cinco cabezas de maguey de diferente tamaño, pero con los rasgos de madurez fisiológica. Las cabezas se llevaron a los patios de la fábrica y se pesaron (Básculas Nuevo León D13, México); cada una se seccionó en tallo y bases de pencas y se pesaron las partes por separado. Posteriormente, en el laboratorio, cada tallo se dividió en tres partes similares para pesarlas (Tecnocor PPN-30, México) y procesarlas de manera individual el mismo día de su recolecta. A la vez, se tomó una muestra de bases de pencas (10 % del peso de la cabeza de

maguey), para determinar su contenido de materia seca, con el propósito de referir el rendimiento del concentrado de fructanos con base en el peso fresco y seco de la cabeza de maguey, la forma actual de aprovechamiento.

3.2.2 Extracción del concentrado de fructanos (CF)

Un tercio del tallo se utilizó para estimar el contenido de materia seca. El segundo tercio se sometió a la acción de un extractor de jugos (International EX-S, México) para separar el extracto líquido considerado como jugo primario y el residuo sólido o bagazo. El jugo se filtró con dos coladeras de muselina, se midió el pH con un potenciómetro (Hanna Instruments H198127, Italia) y los sólidos solubles (°Brix) con un refractómetro digital (Reichert AR200, EE. UU.). Este jugo primario se estabilizó con una misma cantidad de agua destilada en baño María a 53 ± 2 °C por 60 min, pues el extracto acuoso se descompone rápidamente, incluso después de un día en refrigeración, como también sucede con el extracto crudo de achicoria (Van Arkel *et al.*, 2014). Inmediatamente, el jugo primario se colocó en recipientes herméticos y se congeló a -10 °C (Torrey CHTC25, EE. UU.). El bagazo del jugo primario se exprimió en un dispositivo de acero inoxidable diseñado para la extracción de jugos a una presión constante de 14 kg·cm⁻² por medio de una prensa hidráulica de 30 t (Urrea 2471, España). El jugo recuperado del bagazo se denominó jugo secundario y, al igual que el primario, se filtró, se midió pH y °Brix, se estabilizó y se congeló. Posteriormente, el bagazo prensado se rehidrató con un volumen de agua destilada igual al jugo obtenido (jugo primario + jugo secundario) y se estabilizó en baño María; luego se prensó y el extracto generado se procesó como los dos anteriores, al cual se denominó jugo terciario. Previamente se estableció que el bagazo rehidratado y exprimido más de dos veces aportaba muy poco (2 %) al extracto total. Debido a la falta de equipo de secado al vacío para muestras grandes, en un equipo de cocción e impregnación en vacío (J. P. Selecta Gastrovac, Barcelona, España) se hizo una evaporación parcial de los jugos primario, secundario y terciario, por separado, para la desecación de los extractos.

Las características originales del equipo impidieron llevar los extractos a sequedad total, por lo que fue necesario cambiar la tapa original de metacrilato por una tapa plana de acero inoxidable con una salida de vapores al centro y una camisa sellada, para introducir un termómetro al área de vaporización; además, se adaptó un condensador externo entre la

salida de vapores y la línea de vacío. Todos los jugos se evaporaron parcialmente, de manera independiente, a 75 % del vacío total y 42 ± 1 °C, hasta obtener 20 % del volumen original o hasta que el extracto tomara una consistencia densa de aproximadamente 50 °Brix; la tasa de condensación resultante fue de 100 mL de agua por 10 min. Posteriormente, los jugos concentrados se vertieron en moldes de silicón (para hornear) con espesor mínimo para llevarlos a sequedad (aproximadamente 95 % de materia seca [MS]) en un horno de aire forzado (Shel-Lab FX-14, EE. UU.) a 53 ± 2 °C, lo cual tardó en promedio 35 h. El extracto seco se retiró de los moldes y quedó en forma de escamas, las cuales se molieron en mortero, tamizaron, pesaron y almacenaron en recipientes herméticos.

El tercio de tallo restante se sometió a extracción como el anterior, pero los jugos descongelados se centrifugaron a 4,000 rpm (Damon PR-6000, EE. UU.) para decantarlos y desecar el sobrenadante y el sedimento por separado, pues se observó que los jugos al descongelarse presentaban un sedimento blanco en el fondo de los recipientes, lo cual podría facilitar la depuración del extracto. Para evaluar la calidad de los fructanos se hizo una mezcla homogénea con los concentrados obtenidos de los jugos primario, secundario y terciario del segundo tercio del tallo, se tomó una muestra y se secó totalmente en un horno de aire forzado a 35 ± 2 °C hasta peso constante. La muestra libre de humedad se colocó en recipientes y se almacenaron en un desecador hasta su análisis. El procedimiento anterior también se siguió en las muestras de concentrados del sobrenadante y sedimento derivados del último tercio del tallo.

3.2.3 Evaluación del rendimiento relativo y absoluto de fructanos

El rendimiento absoluto y relativo de fructanos se calculó con base en los pesos registrados (Ohaus 5120, EE. UU.) de la materia fresca y materia seca, tanto del tallo como de la cabeza completa.

3.2.4 Contenido de humedad del tallo

Una muestra de 100 g del tercio de cada tallo se pesó (Ohaus 5120, USA) y se secó hasta peso constante en un horno de aire forzado a 80 ± 2 °C (Shel-Lab FX-14, EE. UU.), para estimar el contenido de humedad; cada medición se hizo por triplicado.

3.2.5 Contenido de cenizas totales del extracto de fructanos

Las cenizas totales se obtuvieron mediante la calcinación de las muestras. Para ello se pesaron 5 g (Sartorius BP221S, Alemania) del concentrado de fructanos libre de humedad, mismo que se calcinó en una mufla (Lindberg 51844, México) a 550 °C por 2 h. La muestra se enfrió, se colocó en un desecador y se pesó en una balanza analítica (Sartorius BP221S, Alemania). El porcentaje de cenizas totales se obtuvo por diferencia de pesos respecto al peso inicial; cada medición se realizó por triplicado.

3.2.6 Cuantificación de sapogeninas del concentrado de fructanos

La extracción de sapogeninas se basó en la metodología descrita por Zamora *et al.* (2010), para lo cual se hizo una hidrólisis ácida de 30 mg de muestra y se aforó en un matraz volumétrico de 10 mL. En un tubo de ensayo se tomaron 2 mL de la solución y 2 mL de H₂SO₄ (2 N); la mezcla se calentó a 110 °C por 1.5 h en un baño seco (Labnet Internantional Inc. D1200, EE. UU.). Luego de que los tubos alcanzaron la temperatura ambiente se hizo una extracción con 5 mL de acetato de etilo. Los tubos se agitaron en un vortex (Barnstead Thermolyne M37615, Iowa, EE. UU.), se sumergieron en un baño de ultrasonido (Bransonic 1510R-MT, Danbury, EE. UU.) por 1 minuto y se separó la capa orgánica en otro tubo de ensayo. Las sapogeninas se cuantificaron con el método descrito por Baccou, Lambert, y Sauvair (1977), para lo cual se utilizó una curva estándar de 2.5, 5, 10, 15 y 20 µg·mL⁻¹ de diosgenina (Sigma-Aldrich, EE.UU.). Las lecturas de absorbancia se hicieron a 430 nm de longitud de onda en un espectrofotómetro (HP-Agilent Technologies 8453, Alemania).

3.2.7 Cuantificación de carbohidratos por cromatografía líquida de alta resolución

Los carbohidratos presentes en los extractos se cuantificaron de acuerdo con el método descrito por Zuleta y Sambucetti (2001). A diferencia de la cromatografía de intercambio iónico de alta resolución con detector de pulsos amperométricos (HPAEC-PAD, por sus siglas en inglés), el método usado no logra separar los componentes con más de cinco grados de polimerización de manera individual, pero sí los monosacáridos, disacáridos, trisacáridos y tetrasacáridos, por lo cual, los fructanos con grado de

polimerización mayor de cinco se integraron en una sola área. Para este caso, el estándar usado como referente fue inulina (Sigma-Aldrich, EE. UU.). Este método se ha utilizado para el análisis de fructooligosacáridos e inulina en productos alimentarios por ser práctico y rápido (Van Loo, Coussement, De Leenheer, & Hoebregs, 1995). En consecuencia, se usó en fase normal, un cromatógrafo (HP-Agilent Technologies serie 1100, Alemania) compuesto por un desgasificador, bomba cuaternaria, compartimiento térmico de columna y detector de índice de refracción. Como fase estacionaria se utilizó una columna de intercambio iónico (HP-Animex 87-C [7.8 mm d. i. x 300 mm] Bio Rad, EE. UU.). Como fase móvil se utilizó agua grado HPLC (Fermont, México) con un flujo de 0.5 mL·min⁻¹. La temperatura de la columna fue de 75 °C y la del detector de 50 °C con un tiempo de operación por muestra de 20 min. Las muestras se ajustaron a pH 7 antes de su inyección. Los carbohidratos se identificaron con base en la comparación de los tiempos de retención con los correspondientes a los estándares de referencia: inulina, sacarosa, glucosa, fructosa (Sigma-Aldrich, EE. UU.), nistosa y 1-kestosa (Wako Laboratory Chemicals, Japón), todos con pureza mayor de 98 % (**Figura 3.1**). Para la cuantificación de carbohidratos se construyó una curva de calibración lineal por cada estándar de referencia ($r \geq 0.994$) y se determinó su constante de linealidad (pendiente). El límite de cuantificación para fructosa y glucosa (carbohidratos encontrados en menor proporción en las muestras) fue de 0.02 mg·mL⁻¹ y 0.07 mg·mL⁻¹, respectivamente.

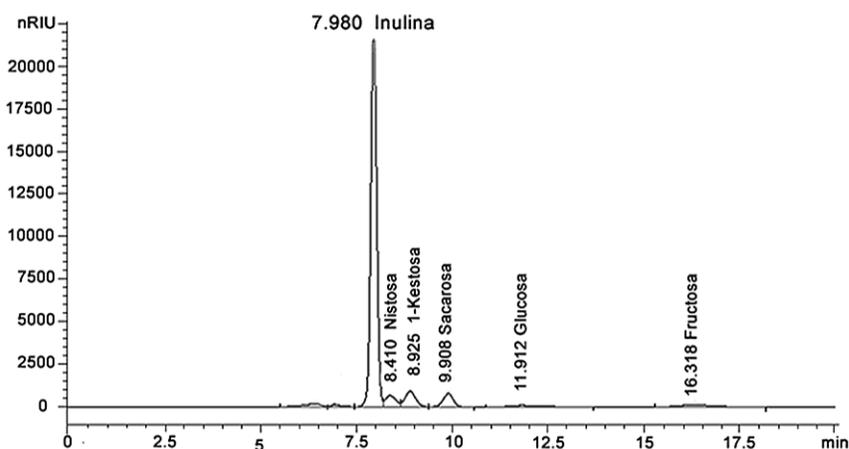


Fig. 3.1 Separación e identificación de azúcares del concentrado de fructanos de *Agave salmiana* con estándares externos por HPLC.

3.2.8 Análisis estadístico

Los datos derivados del proceso de extracción y de la composición del concentrado de fructanos se representaron con su valor medio y desviación estándar respectiva.

3.3 Resultados y discusión

3.3.1 Extracción de fructanos

Con el método de extracción a base de operaciones y procesos simples, como es el uso de un extractor de jugos y una prensa hidráulica, se pudo obtener jugo primario con cerca de 55 % de los fructanos (CF) totales extraíbles, jugo secundario (recuperado del bagazo prensado) con 32 % y jugo terciario (del lavado y prensado del bagazo) con 12 % de los fructanos totales posibles (**Cuadro 3.1**). Un segundo lavado del bagazo sólo permitió añadir 2 % al concentrado total de fructanos, lo cual se consideró inviable, al tener que evaporar volúmenes de agua similares a los de los jugos anteriores.

Cuadro 3.1 Concentrado de fructanos (CF) obtenido (%) en cada etapa del método de extracción utilizado, a partir de tallos de *Agave salmiana*.

	Repetición					Media ± DE
	1	2	3	4	5	
CF del jugo primario (jugo del extractor)	58.72	58.19	53.75	51.74	55.03	55.49 ± 2.96
CF del jugo secundario (bagazo prensado)	33.49	30.00	35.26	30.27	32.29	32.26 ± 2.21
CF del jugo terciario (bagazo lavado y prensado)	8.79	11.81	10.99	16.99	12.68	12.25 ± 3.02
	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

DE: Desviación estándar

Al utilizar únicamente el tallo de la planta como materia prima fue innecesario recurrir a equipos de filtración (resinas de intercambio iónico, carbón activado, nanofiltración, etc.) y procesos costosos para separar los contaminantes presentes en las bases de las pencas (saponinas, clorofilas, ceras), así como los di, tri y tetrasacáridos en vías de polimerización para ser almacenados en el tallo. El uso de agua caliente como solvente fue suficiente para complementar la extracción, al igual que en el proceso de obtención de inulina de la raíz de achicoria (Niness, 1999), y resulta lo más adecuado para obtener un producto alimentario lo más natural posible.

El pH de los jugos primario, secundario y terciario osciló entre 5.6 y 5.8; este pH ligeramente ácido fue mayor que el encontrado típicamente en los fluidos foliares de especies de *Agave*, por su tipo de metabolismo (metabolismo ácido de las crasuláceas) (Medrano & Flexas, 2008). El pH tiene un papel importante en las reacciones enzimáticas que ocurren a nivel celular en la planta, las cuales continúan durante y después del proceso de extracción, si no son inhibidas. En algunos trabajos se ha neutralizado la acidez natural con NaOH para inhibir la actividad enzimática (Gupta, Kaur, & Kaur, 2003); sin embargo, en este estudio, para evitar tratamientos químicos se recurrió a la inactivación enzimática con agua destilada (que a la vez disuelve los fructanos) a 55 °C por 60 min y a la congelación de los jugos. Estas operaciones fueron críticas, pues la posibilidad de que las reacciones enzimáticas continúen es muy alta (Van Arkel *et al.*, 2014), aún bajo refrigeración. De ahí la importancia de la extracción, estabilización y congelación de los jugos el mismo día de la recolección de la cabeza de maguey.

La concentración de sólidos solubles de los jugos primario y secundario del tallo oscilaron entre 25.0 y 28.8 °Brix, valores mucho mayores que los 11.7 °Brix encontrados en el jugo crudo de la cabeza completa de *A. salmiana* (Moreno, 2013). Esto se debe a que el mayor contenido de fructanos y materia seca se encuentra en el tallo (Aguirre *et al.*, 2001; Michel- Cuello *et al.*, 2008), y al procesar la cabeza completa ocurre un efecto de dilución con la mayor humedad de las bases de las pencas. El jugo terciario tuvo de 5.4 a 7.2 °Brix, lo cual corresponde principalmente a los fructanos remanentes, recuperados con el lavado y prensado del bagazo.

El tiempo promedio estimado para desecar 12 L de jugo (primario, secundario y terciario) obtenido del tallo de una cabeza de 57.6 kg, hasta alcanzar 95 % MS, fue de 55 h. Este tiempo fue mucho menor que las 480 h (20 días) promedio requeridas por Franco (2012) para el mismo propósito, con sólo un horno de aire forzado.

3.3.2 Rendimiento absoluto y relativo de concentrado de fructanos

Como se muestra en el **Cuadro 3.2**, el tallo de una cabeza de maguey de 57.6 kg (menos de 10 % del peso total) rinde en promedio 1.05 kg de fructanos con 95 % de materia seca. Además, las bases de las pencas de esta cabeza pueden utilizarse como forraje

o para producir mezcal; así, dicho rendimiento permite valorar el uso alternativo de la cabeza de maguey y sus partes como materia prima.

Cuadro 3.2 Rendimiento absoluto y relativo de concentrado de fructanos (CF) del tallo de *Agave salmiana*.

	Repetición					Media ± DE
	1	2	3	4	5	
Peso fresco de la cabeza (kg)	44.50	43.50	58.50	88.00	53.50	57.60 ± 18.11
Peso seco de la cabeza (kg)	7.65	8.11	10.70	16.02	9.40	10.38 ± 3.37
Peso del tallo fresco (kg)	3.00	3.00	5.50	9.14	4.25	4.98 ± 2.55
Peso del tallo seco (kg)	0.72	0.69	1.69	2.75	1.12	1.39 ± 0.85
Proporción del tallo respecto de la cabeza (%)	6.74	6.90	9.40	10.39	7.94	8.27 ± 1.59
CF (95 % MS, kg)	0.63	0.64	1.10	1.96	0.93	1.05 ± 0.55
Rendimiento de CF con base en el peso fresco del tallo (%)	21.00	21.30	20.00	21.44	21.88	21.12 ± 0.70
Rendimiento de CF con base en el peso seco del tallo (%)	81.82	83.12	80.88	75.10	76.23	79.43 ± 3.55
Rendimiento de CF con base en el peso fresco de la cabeza (%)	1.42	1.47	1.88	2.23	1.74	1.75 ± 0.33
Rendimiento de CF con base en el peso seco de la cabeza (%)	8.24	7.89	10.28	12.23	9.89	9.71 ± 1.75
Bagazo seco del tallo (%)	0.14	0.13	0.26	0.65	0.29	0.29 ± 0.21
Bagazo seco con base en el peso fresco del tallo (%)	4.67	4.33	4.73	7.11	6.82	5.53 ± 1.32
Bagazo seco con base en el peso seco del tallo (%)	19.44	18.84	15.35	23.64	25.89	20.64 ± 4.15

DE: Desviación estándar

MS: Materia seca

Cuadro 3.3 Contenido relativo de fructanos en *Agave salmiana* y otras especies.

Especie	Parte procesada	Base fresca	Fuente	Base seca	Fuente
Pataca - <i>Helianthus tuberosus</i> L.	Tubérculo	16-20	Franck (2009)	-	-
Achicoria - <i>Cichorium intybus</i> L.	Raíz	15-20	Franck (2009)	70	Franck (2009)
Achicoria - <i>Cichorium intybus</i> L.	Raíz	15-29	Gupta <i>et al.</i> (2003)	70-80	Gupta <i>et al.</i> (2003)
Maguey tequilero - <i>A. tequilana</i> F. A.C. Weber	Cabeza	-	-	60	López & Mancilla-Margalli (2007)
Maguey mezcalero - <i>A. salmiana</i> Otto ex Salm-Dyck	Tallo	20-21	Presente estudio	75-82	Presente estudio

Del tallo fresco de una cabeza promedio de maguey mezcalero (57.6 kg) se obtuvo un rendimiento promedio de CF (95 % MS) de 21 %, y con respecto al peso seco del tallo, el rendimiento fue de casi 80 %; ambos valores son similares al contenido de inulina con base en el peso fresco (15 a 20 %) y seco (70 a 80 %) de las raíces de achicoria (Franck, 2002; Gupta *et al.*, 2003). El **Cuadro 3.3** se compara el contenido de fructanos de *A. salmiana* y otras especies. El menor rendimiento de fructanos con base en el peso seco de la cabeza, documentado por Mancilla- Margalli y López (2006) para sotol (especie del género *Dasyilirion*) y diferentes tipos de magueyes, de cerca de 60 %, es de esperarse, al utilizar las cabezas enteras como materia prima, con todos los inconvenientes ya señalados, referentes a la complejidad de procesos y calidad de los fructanos extraídos.

3.3.3 Calidad del concentrado de fructanos

El **Cuadro 3.4** presenta los resultados de la evaluación de la calidad media del CF (llevado a peso constante); es decir, el contenido relativo de fructanos extraídos del tallo de una planta madura de *A. salmiana*. Como se mencionó anteriormente, se usó un estándar de inulina como referente, ya que el equipo y el método impide una mayor resolución para fructanos con grado de polimerización mayor a cinco; por ello, el término inulina de esta metodología en realidad corresponde a los fructanos de maguey (agavinas, según López *et al.*, 2014). Se encontró que el concentrado del extracto íntegro del segundo tercio del tallo tiene 78.31 % de fructanos de maguey con más de cinco grados de polimerización, y que los contenidos de glucosa y fructosa no fueron detectables (< 0.02 %). La composición del concentrado de fructanos del sobrenadante del tercer tercio de tallo fue similar a la composición del concentrado íntegro del segundo tercio, incluso en su recuperación total (95.03 %), y ambos presentaron también aspecto blanquecino. En cambio, la composición del CF del sedimento del tercer tercio de tallo fue diferente hasta en su aspecto, ya que presentó coloración castaña oscura, contenidos de cenizas totales y sapogeninas mayores y menor porcentaje de recuperación (79.31 %), quizá porque contiene compuestos no identificados ni cuantificados con esta metodología. Con respecto al peso del extracto total, la proporción del sedimento es de sólo 5.6 %, por lo que la centrifugación puede ser una práctica viable para depurar un poco más los fructanos de maguey.

Cuadro 3.4 Calidad del concentrado de fructanos (CF) de *Agave salmiana* (libre de humedad).

	CF del extracto íntegro (mg·g ⁻¹)	CF del extracto centrifugado (mg·g ⁻¹)	
		Sobrenadante	Sedimento
Inulina (fructanos de maguey)	783.10 ± 58.05	778.1 ± 62.43	641.1 ± 100.80
Nistosa	72.46 ± 19.39	78.80 ± 20.59	56.32 ± 15.47
1-Cestosa	22.36 ± 8.66	21.14 ± 9.93	7.00 ± 3.76
Sacarosa	12.24 ± 6.86	17.80 ± 12.21	4.43 ± 8.37
Glucosa	ND	ND	ND
Fructosa	ND	ND	ND
Sapogeninas	8.42 ± 0.66	8.34 ± 0.60	11.12 ± 1.64
Cenizas	48.68 ± 8.4	46.09 ± 6.64	76.03 ± 6.27
Recuperación	947.32	950.37	793.15

ND= No detectable (< 0.02 mg/ml)

3.4 Conclusiones

El uso de los tallos como materia prima permite aplicar procedimientos simples y naturales para la extracción de fructanos de maguey. Con el prensado y lavado del bagazo se puede casi duplicar el volumen de CF obtenidos con un extractor. El rendimiento de CF fue de 21 % del peso fresco del tallo de un maguey maduro y cerca de 80 % del peso seco del tallo. El concentrado de fructanos de maguey, libre de humedad, presentó una pureza cercana a 80 % (fructanos con más de cinco grados de polimerización). El uso alternativo o complementario del maguey mezcalero para la extracción de fructanos, con un proceso de extracción simple y natural, puede estimular el aprecio y aprovechamiento de las magueyeras silvestres, y a su vez, el desarrollo rural de la región.

Agradecimientos

Este trabajo se realizó con el Fondo de Apoyo a la Investigación - UASLP (C14-FAI-04-61.61). CIGH agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca (289510) para estudios de doctorado.

3.5 Bibliografía citada

- Aguirre R., J. R., Charcas S., H., & Flores F., J. L. 2001. *El maguey mezcalero potosino*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Consejo Potosino de Ciencia y Tecnología. San Luis Potosí, SLP. México. 78 p.
- Baccou, J. C., Lambert, F., & Sauvaire, Y. 1977. Spectrophotometric method for the determination of total steroidal saponin. *The Analyst*. 102: 448-465. doi: 10.1039/AN9770200458
- Banguela, A., & Hernández, L. 2006. Fructans: from natural sources to transgenic plants. *Biotecnología Aplicada* 23(3): 202-210. Obtenido de: http://www.researchgate.net/publication/228488099_Fructans_from_natural_sources_to_transgenic_plants
- Chalmers, J., Lidgett, A., Cummings, N., Cao, Y., Foster, J., & Spangenberg, G. 2005. Molecular genetics of fructan metabolism in perennial ryegrass. *Plant Biotechnology Journal*. 3:459-474. Obtenido de: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-7652.2005.00148.x>
- Coussement A., P. A. 1999. Inulin and oligofructosa: Safe intakes and legal status. *The Journal of Nutrition*. 1412S-1417S. Obtenido de: <http://jn.nutrition.org/content/129/7/1412S.full>
- Dávila-Céspedes, A., Juárez-Flores, B. I., Pinos-Rodríguez, J. M., Aguirre-Rivera, J. R., Oros-Ovalled, A. C., Loyola Martínez, E. D., & Andrade-Zaldivar, H. 2014. Protective effect of *Agave salmiana* fructans in azoxymethane-induced colon cáncer in Wistar rats. *Natural Products Communications*. 9 (10):1503-1506. Obtenido de: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25522547>
- Franck, A. 2002. Technological functionality of inulin and oligofructose. *British Journal of Nutrition*. 2: 287–291. doi: 10.1079/BJN/2002550
- Franck, A. 2009. Inulin and oligofructose. In S. Jardine (Ed.). *Prebiotics and probiotics* (pp. 3-30). Wiley-Blackwell. United Kingdom.
- Franco, A. B. P. 2012. *Método de extracción de fructanos de maguey (Agave salmiana Otto ex Salm-Dyck)*. Tesis de maestría, Programa Multidisciplinario de Posgrados en Ciencias Ambientales, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México.
- Gibson, G. R., & Roberfroid, M. 1995. Dietary modulation of the human colonic microflora: introducing the concept of prebiotics. *Journal of Nutrition*. 125:1401-1412. Obtenido de: <http://jn.nutrition.org/content/129/7/1438S.full>
- Greg, K. 2009. Inulin-type prebiotics: A review (Part 2). *Alternative Medicine Review*. 14(1): 36-55. Obtenido de: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19364192>

- Gupta, A. K., Kaur, N., & Kaur, N. 2003. Preparation of inulin from chicory roots. *Journal of Scientific & Industrial Research*. 62:916-920. Obtenido de <http://nopr.niscair.res.in/handle/123456789/26337>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2001-2012. *Anuarios estadísticos de comercio exterior de los Estados Unidos Mexicanos*. Obtenido de <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/productos/>
- Kays, S. J., & Nottingham S. F. 2007. *Biology and chemistry of Jerusalem artichoke*. CRC. Boca Raton, Florida USA. 492 p.
- Leach, J. D. 2007. Prebiotics in ancient diets. *Food Science and Technology Bulletin: Functional Foods*. 4 (1):1-8. doi: 10.1616/1476-2137.14801
- Leach, J. D., & Sobolik, K. D. 2010. High dietary intake of prebiotic inulin-type fructans in the prehistoric Chihuahuan Desert. *British Journal of Nutrition*. 103: 1558-1561. Obtenido de: <http://dx.doi.org/10.1017/S0007114510000966>.
- López, M. G., Mancilla-Margalli, N. A., & Mendoza-Díaz, G. 2003. Molecular structures of fructans from *Agave tequilana* Weber var. azul. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 51: 7835-7840. doi: 10.1021/jf030383v
- López, M. G., Huazano-García A., García-Pérez M. C., & M. García-Vieyra I. 2014. *Agave* fiber structure complexity and its impact on health. In N. Benkeblia (Ed.). *Polysaccharides: Natural fibers in food and nutrition*. (pp. 45-74). CRC. Boca Raton, Florida USA.
- Mancilla-Margalli, N., & López, M. G. 2006. Water-soluble carbohydrates and fructan structure patterns from *Agave* and *Dasyliirion* species. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 54: 7832-7839. doi: 10.1021/jf060354v
- Medrano, H., & Flexas J. 2008. Fotorrespiración y mecanismos de concentración del dióxido de carbono. In J., Azcon B., & M., Talon (Eds.). *Fisiología vegetal*. (pp. 227-246) Interamericana. McGraw Hill. Madrid, España.
- Michel-Cuello, C., Juárez-Flores, B. I., Aguirre-Rivera, J. R., & Pinos Rodríguez, J. M. 2008. Quantitative characterization of non-structural carbohydrates of mezcal *Agave* (*Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 56 (14): 5753-5760. doi: 10.1021/jf800158p
- Michel-Cuello, C., Ortiz-Cerda, I., Moreno-Vilet, L., Grajales-Lagunes, A., Moscosa-Santillán, M., Bonnin, J., González-Chávez, M. M., & Ruiz-Cabrera, M. 2012. Study of enzymatic hydrolysis of fructans from *Agave salmiana* characterization and kinetic assessment. *The Scientific World Journal*. 2012: 863432. 1-10 p. doi: 10.1100/2012/863432

- Mora-López, J. L., Reyes-Agüero, J. A., Flores-Flores, J. L., Peña-Valdivia, C. B., & Aguirre-Rivera, J. R. 2011. Variación morfológica y humanización de la sección *Salmianae* del género *Agave*. *Agrociencia*. 45: 465-477. Obtenido de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30219802006>
- Moreno V., L. 2013. *Obtención de un producto con alto contenido de fructanos a partir de Agave salmiana y su evaluación biológica*. Tesis de doctorado. Programa de Posgrado en Bioprocesos. Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, SLP. México. 107 p.
- Moreno-Vilet, L., García-Hernández, M. H., Delgado-Portales, R. E., Corral-Fernández, N. E., Cortez-Espinoza, N., Ruíz-Cabrera, M. A., & Portales-Pérez, D. P. 2014. *In vitro* assessment of *Agave* fructans (*Agave salmiana*) as prebiotics and immune system activators. *International Journal of Biological Macromolecules*. 63: 181-187. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2013.10.039
- Niness, K. R. (1999). Inulin and oligofructosa: What are they? *The Journal of Nutrition*. 1402S-1406S. Obtenido de: <http://jn.nutrition.org/content/129/7/1402S.full>
- Olvera, C., Castillo, E., & López-Munguía, A. 2007. Fructosiltransferasas, fructanas y fructosa. *Biotecnología* 14: 327-345. Obtenido de: http://www.ibt.unam.mx/computo/pdfs/libro_25_aniv/capitulo_29.pdf
- Sánchez-Marroquín, A., & Hope, P. 1953. Fermentation and chemical composition studies of some species of *Agave* juice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 1: 246-249. doi: 10.1021/jf60003a007
- Van Arkel, J., Stévenier, R., Hakkert, J. C., Bouwmeester, H. J., Koops, A. J., & Van Der Meer, I. M. 2014. Fructan biosynthesis regulation and the production of tailor-made fructan in plants. In Nouredine Benkeblia (Ed.). *Polysaccharides: Natural fibers in food and nutrition*. (pp.1-29) CRC. Boca Raton, Florida. USA.
- Van Loo, J., Coussement, P., De Leenheer L., & Hoebregs H. 1995. On the presence of inulin and oligofructosa as natural ingredients in the wester diet. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 35 (6):525-552. doi: 10.1080/10408399509527714
- Vijn, I., & Smeekens, S. 1999. Fructan: ¿More than a reserve carbohydrate? *Plant Physiology*. 120: 351-359. doi: <http://dx.doi.org/10.1104/pp.120.2.351>
- Waleckx, E., Gschaedler, A., Colonna-Ceccaldi, B., & Monsan, P. 2008. Hydrolysis of fructans from *Agave tequilana* Weber var. azul during the cooking step in a traditional tequila elaborations process. *Food Chemistry*. 108:40-48. doi: 10.1016/j.foodchem.2007.10.028
- Zamora P., C., Juárez F., B. I., Aguirre R., J. R., Ortiz P., M. D., Godínez H., C. I., & Álvarez F, G. 2010. Variación de la concentración de azúcares y saponinas durante la cocción del maguey

mezcalero potosino. *e-Gnosi*. 8(7):1-11. Obtenido de: <http://www.e-gnosis.udg.mx/index.php/e-gnosis/article/view/117>

Zuleta, A., & Sambucetti, M. E. 2001. Inulina determination for food labeling. *Journal Agricultural and Food Chemistry*. 49:4570-4572. doi: 10.1021/jf010505o

Capítulo

4. Rendimiento y composición de fructanos de *Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck y *A.* *tequilana* F.A.C. Weber

Rendimiento y composición de fructanos de *Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck y *A. tequilana* F.A.C. Weber

¹Godínez-Hernández, C. I., ²Aguirre-Rivera, J. R., ²Juárez Flores B.I.

¹ Programas Multidisciplinarios de Posgrados en Ciencias Ambientales-Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Av. Dr. Manuel Nava # 201. Agenda ambiental 2° Piso, Zona Universitaria. C.P. 78210. San Luis Potosí, SLP. México

² Instituto de Investigación de Zonas Desérticas-UASLP. Altair #200 Col. Del llano. C.P. 78377. San Luis Potosí, SLP. México

Publicado como capítulo del libro *Sustainable and Integrated use of Agave*. 2016. 153-157.

Resumen

La producción, uso local y exportación de fructanos de *Agave tequilana* F.A.C. Weber (AT) ha crecido recientemente de manera importante; sin embargo, su catalogación como sustancia GRAS aún está en proceso ante la FDA de los EE. UU. Cabe notar que aún falta estandarizar su materia prima para controlar su variación en rendimiento, composición y pureza. Por ello el objetivo de este trabajo fue comparar el rendimiento y composición de los fructanos extraídos de tallos de individuos en plena madurez fisiológica, “quiotillos” de *Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck (AS), y “novillos” de AT. Cada individuo se seccionó en tallo y bases de pencas y se le midió su materia seca, y a cada tallo se le extrajo el concentrado de fructanos (CF) y se le midió la humedad, el rendimiento y la composición de carbohidratos y cenizas. En ambas especies la proporción de CF recuperado en los jugos primarios, secundarios y terciarios fue similar ($p < 0.05$); sólo en los cuaternarios fue mayor en AT. El rendimiento medio total de CF de un tallo de AS es casi una tercera parte del de AT, aunque su concentración en la materia seca del tallo fue similar en ambas especies ($p < 0.05$). En ambas especies, más que 80 % del CF está compuesto principalmente de fructanos mayores que cinco grados de polimerización. El contenido de cenizas fue mayor en AS ($p < 0.05$) que en AT, y están compuestas principalmente por Ca, en forma de cristales de oxalatos tipo rafidios insolubles en agua. Estos cristales son más grandes

($p < 0.05$) en AS que en AT, pero similares en grosor ($p < 0.05$). Estos resultados son relevantes para el escalamiento, diseño y optimización de procesos en nivel industrial.

Palabras clave: *Agave salmiana*, *A. tequilana*, fructanos, composición, rendimiento.

4.1 Introducción

La producción, uso local y exportación de fructanos de maguey tequilero (*Agave tequilana* F.A.C. Weber) (AT) ha crecido muchísimo recientemente (Godínez *et al.* 2016a) y junto con la producción de jarabe derivado de ellos pueden contribuir a reducir las oscilaciones cíclicas en el mercado de este maguey. Para la producción de fructanos erróneamente se sigue utilizando la cabeza de maguey (conformada por el tallo y las bases de las pencas) como materia prima, en vez de tomar únicamente el tallo donde se almacenan los fructanos (Aguirre *et al.*, 2001). Además, al incorporar las bases de las pencas los extractos obtenidos resultan contaminados con compuestos diversos (clorofilas, ceras, saponinas y azúcares) que tienen que ser depurados, y la cosecha de este maguey usualmente basa en la edad cronológica imprecisa. La catalogación de los fructanos de este maguey como sustancias GRAS está en proceso ante la FDA de los EE. UU. (Anónimo, 2015). Sin embargo, aún falta estandarizar la materia prima, para controlar la variación en rendimiento, composición y pureza de dichos fructanos, lo cual depende de la madurez fisiológica de las plantas cosechadas para este propósito y de su estructura usada como materia prima. Para *Agave salmiana* Otto ex Sal-Dyck (AS), con potencial al respecto por su mayor distribución natural en el país (Aguirre *et al.*, 2001), se ha adelantado la estandarización de su materia prima, al utilizar únicamente el tallo, en vez de la cabeza tradicional, de plantas en plena madurez fisiológica (Godínez *et al.*, 2016b). Este estadio es reconocido en el campo como maguey “quiotillo” para el caso de AS, y como maguey “novillo” para AT (**Figura 4.1**). Estos estadios de madurez fisiológica se reconocen en el campo por el adelgazamiento del cogollo y porque las puntas de sus últimas pencas por desplegar se encuentran por debajo del ápice de las ya desplegadas; es decir, este es el estadio previo a la aparición del escapo floral que implica el consumo de los fructanos almacenados (Aguirre *et al.*, 2001). Así, el objetivo de este estudio fue comparar los rendimientos y composición de los fructanos extraídos de tallos de individuos quiotillos o novillos de estas dos especies.

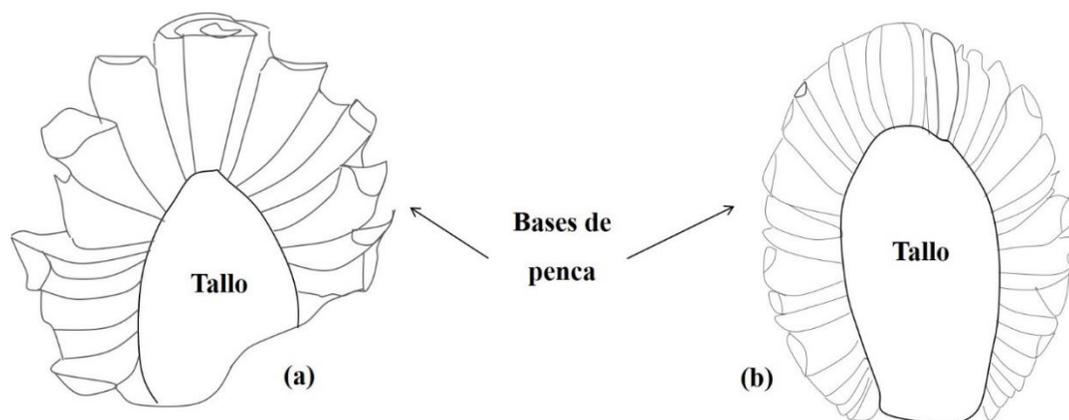


Fig. 4.1 Sección longitudinal de cabezas maduras de a) *Agave salmiana* (quiotillo) y (b) *A. tequilana* (novillo).

4.2 Metodología

Se seleccionaron cinco cabezas en estado quiotillo de AS en Charcas, San Luis Potosí y cinco de AT en estado novillo en el municipio de Arandas, Jalisco, preparadas en la forma usual en ambos casos. Se pesaron y se seccionaron en tallo y bases de pencas; cada sección se pesó y se procesó por separado; se tomó una submuestra de tallo y de bases de penca de cada una y se secaron a 60 °C/48 h (Shel-Lab FX-14, EE. UU.) hasta peso constante (Ohaus 5120, EE. UU.) para medir su humedad. Para la extracción de fructanos se tomó otra submuestra de cada tallo y se le extrajeron los fructanos según la metodología que hemos desarrollado (Godínez *et al.*, 2016b). El rendimiento se calculó de acuerdo con la cantidad de concentrado de fructanos (CF) obtenido, y se refirió al peso seco y fresco de cada submuestra. La composición de carbohidratos se evaluó por HPLC (HP-Agilent Technologies serie 1100, Alemania) con la metodología de Zuleta y Sambucetti (2001) modificada. El contenido de cenizas se obtuvo por incineración en mufla (Sartorius BP221S, Alemania) y su composición de macro elementos por ICP-OES (Thermo Scientific iCAP 7000 Series, EE. UU.) y micro elementos por ICP-MS (Thermo Scientific X - Series 2, EE. UU.) en el Instituto de Geología de la UASLP. La dimensión media de los rafidios (cristales de oxalato de calcio) presentes en los jugos crudos del tallo se obtuvo de microfotografías tomadas con una cámara y un microscopio óptico (Leica DM2000, EE. UU.), y con la ayuda del software ImageJ 1.50i y una escala de referencia. Se calcularon los valores medios y su desviación estándar (DS) y se compararon mediante una prueba de t.

4.3 Resultados y discusión

En ambas especies la proporción de CF obtenida de los jugos tanto primarios, secundarios y terciarios (JP, JS y JT) del proceso de extracción fue similar, a excepción de los cuaternarios (JC), la cual fue mayor ($p < 0.05$) en AT que en AS (**Cuadro 4.1**); así, con dos lavados del bagazo (JS y JT) se extrae la mayor cantidad de CF en ambas especies. El rendimiento medio de CF de un tallo de AS es casi una tercera parte del de AT, aunque su concentración en la materia seca del tallo fue similar en ambas especies (**Cuadro 4.2**).

Cuadro 4.1 Proporción media (%) de CF recuperado durante el proceso de extracción.

	JP	JS	JT	JC	Total
<i>A. salmiana</i>	54.08±4.81	31.05±2.52	13.11±3.10	1.76±0.024*	100.00
<i>A. tequilana</i>	44.10±5.72	32.59±4.03	18.66±3.38	4.65±0.40*	100.00

*($P < 0.05$)

Cuadro 4.2 Peso medio (kg) fresco (TPF) y seco (TPS) de tallos de *A. salmiana* y *A. tequilana*, proporción (%) cabeza/tallo en fresco (PTF) y en seco (PTS) y concentrado de fructanos totales (CFT) y relativos (CFR) en la materia seca del tallo.

Tallo	TPF	TPS	PTF	PTS	CFT	CFR
<i>A. salmiana</i>	5.00	1.39	8.92	13.39	1.05	75.53
<i>A. tequilana</i>	10.81	3.87	22.36	25.44	2.98	77.25

En ambas especies, sin diferencias ($p < 0.05$), el CF contiene principalmente fructanos mayores que cinco grados de polimerización, y cantidades similares de 1-cestosa y sacarosa, pero su contenido de nistosa, glucosa y fructosa sí fue diferente ($p < 0.05$) (**Cuadro 4.3**). La composición del CF de AT resultó diferente a la consignada por Mancilla y López (2006). También, según Mancilla y López (2006), el contenido de fructanos en base seca de AT es cerca del 73%, y de poco más que 15% la suma de glucosa fructosa y sacarosa, estos valores contrastan con el 87.0% y 4.7%, respectivamente, encontrados para la misma especie en este trabajo, lo cual probablemente se deba a diferencias en madurez fisiológica, método de extracción y en la estructura usada como materia prima. En cambio, para AS se confirma lo documentado por Godínez *et al.* (2016). El contenido de cenizas del CF de AS fue superior (5.16%) al de AT (1.77%) y está compuesto principalmente de Ca, K, S, Mg, Na, Si, P y Sr (75.8, 9.4, 7.6, 2.2, 1.7, 1.2, 0.9 y 0.4%, respectivamente) y las

cenizas de AT por Ca, S, K, Mg, P, Si, Na, Sr, Ba y Zn (51.9, 15.0, 10.6, 9.1, 4.4, 4.1, 1.9, 0.6, 0.6 y 0.6%, respectivamente). El calcio está en forma de cristales de oxalatos de calcio (rafidios), cuya longitud fue mayor ($315.12 \pm 32.93 \mu\text{m}$) en AS que en AT ($192.57 \pm 29.82 \mu\text{m}$), pero resultaron similares en grosor (6.08 ± 1.33 y $4.56 \pm 1.01 \mu\text{m}$, respectivamente). Estos rafidios tipo III (de sección hexagonal), insolubles en agua, están presentes de manera natural en especies de *Agave* (Raman *et al.*, 2014); su presencia en los jugos de tallos de maguey crudo es poco conocida, aunque al ser insolubles en agua y resistentes a altas temperaturas, es probable que persistan hasta la destilación de los aguardientes de maguey. En ambas especies las puntas de los rafidios miden aproximadamente $1 \mu\text{m}$ de diámetro, lo cual facilita la punción y muerte de levaduras por el contacto las saponinas u otras enzimas del maguey. El mayor tamaño de los rafidios y contenido saponinas de AS puede explicar el mayor efecto pungente de sus “guishes” crudos en la piel (Salinas *et al.*, 2001), y la inhibición de la fermentación alcohólica (Zamora *et al.*, 2010). Sin embargo, estos rafidios al ser insolubles en agua pueden ser separados mecánicamente (León, 2000), mediante centrifugación de los jugos de maguey crudo o cocido.

Cuadro 4.3 Composición (%) del CF de *Agave salmiana* y *A. tequilana*.

Componente	<i>A. salmiana</i>	<i>A. tequilana</i>
“Inulina” (fructanos mayores que 5 GP)	81.45±5.80	87.04±3.19
Nistosa	7.18 ±1.44*	0.35±0.17*
1-kestosa	2.31±0.74	1.94±0.76
Sacarosa	1.72±0.43	2.19±0.82
Glucosa	ND*	1.13±0.07*
Fructosa	ND*	1.38±0.35*
Cenizas	5.16±0.65*	1.77±0.26*
Recuperación	97.82	95.80

ND: no detectable <0.001%; * (p<0.05)

4.4 Conclusiones

Es necesario el conocimiento de cada uno de los componentes de la materia prima usada para la extracción de fructanos y para la elaboración de aguardientes de maguey como antecedente para fundamentar el escalamiento, diseño y optimización de procesos en nivel industrial.

Agradecimientos

A Pablo Díaz del Castillo Fraga de la mezcalera “Laguna Seca”. Al Ing. Ismael Vicente Ramírez, Ing. Martín Sánchez Navarrete (Consejo Regulador del Tequila) y M.C. Santiago Sánchez Preciado (Universidad de Guadalajara) por haber facilitado la adquisición de las cabezas de maguey tequilero.

4.5 Bibliografía citada

- Aguirre R., J. R., Charcas S., H., & Flores F., J. L. 2001. *El maguey mezcalero potosino*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Consejo Potosino de Ciencia y Tecnología. San Luis Potosí, SLP. México. 78 p.
- Anónimo. 2015. *Agave inulin* - Generally Recognized as Safe (GRAS) notification. *NSF International*. FDA. GRAS notice (GRN) No. 582.
- Godínez H., C. I.; J. R. Aguirre R.; B. I. Juárez F. 2016a. Importancia creciente de los fructanos del maguey-retos y perspectivas. *Tecnoagave*. 40:26-29.
- Godínez H., C. I.; J. R. Aguirre R. B. I. Juárez F.; M. D. Ortiz P.; J. Becerra J. 2016c Extraction and characterization of *Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck fructans. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 22(1):59-72.
- Mancilla M., N. A.; M. G. López. 2006. Water-soluble carbohydrates and fructan structure patterns from *Agave* and *Dasyilirion* species. *J. Agric. Food Chem*. 54:7832–39.
- León, J. 2000. *Botánica de los cultivos tropicales*. 3ª ed. San José, Costa Rica. Agroamericana-Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. 522 p.
- Salinas, M. L.; T. Ogura; L. Soffchi. 2001. Irritant contact dermatitis caused by needle-like calcium oxalate crystals, raphides, in *Agave tequilana* among workers in tequila distilleries and agave plantations. *Contact Dermatitis*. 44: 94–96.
- Raman V.; H. T. Horner, H.; I. A. Khan. 2014. New and unusual forms of calcium oxalate raphide crystals in the plant kingdom. *Journal Plant Research*. 127:721:730.
- Zamora P., C., Juárez F., B. I., Aguirre R., J. R., Ortiz P., M. D., Godínez H., C. I., & Álvarez F, G. 2010. Variación de la concentración de azúcares y saponinas durante la cocción del maguey. *e-Gnosis*. 8: 1-11.
- Zuleta, A.; E. M. Sambucetti. 2001. Inulin determination for food labeling. *Journal Agricultural. Food Chemistry*. 49: 4570-4572.

Capítulo

5. Efecto de la madurez fisiológica en el rendimiento y calidad de los fructanos de *Agave* *salmiana* Otto ex Salm-Dyck

Efecto de la madurez fisiológica en el rendimiento y calidad de los fructanos de *Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck

Godínez Hernández., C. I.^{ac}, L. Moreno Vilet.^{bc}, J. R. Aguirre-Rivera.^{ac}, B. I. Juárez Flores^{ac*}, R. M. Camacho R.^{bc}.

^aUASLP-Instituto de Investigación de Zonas Desérticas, UASLP, México, San Luis Potosí, SLP, Altaír, 200, Del Llano, C.P. 78377.

^bCONACYT - Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado Jalisco A. C., México, Zapopan, Jalisco, Camino Arenero 1227, El Bajío del Arenal C.P. 45019.

^cMiembros activos de la Red Temática Mexicana Aprovechamiento Integral Sustentable y Biotecnología de los Agaves-AGARED

Abreviaturas

MF: Madurez fisiológica
MFP: Madurez fisiológica plena
CF: Concentrado de fructanos
GP: Grado de polimerización
GPn: Grado de polimerización (estimación numérica)
GPw: Grado de polimerización (estimación en peso)
Mn: Peso molecular (estimación numérica)
Mw: Peso molecular (estimación en peso)
D: Grado de dispersión (Mn/ Mw)
GPP: Grado de polimerización promedio
MS: Materia seca
MI: Maguey inmaduro
MM: Maguey maduro
MQ: Maguey quietado

Resumen

Los fructanos de origen vegetal son polisacáridos de fructosa los cuales presentan periodos de polimerización y despolimerización al ser sustancias de reserva de las plantas para otros procesos metabólicos y fisiológicos. La inulina de achicoria (*Cichorium intybus* L.) y la oligofructosa obtenida de la hidrólisis parcial de la inulina son los fructanos comerciales más importantes a nivel internacional. Estas moléculas por sus propiedades físicas, químicas y funcionales tienen aplicaciones tanto en la industria alimentaria como en la no alimentaria. La demanda creciente de fructanos a nivel internacional ha estimulado la búsqueda de nuevas fuentes potenciales como las de las especies de maguey. Los fructanos de *Agave tequilana* son los que actualmente se extraen a nivel industrial, sin embargo, la

certificación GRAS ante la FDA aún está en proceso. Para la extracción de fructanos de *A. tequilana* se ha recurrido a utilizar la cabeza completa (tallos más bases foliares) de plantas con madurez variable e imprecisa pues su criterio de madurez es la edad en años de la plantación. Por ello el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la madurez fisiológica en el rendimiento y la calidad de los fructanos de tallos de *Agave salmiana* Otto ex Salm Dyck en tres estadios de crecimiento diferentes en magueyes inmaduros (MI), maduros (MM) y quiotados (MQ). El estadio de crecimiento del MM fue el que mejor rendimiento y calidad de fructanos tuvo, pues contienen escasos monosacáridos y disacáridos y mayor grado de polimerización, contrario a los estadios del MI y MQ, son los menos deseables, ya que se encuentran en etapas de síntesis incipiente y de consumo de fructanos respectivamente. El grado de GP de los fructanos del MM fue cerca de 16 y del MI de 10 y el MQ de 9. El contenido de cenizas fue superior en MI (111.6 mg/g) que en el MM (57.7 mg/g) y el MQ (50.8 mg/g). El rendimiento en peso seco fue mayor en el MM (78 %) que en el MI (42 %) y el MQ (33 %). La composición del CF de fructanos mayores que 5 GP fue de mayor en el MM (786mg/g) mientras seguido del MQ (552 mg/g) y el MI (214 mg/g). El planteamiento de usar exclusivamente los tallos de plantas en madurez fisiológica plena está encaminado en reducir esta variación de la calidad y rendimiento de los fructanos comerciales.

Palabras clave: *Agave salmiana*, grado de polimerización, fructanos.

5.1 Introducción

En las plantas la síntesis bioquímica de carbohidratos comienza con la generación de NADPH y ATP en presencia de luz solar, y la reducción de CO₂ en O₂ y carbohidratos, principalmente sacarosa (Bornner y Galston 1992; Díaz, 2004; Medrano *et al.* 2008). La sacarosa constituye el soluto principal del floema junto con otros compuestos minoritarios (García y Guardiola, 2008). Estos solutos se difunden a través del floema (Wang y Nobel, 1998) para sustentar el crecimiento, la diferenciación celular, la demanda energética y funcionamiento de todos los órganos de la planta, su mantenimiento en condiciones desfavorables, y la polimerización y acumulación de sustancias de reserva (Hopkins, 1999; Sitte *et al.*, 2004; Díaz, 2004; García y Guardiola, 2008; Michel *et al.*, 2008). Sin embargo, cada uno de estos procesos dependen de las condiciones ambientales y de peculiaridades de

cada especie e individuo (Aguirre *et al.*, 2001; Sitte *et al.*, 2004). Así, durante la vida de las plantas, los carbohidratos sintetizados presentan periodos de polimerización (almacenamiento) y despolimerización (consumo), como ocurre con el almidón (polímero de glucosa) y con los fructanos (polímeros de fructosa); esto sucede con la madurez, por ejemplo, con la inulina de *Cichorium intybus* L. (achicoria) (Van den Ende *et al.*, 1996) y los fructanos de *Agave tequilana* F.A.C. Weber (maguey tequilero) (Arrizon *et al.*, 2010; Mellado y López, 2012). Estos fructanos presentan un comercio creciente a nivel nacional para exportación (fructanos de *Agave*) e importación (inulina) (Godínez *et al.*, 2016a), por sus diversas aplicaciones en la industria alimentaria y no alimentaria (Gibson *et al.*, 2017).

En los individuos del género *Agave*, la madurez fisiológica plena (MFP) se caracteriza por la acumulación de sustancias de reserva (fructanos) máxima posible en las condiciones ambientales donde crecieron (Aguirre *et al.*, 2001). Por ello, para estandarizar la producción de fructanos de *Agave* a nivel industrial es imprescindible partir de plantas en MFP para optimizar el rendimiento (producto/kg de materia prima), la calidad del producto (composición y pureza) y los procesos de extracción (Godínez *et al.*, 2016b). Actualmente el criterio predominante de madurez utilizado en México para *A. tequilana*, es el tiempo transcurrido desde el establecimiento de la plantación, lo cual sólo por azar puede llegar a concordar con la MFP de la planta. Además, a veces los productores cosechan las cabezas (tallos más bases foliares con mayor o menor longitud) a los cinco, seis o siete años de establecida la plantación, en dependencia del precio prevaleciente o la urgencia de liquidez. Por otro lado, como atavismo, para la extracción de fructanos se sigue utilizando como materia prima la cabeza de maguey (Arrizon *et al.*, 2010; Anónimo, 2016a), en vez del tallo, por ser el órgano de almacenamiento de los fructanos como sustancias de reserva (Aguirre *et al.*, 2001; Godínez *et al.*, 2016c).

Previamente para la extracción de fructanos estandarizados de *Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck se ha enfatizado la importancia de utilizar únicamente los tallos de plantas con MFP, para evitar que se contaminen con sacáridos y con otros compuestos propios de las bases de las pencas, como saponinas, ceras y clorofilas (Godínez *et al.*, 2016c). La naturaleza de los fructanos de origen vegetal es compleja, ya que son una mezcla heterogénea de polisacáridos de fructosa de diferente tamaño o grado de polimerización

(GP) (Camacho, 2016); por ello, han sido reconocidos como polisacáridos heterodispersos (Benkeblia, 2013; Moreno *et al.*, 2017), que difícilmente se pueden llegar a cuantificar de manera detallada debido a la falta de estándares específicos (Benkeblia, 2013). Así, para su caracterización, se ha recurrido a evaluaciones basadas en técnicas analíticas indirectas, como expresar su pureza en términos de la proporción de polisacáridos por gramo de concentrado de fructanos (CF), el contenido de monosacáridos y disacáridos (Godínez *et al.*, 2016; Camacho, 2016), cenizas, y metales pesados, la presencia o ausencia de rafidios (Anónimo, 2016a), la estimación de su GP promedio mediante cromatografía de exclusión de tamaño (Moreno *et al.*, 2017), así como la proporción de fructanos mayores o menores que 10 GP, entre otras. Sin embargo, poco se han estudiado los efectos de la madurez fisiológica (MF) del maguey sobre el rendimiento y los indicadores de calidad de sus fructanos. Por ello, el objetivo de este trabajo fue reconocer las diferencias de tallos de magueyes inmaduros, maduros y quiotados en el rendimiento, grado de polimerización, y composición de sus fructanos y de sus cenizas en *A. salmiana*.

5.2 Materiales y métodos

5.2.1 Material vegetal

Se recolectaron tres cabezas por cada estadio de crecimiento de *A. salmiana*: a) maguey inmaduro (MI), con dos a tres años antes de su MFP, por su tamaño se puede confundir con uno maduro, pero presenta la base de su cogollo aún engrosada por las pencas que quedan por desplegarse; b) maguey maduro (MM), es decir en la etapa previa a la emisión del escapo floral, cuando se adelgaza la base del cogollo porque la planta ha desplegado sus últimas pencas; c) maguey quiotado (MQ), con el quiole de aproximadamente dos metros, antes de florecer. Este material de plantas espontáneas se obtuvo de los agostaderos de abastecimiento de materia prima de la fábrica de mezcal “Laguna Seca” (ejido Miguel Hidalgo, Charcas, SLP. México); en el campo las plantas elegidas se defoliaron (“desviraron”) en pie, se tumbaron las cabezas resultantes, se pesaron en una báscula de plataforma (Básculas Nuevo León D-13, México) y se les extrajeron sus tallos. Estos estadios de crecimiento de *A. salmiana* son descritos detalladamente por Aguirre *et al.* (2001).

5.2.2 Extracción del concentrado de fructanos de *A. salmiana*

En el laboratorio cada tallo se pesó (Tecnocor PPN-30, México) y se le tomó una submuestra de 500 g, de la cual se obtuvo su jugo mediante un extractor (International EX-S, México); este jugo se filtró con una coladera de muselina, se neutralizó su actividad enzimática en un baño María a 70 °C/1h y se llevó a sequedad de acuerdo con la metodología descrita por Godínez *et al.* (2016c). El proceso descrito desde la recolecta de la planta hasta el inicio del secado se realizó el mismo día, para minimizar el consumo de sustancias de reserva, por la respiración de los tejidos (Cooke, 1969). La temperatura de la evaporación parcial al vacío (Fito, 1994) y el secado del extracto de fructanos fue de 55 °C (Shel-Lab FX-14, EE. UU.) para evitar su hidrólisis. El CF que se obtuvo de cada submuestra fue referido al peso fresco y seco del tallo completo, así como al peso fresco de la cabeza completa.

5.2.3 Contenido de materia seca (MS) del tallo

De cada tallo se tomó (Ohaus 5120, EE. UU.) otra submuestra de 100 g, se cortó en trozos delgados y pequeños con un cuchillo, y se secó a 70°C hasta peso constante en un horno de aire forzado (Shel-Lab FX-14, EE. UU.). La MS total del tallo se calculó a partir del porcentaje de MS de la muestra y cada medición se realizó por triplicado (Gardner, 1967).

5.2.4 Composición de carbohidratos del CF

La composición de carbohidratos del CF de las muestras se evaluó por HPLC mediante el método del estándar externo. Se utilizaron estándares de fructosa, glucosa, sacarosa e inulina de achicoria (fructanos mayores que 5 GP) (Sigma Aldrich), nistosa y 1-kestosa (Wako Laboratory Chemicals), de acuerdo con la metodología descrita por Godínez *et al.* (2016c). Se utilizó un HPLC (HP-Agilent Technologies serie 1100, Alemania) compuesto por desgasificador, bomba cuaternaria, compartimento térmico de columna y detector de índice de refracción (DIR). Se trabajó en fase normal con una columna de intercambio iónico (BioRad HP-Animex 87-C, 7.8 mm d.i. x 300 mm, EE.UU.) como fase estacionaria, y agua grado HPLC (Fermont, México) filtrada con membranas de nailon de 0.45 µm como fase móvil y para la preparación de las muestras y estándares. Se operó con

un flujo de 0.5 mL/min, y las temperaturas de trabajo de la columna y del DIR fueron 75 °C y 50 °C, respectivamente. La identificación de los compuestos se realizó por comparación con el tiempo de retención de los estándares, y su cuantificación mediante su comparación estadística con las curvas de calibración lineal para cada estándar con un coeficiente de correlación $r > 0.9998$.

5.2.5 Estimación de la distribución de los pesos moleculares (M) y GP del CF

Los parámetros de los fructanos se estimaron de acuerdo con la metodología de Moreno *et al.* (2017), mediante cromatografía de exclusión de tamaño (HPLC-SEC, por sus siglas en inglés) en un cromatógrafo de líquidos de alta resolución (Waters - H E2695, EE. UU.). Como fase estacionaria se utilizó una columna de exclusión de tamaño (Waters, Ultrahydrogel™, DP 120, 7.8 mm d.i. 300 mm, EE. UU.), acoplada a un detector de índice de refracción. Como fase móvil se utilizó agua HPLC tridestilada y filtrada con membranas de polisulfona de 0.45 µm y ajustada a pH 5.4, misma que se utilizó para la preparación de las diluciones de las muestras y de los estándares. El sistema fue calibrado con estándares de peso molecular conocido como fructosa, sacarosa, 1-kestosa, nistosa (Sigma Aldrich), maltopentosa, maltohexosa, maltoheptosa (Supelco), dextranos (Fluka Analytical), e inulina de achicoria (Raftiline HP® y Raftilose P95®). Se operó con un flujo de 0.36 mL/min y 61.7 °C de temperatura del compartimento de la columna. Los datos se analizaron con la ayuda del software Empower 3™ y Excel 2013 (Microsoft), de acuerdo con la metodología descrita por Moreno *et al.* (2017). La distribución de los pesos moleculares de los fructanos fue estimada de los parámetros clásicos de los polímeros de la siguiente manera:

Valor numérico del peso molecular promedio:

$$\bar{M}_n = \frac{\sum n_i M_i}{\sum n_i}$$

Peso molecular promedio en peso:

$$\bar{M}_w = \frac{\sum n_i M_i^2}{\sum n_i M_i}$$

Donde n es el área diferencial bajo la curva en el cromatograma y M el peso molecular de la fracción i .

Grado de dispersión (D):

$$D = \frac{M_w}{M_n}$$

Número y peso promedio del grado de polimerización de los fructanos:

$$\overline{DP}_n = \frac{M_n^{-18}}{162.1} \quad \overline{DP}_w = \frac{M_w^{-18}}{162.1}$$

La proporción, así como el GPP de fructanos mayores o menores que 10 GP se hizo de acuerdo con la metodología que establece la NOM-002-SAGARPA-2016 e integrando el cromatograma completo.

5.2.6 Contenido de cenizas totales

Las cenizas totales se evaluaron mediante la calcinación de las muestras de los CF (libres de humedad) de cada submuestra a 600 °C/2h en una mufla (Sartorius BP221S, Alemania).

5.2.7 Análisis de macro y micro elementos de las cenizas

Se analizaron 36 elementos; para ello de cada una de las tres repeticiones de cada estadio de crecimiento se tomó una submuestra del CF y se llevó a peso constante (libre de humedad) para su hidrólisis posterior con ácido nítrico destilado (J.T. Baker) y así eliminar la materia orgánica y disolver los minerales. La identificación y cuantificación de macro elementos (Ca, K, Mg, Na, S y Si) de las cenizas se llevó a cabo mediante la ionización de la muestra con un equipo de plasma de acoplamiento inductivo y un espectrofotómetro de emisión óptica (ICP-OES, por sus siglas en inglés) (Thermo Scientific iCAP 7000 Series, EE. UU.). La identificación y cuantificación de elementos traza (Li, B, Al, P, Sc, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Rb, Sr, Y, Mo, Cd, I, Cs, Ba, La, Ce, Eu, Hg, Tl, Pb, Th y U) de las cenizas se llevó a cabo con un equipo de plasma de acoplamiento inductivo acoplado a un espectrofotómetro de emisión óptica de masas (ICP-MS, por sus siglas en inglés) (Thermo Scientific X - Series 2, EE. UU.) con un sistema de cuadrupolo. Todos los datos

se presentan con los valores medios de las tres repeticiones de muestras independientes y su desviación estándar. Estos análisis se realizaron en el Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

5.3 Resultados y discusión

Los procesos actuales de extracción industrial de fructanos de maguey, particularmente de *A. tequilana*, utilizan como materia prima las cabezas enteras de maguey con madurez variable. Por ello, es preciso diferenciar tanto las estructuras que conforman la materia prima como sus diferencias morfológicas en diferentes estadios de crecimiento de cualquier especie de maguey (**Figura 5.1**). A partir de esto, se pueden llegar a reconocer las implicaciones de cada variable del proceso de extracción en el rendimiento de CF por kg de materia prima, su composición y la calidad de los fructanos.

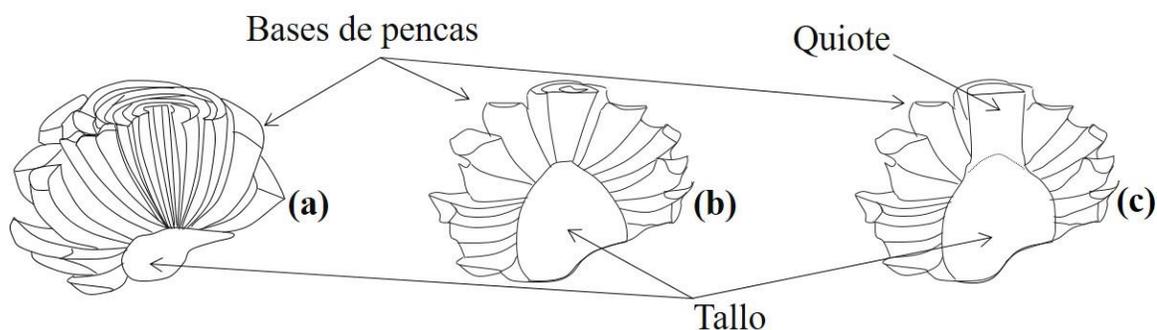


Fig. 5.1 Sección longitudinal de cabezas de *A. salmiana* (a) inmaduro (b) maduro y (c) quiotado.

A nivel internacional el registro GRAS de los fructanos de *A. tequilana* aún se encuentra en proceso en la FDA de los EE. UU. (Anónimo, 2016a). En México se ha hecho un primer intento de establecer los parámetros o especificaciones para los fructanos de maguey con la publicación de la NOM-002-SAGARPA-2016.

5.3.1 Rendimiento y composición del CF

El CF total del tallo (**Cuadro 5.1**) fue mayor en el MM (1.01 kg) que en el MQ (0.67 kg); es decir, la generación del quiote ya había consumido 34 % del CF acumulado durante la etapa vegetativa. El estadio que registró menor CF totales fue el MI (0.17 kg), es decir sólo 17 % de lo registrado para el MM. Así, a pesar de presentar un tamaño similar, a

la planta inmadura aún le resta acumular el 83 % de sustancias de reserva para alcanzar su óptimo y comenzar su reproducción. El rendimiento de CF/kg MS fue mayor en el MM (0.78 kg/kg MS) que en el MI (0.42 kg/kg MS) y el MQ (0.33 kg/kg MS). La diferencia entre MM y el MQ probablemente se debe a la mayor proporción de fibra insoluble (celulosa y hemicelulosa) en la MS del MQ asociada a su mayor MF; además, el desarrollo del quiotote implica la despolimerización de los fructanos almacenados en el tallo para la translocación de energía en forma de fructosa isomerizada a glucosa hacia la floración, lo cual también explicaría el rendimiento absoluto menor del MQ que el del MI.

Cuadro 5.1 Rendimiento absoluto y relativo de CF (kg) del tallo de una cabeza estandarizada a 60 kg de *A. salmiana* en diferentes estadios de madurez.

Magüey	Peso fresco del tallo	Peso seco del tallo	% MS	CF totales del tallo	CF/kg de MS
Inmaduro	2.15	0.41	19.06	0.17	0.42
Maduro	5.06	1.28	25.29	1.01	0.78
Quiotado	7.06	2.04	28.89	0.67	0.33

Calculado a partir de los valores promedio de 3 replicas

Para *A. tequilana* se ha llegado a observar un efecto similar, aunque en términos relativos, en plantas en estadios inmaduros con diferente edad de plantados, 2, 4 y 6 ½ años (Arrizon *et al.*, 2010) y 2, 3, 4, 5, 6 y 7 años (Mellado y López, 2012). La edad o la antigüedad de la plantación es un indicador de madurez muy impreciso, pues los hijuelos plantados suelen tener distinta edad y procedencia y las condiciones ambientales para cada plantación varían dentro y entre sitios de plantación (Aguirre *et al.*, 2001). Es decir, la edad cronológica de una plantación es un indicador de madurez muy impreciso para reconocer la acumulación máxima de fructanos de las diferentes especies de magüey y ambientes de desarrollo. Pero además es innecesario, pues se dispone de la MF como indicador cierto de acumulación máxima de fructanos. Indudablemente las cabezas de magüey de plantas demasiado jóvenes, son las menos indicadas para ser aprovechadas por su menor rendimiento de CF por kg de MS (Arrizon *et al.*, 2010; Mellado y López, 2012); sin embargo, en ciertas condiciones ambientales, pueden existir MI tan grandes que se pueden llegar a confundir con MM. Por ello, es preciso reconocer la MFP como un indicador funcional y práctico de madurez óptima, para la recolección de especies silvestres de magüey, ya sea para mezcal o para fructanos.

En cuanto a composición (**Cuadro 5.2**), el MM presentó mucho mayor cantidad de fructanos superiores a cinco grados de polimerización (786 mg/g CF) y el menor contenido de sacarosa (53.75 mg/g CF). El MQ tiene 552 mg/g de fructanos superiores a 5 GP y fue el único con un contenido significativo de fructosa (222 mg/g CF), probablemente por la despolimerización de los fructanos y la transformación de la fructosa para cubrir la demanda energética de la formación y desarrollo del escapo floral, como también ocurre con *C. intybus* L. (Gupta *et al.*, 1985) durante y después de la floración. El MI presentó el menor contenido de fructanos mayores que 5 GP (214 mg/g CF) y el mayor contenido de sacarosa (208 mg/g CF) que los demás, debido probablemente a su crecimiento vegetativo incompleto, previo a la síntesis de fructanos. El contenido de cenizas totales del CF fue mayor en el MI (111 mg/g CF) que en el MM (57 mg/g CF) y en el MQ (50 mg/g CF); las cenizas de los fructanos de *A. salmiana* están compuestas cerca de 80 % por Ca (Godínez *et al.*, 2016b), principalmente en forma de cristales de oxalato de calcio (rafidios) insolubles en agua (León, 2000), que junto con los “guishes” (enzimas y saponinas) presentes en sus jugos, tienen propiedades pungentes severas en la piel de los mamíferos (Webb, 1999; Salinas *et al.*, 2001; Jáuregui y Moreno, 2004; De la Cueva *et al.*, 2005; Raman *et al.*, 2014). Con la madurez, estos metabolitos secundarios y otros compuestos son transformados y traslocados para cubrir la demanda energética de la reproducción (Piñol *et al.*, 2008).

Cuadro 5.2 Composición y recuperación (mg/g) del CF de tallos de *A. salmiana* en diferentes estadios de madurez.

Compuesto	M. Inmaduro	M. Maduro	M. Quiotado
“Inulina” (Fructanos mayores que 5 GP)	214.12±27.59	786.75±93.23	552.57±41.21
Nistosa	16.81±1.81	12.98±2.01	4.98±0.35
1-Kestosa	47.31±5.02	39.87±2.94	24.47±2.09
Sacarosa	208.89±30.54	53.75±6.83	79.88±9.24
Glucosa	28.58±3.23	23.84±4.56	22.10±1.09
Fructosa	ND	ND	222.51±39.12
Cenizas	111.63±10.58	57.79±7.40	50.81±6.21
Recuperación	637.34	974.98	957.32

n = 3; $\bar{x} \pm DE$; ND: No detectable <0.02mg/ml

Actualmente en la industria de fructanos de maguey tequilero se reconoce la presencia de rafidios, pero son depurados mediante filtración con membranas de 0.5 μm

(Anónimo, 2016a); sin embargo, al ser insolubles, fue posible separarlos antes del secado de la solución de fructanos mediante decantación por centrifugación. Finalmente, el porcentaje de recuperación de solutos fue menor en el MI (63.92 %) que en el MM (97.49 %) y en el MQ (95.72 %), probablemente porque existe otro tipo de compuestos en el CF no cuantificados en este trabajo, como el contenido de proteína, que pueden enmascarar las proporciones de los compuestos e evaluados.

5.3.2 Grado de polimerización promedio (GPP) y otros parámetros del CF

El GPP se calculó a partir del promedio del GPn de las tres submuestras de individuos independientes de cada estadio de crecimiento, mayormente utilizado en los polímeros de fructosa. Además, para el cálculo el GPP se consideró la integración completa del cromatograma de cada muestra, es decir, incluye toda la distribución completa de los pesos moleculares presentes en el CF, incluso las que teóricamente carecen de GP como los monosacáridos y disacáridos. El GPP del MM fue el mayor (15.59 GP), seguido del MI (10.44 GP) y el MQ (8.75 GP), todos con un rango de moléculas desde 1 a 49 GP (**Cuadro 5.3**). El GPP estimado para el MM representa casi el doble que 8 GPP (GP 1-21) encontrado para *A. salmiana* por Michel *et al.* (2012) a partir de muestras secas de jugos crudos filtrados de cabezas completas de maguey de 7 a 9 años de edad, con un año de castrado. Esta diferencia puede deberse a que estos autores utilizaron como materia prima cabezas completas en vez de tallos, un proceso de extracción muy diferente y plantas envejecidas. Respecto a la proporción de fructanos mayores y menores que 10 GP, el MM presentó (68.06 % GP>10 y 31.94 % <10GP) un resultado inverso al del MI (31.70 % GP>10 y 68.29 %) y al del MQ (36.99 % GP>10 y 63.01 % <10GP), puede explicarse, por sus etapas fisiológicas respectivas, de síntesis y acumulación máxima, síntesis incipiente y consumo de fructanos, respectivamente.

El grado de dispersión (D) supone, que al ser Mw y Mn idénticos, el D sería igual a uno, y entonces el compuesto es monodisperso, y que cuanto mayor sea que uno es más polidisperso. El D fue mayor en el MI (2.33), seguido del MQ (1.90), y en el MM se registró el menor D (1.30) (**Figura 5.2**). Estos datos obtenidos del análisis de los cromatogramas por HPLC-SEC, pueden cambiar según el criterio de exclusión de sus componentes; por ejemplo, en la NOM-002-SAGARPA-2016 se puede interpretar que el

cálculo de los estimadores de fructanos debe hacerse sin incluir la glucosa, fructosa y sacarosa, las cuales se considera “contaminantes” permitidos hasta 6, 9, y 5 % respectivamente.

Cuadro 5.3 Valores medios de las estimaciones de las distribuciones del peso molecular y GP del CF de tallos de *A. salmiana* en diferentes estadios de crecimiento.

Parámetro	M. Inmaduro	M. Maduro	M. Quiotado
Mn (g/mol)	1703.20 ± 214.49	2383.38 ± 264.98	1441.09 ± 51.90
Mw (g/mol)	3922.65 ± 283.30	3086.14 ± 170.46	2737.7 ± 106.48
D=Mw/Mn	2.33 ± 0.29	1.30 ± 0.09	1.90 ± 0.01
GPn	10.40 ± 1.32	15.59 ± 1.63	8.75 ± 0.29
GPw	24.09 ± 1.75	18.93 ± 1.05	16.78 ± 0.66
GP < 10 (%)	68.29 ± 4.86	31.94 ± 11.25	63.01 ± 1.23
GP > 10 (%)	31.70 ± 4.86	68.06 ± 11.25	36.99 ± 1.23

n = 3; $\bar{X} \pm DE$

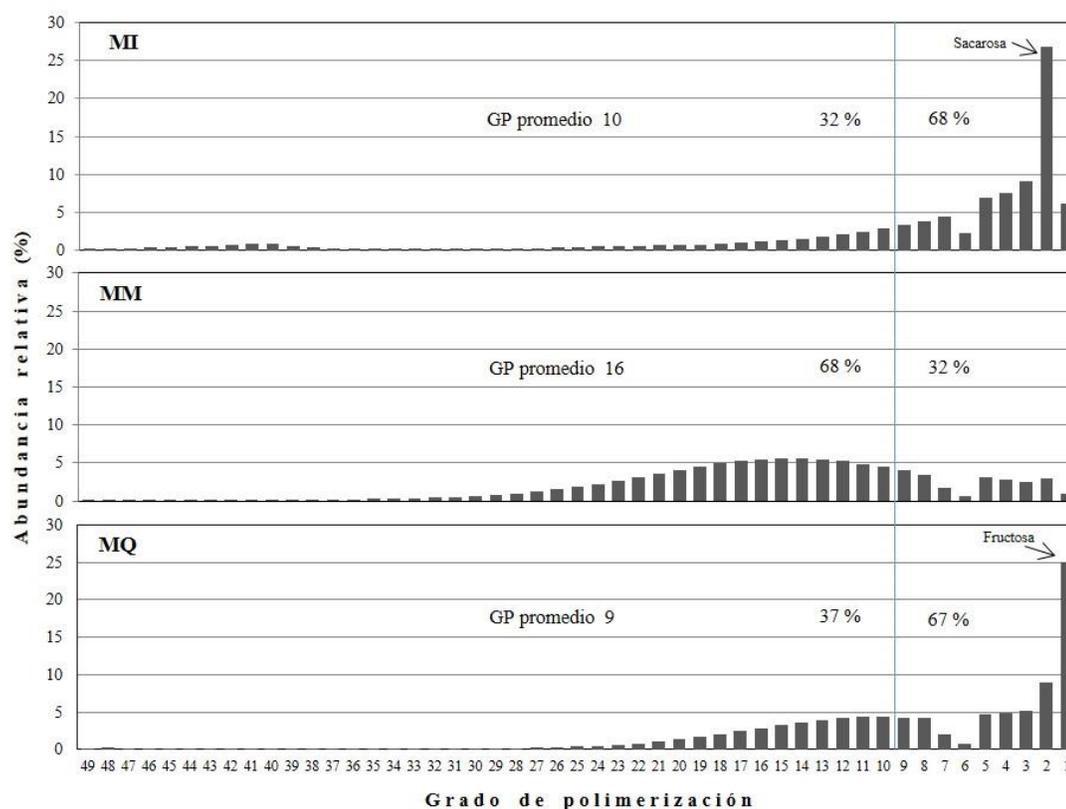


Fig. 5.2 Histogramas de los pesos moleculares, GGP, y la proporción de fructanos mayores y menores que 10 GP del CF de tallos de *A. salmiana*.

En el **Cuadro 5.3** el GPP de CF del MM es significativamente mayor si se considera la integración completa del cromatograma, debido a que el GPP del MI y el MQ cambia por su mayor proporción de disacáridos y monosacáridos, respectivamente; en cambio, si la integración se realiza a partir de 3 GP, como lo NOM-02-SAGARPA-2016 lo establece (**Cuadro 5.4**), el GPP se homogeniza un poco en los tres estadios de madurez (MI:14.13, MM:15.16, MQ:12.43) enmascarando la diferencia del GPP debido a la madurez real. Esto puede explicar un tanto la variación tan frecuente de la calidad de los fructanos comerciales (Camacho, 2014), y porqué en la misma norma mexicana de fructanos se ignora la MF de las diferentes especies de maguey como vía para la estandarización del producto final, y por ello las especificaciones de la NOM-002-SAGARPA-2016 resultan confusas de interpretar.

Cuadro 5.4 Estimaciones con base en la NOM-002-SAGARPA-2016 de las distribuciones medias del M y GP a partir de 3GP del CF de tallos de *A. salmiana* en tres estadios de madurez.

Parámetro	M. Inmaduro	M. Maduro	M. Quiotado
Mn (g/mol)	2309.19 ± 198.53	2474.66 ± 258.98	2033.65 ± 57.32
Mw (g/mol)	4031.23 ± 242.07	3101.85 ± 165.88	2855.63 ± 111.81
D=Mw/Mn	1.75 ± 0.09	1.26 ± 0.08	1.40 ± 0.04
GPn	14.13 ± 1.22	15.16 ± 1.60	12.43 ± 0.35
GPw	24.76 ± 1.49	19.02 ± 1.02	17.51 ± 0.69
Monosacáridos y disacáridos (%)	29.99 ± 3.58	4.30 ± 0.94	32.94 ± 1.25
GP 3 a 10 (%)	38.3 ± 3.85	27.64 ± 10.31	30.20 ± 0.49
GP >10 (%)	31.71 ± 4.86	68.06 ± 11.25	36.99 ± 1.23

n = 3; $\bar{X} \pm DE$

Sin embargo, el CF del MM y su contenido de fructanos >10GP (68.06 %), más que 50 %, y de mono y disacáridos (4.3 %) menor que 20 %, según la normativa mexicana sí pueden ser catalogados como fructanos nativos de *Agave*. Por otro lado, la composición de carbohidratos de los CF que se obtuvo a través de HPLC por el método del estándar externo, y las proporciones que se obtuvieron por HPLC-SEC son muy próximas, con la ventaja de que, con esta última metodología, se puede también estimar el GPP de la muestra. Esta caracterización de los fructanos es necesaria para evaluar y comparar sus propiedades físicas, químicas, tecnológicas y sus efectos biológicos (*in vitro* e *in vivo*), ya que generalmente los fructanos utilizado en este tipo de estudios, son pobremente

caracterizados, y en ocasiones sólo se indica la edad supuesta de la planta, la región, el suelo o la época cuando fue cosechada; en cambio, con igual MFP de la planta y CF extraído del tallo se elimina la variabilidad ajena a la especie y con ello se consigue reproducibilidad de los experimentos y se validan las comparaciones con los fructanos de otras especies, lo cual es necesario para poder avanzar en el conocimiento de sus efectos biológicos en el sistema inmune (Moreno y Camacho, 2016). Por el contrario, recurrir al estudio de las estructuras químicas es complicado, costoso y muy limitado, pues se elucida sólo una de las muchas estructuras que conforman los fructanos de determinada especie (Benkeblia, 2013).

5.3.3 Composición de las cenizas de los CF

En el **Cuadro 5.5** se presenta la composición de las cenizas de los CF extraídos de los tallos de *A. salmiana* con diferentes estadios de madurez. Estas cenizas contienen principalmente Ca (>50% del total), K, S, Mg, Si, P, Zn, Sr, Na, B, Fe, Ba y Al, principalmente.

Cuadro 5.5 Composición absoluta y relativa de los minerales del CF de *A. salmiana* en diferentes estadios de madurez.

Mineral	Tipo de elemento	M. Inmaduro		M. Maduro		M. Quiotado		Valor de referencia*
		mg·g ⁻¹	%	mg·g ⁻¹	%	mg·g ⁻¹	%	
Ca	Macro	24.84	51.83	23.28	72.52	14.68	60.17	350-1000
K	Macro	14.31	26.71	4.34	13.5	5.6	22.95	700-3500
S	Macro	2.75	5.52	1.63	5.06	1.91	7.82	-
Mg	Macro	5.06	10.14	1.44	4.47	0.76	3.1	55-300
Si	Micro	0.52	1.03	0.52	1.62	0.59	2.4	-
P	Macro	1.63	3.26	0.45	1.41	0.48	1.95	270-775
Zn	Macro	0.31	0.63	0.14	0.42	0.09	0.37	4-9.5
Sr	Micro	0.14	0.28	0.11	0.35	0.09	0.35	-
Na	Macro	0.11	0.21	0.09	0.27	0.1	0.4	210-1600
B	Micro	0.04	0.07	0.03	0.09	0.03	0.11	-
Fe	Micro	0.03	0.06	0.02	0.06	0.02	0.07	1.7-14.8
Ba	Micro	0.03	0.05	0.02	0.05	0.02	0.08	-
Al	Micro	0.02	0.04	0.02	0.04	0.01	0.04	-
Otros	Micro	0.13	0.07	1.06	0.04	0.08	0.05	-
Total	-	49.92	100.00	33.15	100.00	24.46	100.00	-

n=3; * ©British Nutrition Fundation, (Anónimo, 2016b)

El calcio, se presenta en forma soluble e insoluble; el insoluble, está en forma de cristales de oxalato de calcio conocidos como rafidios, los cuales por su forma bipuntiguda y microscópica ($315.12\mu\text{m} \times 6.08\mu\text{m}$) (Godínez *et al.*, 2016b) puede separarse por filtración o por centrifugación (León, 2000). El contenido total de minerales es superior en el MI (49.92mg/g), seguido del MM (33.15mg/g) y MQ con el menor (24.46 mg/g).

Estos resultados difieren de las cenizas totales cuantificadas por calcinación (**Cuadro 5.2**); sin embargo, ambos resultados presentan la misma tendencia, por lo que sus diferencias pueden ser debidas a la precisión de la técnica utilizada para cada análisis. Por otro lado, el contenido de macro y microelementos, de los CF están por debajo de los valores de referencia. Sin embargo, por las cantidades de ingesta recomendadas de fructanos (10-12 g/día), estos macro y microelementos a excepción del calcio insoluble (rafidios, que pueden separarse sin problema), no tienen mayor efecto negativo en la salud del humano, sino todo lo contrario.

Es importante mencionar que el consumidor es un factor importante al hablar de valores nutricionales de referencia, ya que éstos dependen de la edad y el sexo del individuo. La normativa mexicana establece el 1 % como límite máximo del porcentaje de cenizas en los fructanos de maguey. Se ha recurrido a la desmineralización de los fructanos de maguey, a través de resinas de intercambio catiónico previo al secado, posiblemente porque este proceso es indispensable en los fructanos de achicoria por tratarse de una raíz tuberizada. Los límites máximos permisibles de metales pesados, aún no los establece la normativa mexicana; sin embargo, como valores de referencia, se buscó otro alimento similar o equiparable por las cantidades de ingesta recomendada al día (10-12 g/día), y se eligió la normativa para la sal de mesa de la Comunidad Europea (Alonso, 2017). Con base en ello, todos los contenidos de metales pesados en los CF de diferentes estadios de crecimiento se encuentran dentro de los límites permisibles (**Cuadro 5.6**).

En resumen, el planteamiento de usar exclusivamente los tallos de plantas con MFP está encaminado a resolver la variación en la composición y calidad de los fructanos para fines industriales (entre lotes) y los utilizados en investigación. Este planteamiento implica un reto tecnológico industrial para separar mecánicamente el tallo de las bases de las pencas. Sin embargo, tomando en cuenta que los procesos de purificación son los más caros

y tecnológicamente más complicados en cualquier proceso, y que además repercuten hasta un 60 % del costo total de producción del costo final del producto (Kalk *et al.*, 1986), este enfoque parece ser el más conveniente para simplificar los procesos de obtención de fructanos de maguey de calidad. Además, al obtener fructanos de las fracciones por separado (tallos y base de pencas), se podrían obtener productos estandarizados con diversas aplicaciones específicas con base en su composición.

Cuadro 5.6 Valores medios del contenido de metales pesados ($\mu\text{g/g}$) del CF de tallos de *A. salmiana* en diferentes estadios de madurez.

Metal pesado	Valor de referencia*	M. Inmaduro	M. Maduro	M. Quiotado
Pb	2.00	0.63	0.75	1.13
Cd	0.50	0.34	0.13	0.10
As	1.00	0.08	0.01	0.01
Hg	0.10	0.01	0.01	0.01

n = 3; *Límite máximo permisible por la Comunidad Europea para la sal de mesa.

5.4 Conclusiones

El efecto de la madurez del maguey es evidente en el rendimiento, composición y calidad (GGP, D y proporción de fructanos mayores o menores que 10 GP) de los fructanos de tallos de maguey. El MM es el estadio con mejor rendimiento y calidad de sus fructanos, pues contienen menos monosacáridos y disacáridos. Los otros dos estadios MI y MQ son menos deseables ya que se encuentran en etapas fisiológicas de síntesis incipiente y de consumo de fructanos, respectivamente. La madurez fisiológica plena de cualquier especie de maguey es el mejor indicador para establecer patrones de calidad de fructanos para cada especie y evitar tener que mezclar fructanos de diferentes especies para cumplir con las normativas. La edad cronológica supuesta es el indicador de madurez más impreciso para el productor de planta y el industrial de fructanos, pues les representa bajos rendimientos por kg de materia prima, y mayores costos de producción.

Agradecimientos

Este trabajo se realizó gracias al apoyo de la AGARED. A la Dra. María Elena García Arreola del Instituto de Geología de la UASLP, por el apoyo en los análisis de los minerales. CIGH agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca

(289510) para estudios de doctorado. A Don Fernando Rodríguez, capitán de campo de la fábrica de mezcal Laguna Seca, Charcas San Luis Potosí.

5.5 Bibliografía citada

- Aguirre, R., J.R.; H. Charcas S.; J. L. Flores F. 2001. El maguey mezcalero potosino. Universidad Autónoma de San Luis Potosí-Consejo Potosino de Ciencia y Tecnología. San Luis Potosí, SLP. México. 87p.
- Anónimo. 2016a. *Agave* inulin - Generally Recognized as Safe (GRAS) notification. NSF International. FDA. GRAS notice (GRN) No. 687. 170p.
- Anónimo. 2016b. Nutrition requirements. British Nutrition Information. 8 p. URL: www.nutrition.org.uk (Consultado: 05/09/2017).
- Alonso D., A. 2017. Metales pesados. Contaminantes en la Unión Europea. Revisión Marzo-2017. Secretaría de Estado de Comercio. Valencia, España. 25 p.
- Arrizon, J.; S. Morel; A. Gschaedler M.; P. Monsan. 2010. Comparison of the water-soluble carbohydrate composition and fructan structures of *Agave tequilana* plants of different ages. *Food Chemistry* 122(1):123-130.
- Benkeblia, N. 2013. Fructooligosaccharides and fructans analysis in plants and food crops. *Journal of Chromatography A*. 1313: 54–61.
- Bornner, J.; A. W. Galston. 1952. Principles of plant physiology. Freeman. USA. 499 p.
- Camacho R., R. M. 2016. Fructanos de *Agave*. Retos en la estandarización. *Tecnoagave*. 41:62-63.
- Cooke, D. A. 1969. Estimating herbage yield from simulated grazing trials. In: J. B. Campbell (Ed.). *Experimental methods for evaluating herbage*. Canada Department of Agriculture. Ottawa, Canada. pp. 80-95.
- Díaz de la G., M. 2004. Fisiología de las plantas. Servicio de publicaciones de la Universidad de Córdoba. Córdoba, España. 276 p.
- De la Cueva, P.; M. González C.; M. Campos; V. Leis; R. Suárez; P. Lázaro. 2005. Dermatitis de contacto por *Agave americana*. *Actas Dermosifiliogr*. 96(8):534-536.
- Fito, P. 1994. Modelling of vacuum osmotic dehydration of food. *Journal of Food Engineering*. 22:313-328.
- García, A.; J. L. Guardiola. 2008. Transporte en el floema. En: J. Azcón B.; M. Talón. (Eds.) *Fundamentos de fisiología vegetal*. McGraw-Hill- Interamericana de España. Madrid, España. pp. 81-102.
- Gardner, A. L. 1967. Estudio sobre los métodos agronómicos para la evaluación de las pasturas. ICCA. Montevideo, Uruguay. 80p.

- Gibson, G. R.; R. Hutkins; M. E. Sanders; S. L. Prescott; R. A. Reimer; S. J. Salminen; K. Scott; C. Stanton; K. S. Swanson; P. D. Cani; K. Verbeke; G. Reid. 2017. The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of prebiotics. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*. Advance Online Publication. 14p.
- Godínez H., C. I.; J. R. Aguirre R.; B. I. Juárez F. 2016a. Importancia creciente de los fructanos del maguey-Retos y perspectivas. *Tecnoagave*. 40:26-29.
- Godínez H., C. I.; J. R. Aguirre R.; B. I. Juárez F. 2016b. Yield and composition of *Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck and *A. tequilana* F.A.C. Weber fructans. In: A. Gutiérrez M. (Ed.) *Sustainable and integrated use of Agave*. CONACYT/CIATEJ/Agared. Guadalajara, Jalisco. México. pp. 153-157.
- Godínez H., C. I.; J. R. Aguirre R. B. I. Juárez F.; M. D. Ortiz P.; J. Becerra J. 2016c Extraction and characterization of *Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck fructans. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 22(1):59-72.
- Gupta M., A. K.; I. S. Bhatia. 1985. Glucofructosan metabolism in *Chichorium intybus* roots. *Phytochemistry*. 24(7):1423-1427.
- Hopkins. 1999. Introduction on plant physiology. 2ª edition. Wiley. USA. 512 p.
- Jáuregui Z., D.; A. Moreno C. 2004. La biomineralización del oxalato de calcio en platas: retos y potencial. *Revista de Educación Bioquímica*. 23(1):18-23.
- León, J. 2000. Botánica de los cultivos tropicales. 3a ed. Agroamericana-IICA. San José, Costa Rica. 522 p.
- Medrano, H.; J. Galmés; J. Flexas. 2008. Fijación del dióxido de carbono y biosíntesis de fotoasimilados. In: J. Azcón B.; M. Talón. (Eds.) *Fundamentos de fisiología vegetal*. McGraw-Hill- Interamericana de España. Madrid, España. pp. 211-225.
- Mellado, E.; M. G. López. 2012. Fructan metabolism in *A. tequilana* Weber Blue variety along its developmental cycle in the field. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 60 (47), 11704–11713.
- Michel C., C.; B. I. Juárez F.; J. R. Aguirre R.; J. M. Pinos R. 2008. Quantitative characterization of non-structural carbohydrates of mezcal *Agave* (*Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 56(14):5753- 5760.
- Michel C., C.; I. Ortiz C.; L. Moreno V.; A. Grajales L.; M. Moscosa S.; J. Bonnin; M. a. Ruiz C. 2012. Study of enzymatic hydrolysis of fructans from *Agave salmiana* characterization and kinetic assessment. *The Scientific World Journal*. Article ID: 863432.10 p.

- Moreno V., L.; R. M. Camacho R.; D. P. Portales P. 2016. Prebiotic *Agave* fructans and immune aspects. In: R. Watson; V. Preedy. Probiotics, prebiotic and symbiotics-bioactive foods in health promotion. Academic Press. London, UK. pp. 165-179.
- Moreno V., L.; S. Bostyn; J. L. Flores M.; R. M. Camacho R. 2017. Size-exclusion chromatography (HPLC-SEC) technique optimization by simplex method to estimate molecular weight distribution of *Agave* fructans. *Food Chemistry*. 237:833-840.
- NOM-002-SAGARPA-2016. Relativa a las características de sanidad, calidad agroalimentaria, autenticidad, etiquetado y evaluación de la conformidad de los fructanos de *Agave*. Diario Oficial de la Federación. México. 43 p.
- Piñol, M. T.; J. Palazón; R. M. Cusidó. 2008. Introducción al metabolismo secundario. In: J. Azcón B.; M. Talón. (Eds.) Fundamentos de fisiología vegetal. McGraw-Hill- Interamericana de España. Madrid, España. pp. 323-348.
- Raman, V.; H. T. Horner H.; I. A. Khan. 2014. New and unusual forms of calcium oxalate raphide crystals in the plant kingdom. *Journal Plant Research*. 127:721:730.
- Salinas, M. L.; T. Ogura; L. Soffchi. 2001. Irritant contact dermatitis caused by needle-like calcium oxalate crystals, raphides, in *Agave tequilana* among workers in tequila distilleries and agave plantations. *Contact Dermatitis*. 44: 94-96.
- Sitte, P.; E. W. Weiler; J. W. Kadereit; A. Bresinsky; C. Körner. 2004. Strasburger-Tratado de Botánica. 35ª Edición. Omega. Barcelona. España. 1154 p.
- Van den Ende, W.; A. Mintiens; H. Spellers; A. A. Onuoha; A. Van Laere. 1996. The metabolism of fructans in roots of *Cichorium intybus* during growth, storage and forcing. *New Phytologist Journal*. 132: 555-563.
- Wang, N.; P. S. Nobel. 1998. Phloem transport of fructans in the crassulacean acid metabolism species *Agave deserti*. *Plant Physiology*. 116(2):709-714.
- Webb, M. A. 1999. Cell-mediated crystallization of calcium oxalate in plants. *The Plant Cell*. 11:751-761.

Capítulo

6. Caracterización de las vinazas del mezcal potosino

Caracterización de las vinazas del mezcal potosino

¹Godínez-Hernández, C. I., ³González Ambrocio, M. J., ²Aguirre-Rivera, J. R.,

²Juárez Flores B.I.

¹ Programas Multidisciplinarios de Posgrados en Ciencias Ambientales-Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Av. Dr. Manuel Nava # 201. Agenda ambiental 2° Piso, Zona Universitaria. C.P. 78210. San Luis Potosí, SLP. México.

² Instituto de Investigación de Zonas Desérticas-UASLP. Altair #200 Col. Del llano. C.P. 78377. San Luis Potosí, SLP. México.

³Facultad de Ingeniería- UASLP. Av. Dr. Manuel Nava # 8., Zona Universitaria Poniente. C.P. 78210. San Luis Potosí, SLP. México.

Por publicar

Resumen

Las vinazas son el residuo líquido que queda al final de la destilación de los aguardientes de maguey, las cuales mayormente se desechan sin ningún tratamiento al ambiente. Se estima que en 2016 esta industria generó 2 252 millones de litros de vinazas y que con ellas se dispersaron cerca de 135 120 t de compuestos orgánicos y minerales en forma de sólidos al ambiente. Las vinazas están compuestas principalmente de agua de lluvia captada por el maguey durante su vida, compuestos de color y de Maillard (melanoidinas), residuos fibrosos solubles (mucílago y pectina) e insolubles (celulosa, hemicelulosa y lignina), sedimentos microbianos (levaduras) y minerales en solución. Las vinazas se llegan a usar como agua de riego para cultivos y se han sometido a tratamientos biológicos para la remoción de su materia orgánica. El confinamiento o disposición final del lodo del tratamiento biológico de las vinazas representa todo un reto ambiental, como todos los desechos de cualquier proceso de depuración de contaminantes. Una alternativa de aprovechamiento de las vinazas es derivar materiales para los sistemas actuales de producción agropecuaria, y reducir así los ciclos de generación de residuos, como sucede con el tratamiento biológico y la producción de biogás. Por ello, se propuso obtener 75 % de agua de las vinazas mediante su evaporación a baja presión para obtener un agua de

vinaza incolora, de cualidades interesantes, libre de sólidos sedimentables y totales, DBO y DQO y color, para propósitos de autoconsumo por los productores de aguardientes de maguey o su venta; y del 25 % restante del volumen de las vinazas obtener un lodo de vinaza como fuente de nutrientes orgánicos y minerales para la industria agropecuaria. Por ello, el objetivo de este trabajo fue obtener agua y lodo de vinaza, caracterizarlos, probarlos y proponer su utilización. El lodo de vinazas seco está compuesto principalmente de compuestos de color y de Maillard (melanoidinas), no cuantificados en este trabajo, cenizas (12.07 %), proteína (5.68 %), celulosa (1.91 %), hemicelulosa (8.32 %), lignina (0.34 %) y elevado contenido de minerales, por lo que se propone utilizarlo como una fuente de minerales para la formulación de piensos balanceados de monogástricos. El agua de vinaza de maguey cocido con vapor tiene sabor ácido y olor acético, y el agua de vinaza de maguey cocido con leña es de sabor ácido y de olor acético y ahumado. Esta agua contiene trazas de ácidos orgánicos como el acético, láctico, propiónico y butírico y etanol. Con esta agua se realizó una cata ciega experimental completamente al azar con un arreglo factorial de 3 x 3 de tratamientos. Donde el factor A es el tipo de aguardiente y el factor B es el tipo de agua utilizada para diluir el mezcal. No se observaron diferencias significativas de tratamientos, pero sí se definieron ciertas tendencias para su aprovechamiento.

Palabras clave: Vinaza, agua y lodo de vinaza, fuente de nutrientes y minerales.

6.1 Introducción

Las vinazas de los aguardientes de maguey son el residuo líquido de esta industria con mayor impacto ambiental potencial cuando son descargadas sin ningún tratamiento a suelos y cuerpos de agua. Las grandes cantidades de materia orgánica, minerales y su pH ácido pueden provocar alteraciones desconocidas en suelos, cuerpos de agua superficiales y acuíferos profundos. La producción de aguardientes de maguey de México en 2016 fue de 213.4 millones de litros ajustados a 40 °GL, lo cual generó 2 252 millones de litros de vinazas, pero sólo las empresas tequileras más grandes han sido obligadas por la autoridad ambiental mexicana a aplicar tratamientos biológicos a la materia orgánica de sus vinazas. La disposición final y aprovechamiento de las vinazas debe entenderse al menos como la separación de agua (de lluvia, captada por el maguey), nutrientes y minerales que pueden reutilizarse en forma de agua de vinaza y un lodo de vinaza rico en nutrientes y minerales,

ya sea en la misma agroindustria de los aguardientes de maguey o en la industria agropecuaria. Sin embargo, este aprovechamiento integral de las vinazas de la industria de los aguardientes de maguey, aún tiene que desarrollarse y escalarse a nivel industrial.

6.1.1 Importancia de los aguardientes de maguey

En México los aguardientes de maguey auténticos y más importantes son el tequila y el mezcal, elaborados a partir la destilación del vino que resulta de la fermentación exclusiva de jugos de cabezas magueyes cocidas (Gutiérrez, 2001). La demanda de los aguardientes de maguey cada vez es mayor a nivel internacional y recientemente en México (Aguirre, 2016). La comercialización de tequila en escala global comprende 180 países (CRT, 2017), y la del mezcal incluye sólo 52 países (Nolasco, 2017). La producción oficial de tequila puro ajustado a 40° GL en 2016 fue 210 millones de litros, mientras que la de mezcal fue sólo 3.5 millones de litros (1.6 % del tequila) (**Cuadro 6.1**).

Cuadro 6.1. Producción de millones de litros (ML) de aguardientes puros de maguey durante los últimos años en México, ajustados a 40° GL.

	2011		2012		2013		2014		2015		2016	
Aguardiente	ML	%	ML	(%)								
Tequila	209.3	99.5	185.1	99.4	164.0	98.3	174.3	99.1	170.1	98.4	210.0	98.4
Mezcal	1.1	0.5	1.2	0.6	2.8	1.7	1.6	0.9	2.7	1.6	3.4	1.6
Total	210.4	100.0	186.3	100.0	166.9	100.0	176.0	100.0	172.9	100.0	213.4	100.0

Fuente: CRT, 2017; Nolasco, 2017.

La denominación de origen para mezcal (DOM) se amplió recientemente de siete a nueve estados del país (Oaxaca, Guerrero, Durango, San Luis Potosí, Zacatecas, Guanajuato, Tamaulipas, Michoacán y Puebla); esto hace que sea la más grande del mundo, con 500 000 km². A pesar de tener casi cinco veces más superficie que la denominación de origen para tequila, la industria del mezcal es muy improductiva, pues al estar vinculada principalmente a comunidades rurales campesinas, en general sus procesos son ineficientes y rudimentarios, carentes de medios de producción, su materia prima cultivada compite con los alimentos básicos en el minifundio, y si es silvestre está sujeta al desorden en el aprovechamiento de los recursos de las tierras comunales.

En 2016 en Oaxaca se produjo 83.5 % de la producción nacional oficial de mezcal puro (3.4 millones de litros de mezcal ajustado a 40° GL); San Luis Potosí apenas produjo 0.7 %, equivalente a 23 800 L. De este volumen corresponde a la única fábrica de mezcal de la región “Laguna Seca” que ha trabajado de manera ininterrumpida desde 1996 certificada por el COMERCAM (Consejo Regulador del Mezcal).

La moda reciente del mezcal en México está relacionada con el surgimiento de intermediarios jóvenes, capaces de crear su empresa con un producto novedoso, lleno de mitos (mezcal de puntas, grados de ahumado, madurado en vidrio y graduaciones irracionales de alcohol) y calificativos rebuscados (ensambles de magueyes, mezcales artesanales, ancestrales y añejamiento cristalino), con nombres y presentaciones diseñados para un mercado joven e inculto de zonas urbanas (Aguirre, 2016). Por otro lado, el bebedor extranjero culto y familiarizado con las bebidas destiladas comienza a detectar en los aguardientes de maguey riqueza de aromas y sabores carentes en los aguardientes neutros o madurados (brandy, ron, coñac, whisky, vodka, ginebra, etc.), así como entre lotes, procesos y especies de maguey (Aguirre, 2012). Sin duda, la creciente y reciente comercialización de los aguardientes de maguey en el exterior genera divisas y fuentes de trabajo en regiones mezcaleras y tequileras. No obstante, la producción de aguardientes de maguey presenta actualmente una gran diversidad de escenarios, desde procesos industriales excesivos que los desnaturalizan (hidrólisis ácida de las cabezas mediante difusores, filtraciones enérgicas y destilaciones continuas con columnas de rectificación) (Blanco, 1905; Pérez *et al.*, 2015; Prado, 2015; Martínez, 2012), hasta procesos muy rudimentarios e ineficientes (hornos de pozo, cabezas carbonizadas, extracción manual de jugos, fermentaciones con bagazo, y destilaciones sin control de temperatura, en ollas de barro sobre fogones de leña y condensaciones elementales), como reminiscencias prehispánicas y coloniales.

6.1.2 ¿Que son las vinazas?

Las vinazas son el residuo líquido que queda en los alambiques después de la destilación de cualquier tipo de aguardiente. Las vinazas de la producción de aguardientes de maguey (tequila y mezcal) son de color marrón oscuro por los compuestos de Maillard (melanoidinas) disueltos, generados por calentamiento durante la cocción y destilación.

Además, las vinazas contienen materia orgánica en forma de fibras solubles (mucílago y pectina) e insolubles (celulosa y hemicelulosa), sedimentos finos en suspensión (levaduras), compuestos fenólicos, minerales, ácidos orgánicos, y trazas de alcoholes y de azúcares. Sin embargo, su tratamiento biológico lo realizan sólo unas cuantas empresas tequileras con la capacidad económica y tecnológica para realizarlo (López *et al.*, 2010). Las empresas tequileras medianas y pequeñas, así como la mayoría de los productores de mezcal, descargan las vinazas sin ningún tratamiento en los terrenos y arroyos más próximos a sus instalaciones.

6.1.3 Volúmenes de vinazas de aguardientes de maguey

El volumen de vinazas generado en la producción de cada tipo de aguardiente depende del grado de eficiencia de sus procesos; también, el volumen de vinazas por litro de aguardiente puede diferir entre especies de maguey de una misma región. Sin embargo, en términos generales se ha reconocido que para el tequila se generan de 6 a 10 L de vinaza por litro de tequila ajustado a 40° GL (Cedeño, 2003). Robles *et al.* (2012) estiman la generación de 8 a 15 L de vinaza por litro de mezcal de 40° GL en Oaxaca; sin embargo, con el predominio de unidades de producción rudimentarias es ese estado, es posible que dicha variación sea de 15 a 25 L de vinaza por litro de mezcal. En la fábrica de mezcal Laguna Seca se estima en cerca de 15 L de vinaza por litro de mezcal; la eficiencia en esta fábrica es muy superior a los palenques tradicionales de Oaxaca y otras regiones, pero inferior a la mayoría de las fábricas modernas de tequila (**Cuadro 6.2**).

Así, los volúmenes de vinaza que genera la industria mezcalera son mucho menores que los generados por la industria tequilera. Sin embargo, la normativa ambiental mexicana (NOM-001-SEMARNAT-1996), sólo la cumplen unas cuantas empresas tequileras. El tratamiento de los efluentes de esta agroindustria es principalmente por digestión biológica aerobia y anaerobia, hasta que el agua tratada cumpla con los límites máximos permisibles de contaminantes para su descarga (López y Contreras, 2015). En Oaxaca y otros estados de la DOM con predominio de producción en pequeña escala, las vinazas que se generan, suelen ser descargadas sobre el suelo próximo al alambique sin ningún tratamiento.

Cuadro 6.2 Volúmenes de vinazas (L) generados en la producción de aguardientes de maguey por litro ajustado a 40° GL en 2016.

Aguardiente	Estimación de vinazas	Promedio	Producción de aguardiente	Volumen de vinazas generadas
Tequila	6-10	8.0	273 000 000	2 184 000 000
Mezcal	15-25	20.0	3 400 000	68 000 000
Total			276 400 000	2 252 000 000

Fuentes: CRT, COMERCAM, Cedeño (2003) y datos inéditos.

6.1.4 Usos actuales de las vinazas y propuesta para su reutilización

Las vinazas de aguardientes de maguey se han usado sin tratamiento alguno como enmiendas para suelos (Morán *et al.*, 2016), para humedecer las picaduras de bagazo y pencas de desvirado durante la formación de compost, y sólo en Jalisco son tratadas biológicamente para su descarga al drenaje. Sin embargo, el tratamiento biológico implica que el agua resultante haya tenido contacto con lodos activados (microorganismos) y resulta insalubre; por ello, sólo se ha intentado reutilizarla como parte (5 a 10 %) del agua utilizada para reproducir el fermento que se incorpora a los jugos hidrolizados, pero por no más de cinco ciclos, pues el agua tratada va saturándolo de sales minerales hasta inhibir parcialmente su reproducción (Cedeño, 2003). Esta agua se puede usar para limpieza de las diferentes áreas de la fábrica o para regar áreas verdes. Se ha intentado utilizarlas para la generación de biogás (metano e hidrógeno), sin que se articule de manera sistemática su aprovechamiento para que pueda ser viable. Existe una patente (WO2005052113 A1) de Herrera y Rodríguez (2005) para la obtención de vapor libre de compuestos volátiles mediante su decantación y evaporación con intercambiadores operados con vapor, para reutilizar el vapor de las vinazas en las calderas, sin embargo, el calentamiento y los intercambiadores de calor necesarios, demandan grandes cantidades de energía.

6.1.5 Proceso de elaboración de mezcal potosino

El proceso de elaboración de mezcal potosino se caracteriza por contar con desarrollos tecnológicos de principios del siglo XVIII, intermedios entre los prehispánicos coloniales existentes en otros estados con DOM y los industriales del tequila. Las fábricas de mezcal típicas del altiplano potosino, tienen el diseño ingenieril y tecnológico más

avanzado en su género hasta el primer tercio del siglo XX (Aguirre, 2004; Gschaedler, 2007; Godínez, 2012). En estas construcciones abovedadas alargadas (bóvedas de cañón) o en forma de cruz (bóvedas de arista) se disponen secciones para cada una de las etapas del proceso, y están diseñadas para reducir esfuerzos y generar microclimas adecuados. El diseño incluye disposición accesible para su carga y descarga de hornos elevados de piedra abovedados, que originalmente funcionaban con leña y que se adaptaron para vapor. Estos hornos permitían la producción durante todo el año, no sólo durante el periodo seco. Junto a los hornos, en el punto más alto de toda la construcción se encuentra el área de la molienda, para que el movimiento canalizado de jugos se realice por gravedad desde el molino prensa y de las pilas de lavado del bagazo al área o cuarto de fermentación, tanto a unas piletas pequeñas o cubas especiales usadas para reproducción del crecimiento del fermento, como a la batería de pilas de fermentación, con capacidad de más que 6 000 L cada una. Cada pila de fermentación cuenta con una válvula inferior para drenar el vino hacia un canal que lo conduce por gravedad a la boca de carga del alambique, situado en el espacio contiguo para la destilación (**Figura 6.1**).

El proceso del mezcal comprende una serie de reacciones, transformaciones y separaciones físicas, químicas y biológicas de los polisacáridos de reserva de los magueyes para obtener un aguardiente de maguey como se describe en seguida (Godínez *et al.*, 2012). Primeramente se recolecta maguey silvestre maduro en los agostaderos aledaños a la fábrica, para lo cual la planta elegida se desvira en pie y posteriormente se corta o tumba su cabeza; en la fábrica se somete a cocción con vapor (principal forma de cocción en la actualidad) en un horno elevado de mampostería para hidrolizar (100 °C aproximadamente) los polisacáridos de reserva (fructanos) de la cabeza; después de 36 h de cocción, se cierra el vapor, y se deja enfriar para poder abrir el horno. Luego, se saca del horno y se lleva al molino o prensa tipo tahona para la extracción del jugo, el cual consiste en una piedra (\pm 1.2 t) dispuesta para girar en un eje perpendicular al eje central de una pileta circular inclinada. Este movimiento es accionado actualmente por un tractor y el maguey troceado manualmente se va colocando al paso de la piedra. El bagazo prensado se lleva a una pila de lavado para disolver y extraer los azúcares remanentes; luego los jugos azucarados de la molienda y de la pila de lavado se conducen al cuarto de fermentación por gravedad. En

cubas o en pilas se induce la multiplicación del fermento seminal. Luego, el fermento se trasvasa a las piletas de fermentación en condiciones anaerobias.

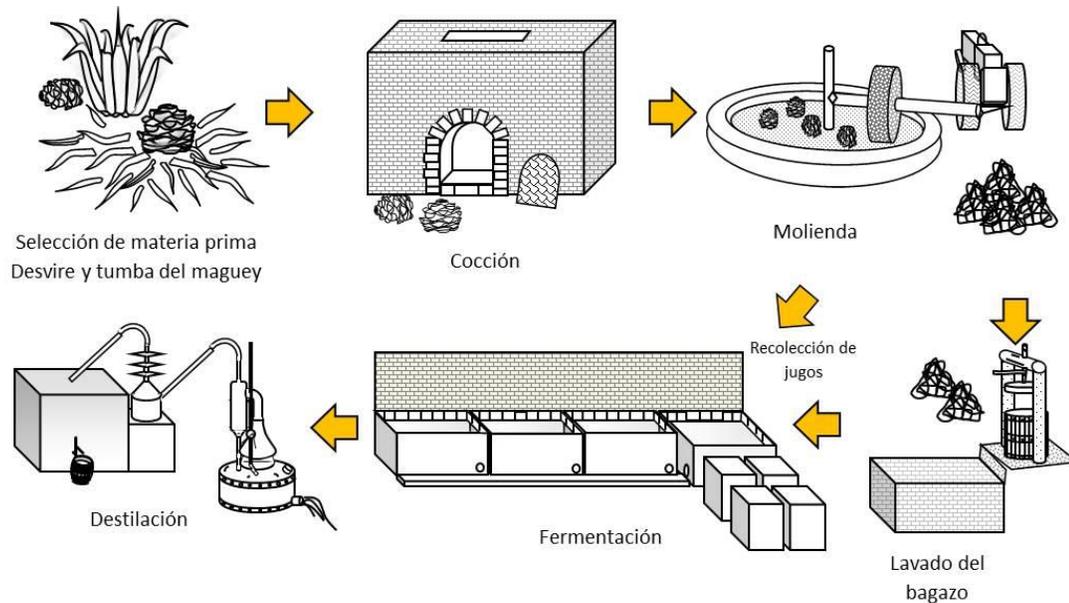


Fig. 6.1 Proceso de elaboración de mezcal potosino de la fábrica “Laguna Seca” (Godínez, 2012).

En esta etapa se genera principalmente etanol, CO_2 , y otros compuestos congéneres como alcoholes superiores (butanol, propanol, isopropanol, etc.), ácidos orgánicos (láctico y acético), entre otros. El vino generado en 36 h de fermentación se descarga en un canal de carga del alambique, situado en el siguiente espacio inferior de la fábrica. En estas fábricas tradicionalmente se realiza una sola destilación fraccionada, con la cual se separan los alcoholes según su punto de ebullición, por medio del calentamiento regulado con la presión de vapor, la temperatura al tacto de la olla y el caudal condensado, y es reforzada con una serie de retornos y trampas de condensación en serie (cabezote, botella y rectificador de lentejas). Esta destilación fraccionada es típica en las fábricas del altiplano potosino, y permite la separación de las “cabezas” compuestas por el alcohol más ligero y tóxico (metanol), antes del “corazón”, alcohol comestible o mezcal verdadero (etanol), y al final de la destilación se separa otra fracción con mayor contenido de agua que alcohol, denominada “colas”, compuestas por alcoholes pesados y otros compuestos de olor y sabor desagradable. La vinaza queda en la olla del alambique como residuo líquido que se descarga al suelo fuera de la fábrica sin ningún tratamiento. En la actualidad esta fábrica

procesa sólo dos hornos de 16 t por semana, lo cual genera 11 000 L de vinaza, equivalentes a 572 000 L al año.

Estas vinazas pueden ser una fuente de agua para el mismo productor de mezcal, pues el agua es un recurso limitado en el altiplano potosino; sin embargo, en las grandes tequileras son consideradas como aguas residuales domésticas, por el tratamiento biológico que les aplican para su descarga al drenaje. Con base en lo precedente, el objetivo de este trabajo fue separar las fracciones principales de la vinaza (agua y lodo de vinaza) generadas en la fábrica de mezcal Laguna Seca mediante procesos simples y mecánicos (filtración, centrifugación y evaporación a baja presión) y establecer la composición parcial de dichas fracciones para proponer su utilización.

6.2 Materiales y métodos

6.2.1 Recolección de las muestras de vinaza

Las muestras de vinaza se recolectaron de dos procesos diferentes, de tres cargas de destilación de maguey cocido con vapor, y de otras tres de maguey cocido con leña, en la fábrica de mezcal Laguna Seca, ubicada en el ejido Miguel Hidalgo, municipio de Charcas, San Luis Potosí, México. Al término de la destilación, la vinaza se agitó en la olla del alambique, para homogenizar su contenido de sólidos antes de descargarse; luego, las muestras se recolectaron del chorro de descarga al drenaje, con una cubeta de 20 L, e inmediatamente se le midió su temperatura (**Figura 6.2**). Las muestras de vinaza se enfriaron y trasvasaron con un embudo a una garrafa de 20 L, para su traslado al laboratorio y almacenamiento a 5 °C. En el laboratorio se tomó una submuestra de 2 L de vinaza de cada muestra para analizar su contenido de sólidos totales, sólidos sedimentables, demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), conductividad eléctrica y pH. Estos análisis se realizaron en el Laboratorio de Análisis del Área de Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ingeniería, UASLP.



Fig. 6.2 Alambique de cobre (a) y recolección de las muestras de vinazas (b) en la fábrica de mezcal Laguna Seca.

6.2.2 Separación del agua y lodo de vinaza

Otras submuestras homogéneas de 2 L cada una se colocaron en un evaporador a baja presión, con un equipo de impregnación a vacío (J. P. Selecta Gastrovac, España) adaptado a un condensador y dos trampas de condensación en serie, a 41 °C y 75 % del vacío total, hasta obtener 75 % (1.5 L) de agua, en las trampas de condensación (**Figura 6.3**), de acuerdo con el principio de Fito (1994) y la metodología descrita por Godínez *et al.* (2016). El 25 % restante (0.50 L) en la olla del equipo, es la vinaza concentrada o lodo húmedo de vinaza, el cual se desecó y analizó de manera independiente (**Figura 6.4**).



Fig. 6.3. Equipo de cocción e impregnación al vacío (J. P. Selecta Gastrovac, España) acondicionado con un condensador y dos trampas de condensación para trabajar como evaporador al vacío.



Fig. 6.4. Vinaza cruda, agua y lodo húmedo de vinaza de la producción de mezcal potosino.

En la **Figura 6.5** se describe el proceso de separación de las fracciones del lodo de vinaza. Para ello, otra submuestra de 2 L, se filtró con una coladera de muselina para separar los sólidos fibrosos; a la vinaza filtrada se le decantó el sedimento microbiano por centrifugación (Damon PR-6000, EE. UU.) a 1600 rpm/30 minutos; el sobrenadante se evaporó al vacío con el mismo equipo y condiciones para la obtención del agua de vinaza, y al final quedó el concentrado de compuestos de color caramelo de la vinaza.

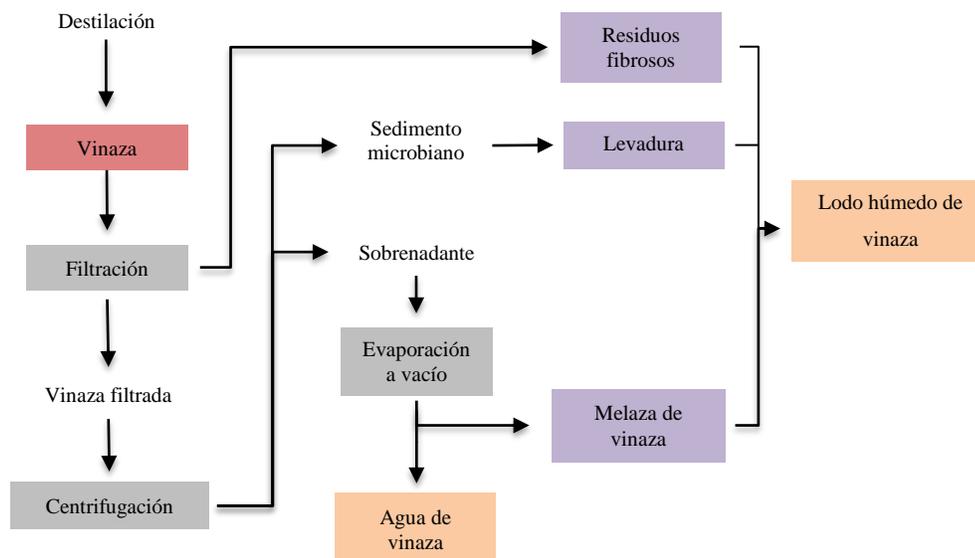


Fig. 6.5 Proceso de separación de sólidos de las vinazas para la obtención de agua mediante evaporación parcial al vacío.

Así, el lodo de vinaza (LV) está conformado por el filtrado de la coladera de muselina, al cual se denominó sedimento fibroso (SF), por el sedimento microbiano (SM) obtenido por centrifugación, y por el concentrado de compuestos de color de la vinaza o melaza de vinaza (MV) (**Figura 6.6**). Cada una de estas fracciones, así como el lodo húmedo de vinaza se analizó por separado.

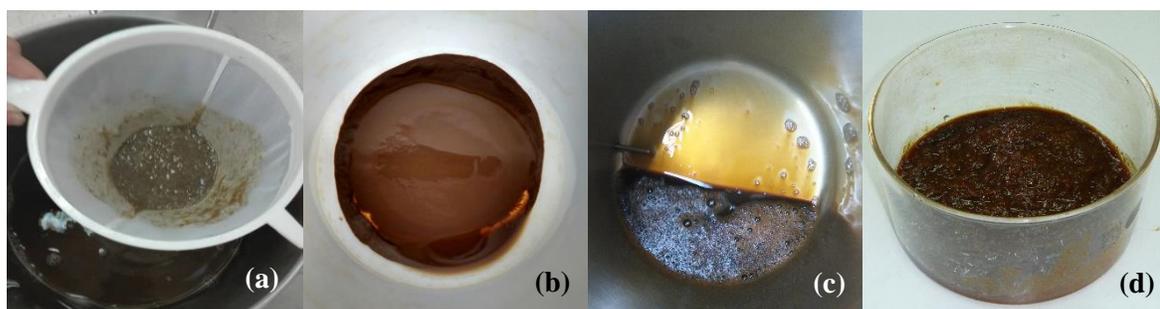


Fig. 6.6 Sedimento fibroso (a), sedimento microbiano (b), melaza de vinaza (c) y lodo de vinaza (d).

6.2.2.1 Análisis de ácidos grasos de cadena corta y etanol y azúcares en el agua de vinaza

Los contenidos de ácidos láctico, acético, propiónico y butírico, y de etanol en las muestras de agua de vinaza se midieron por cromatografía de líquidos de alta resolución (HPLC), mediante el método del estándar externo. Se utilizaron estándares de ácidos láctico y acético (Jalmek, México) y propiónico y butírico (Sigma Aldrich, EE. UU.), etanol (Fermont, México), y glucosa y fructosa (Sigma Aldrich, EE. UU.) de acuerdo con la metodología descrita por Ewen (2011). Se utilizó un HPLC (HP-Agilent Technologies serie 1100, Alemania) con un detector de índice de refracción. Se trabajó en fase normal con una columna de intercambio iónico (Agilent, Hi-Plex- H, 7.7 x 300 mm, 0.8 μm , Alemania) como fase estacionaria, y como fase móvil se usó agua HPLC (Fermont, México) a 5 mM de H_2SO_4 filtrada con membranas de nailon de 0.45 μm , misma que se utilizó para la preparación de los estándares y las muestras. Se utilizó una temperatura de 55 $^{\circ}\text{C}$, igual a la del detector del índice de refracción. Se utilizó un flujo de 0.6 ml/min, y un volumen de inyección fijo de muestra “lup” de 20 μl ; el tiempo de corrida de las muestras fue de 30 minutos. La identificación de los compuestos se realizó por comparación con el tiempo de

retención de los estándares, y su cuantificación mediante su comparación estadística con las curvas de calibración lineal para cada estándar con un coeficiente de correlación $r > 0.9998$.

6.2.3 Caracterización del lodo de vinazas

El lodo húmedo de vinazas (25 % del volumen original), está compuesto por el residuo fibroso separado por filtración, el sedimento microbiano decantado por centrifugación y la melaza de vinaza concentrada al vacío. Cada una de estas fracciones se secó y analizó por separado y de manera conjunta, para su valoración como una fuente potencial de nutrientes y minerales para piensos.

6.2.3.1 Materia seca (MS)

A cada muestra de lodo de vinaza y sus fracciones se le registró el peso fresco y luego se secaron a 60 °C hasta peso constante (Ohaus 5120, EE. UU.), en un horno de aire forzado (Shel-Lab FX-14, EE. UU.). La materia seca se calculó a partir de la relación en porcentaje que representa la materia seca con respecto a su peso fresco (Gardner, 1967).

6.2.3.2 Contenido de cenizas totales por calcinación

Las cenizas totales se evaluaron en 1 g de cada submuestra desecada, por medio de su calcinación a 700 °C/2h en una mufla (Sartorius BP221S, Alemania).

6.2.3.3 Análisis de macro y micro elementos de las cenizas

Se analizaron 36 elementos; para ello tomaron las submuestras y se secaron hasta peso constante, luego se hidrolizaron con ácido nítrico destilado (J.T. Baker) para eliminar la materia orgánica y disolver los minerales. La identificación y cuantificación de macro elementos (Ca, K, Mg, Na, S y Si) de las cenizas se llevó a cabo mediante la ionización de la muestra con un equipo de plasma de acoplamiento inductivo y un espectrofotómetro de emisión óptica (ICP-OES, por sus siglas en inglés) (Thermo Scientific iCAP 7000 Series, EE. UU.). La identificación y cuantificación de elementos traza (Li, B, Al, P, Sc, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Rb, Sr, Y, Mo, Cd, I, Cs, Ba, La, Ce, Eu, Hg, Tl, Pb, Th y U) de las cenizas se llevó a cabo con un equipo de plasma de acoplamiento inductivo acoplado a un espectrofotómetro de emisión óptica de masas (ICP-MS, por sus siglas en inglés)

(Thermo Scientific X - Series 2, EE. UU.) con un sistema de cuadrupolo. Todos estos datos se presentan con valores medios de las tres repeticiones de muestras independientes y su desviación estándar. Estos análisis se realizaron en el Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

6.2.3.4 Proteína bruta

El contenido de proteína bruta se realizó de acuerdo con el método oficial de la AOAC 990.03.

6.2.3.5 Contenido de fibra insoluble (celulosa, hemicelulosa y lignina)

El contenido de hemicelulosa, celulosa y lignina de las muestras de los lodos de vinazas y sus fracciones, se calculó a partir de la diferencia de los contenidos resultantes del análisis de fibra insoluble, de acuerdo con los procedimientos de ANKOM Technology, método 6 para fibra detergente neutro (FDN), método 5 para fibra detergente ácido y el método 8 para lignina detergente ácido, basados en la metodología de Goering y Van Soest (1970).

6.3 Resultados y discusión

6.3.1 Características generales de las vinazas crudas

Las características físicas y química de la vinaza de mezcal fueron similares en las derivadas de cabezas cocidas con vapor y con leña. La temperatura promedio de la vinaza al momento de su descarga de la olla fue de 93 °C, y su pH de 3.3 a 3.5. Además, estas vinazas descargadas al suelo próximo incumplen la normativa mexicana por sus valores medios de conductividad eléctrica (alto contenido de minerales), carga importante de sólidos sedimentables y totales, material flotante, DBO, DQO y fósforo (**Cuadro 6.3**). Sin embargo, los contenidos de metales pesados se encuentran dentro de los valores de referencia, ya que están en solución.

El calcio es el mineral que predomina en la vinaza (48-51 % de las cenizas totales), este mineral puede estar en forma oxalato de calcio soluble e insoluble, y le siguen en importancia el K y el Mg (**Cuadro 6.4**).

El problema ambiental actual que representa la descarga de vinazas de aguardientes de maguey a cielo abierto en México, debe tratarse como una oportunidad para la generación de otros productos que pueden mejorar la rentabilidad de las empresas, como agua, biogás, etanol, compost, forraje, fibras, sustratos para cultivo de hortalizas y hongos o sustratos con demanda local, regional, nacional o internacional, en vez de invertir en su tratamiento con procesos físicos, químicos y biológicos para descargarlas legalmente al drenaje.

Cuadro 6.3 Características de la vinaza de mezcal potosino derivada de dos procesos diferentes, y valores máximos permisibles por la NOM-001-ECOL-1994 para la descarga de aguas residuales en aguas y bienes nacionales (promedio mensual para descargas en embalses artificiales).

Vinazas	Lote de maguey cocido con vapor	Lote de maguey cocido con leña	Valor de referencia
Temperatura de descarga	94.26 ± 1.71	92.34 ± 1.58	40.00
pH	3.59 ± 0.12	3.33 ± 0.14	6.00-9.00
Color	Marrón oscuro	Marrón oscuro	Sin color
Olor	Acético	Acético	-
°Brix	5.40 ± 0.61	6.20 ± 0.41	-
Azúcares fermentables (g/L)	1.78 ± 0.69	2.34 ± 0.46	-
Conductividad eléctrica (mS/cm)	92.84 ± 6.11	10.04 ± 9.62	-
Material flotante	Presente	Presente	Ausente
Sólidos totales (g/L)	44.48 ± 7.54	39.67 ± 5.12	0.07-0.12
Sólidos sedimentables (ml/L)	151.66 ± 12.57	174.16 ± 21.94	1.00
Demanda biológica de oxígeno (DBO) (g/L)	35.69 ± 8.56	40.36 ± 6.21	0.15
Demanda química de oxígeno (DQO) (g/L)	44.00 ± 5.84	46.12 ± 5.98	0.15
Fosforo (mg/L)	148.24 ± 39.36	121.12 ± 21.64	20.00
Arsénico (mg/L)	0.10 ± 0.01	0.08 ± 0.01	0.20
Cadmio (mg/L)	0.02 ± 3.12E-3	0.01 ± 1.12E-3	0.20
Cianuro (mg/L)	-	-	2.00
Cobre (mg/L)	2.15 ± 0.37	1.92 ± 0.24	4.00
Cromo (mg/L)	0.05 ± 0.01	0.08 ± 0.01	1.00
Mercurio (mg/L)	7.30E-4	1.00E-3	0.01
Níquel (mg/L)	0.5 ± 0.08	0.13 ± 0.01	2.00
Plomo (mg/L)	0.24 ± 0.01	0.17 ± 0.01	0.50
Zinc (mg/L)	5.07 ± 0.67	2.54 ± 0.28	10.00

n = 3; $\bar{X} \pm DE$;

Las vinazas en recipientes cerrados son relativamente estables a la sombra y a temperatura ambiente, debido a su pobreza de azúcares, pH ácido, y riqueza de compuestos (fenólicos, de Maillard y furfural) generados durante la cocción y destilación, por

reacciones de oxidación de los azúcares con grupos amino libres en presencia de calor. Todos estos compuestos y sus concentraciones crean un ambiente tóxico para el desarrollo de microorganismos, más la esterilización de las vinazas durante la destilación. En cambio, las vinazas descargadas sobre el suelo, generan un mal olor muy característico de los drenajes de las fábricas de mezcal del altiplano potosino.

Cuadro 6.4 Concentración (mg/L) y abundancia relativa (%) de minerales de la vinaza generadas por dos procesos diferentes.

Mineral	Tipo de nutriente	Lote de maguey cocido con vapor	%	Lote de maguey cocido con leña	%
Ca	Macro	2813.52 ± 351.36	51.15	2093.05 ± 456.12	48.38
K	Macro	1537.45 ± 121.20	27.95	1283.23 ± 236.23	29.66
Mg	Macro	466.71 ± 31.36	8.49	422.56 ± 65.39	9.77
Na	Macro	274.96 ± 34.51	5.00	169.24 ± 12.36	3.91
P	Macro	148.23 ± 16.34	2.70	111.17 ± 9.19	2.57
S	Macro	146.31 ± 17.67	2.66	117.55 ± 17.94	2.72
Si	Macro	52.98 ± 6.12	0.96	45.57 ± 6.01	1.05
Al	Micro	14.64 ± 2.65	0.26	25.96 ± 3.31	0.60
Fe	Micro	13.25 ± 2.44	0.24	30.59 ± 5.77	0.71
Sr	Micro	9.51 ± 2.61	0.17	7.81 ± 1.04	0.18
B	Micro	5.02 ± 1.03	0.09	4.16 ± 0.93	0.09
Ba	Micro	4.23 ± 0.86	0.08	4.04 ± 0.81	0.09
Zn	Micro	5.11 ± 0.76	0.09	2.51 ± 0.67	0.06
Cu	Micro	2.26 ± 0.31	0.04	1.90 ± 0.34	0.04
Mn	Micro	2.12 ± 0.515	0.04	2.36 ± 0.51	0.05
Otros	Micro	5.18 ± 1.86	0.09	5.31 ± 1.04	0.12
Total		5 500.86	100.00	4 326.44	100.00

n = 3; $\bar{x} \pm DE$: Desviación estándar;

6.3.2 Características del agua de vinaza

Como la vinaza de mezcal está compuesta principalmente de agua de lluvia captada por el maguey, se consideró útil recuperarla mediante su evaporación parcial al vacío. Las condiciones de evaporación a baja presión de la vinaza fueron 41 °C a 75 % de vacío total del equipo, esto equivale a calentar la vinaza a 94 °C a 612 mm Hg de presión atmosférica a la altitud de San Luis Potosí, para evaporar y condensar la vinaza en la olla de vacío y a la vez los vapores de agua en las trampas de condensados. Con estas condiciones de vacío y temperatura, el vapor de agua arrastra compuestos que a presión normal sus puntos de

ebullición son mucho menores que 100 °C, como el etanol y compuestos de punto de ebullición cercanos al del agua, como los ácidos, acético (118 °C) y láctico (98°C), principalmente. El arrastre de otro tipo de compuestos tóxicos, como el furfural, es poco probable ya que su punto de ebullición de 162°C es mucho mayor que el del agua. La evaporación a baja presión requiere menor cantidad de energía para evaporar la vinaza, incluso se podría evaporar únicamente con la energía del sol, acoplada a un sistema de vacío que permita recuperar los vapores del agua para su condensación.

El agua de vinaza que resultó de ambos procesos de cocción del maguey es incolora, esto quiere decir que está libre de sólidos sedimentables y totales, es de olor acético en los lotes de maguey cocidos con vapor, y particularmente acético y ahumado en los lotes cocidos con leña y con pH de 2.8 a 3.0 y sabor ácido, pues el vapor de agua arrastra algunos ácidos orgánicos generados en la fermentación alcohólica. Esta agua tiene una conductividad eléctrica de 323-357 $\mu\text{S}/\text{cm}$, cerca del 3 % de la conductividad original de la vinaza. El agua de vinaza de los magueyes cocidos con leña, presentó mayor cantidad de ácidos acético y láctico y etanol que el agua de vinazas de los magueyes cocidos con vapor (**Cuadro 6.5**). Esta agua de vinaza puede llegar a usarse en la limpieza de instalaciones de las fábricas, o si se mejora su calidad mediante tratamientos simples, como neutralización, filtración y precipitación, incluso se podría usar en calderas y condensadores.

Por su aroma peculiar a maguey cocido y a fermentación alcohólica, el agua de vinaza, puede ser comestible y usarse como agua de dilución del mismo mezcal. Otra forma como se podría aprovechar es como de electrolitos, añadiendo carbonatos de sodio o calcio para genera lactato o acetato de sodio o de calcio en solución, o bien, para la obtención de estas mismas sales (acetato y lactato) de sodio o de calcio para ser utilizadas como compuestos químicos con aplicaciones muy diversas.

Es importante resaltar que el agua de las vinazas que se obtuvo mediante la evaporación y condensación a vacío, tiene una ventaja sobre el agua que se obtiene del tratamiento biológico que se realiza en otras regiones, y es debido a la diferencia de microorganismos presentes en la fermentación alcohólica (no patógenos) y los utilizados en el tratamiento biológico (patógenos) de las vinazas, ya que el agua de vinaza obtenida al vacío es más salubre para destinarse al consumo humano.

Cuadro 6.5 Características del agua de vinaza generada de la elaboración de mezcal.

Parámetro/Vinaza	Lote de maguey cocido con vapor	Lote de maguey cocido con leña
Color	Incolora	Incolora
Olor	Acético	Acético y ahumado
Sabor	Ácido	Ácido
pH	2.9 ± 0.38	2.8 ± 0.40
Conductividad eléctrica (µS)	323 ± 46.12	357 ± 65.87
Ácido láctico (g/L)	N.D.	0.11 ± 0.02
Ácido acético (g/L)	1.89 ± 0.56	2.50 ± 0.44
Ácido propiónico (g/L)	0.04 ± 0.00	0.03 ± 0.00
Ácido butírico (g/L)	0.02 ± 0.00	0.01 ± 0.00
Etanol (g/L)	2.45 ± 0.35	3.72 ± 0.61

n = 3; $\bar{X} \pm$ Desviación estándar

Sin considerar la calidad del agua obtenida con este proceso, con el 75 % del volumen de las vinazas que genera la fábrica de mezcal Laguna Seca (572 000 L por año), se podrían obtener 429 000 L de agua de vinaza, equivalentes a 42 viajes del camión cisterna de 10 000 L. Por otro lado, el agua de vinaza puede utilizarse para dilución del mezcal, ya que generalmente se produce con 45 °GL, y se ajusta con agua comercial hasta 38° o 40 °GL según el destino de venta. Si esta fábrica produce 52 000 L de mezcal de 38 °GL al año, derivados de 43 911 L de mezcal de 45 °GL, significa que anualmente se consumen 8 089 L de agua purificada comercial para dilución. Este volumen apenas representa 1.3 % del agua de vinaza que se pudiera obtener durante todo el año. El costo promedio del agua purificada comercial es un peso/litro (8 089 pesos/año), pero la fábrica de mezcal tiene necesidades mayores de agua para la elaboración de dos marcas de destilados de *Agave*, y probablemente esta agua de vinaza pudiera mejorar su sabor y aroma e incrementar los ahorros en agua comercial para dilución.

En 2016 los aguardientes de maguey en general (tequila y mezcal) generaron 2 252 000 000 L de vinazas; de ellas se podrían llegar a obtener 1 689 000 000 L de agua de vinaza, cantidad considerable de agua para utilizarse en la misma agroindustria para distintos propósitos. La evaporación al vacío es un proceso de bajo costo relativo muy utilizado en industrias como la azucarera, del papel, jugueras, refinerías y biorefinerías, donde este proceso es conocido como evaporación al vacío de múltiple efecto. El problema

es que la inversión inicial de este tipo de tecnologías es alta, y solamente algunas empresas tequileras la podrían costear.

6.3.3 Caracterización parcial del lodo de vinaza y de sus fracciones

El lodo de vinazas es la fracción en donde quedan concentrados todos los sólidos ricos en nutrientes y minerales, desperdiciados cuando se someten a tratamientos biológicos para consumir su materia orgánica con microorganismos o procesos de floculación, sedimentación, confinamiento o incineración pues su disposición final es el reto al que se enfrentan todos los procesos de depuración de contaminantes. En cambio, dichos nutrientes y minerales pueden destinarse como ingredientes en la formulación de piensos. Por ello, es importante caracterizar sus nutrientes para buscar formas de aprovecharlos.

El lodo de vinaza que resulta de concentrar la vinaza hasta 25 % del volumen original presentó contenido similar de materia seca con ambos procesos de cocción del maguey (42 a 45 %). La materia seca del lodo de vinaza de ambos procesos está compuesta principalmente por la melaza de vinaza, seguida del sedimento fibroso y en menor proporción por el sedimento microbiano (**Cuadro 6.6**). Las cantidades de nutrientes y minerales que pueden llegar a generarse en esta fábrica de mezcal en un año son de 41 a 43 toneladas, según el tipo de cocción del maguey.

Si se considera una concentración de 60 g de sólidos /L de vinaza para los 2 252 000 000 L que generó la industria de los aguardientes de maguey en 2016, se estiman en 135 120 t los nutrientes y minerales que se estarían desperdiciando y liberando al ambiente, o estarían siendo transformados en lodos de plantas tratadoras de vinazas, para que al final su disposición o confinamiento resulte en otro problema ambiental.

En cuanto a la composición de nutrientes del lodo seco de vinaza (**Cuadro 6.7**), el sedimento microbiano fue el más rico en proteína (20 a 21 %), por concentrarse en esta fracción la mayor parte de las levaduras responsables de la fermentación alcohólica, pero es también el que presenta la menor proporción de MS del lodo completo.

Cuadro 6.6 Composición absoluta (g MS/L) y relativa de las fracciones del lodo de vinaza (LV) de dos procesos de cocción diferentes y las cantidades que se generan por cada horno que se procesa y durante un año, con la capacidad actual de trabajo de la fábrica de mezcal Laguna Seca.

Vinaza	Unidades	Fracción del lodo de vinaza			
		SF	SM	MV	LV
Magüey cocido con vapor	(g MS/L de vinaza)	8.08 ± 0.60	4.02 ± 0.61	48.86 ± 6.35	60.96 ± 8.12
	Proporción de la MS	13.25 ± 0.97	6.59 ± 9.88	80.15 ± 10.42	100.00
	kg/Lote	52.52 ± 3.40	26.13 ± 3.40	317.59 ± 37.50	396.24 ± 45.10
	t/año	5.46 ± 0.35	2.74 ± 0.35	33.02 ± 3.90	41.22 ± 4.62
Magüey cocido con leña	(g MS/L de vinaza)	9.66 ± 0.81	4.06 ± 0.44	50.87 ± 6.30	64.59 ± 14.71
	Proporción de la MS	14.96 ± 1.24	6.29 ± 0.69	78.76 ± 9.79	100.00
	kg/Lote	62.79 ± 4.51	26.39 ± 2.54	330.65 ± 35.95	419.83 ± 80.64
	t/año	6.53 ± 0.47	2.74 ± 0.26	34.38 ± 3.73	43.65 ± 8.42

n = 3; $\bar{X} \pm$ Desviación estándar; SF: Sedimento fibroso; SM: Sedimento microbiano; MV: Melaza de vinaza; LV: Lodo de vinaza

Cuadro 6.7 Composición (% base seca) de las fracciones del lodo de vinaza de dos procesos de cocción diferentes.

Vinaza	Fracción	Cenizas	Proteína	Hemicelulosa	Celulosa	Lignina
Magüey cocido con vapor	LV	12.12	6.32	1.68	9.40	0.29
	SF	11.02	13.86	1.17	39.53	2.79
	SM	10.25	21.30	20.10	19.60	-
	MV	12.12	3.64	-	-	-
Magüey cocido con leña	LV	12.01	5.04	2.13	7.23	0.38
	SF	11.39	8.19	2.29	41.99	1.91
	SM	13.78	20.85	17.18	21.50	-
	MV	11.67	2.45	-	-	-
Promedio	LV	12.07	5.68	1.91	8.32	0.34

n = 3; SF: Sedimento fibroso; SM: Sedimento microbiano; MV: Melaza de vinaza

El contenido de proteína fue cerca de la mitad que el registrado para el concentrado de levadura de cerveza (42 %) (McDonald *et al.*, 2010); esto se debe en parte a la

degradación de las proteínas por el calentamiento del vino durante la destilación; también, la membrana utilizada para separar el sedimento fibroso pudo ser insuficiente, pues en el sedimento microbiano se registró celulosa y hemicelulosa, y estos compuestos no son constituyentes de las levaduras, y su presencia enmascara el contenido de proteína real del sedimento microbiano. En la melaza de vinaza definitivamente no se encontró ningún resto de celulosa, hemicelulosa ni lignina; sin embargo, se registró una pequeña cantidad de proteína, probablemente debida a las levaduras remanentes en la vinaza decantada por filtración y centrifugación. El contenido relativo de cenizas fue similar en todas las fracciones, al igual que en el lodo de vinaza.

En cuanto a la composición absoluta de las cenizas por fracción seca del lodo de vinaza, la melaza de vinaza aporta cerca del 80 % de las cenizas totales solubles, y contiene casi 50 % del Ca de las cenizas totales del lodo de vinaza. El 13.53 % de las cenizas o totales lo aporta el sedimento fibroso, y 7.01 % el sedimento microbiano; este último destaca de las demás fracciones por su mayor riqueza en Fe, Al, Cr, Zr, Nb, U, Cs y Be (**Cuadro 6.8**).

Sin duda, la proteína es el nutriente con mayor valor económico del lodo de vinaza, particularmente del sedimento microbiano. En efecto, los concentrados de destilerías o subproductos de la industria cervecera son utilizados como ingredientes para piensos balanceados como fuente de proteína muy digestible, rica en aminoácidos esenciales (lisina) y vitamina B, principalmente para monogástricos (cerdos y aves); sin embargo, la fracción del sedimento microbiano tiene cerca de 40 % de fibra insoluble (celulosa mas hemicelulosa), la cual reduce la conversión de pienso a proteína animal y limita la proporción que puede incorporarse en dichos piensos (McDonald *et al.*, 2010).

El contenido proteico del sedimento microbiano es superior al de los cereales, y aunque es inferior al de las principales fuentes de proteína vegetal, éstas suelen ser deficitarias en algunos aminoácidos esenciales, por lo que el SM puede ser una fuente complementaria de proteína rica en aminoácidos esenciales y vitamina B (**Cuadro 6.9**) para monogástricos.

Cuadro 6.8 Composición media (mg/kg MS) del lodo de vinaza derivado de los dos procesos (maguey cocido con vapor y con leña), y composición relativa de minerales de sus fracciones.

Mineral	mg/kg				%
	Lodo de vinaza	SF	SM	MV	
Ca	34 882.90 ± 4 126.64	21.41	8.58	70.01	100.00
K	21 387.29 ± 3 124.12	5.12	2.89	91.99	100.00
Mg	7 042.08 ± 804.36	6.12	3.80	90.08	100.00
Na	2 820.47 ± 364.21	4.69	5.13	90.18	100.00
S	1 958.75 ± 153.69	8.83	7.72	83.45	100.00
P	1 852.01 ± 279.01	6.39	15.38	78.23	100.00
Si	758.30 ± 94.16	11.38	6.32	82.30	100.00
Fe	508.85 ± 60.45	21.11	53.86	25.03	100.00
Al	432.38 ± 49.36	18.52	53.49	27.99	100.00
Sr	130.38 ± 17.90	10.70	4.73	84.57	100.00
B	67.70 ± 7.01	5.82	4.07	90.12	100.00
Ba	65.85 ± 7.20	21.38	8.17	70.45	100.00
Zn	42.41 ± 5.16	15.25	8.64	76.11	100.00
Mn	37.53 ± 3.91	9.81	8.87	81.33	100.00
Cu	32.12 ± 4.88	20.90	25.16	53.94	100.00
Sn	22.78 ± 4.56	31.16	4.44	64.40	100.00
Br	18.62 ± 1.13	4.93	2.55	92.52	100.00
Ti	16.02 ± 1.20	14.95	32.28	52.77	100.00
Rb	10.49 ± 1.64	5.89	6.68	87.43	100.00
I	3.38 ± 0.56	5.37	7.26	87.36	100.00
Pb	2.93 ± 0.41	54.44	16.69	28.87	100.00
Li	2.59 ± 0.36	5.12	8.66	86.22	100.00
Ni	2.33 ± 0.28	10.68	13.67	75.65	100.00
V	1.95 ± 0.26	14.16	22.13	63.70	100.00
Cr	1.47 ± 0.17	13.78	40.40	45.82	100.00
As	1.38 ± 0.15	4.66	6.93	88.41	100.00
Zr	1.26 ± 0.18	22.57	58.50	18.93	100.00
Mo	0.83 ± 0.12	6.59	12.52	80.89	100.00
U	0.55 ± 0.08	29.89	53.62	16.49	100.00
Sc	0.40 ± 0.07	10.53	13.18	76.29	100.00
Y	0.36 ± 0.05	5.50	15.01	79.49	100.00
Cd	0.27 ± 0.04	14.69	8.66	76.65	100.00
Co	0.19 ± 0.5	14.40	23.39	62.21	100.00
Pd	0.13 ± 0.06	10.23	6.07	83.70	100.00
Sb	0.08	13.00	27.61	59.39	100.00
Nb	0.08	23.22	62.15	14.63	100.00
Cs	0.06	13.22	72.60	14.18	100.00
Be	0.02	6.45	54.54	39.01	100.00
Hg	0.02	20.05	28.62	51.33	100.00
Se	0.01	11.14	5.54	83.32	100.00
Total	72 107.19	13.53	7.01	79.46	100.00

n = 3; $\bar{x} \pm DE$: Desviación estándar; SF: Sedimento fibroso; SM: Sedimento microbiano; MV: Melaza de vinaza

En efecto, la calidad real de la proteína depende de su composición en aminoácidos, particularmente de lisina, leucina, treonina, arginina, isoleucina y valina (Maynard y Loosli, 1956) considerados esenciales, los cuales están estrechamente vinculados con la síntesis de las proteínas corporales de los animales.

Cuadro 6.9 Comparación proteica y mineral de ingredientes o subproductos utilizados en la formulación de raciones para monogástricos (cerdos y aves).

Alimento / subproducto	(g/kg)					(mg/kg)					
	Proteína	Ca	P	Na	Mg	Cu	Mn	Zn	Co	Se	Fe
SM lote vapor	213.00	41.50	5.09	2.61	3.30	129.46	23.71	106.8	0.24	0.08	490.00
SM lote leña	208.00	44.60	4.25	2.15	3.90	120.62	49.67	54.67	0.06	0.01	772.00
Levadura de cerveza	443.00	1.30	15.10	0.80	2.50	35.30	6.00	42.00	-	-	-
Maíz	98.00	0.30	2.70	0.20	1.10	2.50	6.00	16.00	0.02	0.02	-
Sorgo	107.00	0.50	3.50	0.40	1.90	10.80	16.00	15.00	0.14	-	-
Trigo	124.00	0.50	3.50	0.10	1.20	5.00	42.00	50.00	0.05	0.02	-
Harina de pescado	716.00	79.0	44.00	4.50	3.60	9.00	21.00	119.00	0.14	2.00	-
Pasta de soya	459.00	3.50	6.80	0.40	3.00	25.00	32.00	61.00	0.20	0.55	-
Pasta de algodón	225.00	1.90	12.40	0.60	5.00	16.00	25.00	79.00	0.05	-	-
Pasta de cacahuete	448.00	2.90	6.80	0.80	1.70	17.00	29.00	22.00	0.12	-	-
Pasta de coco	220.00	2.30	6.60	0.40	2.80	20.40	59.00	-	0.14	-	-

Fuente: McDonald *et al.* (2010)

Las necesidades nutricionales de cerdos y aves dependen de la etapa fisiológica de crecimiento (**Cuadro 6.10**). Por su contenido proteico el sedimento microbiano puede contribuir a llenar los requerimientos al respecto; sin embargo, su contenido de magnesio, calcio, cobre y hierro es excesivo. Así el sedimento, sólo puede usarse en proporciones limitadas en las raciones para compensar las deficiencias de otros ingredientes en minerales y proteína. Así, cabe indagar de qué parte del sedimento microbiano provienen estos minerales en exceso, pues con su separación se podría mejorar bastante la calidad del sedimento microbiano.

Las levaduras de destilería decantadas por centrifugación se utilizan en la alimentación de animales y humanos, en dependencia de su calidad e inocuidad. Por

ejemplo, los contenidos celulares de las levaduras utilizadas en destilerías y en la industria cervecera, se utilizan para elaborar extractos nutritivos de levadura, como cremas untables ricas en vitamina B y aminoácidos para consumo humano (Vegemite ® y Marmite ®), y extractos mejoradores de sabor para la industria alimentaria (ácido glutámico) (Romero y Gómez, 2003).

Cuadro 6.10. Necesidades nutricionales diarias de cerdos y pollos en diferentes etapas de crecimiento.

	Cerdos en crecimiento		Gallinas				SM-Vapor	SM-Leña
	20-50	50-90	Crecimiento	Ponedoras	Reproductoras	Acabado	-	-
Peso vivo (kg)	20-50	50-90	Crecimiento	Ponedoras	Reproductoras	Acabado	-	-
Pienso (kg/día)	1.2-2.0	2.2-2.7	-	-	-	-	-	-
Proteína (g/kg)	205.0	175.0	210.0	160.0	160.0	190.0	213.0	208.0
Ca (g/kg)	9.8	7.8	12.0	35.00	33.0	10.0	41.5.0	44.6
P (g/kg)	7.0	5.9	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	4.2
Na (g/kg)	3.2	3.0	1.5	1.5	1.5	1.5	2.6	2.1
Mg (mg/kg)	308.0	221.0	0.3	0.3	0.3	0.3	3300.0	3990.0
Cu (mg/kg)	5.6	5.2	3.5	3.5	3.5	3.5	129.5	120.6
Mn (mg/kg)	11.2	10.0	100.0	100.0	100.0	100.0	23.7	49.6
I (mg/kg)	0.15	0.14	0.4	0.4	0.4	0.4	-	-
Se (mg/kg)	0.15	0.14	0.1	-	-	0.1	0.0	0.0
Fe (mg/kg)	62.0	57.0	80.0	80.0	80.0	80.0	490.0	772.0

Fuente: McDonald *et al.* (2010)

En términos generales, la composición media de la materia seca de los lodos de vinaza generadas con los dos procesos comprende 12.07 % de cenizas, 5.68 % de proteína, 1.91 % de hemicelulosa, 8.32 % de celulosa y 0.34 % de lignina, y el resto (71.7 %) son compuestos no cuantificados en este trabajo, como melanoidinas y los compuestos de color (**Cuadro 6.7**). Utilizar una sola fracción del lodo de vinaza, complica el uso de las demás fracciones por separado; en cambio, si se utiliza de manera conjunta como lodo de vinaza seco, podría servir como una fuente de minerales, y utilizarse en una proporción baja tal vez del 5 a 10 % de la materia seca de los piensos para monogástricos.

6.4 Conclusiones

Las vinazas son el residuo líquido más abundante y con mayor impacto ambiental que genera la industria de los aguardientes de maguey, pues contienen grandes cantidades de compuestos orgánicos y minerales que pueden contaminar suelos y cuerpos de agua superficiales y subterráneos, aunque sean tratados de acuerdo con la normativa mexicana. Se pueden separar el agua y sus fracciones sólidas mediante procesos simples y adecuados para cada propósito. El estudio en términos generales de la composición de las vinazas permite anticipar usos y propósitos particulares para su aprovechamiento. El lodo de vinaza seco, está compuesto principalmente de melanoidinas en solución (no cuantificadas en este trabajo), minerales y materiales orgánicos. La alternativa viable es destinar sus nutrientes y minerales al sistema de producción agropecuaria, como una fuente de nutrientes y minerales.

6.5 Bibliografía citada

- Aguirre R., J.R. 2004. Peculiaridades de las fábricas de mezcal del altiplano potosino zacatecano. En: Simposio Internacional sobre Agaveaceae Nolinaceae. Los agaves de importancia económica en México. Mérida Yucatán, México. p.27.
- Aguirre R., J. R. 2012. Nuestro mezcal. *Universitarios Potosinos*. 159: 24-29.
- Aguirre R., J. R. 2016. Some peculiarities of the maguey and mezcal in the San Luis Potosí plateau (pp). Keynote Lecture. *III Symposium International on Agave*. Conacyt y CIATEJ. p. 21.
- Blanco, G. 1906. Estudio sobre el mezcal. En: R. Aguilar S. (Ed.) *Memorias de la Sociedad Científica "Antonio Alzate"*, Tomo 24. México. pp. 73-116.
- Cedeño C., M. 2003. Production of tequila from agave: historical influences and contemporary processes. In: K. Jacques; T. P. Lyons; D. R. Kelsall (Eds.). *The alcohol textbook*. 4th ed. Nottingham University Press. England. pp. 223-245.
- Concejo Regulador del Tequila. 2017. Consultado 05/06/2017. URL: <https://www.crt.org.mx/EstadisticasCRTweb/>
- Ewen, A. 2011. Acids organic in silage. Application note. Food and environmental. *In*: S. Ball; S. Bullock; L. Lloyd; K. Mapp; A. Ewen (Ed.), *Analysis of carbohydrates, alcohols and organic*

- acids by ion-exchange chromatography. Agilent Hi-Plex. Applications compendium. Agilent Technologies Inc. pp. 44-45.
- Fito, P. 1994. Modelling of vacuum osmotic dehydration of food. *Journal of Food Engineering*. 22:313-328.
- Gardner, A. L. 1967. Estudio sobre los métodos agronómicos para la evaluación de las pasturas. ICCA. Montevideo, Uruguay. 80p.
- Godínez H., C. I. 2012. Caracterización y eficiencia de la fermentación en la elaboración de mezcal potosino. Tesis de maestría. Programas de Posgrado en Ciencias Ambientales. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, SLP. México. 88 p.
- Goering, H., K.; P. J. Van Soest. 1970. Forage fiber analysis: Apparatus, reagents, procedures and some applications. USDA-ARS. Agricultural handbook 379. Gov. Print. Washington, D. C. USA. 20 p.
- Godínez H., C. I.; J. R. Aguirre R. B. I. Juárez F.; M. D. Ortiz P.; J. Becerra J. 2016. Extraction and characterization of *Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck fructans. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 22(1):59-72.
- Gschaedler M., A. C. 2007. La industria del mezcal en el altiplano potosino: tradiciones y retos tecnológicos. *ciencia@sanluispotosi.mx*. 3(30):5.
- Gutiérrez G., S. 2001. Realidad y mitos del tequila. Agata. Jalisco, México. 340 p.
- López L., A.; S. M. Contreras R. 2015 Tratamiento de efluentes y aprovechamiento de residuos. En: A. C. Gschaedler M.; B. Rodríguez G.; J. L. Flores M. Ciencia y tecnología del tequila. 2ª Edición. CIATEJ. Jalisco, México. pp. 343-378.
- López L., A.; G. Dávila V.; E. Villegas G.; J. Gallardo V. 2010. Tequila vinasses: generation and full scale treatment processes. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*. 9(2):109-116.
- Maynard, L. A.; J. K. Loosli. 1956. Animal nutrition. McGraw-Hill. USA. 484 p.
- McDonald, P.; R. A. Edwards; J. F. D. Greenhalgh; C. A. Morgan; M. A. Sinclair; R.G. Wilkinson. 2010. Animal nutrition. 7th edition. Pearson. Canada. 712 p.

- Moran S., R. G.; A. L. Sánchez L.; J. Rodríguez C.; G. Dávila V.; E. N. Marino M.; L. Dendooven; S. M. Contreras R. 2016. Utilization of vinasses as soil amendment: consequences and perspectives. Springer Plus. 5-1007. 11 p.
- NOM-001-ECOL-1994. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación. 06/01/97. Secretaría de Gobernación de los Estados Unidos Mexicanos. México. 29p.
- Nolasco C., H. 2017. Consejo Regulador del Mezcal. Informe del 2016. Consultado 08/10/2017. URL: http://www.crm.org.mx/PDF/INF_ACTIVIDADES/INFORME2016.pdf
- Martínez C. J. 2012. El tequila: Historia, elaboración y control. Tecnoagave. México. 195 p.
- Pérez M., F. J.; E. Rodríguez G.; M. Arellano P.; R. M. Camacho R.; R. Prado R. 2015. Extracción del jugo de *Agave*. En: A. C. Gschaedler M.; B. Rodríguez G.; J. L. Flores M. (Eds.) Ciencia y tecnología del tequila. 2ª Edición. CIATEJ. Jalisco, México. pp. 55-95.
- Prado R., R. 2015. Destilación. En: A. C. Gschaedler M.; B. Rodríguez G.; J. L. Flores M. Ciencia y tecnología del tequila. 2ª Edición. CIATEJ. Jalisco, México. pp. 181-230.
- Robles G., V.; J. Galindez M.; N. Rinderknecht S.; H. M. Poggi V. 2012. Treatment of mezcal vinasses: A review. Journal of Biotechnology. 157: 524-546.
- Romero, R.; J. Gómez B. 2003. Yeast and yeast products, past present and future: from flavors to nutrition and health. In: Nutritional biotechnology in the feed and food industries. T. P. Lyons; K. A. Jacques (Eds.) Nottingham. Unite Kingdom. pp.365-371.

Capítulo

7. Uso del agua de vinaza para dilución del mezcal

Aprovechamiento del agua de vinazas como agua de dilución del mezcal

¹Godínez-Hernández, C. I., ³González Ambrocio, M. J., ²Aguirre-Rivera, J. R.,
²Juárez Flores B.I.

¹ Programas Multidisciplinarios de Posgrados en Ciencias Ambientales-Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Av. Dr. Manuel Nava # 201. Agenda ambiental 2º Piso, Zona Universitaria. C.P. 78210. San Luis Potosí, SLP. México.

² Instituto de Investigación de Zonas Desérticas-UASLP. Altair #200 Col. Del llano. C.P. 78377. San Luis Potosí, SLP. México.

³Facultad de Ingeniería- UASLP. Av. Dr. Manuel Nava # 8., Zona Universitaria Poniente. C.P. 78210. San Luis Potosí, SLP. México.

Resumen

Los volúmenes de vinazas que genera la industria de los aguardientes de maguey (tequila y mezcal) son tan grandes y potencialmente contaminantes que conviene aprovecharlas para la obtención del agua de lluvia captada por el maguey durante su vida, y su materia orgánica y minerales. El tratamiento biológico de la materia orgánica de la vinaza, no elimina el problema de la disposición final o confinamiento de los lodos; además, se pierde la oportunidad de obtener agua de mejor calidad, ya que el agua que resulta del tratamiento biológico sólo se puede utilizar para la limpieza de sanitarios y riego de áreas verdes, o para descara al drenaje. Por ello, se buscó obtener agua de vinaza de cualidades interesantes mediante evaporación a baja presión, para utilizarse en las mismas fábricas de mezcal como agua de dilución de mezcal. Con esta agua se realizó una cata ciega experimental completamente al azar con un arreglo factorial 3 x 3 de tratamientos, donde el factor A correspondió al tipo de aguardiente y el factor B al tipo de agua utilizada para diluir el mezcal. El pH de los aguardientes fue ácido, pero aumentó ligeramente cuando se diluyeron con agua de vinaza. Los tratamientos diseñados con agua de vinaza obtenida mediante evaporación a baja presión mostraron que puede reemplazar al agua comercial para dilución de aguardientes de maguey. Además, se registraron ciertas

tendencias, no significativas en la mejoría del aroma, sabor y aceptación. El agua de vinaza también puede ser utilizada con otros propósitos, siempre y cuando se le acondicione para cada uno de ellos, por ejemplo, como fuente de vapor en las calderas y como refrigerante de los condensadores.

7.1 Introducción

Las vinazas de aguardientes de maguey son el residuo líquido de la destilación; por su volumen, acidez, temperatura y riqueza de compuestos orgánicos e inorgánicos representan el mayor impacto ambiental potencial de esta industria (López *et al.*, 2010; Robles *et al.*, 2012). El volumen de vinaza producido por litro de aguardiente es variable de acuerdo con el grado de tecnificación del proceso de producción, ya sea de mezcal o de tequila, pero también puede variar de acuerdo con la especie de maguey usada como materia prima. La producción de los principales aguardientes de maguey en México (tequila y mezcal) en 2016, se estima que generó 2 252 000 000 litros de vinazas (estimación basada en datos del CRT-2017 y de Nolasco, 2017). Estas vinazas están compuestas principalmente de agua de lluvia captada por el maguey, compuestos de color (melanoidinas) generados durante la cocción y la destilación, compuestos fibrosos solubles (mucílago y pectinas) e insolubles (celulosa, hemicelulosa y lignina), sedimentos finos en suspensión (levaduras), ácidos orgánicos, trazas de alcoholes y azúcares, y minerales disueltos (González *et al.*, 2016). Por su costo elevado, sólo las empresas tequileras principales han podido cumplir la normativa mexicana para aplicar tratamientos biológicos a las vinazas para depurarlas de la materia orgánica y poder descargar el agua tratada al drenaje (López *et al.*, 2015). Con este proceso el agua que se obtiene es insalubre por haber tenido contacto con los lodos y bacterias patógenas responsables del tratamiento biológico. Procesos alternativos al tratamiento biológico de las vinazas, para generar agua potable son posibles y simples, como la filtración de residuos fibrosos, decantación de sedimentos microbianos por centrifugación, y finalmente por medio de la evaporación y condensación parcial al vacío del agua de vinaza. La evaporación a baja presión mediante evaporadores de efecto múltiple, es un proceso industrial ampliamente utilizado para condensación de sólidos y la recuperación de agua en las industrias azucarera, farmacéutica, alimentaria (condensación de leche), salinera, papelera, destilería, biorefinerías y refinerías petroleras

(Anónimo, 2017). Al separarse a baja presión, la evaporación de las vinazas ocurre a 42 °C, lo que implica una demanda de energía menor. Este es un aprovechamiento alternativo a los actuales, pues permite utilizar el agua de las vinazas en la misma agroindustria de los aguardientes de maguey, con el tratamiento adecuado para cada propósito, ya sea para calderas y condensadores, para consumo humano, o para la dilución del aguardiente de maguey, necesaria para ajustar la graduación alcohólica requerida comercialmente.

7.1.1 Problemática ambiental de vinazas de la industria de los aguardientes de maguey

La generación continua y voluminosa de vinazas por la industria tequilera y mezcalera, su condición ácida y caliente cuando son descargadas, y su riqueza orgánica y mineral constituyen un riesgo contaminante significativo (Robles *et al.*, 2012) A la vez, el confinamiento y disposición final de los lodos resultantes de su tratamiento representan también un problema ambiental. Además, el agua que se obtiene con tratamiento biológico, sólo se puede utilizar para limpieza de sanitarios y pisos, o para riego de áreas verdes, pues tuvo contacto con bacterias patógenas durante su tratamiento. Así, se pierde la oportunidad de obtener de las vinazas agua de calidad para consumo humano o para dilución del mezcal. En 2016 la producción de aguardientes de maguey en México (tequila y mezcal) generaron unos 2 252 000 000 litros de vinazas (estimación basada en datos de producción de tequila y mezcal, según CRT-2017 y Nolasco, 2017, respectivamente). De dicho volumen 75 % corresponde al agua, es decir 1 689 000 000 L, la cual se puede utilizar para diferentes propósitos.

7.1.2 Usos actuales de las vinazas de las destilerías de aguardientes de maguey

En la actualidad las vinazas de la industria del mezcal potosino son descargadas sin ningún tratamiento al suelo. En otras regiones, las vinazas se han utilizado como agua de riego para plantaciones de maguey tequilero, con el riesgo de alterar la fertilidad de esos suelos, y también se han utilizado para humedecer y enriquecer la picadura de bagazo y pencas de desvirado para su transformación en compost. Algunas empresas tequileras utilizan el tratamiento biológico de las vinazas, para la digestión, sedimentación y depuración de la materia orgánica, para que el agua así tratada cumpla con los límites

máximos permisibles de contaminantes y pueda ser descargada al drenaje, o utilizada para riego de plantaciones de maguey tequilero. Además, se ha estudiado el uso de las vinazas de la industria tequilera para obtener biogás mediante sistemas de digestión anaerobia; sin embargo, esta aplicación en escala industrial está restringida por la variación de la materia orgánica y la falta de elementos para monitorizar del proceso (Arreola *et al.*, 2016).

7.1.3 Peculiaridades del agua de vinaza obtenida mediante evaporación a baja presión

El agua de vinaza que se obtuvo a baja presión presenta cualidades interesantes, como sabor y aroma característicos del proceso y de la materia prima (sabor acético, y olor ahumado y a maguey cocido). Por ello, se optó por probarla como agua de dilución para aguardientes de maguey, y evaluarla mediante una cata ciega experimental con 27 participantes.

7.2 Materiales y métodos

7.2.1 Obtención del agua de vinazas

Las muestras de vinazas se recolectaron de la destilación de vinos generados de materia prima sometida a dos procesos diferentes, con maguey cocido con vapor y con maguey cocido con leña, pues la percepción aromática de los mescales respectivos se considera distinta. Las muestras se recolectaron al final del proceso de destilación en la fábrica de mezcal Laguna Seca, ubicada en el ejido Miguel Hidalgo, en el municipio de Charcas, San Luis Potosí, México. La muestra se depositó en una garrafa de 20 L, para su traslado al laboratorio y almacenamiento a 5 °C. En el laboratorio se procesó una submuestra de 2 L de vinaza de cada muestra original; primero se filtró con una coladera de muselina; luego se decantó por centrifugación a 1600 RPM/ 30 minutos (Damon PR-6000, EE. UU.) para separar el sedimento microbiano, y finalmente se procedió a evaporar y condensar el agua de vinaza en un equipo de cocción e impregnación (J. P. Selecta Gastrovac, España) a 41 °C y 75 % del vacío total del equipo, de acuerdo con la metodología descrita por Godínez *et al.* (2016). La proporción de agua que se obtuvo por unidad de volumen de vinaza fue 75 % y el resto se consideró como lodo de vinaza. Al agua obtenida se le midió el pH y conductividad eléctrica, y para separar cualquier residuo

fino o sedimento (esporas) se filtró con una membrana de nailon de 0.45 μm (Millipore) con la ayuda de una bomba de vacío. Una vez filtrada, el agua se almacenó en recipientes de vidrio herméticos a la sombra, hasta que se utilizó como agua de dilución.

7.2.2 Diseño y preparación de las muestras

Para la evaluación del agua de vinaza como agua de dilución se escogieron tres tipos de agua, un agua de vinaza de maguey cocido con vapor, otra agua de vinaza de maguey cocido con leña y un agua comercial (Ciel®), y tres aguardientes de maguey diferentes, dos mezcales naturales de la fábrica de mezcal Laguna Seca: un mezcal de maguey cocido con vapor, otro mezcal de maguey cocido con leña, y un tequila natural (Tequila Herradura®, “Colección de la casa, directo de alambique”), todos sin filtración o dilución. Como la graduación original del tequila es de 55 °GL, se diluyó con agua comercial hasta 44 °GL para igualarlo con los mezcales; y se diluyeron con las tres aguas de dilución hasta 38 °GL. Las mediciones del grado alcohólico se realizaron con un alcoholímetro, de acuerdo con la temperatura del aguardiente y la corrección de temperatura de calibración del alcoholímetro. De esta manera se estandarizaron todos los tratamientos con una misma cantidad de agua y a una misma graduación alcohólica para eliminar sesgos en la percepción de aroma y sabor debidos a las diferencias en la graduación alcohólica o a la mayor o menor proporción de agua utilizada para la dilución del aguardiente.

7.2.3 Cata experimental

Para este propósito se usaron los materiales y procedimientos inéditos diseñados y utilizados por la Dra. Guadalupe Bárcenas P. y el Dr. J. Rogelio Aguirre R. para evaluar especies de encinos y periodos en la maduración de mezcal (Anexos I). Así, se realizó una cata ciega experimental completamente al azar con arreglo factorial 3 x 3 de tratamientos, en donde el factor A es el tipo de aguardiente de maguey y el factor B es el tipo de agua utilizada para diluir esos aguardientes (**Cuadro 7.1**). El aroma y sabor de los nueve tratamientos resultantes fueron calificados numéricamente por 27 evaluadores. La única condición para poder participar en la cata experimental, fue que el participante hubiera ya

probado algún aguardiente sólo, sin combinar; es decir, que estuviera familiarizado con el consumo de destilados, para evitar el sesgo del principiante.

Cuadro 7.1 Tratamientos para evaluar experimentalmente la dilución de aguardientes de maguey con agua de vinaza.

Acrónimo	Tratamiento
MV-AVV	Mezcal de maguey cocido con vapor diluido con agua de vinaza de maguey cocido con vapor
MV-AVL	Mezcal de maguey cocido con vapor diluido con agua de vinaza de maguey cocido con leña
MV-AC	Mezcal de maguey cocido con vapor diluido con agua comercial
ML-AVV	Mezcal de maguey cocido con leña diluido con agua de vinaza de maguey cocido con vapor
ML-AVL	Mezcal de maguey cocido con leña diluido con agua de vinaza de maguey cocido con leña
ML- AC	Mezcal de maguey cocido con leña diluido con agua comercial
TH-AVV	Tequila Herradura diluido con agua de vinaza de maguey cocido con vapor
TH-AVL	Tequila Herradura diluido con agua de vinaza de maguey cocido con leña
TH-AC	Tequila Herradura diluido con agua comercial

La estimación de cada parámetro (aroma y sabor) se realizó cruzando una línea perpendicular sobre la diagonal utilizada como escala (**Figura 7.1 y 7.2**). El dato cuantitativo de la calificación se obtuvo al medir la longitud (cm) desde el origen inferior de la diagonal hasta la marca señalada por el evaluador. En el anexo se detalla el procedimiento de la cata experimental.

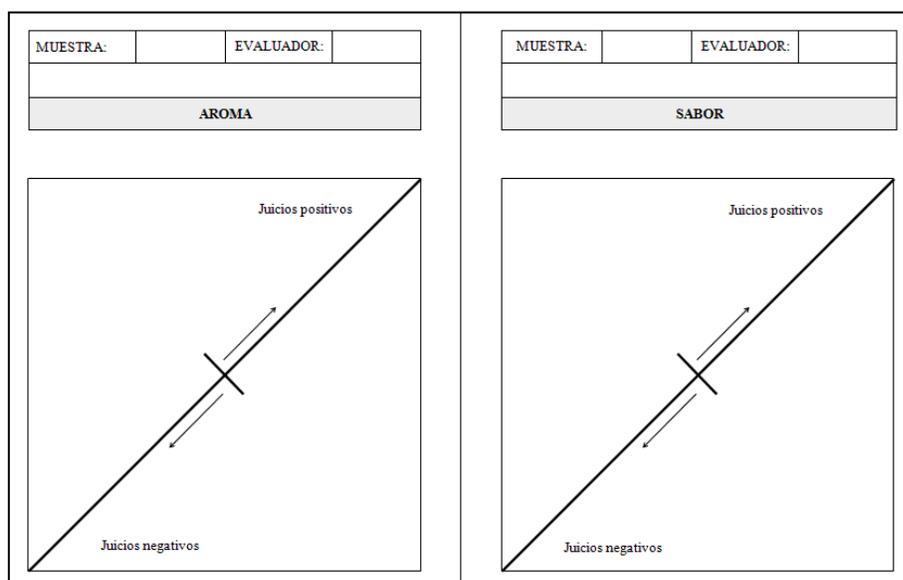


Fig. 7.1 Hojas de evaluación individual para cada parámetro a evaluar (aroma y sabor).



Fig. 7.2 Aspectos de la cata ciega experimental de aguardientes de maguey.

Con los datos de evaluación de cada tratamiento se generó una tercera variable (sintética o compuesta) para ese tratamiento, la cual se obtuvo al sumar las dos primarias y se le consideró como aceptación general.

7.2.4 Análisis estadístico

Los datos de cada parámetro estimado se analizaron de acuerdo con un diseño completamente al azar con 27 repeticiones por tratamiento. Se realizó un análisis de varianza (SAS, 1999) mediante el procedimiento PROC GLM y se hizo una comparación múltiple de medias con la prueba de Tukey; se consideró una $p \leq 0.10$ como el nivel de significación estadística, adecuado para este caso.

7.3 Resultados y discusión

El agua de vinaza de ambos procesos resultó libre de cualquier sedimento, es incolora, con sabor ácido la procedente de maguey cocido con vapor, y con sabor ácido y olor acético y ahumado la del maguey cocido con leña. A diferencia del agua comercial, el agua de vinaza tiene un pH más ácido, y contiene trazas de los ácidos orgánicos siguientes, en orden de importancia, acético, láctico, propiónico y butírico (**Cuadro 7.2**). La conductividad eléctrica del agua comercial es cerca de una quinta parte de la registrada en las aguas de vinaza.

El pH original de los tres aguardientes de maguey evaluados fue similar (**Cuadro 7.3**), pero cuando se diluyeron con las diferentes aguas para conformar los tratamientos su acidez se incrementó de manera más marcada en los tratamientos diluidos con aguas de vinaza, a diferencia de los tratamientos de dilución con el agua comercial (**Cuadro 7.4**).

Cuadro 7.2 Características de las aguas de vinaza usadas para la dilución de aguardientes de maguey.

Atributo	Cocción con vapor	Cocción con leña	Agua comercial
Color	Incolora	Incolora	Incolora
Olor	Acético	Acético y ahumado	Sin olor
Sabor	Ácido	Ácido	Sin sabor
pH	2.9	2.8	7
Ac. Acético (mg/L)	1.89	2.5	-
Ac. Láctico (mg/L)	-	0.11	-
Ac. Propiónico (mg/L)	0.04	0.03	-
Ac. Butírico (mg/L)	0.02	0.01	-
Etanol (mg/L)	2.45	3.72	-
Conductividad eléctrica (µS/cm)	323.23	278.12	65.20

Cuadro 7.3. Acidez original de los tres aguardientes de maguey evaluados.

Aguardiente	pH
Mezcal de maguey cocido con leña	3.9
Mezcal de con maguey cocido con vapor	4.0
Tequila Herradura	4.1

Cuadro 7.4. Acidez de los tratamientos evaluados.

Tratamiento	pH
MV-AVV	3.7
MV-AVL	3.6
MV-AC	3.8
ML-AVV	3.7
ML-AVL	3.7
ML- AC	3.9
TH-AVV	3.3
TH-AVL	3.4
TH-AC	3.6

En el **Cuadro 7.5** se puede ver que únicamente el tipo de aguardiente de maguey tuvo un efecto significativo en aroma ($p < 0.10$); en cambio, utilizar diferente tipo de agua

de dilución ($p=0.2900$) al igual que su interacción ($p=0.6337$) careció de significación estadística. Esto es que independientemente del tipo de agua de dilución que se utilice, el aroma natural del aguardiente de maguey se conserva, sin que el tipo de agua utilizada lo altere en ningún caso. En cuanto al sabor (**Cuadro 7.5**) el efecto, tanto del tipo de aguardiente ($p=0.9493$) como del tipo de agua de dilución utilizada ($p=0.4743$), carecieron de significación estadística, al igual que su interacción ($p=0.5771$). La aceptación tampoco dependió significativamente del tipo aguardiente de maguey ($p=0.2572$) ni del tipo de agua de dilución utilizada ($p=0.3484$), y careció de interacción ($p=0.6961$). La falta de diferencias estadísticas en los resultados de sabor y aceptación, puede deberse a que los aguardientes de maguey utilizados en la cata experimental fueron de calidad sobresaliente y similar, de manera que los evaluadores fueron incapaces de diferenciarlos por su sabor.

Cuadro 7.5 Efecto del tipo de aguardiente de maguey (A) y el agua de dilución (B) en la apreciación de los atributos evaluados.

	Factor	Variable	Promedio	(Pr > 0.10)
Aroma	A	Aguardiente de maguey	11.12	0.0215*
	B	Agua de dilución	10.93	0.2900
	A x B	Interacción	9.94	0.6337
Sabor	A	Aguardiente de maguey	10.63	0.9493
	B	Agua de dilución	10.55	0.4743
	A x B	Interacción	10.47	0.5771
Aceptación	A	Aguardiente de maguey	21.67	0.2572
	B	Agua de dilución	21.56	0.3484
	A x B	Interacción	20.41	0.6961

*Efecto significativo ($p<0.10$)

En los resultados de la comparación múltiple de medias de Tukey para la calificación de aroma (**Cuadro 7.6**), se puede observar que el tratamiento mejor calificado correspondió al mezcal de maguey cocido con vapor y diluido con un agua de vinaza de maguey cocido con vapor (MV-AVV); en el otro extremo, el de calificación más baja fue el tratamiento que corresponde al tequila Herradura diluido con un agua de vinaza de maguey cocido con leña (TH-AVL); los siete tratamientos restantes conformaron un grupo intermedio entre las dos calificaciones extremas.

En promedio, las calificaciones de todos los tratamientos con mezcal fueron estadísticamente similares a las del tequila. Se puede señalar también algunas tendencias en cuanto a la mejora de la calificación, aunque no sea significativa, por ejemplo, el tratamiento MV-AVV que corresponde al mezcal de maguey cocido con vapor y diluido con agua de vinaza de maguey cocido con vapor, presenta mejor aroma (11.77) que el mismo mezcal diluido con agua comercial (MV-AC) (10.37). Lo mismo sucede con los tratamientos ML-AVL y ML-AC, y con TH-AVV y TH-AC.

Cuadro 7.6 Comparación múltiple de medias con la prueba de Tukey para la apreciación. del aroma.

Tratamiento	$\bar{X} \pm DE$	Agrupamiento
MV-AVV	11.77 \pm 2.08	a
ML-AVL	11.23 \pm 2.10	ab
ML-AVV	11.16 \pm 3.58	ab
ML- AC	10.97 \pm 2.64	ab
MV-AVL	10.65 \pm 2.77	ab
MV-AC	10.37 \pm 3.08	ab
TH-AVV	10.29 \pm 2.97	ab
TH-AC	10.10 \pm 3.57	ab
TH-AVL	9.42 \pm 2.81	b

n = 27; $\bar{X} \pm DE$: Desviación estándar; Literales diferentes por columna son estadísticamente diferentes (p <0.10)

En cuanto a sabor (**Cuadro 7.7**), no hubo diferencias significativas ($p=0.10$) entre tratamientos; sin embargo, el tratamiento que corresponde a tequila Herradura diluido con un agua comercial (TH-AC), fue el mejor calificado (11.11), y a la vez, el tratamiento con la calificación más baja (9.67) también fue de tequila Herradura, pero diluido con agua de vinaza de maguey cocido con leña (TH-AVL). Esta misma tendencia de mejora de calificación debida al agua comercial, aunque no significativa, ocurrió con los tratamientos MV-AVL y MV-AC, aunque y lo inverso se observó en los tratamientos ML-AVV y ML-AC.

En la aceptación (**Cuadro 7.8**) tampoco hubo diferencias significativas entre tratamientos, sin embargo, se puede destacar que las tres mejores calificaciones fueron para tres mezcales diluidos con agua de vinaza, y que fueron incluso superiores a sus

equivalentes diluidos con agua comercial (MV-AC y ML-AC), y al tratamiento de tequila mejor evaluado (TH-AC). Por otro lado, las calificaciones más bajas fueron para los tratamientos TH-AVL y TH-AVV correspondientes al tequila, y para el tratamiento MV-AVL que correspondió a un mezcal.

Cuadro 7.7 Comparación múltiple de medias con la prueba de Tukey para la apreciación del sabor.

Tratamiento	$\bar{x} \pm DE$	Agrupamiento
TH-AC	11.11 \pm 3.33	a
ML-AVV	11.00 \pm 3.40	a
MV-AC	10.78 \pm 2.96	a
MV-AVV	10.73 \pm 2.68	a
TH-AVV	10.63 \pm 2.58	a
ML-AVL	10.57 \pm 2.83	a
MV-AVL	10.39 \pm 3.88	a
ML- AC	10.07 \pm 3.49	a
TH-AVL	9.67 \pm 2.89	a

n = 27; $\bar{x} \pm DE$: Desviación estándar; Literales diferentes son estadísticamente diferentes (p <0.10)

Cuadro 7.8 Comparación múltiple de medias con la prueba de Tukey para la apreciación de la aceptación.

Tratamiento	$\bar{x} \pm DE$	Agrupamiento
MV-AVV	22.50 \pm 4.19	a
ML-AVV	22.17 \pm 6.48	a
ML-AVL	21.80 \pm 4.30	a
TH-AC	21.21 \pm 5.99	a
MV-AC	21.14 \pm .51	a
ML- AC	21.04 \pm 5.48	a
MV-AVL	21.03 \pm 5.89	a
TH-AVV	20.93 \pm 5.01	a
TH-AVL	19.10 \pm 5.09	a

n = 27; $\bar{x} \pm DE$: Desviación estándar; Literales diferentes son estadísticamente diferentes (p <0.10).

En síntesis, los tratamientos diseñados para probar el uso del agua de vinaza obtenida mediante evaporación a baja presión para dilución de aguardientes de maguey, mostraron que se puede reemplazar al agua comercial. Además, se observaron ciertas tendencias en la mejoría del aroma, sabor y aceptación de los aguardientes diluidos con

agua de vinaza. Es probable que esta tendencia tenga un mayor efecto en la mejora del aroma de los llamados destilados de *Agave*, ya que para estas bebidas se utilizan aguardientes de caña y de maguey con graduaciones altas, pero se suelen embotellar con graduaciones menores que 38 ° GL, y por ello se requiere más agua que la utilizada para diluir el mezcal.

7.4 Conclusiones

El agua de vinaza obtenida mediante evaporación a baja presión puede ser igual o mejor que el agua comercial utilizada para ajustar el grado alcohólico del mezcal. Aunque el volumen de agua de vinaza utilizado para la dilución del grado alcohólico represente menos que 2 % del volumen total que se podría obtener, el agua de vinaza también puede ser utilizada con otros propósitos, siempre y cuando se le acondicione para cada uno de ellos, por ejemplo, como fuente de vapor en las calderas y como refrigerante de los condensadores.

7.5 Bibliografía citada

Anónimo. 2017. Barometric condensers. Schutte & Koerting. Bolletin 5AA. 12 p.

Arreola V., J.; N. E. Jaramillo G.; R. I. Corona G.; V. González A. V.; H. O. Méndez A. 2016. Biogas production in an anaerobic sequencing batch reactor by using tequila vinasses: effect of pH and temperature. *Water Science & Technology*. 73(3):550-556.

Concejo Regulador del Tequila. 2017. Consultado 05/06/2017. URL: <https://www.crt.org.mx/EstadisticasCRTweb/>

Godínez H., C. I.; J. R. Aguirre R. B. I. Juárez F.; M. D. Ortiz P.; J. Becerra J. 2016c Extraction and characterization of *Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck fructans. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 22(1):59-72.

González A., M. J.; C. I. Godínez H.; J. R. Aguirre R.; B. I. Juárez F. 2016. Caracterización de las vinazas de mezcal potosino y perspectivas de su aprovechamiento. En: *Memorias XXXIX Presentaciones de Conclusiones y Avances y Nuevas Propuestas de Investigación*. IIZD/UASLP. San Luis Potosí, SLP. México. p. 14.

- López L., A.; G. Dávila V.; E. Villegas G.; J. Gallardo V. 2010. Tequila vinasses: generation and full scale treatment processes. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*. 9(2):109-116.
- López L., A.; S. M. Contreras R. 2015 Tratamiento de efluentes y aprovechamiento de residuos. En: A. C. Gschaedler M.; B. Rodríguez G.; J. L. Flores M. *Ciencia y tecnología del tequila*. 2ª Edición. CIATEJ. Jalisco, México. pp. 343-378.
- NOM-001-ECOL-1994. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. *Diario Oficial de la Federación*. 06/01/97. Secretaría de Gobernación de los Estados Unidos Mexicanos. México. 29p.
- Nolasco C., H. 2017. Consejo Regulador del Mezcal. Informe del 2016. Consultado 08/10/2017. URL: http://www.crm.org.mx/PDF/INF_ACTIVIDADES/INFORME2016.pdf
- Robles G., V.; J. Galindez M.; N. Rinderknecht S.; H. M. Poggi V. 2012. Treatment of mezcal vinasses: A review. *Journal of Biotechnology*. 157: 524-546.

Capítulo

8. Recopilación de conclusiones por capítulo

Recopilación de conclusiones por capítulo

8.1 Introducción general

- El aprovechamiento integral y polivalente de los residuos y subproductos de las destilerías ayuda a hacer más rentable sus procesos y a disminuir el daño ambiental que representa su generación y disposición final a cielo abierto.

8.2 Importancia creciente de los fructanos de maguey- Retos y perspectivas

- La inulina y la oligofructosa de achicoria son los fructanos de mayor importancia comercial utilizados en la industria alimentaria por sus propiedades físicas, químicas, prebióticas y funcionales.
- Bélgica y Holanda han sido los principales países productores de inulina y oligofructosa, y por su creciente demanda a nivel mundial su capacidad de producción se ha visto superada, que además de intensificar el cultivo de achicoria con variantes genéticamente modificadas, lo han expandido a otros países como Chile.
- El uso de la cabeza entera de maguey con madurez variable para la extracción de fructanos dificulta estandarizar su calidad, rendimiento y, además encarece el producto por los sistemas de filtración necesarios para su estandarización.
- Los métodos actuales de extracción industrial de fructanos de maguey son caros y complejos, pues se han diseñado para usar las cabezas como materia prima; es decir, en su extracción los fructanos primero se contaminan y luego se descontaminan.
- Finalmente, mientras no se controlen estas variables o factores será difícil obtener resultados repetibles en evaluaciones biológicas de los fructanos de maguey.
- Actualmente se reconoce una demanda y comercio exterior creciente de fructanos en México, ya que en 2014 las importaciones fueron 3815 t, 292 veces de lo que se comenzó a importar en año 2000, y las exportaciones 1559 t, 64 veces de lo que se comenzó a exportar en 2001.

8.3 Extracción y caracterización de fructanos de *Agave salmiana* Otto ex Salm Dyck

- Con el proceso de extracción de fructanos propuesto se obtuvo el 55 % del concentrado de fructanos (secos) del jugo primario (jugo del extractor), 32 % del jugo secundario (jugo del bagazo prensado) y 12 % del jugo terciario (jugo de un primer lavado del bagazo prensado), el segundo lavado de bagazo no vale la pena pues se recupera sólo un 2 % del concentrado de fructanos.
- Se obtiene un kilogramo de concentrado de fructanos de un tallo de peso medio de 5kg.
- El concentrado de fructanos de tallos de *A. salmiana* tiene 780mg/g de fructanos mayores que 5 GP y hasta 870 mg/g fructanos mayores que 3 GP.
- Monosacaridos como glucosa y fructosa no fueron detectables en el concentrado de fructanos de tallos.
- EL contenido de saponinas es menos del 1 % del peso seco del concentrado de fructanos.
- El concentrado de fructanos de tallos tienen cerca del 5 % de cenizas totales.
- El rendimiento con base al peso fresco (20-21 %) y seco (75-80 %) del tallo es similar al registrado para la raíz de achicoria.
- El uso de tallos como materia prima para la extracción de fructanos permite aplicar procedimientos simples, usando únicamente agua como solvente.
- El concentrado de fructanos de maguey libre de humedad, presentó una pureza cercana a 80 % (fructanos con más que 5 GP) y hasta 87 % (fructanos más que 3 GP).
- La extracción de fructanos con agua, el uso de exclusivo de tallos de plantas con madurez fisiológica plena, permitió estandarizar el rendimiento, la calidad de los fructanos de maguey, así como el proceso de extracción.

8.4 Rendimiento y composición de fructanos de *Agave salmiana* Otto ex Salm Dyck y *A. tequilana* F.A.C. Weber

- Se obtiene un kg de concentrado de fructanos de un tallo medio de 5 kg de *A. salmiana* y tres kg de un tallo medio de 10.9 kg de *A. tequilana*.

- El concentrado de fructanos de tallos de *A. salmiana* tiene 780mg/g de fructanos mayores que 5 GP y hasta 870 mg/g fructanos mayores que 3 GP; en *A. tequilana* 870 mg/g mayores que 5 GP y 893 mg/g mayores que 3 GP.
- No se detectaron monosacáridos (glucosa más fructosa) en el concentrado de fructanos de tallos de *A. salmiana*, y en *A. tequilana* fue de 24 mg/g.
- El rendimiento de concentrado de fructanos con base al peso fresco fue 21 % y seco 75.5 % del tallo de *A. salmiana* y 27.5 % y 77 % respectivamente para *A. tequilana*.
- El contenido de cenizas del concentrado de fructanos es mayor en *A. salmiana* (5.16 %) que en *A. tequilana* (1.7 %). Y el calcio representa 75 % de las cenizas en *A. salmiana* y el 52 % en *A. tequilana*.
- La largura de los cristales de oxalato de calcio (rafidios) de *A. salmiana* fue mayor (315 μm) que la de *A. tequilana* (192 μm) y fueron similares en grosor (6.01 y 4.56 μm respectivamente).
- La composición detallada de los componentes de las materias primas (*A. salmiana* y *A. tequilana*) es necesaria para el escalamiento, diseño, optimización de procesos de extracción de fructanos a nivel industrial.

8.5 Efecto de la madurez en el grado de polimerización y la composición de cenizas de fructanos de *Agave salmiana* Otto ex Salm Dyck

- El efecto de la madurez del maguey es evidente en el rendimiento, composición y calidad (GGP, D y proporción de fructanos mayores o menores que 10 GP) de los fructanos de tallos de maguey.
- El MM es el estadio con mejor rendimiento y calidad de sus fructanos, pues contienen menos monosacáridos y disacáridos.
- Los magueyes MI y MQ son menos deseables ya que se encuentran en etapas fisiológicas de síntesis incipiente y de consumo de fructanos, respectivamente.
- El grado de polimerización promedio de los fructanos de tallos de un MM es de 16 GP, superior al del MI (10) y el M (9).

- La madurez fisiológica plena de cualquier especie de maguey es el mejor indicador para establecer patrones de calidad de fructanos para cada especie y evitar tener que mezclar fructanos de diferentes especies para cumplir con la normativa.
- El contenido de cenizas es superior en el MI (111.6 mg/g) que en el MM (57.7 mg/g) y en el MQ (50.8 mg/g).
- El contenido de cenizas superar el límite permisible por la normativa mexicana para fructanos, pero sus contenidos al igual que de los metales pesados no superan los límites máximos permisibles que establece la comunidad europea para la sal como ingrediente equiparable por las cantidades recomendadas de consumo diario.
- El planteamiento de usar exclusivamente los tallos de plantas con MFP está encaminado a resolver la variación en la composición y calidad de los fructanos para fines industriales (entre lotes) y los utilizados en investigación.
- Este planteamiento implica un reto tecnológico industrial para separar mecánicamente el tallo de las bases de las pencas.
- Al utilizar las cabezas enteras como materia prima, obliga a los industriales a recurrir a procesos costosos de separación y purificación de los fructanos (que representan 60 % del costo final del producto) que sólo encarecen el proceso y el producto.
- La edad cronológica supuesta es el indicador de madurez más impreciso para el productor de planta y el industrial de fructanos, pues les representa bajos rendimientos por kg de materia prima, y mayores costos de producción y una variación frecuente de su calidad entre lotes.

8.6 Caracterización de la vinaza de mezcal potosino

- Las vinazas son el residuo líquido más abundante y con mayor impacto al ambiente que genera la industria de los aguardientes de maguey, ya que genera grandes cantidades de compuestos orgánicos y minerales que pueden contaminar suelos y cuerpos de agua superficiales y subterráneos, aunque sean tratados de acuerdo a la normativa ambiental.
- El agua de vinaza obtenida mediante evaporación al vacío libre de sólidos suspendidos, puede reutilizarse para diferentes propósitos en las mismas destilerías

como agua para calderas y condensadores incluso como agua de dilución de mezcal.

- El lodo de vinaza seco está compuesto principalmente de compuestos de color (melanoidinas), 12.07 % de cenizas, 5.68 % de proteína, 1.91 de celulosa y 8.32 % de hemicelulosa y 0.34 % de lignina, y por su mayor contenido de minerales se propuso utilizarlo como fuente de proteína y minerales, para que pueda usarse en la suplementación de piensos en bajas proporciones (5-10%).

8.7 Uso del agua de vinazas para dilución del mezcal

- El agua de vinaza obtenida mediante evaporación a baja presión puede ser igual o mejor que el agua comercial utilizada para ajustar el grado alcohólico del mezcal.
- Aunque el volumen de agua de vinaza utilizado para la dilución del grado alcohólico represente menos que 2 % del volumen total que se podría obtener, el agua de vinaza también puede ser utilizada con otros propósitos, siempre y cuando se le acondicione para cada uno de ellos, por ejemplo, como fuente de vapor en las calderas y como refrigerante de los condensadores.
- Se observaron ciertas tendencias, aunque no significativas que el agua de vinaza puede mejorar el aroma, sabor y la aceptación de los aguardientes diluidos con estas misma.

Anexos-I

Cata experimental de aguardientes de maguey

(Procedimiento inédito de la Dra. Guadalupe Bárcenas y del Dr. Rogelio Aguirre)

Instrucciones para los evaluadores

1. La única condición para poder participar en la cata experimental, es que al menos el participante haya probado un aguardiente de maguey sin combinar, es decir, sin combinar, para que no le sea desconocido o lo haya tomado sólo, para evitar cualquier sesgo en su criterio de evaluación.
2. Durante el proceso de la cata, no debe haber comunicación entre los catadores referente a lo que se está catando.
3. Un gesto o cualquier otra actitud de aprobación o desaprobación, puede influir en la opinión de los otros evaluadores.
4. Es importante que la calificación de su juicio positivo o negativo lo anote en la hoja. Habrá dos tipos de hojas de evaluación una por parámetro a evaluar en este caso evaluaremos aroma y sabor por cada tratamiento.
5. Asegúrese de llenar todos los datos en cada una de las hojas de evaluación, de manera clara y legible.
6. No está permitido fumar en el salón de la cata y es deseable que no se fume previo a la realización de la cata.
7. De preferencia, el día de la cata evite el uso de lociones y perfumes, así como comer comida muy condimentada y picante unas horas antes de la cata.

Procedimiento para el desarrollo de la cata experimental

Las hojas para las calificaciones se entregarán a los evaluadores al inicio de cada evaluación o tratamiento y servirán para evaluar un sólo parámetro de cada muestra.

Aroma y sabor

Primer tratamiento

Aroma: evaluación, calificación, retiro de la hoja de evaluación

Sabor: evaluación, calificación y retiro de la hoja de evaluación.

Segundo tratamiento

Tercer tratamiento ... y así sucesivamente...

Para evaluar el aroma, acerque el vaso a su nariz y aspire lentamente, registre mentalmente la sensación; acerque nuevamente el vaso a su nariz cubriendo con ella completamente la boca del vaso, aspire lenta y profundamente hasta sentir el aroma en la base de la garganta. Registre su apreciación en la hoja de evaluación.

Para evaluar el sabor, tome un pequeño sorbo y muévelo dentro de su boca para llenarla del sabor, tome otro sorbo y aprecie el sabor lentamente, registre entonces su apreciación en la hoja de evaluación.

Al concluir la evaluación de cada tratamiento, los evaluadores deberán enjuagarse la boca con agua, comer un bocadillo y volver a enjuagar su boca antes de iniciar la siguiente evaluación.

Recuerde que es una cata de apreciación en que su juicio será el nivel de gusto o disgusto que le provoque cada muestra, no es una comparación entre ellas.

Anexo II

Folleto

“Equipamiento para el aprovechamiento de nopal y maguey como suplemento para el ganado en la época seca”

Guía para la elaboración de ensilados integrales de maguey y de mezclas frescas de nopal como forraje complementario

Cesar I. Godínez H.; Octavio Negrete S.; Rigoberto Castro R.;
Héctor M. Durán G.; Juan R. Aguirre R.

Noviembre-2015

El nopal y el maguey mezcalero, una fuente de forraje complementario

Uno de los subproductos de la industria mezcalera son las pencas de desvirado, pero su aprovechamiento como forraje es muy marginal, ocasional y rudimentario, pues requiere ser **picado manualmente** para que pueda ser consumido por el ganado. Generalmente las pencas de desvirado son desechadas enteras en los parajes de corte, en donde no pueden ser consumidas directamente por el ganado y obstruye el crecimiento de plantas herbáceas del agostadero. El nopal para ser aprovechado como forraje requiere ser chamuscado y picado para dárselo al ganado.



El maguey y el nopal son de los pocos recursos forrajeros de los que disponen las comunidades rurales del altiplano potosino. Por ello se propone usar pencas de nopal y pencas enteras o de desvirado de maguey usado para mezcal como una fuente de forraje complementario del pastoreo, mediante el proceso de **ensilaje**, en el cual las **pencas de maguey** serán el ingrediente principal complementado con otros materiales locales como **vaina de mezquite y alfalfa henificada**, de tal forma que con la mezcla se obtenga

un forraje que complete lo requerido por el ganado menor en potrero durante toda la época seca, sin pérdida de peso vivo.

El maguey más adecuado para forraje es el que está a punto de quiotar o recién quiotado y se debe aprovechar completo. Del nopal sólo se deben aprovechar las dos pencas terminales de un mismo brazo cada dos años.

¿Qué es el proceso de ensilaje?

Es un proceso de conservación de forraje bajo condiciones anaerobias en el cual ocurre una serie de cambios bioquímicos que permiten su estabilización y conservación hasta por años. Para ello es necesario picar los materiales a un tamaño de 2 a 3 cm, mezclarlos, compactarlos para eliminar la mayor cantidad de aire y sellar el recipiente para impedir la entrada de aire. Para el caso de la vaina de mezquite es necesario romper la pepita, pues es la parte con mayor contenido de proteína utilizable por el ganado. La descomposición microbiana y estabilización que ocurre durante el ensilaje es relativamente rápida (15 días) y permite conservar indefinidamente el forraje y mejorar su aceptación por el ganado.

Máquina picadora de maguey y nopal

El maguey y el nopal al ser materiales suculentos y fibrosos, demandan de una máquina con ciertas características mecánicas y de diseño para ser picados. Esta máquina ha sido desarrollada y probada por académicos del IIZD.



Ventajas de la máquina picadora de maguey y nopal

- Se supera el picado manual y se ahorra tiempo para dedicarlo a otras actividades.
- Se evita el chamuscado de nopal, pues al picarlo se destruyen las espinas, al igual que la irritación de los “guishes” del maguey a los humanos durante su preparación y al ganado al consumirlo, después de ensilarlo.
- Con el maguey y nopal picado se facilita complementarlos con otros materiales locales de bajo costo, que permitan alcanzar de un 10-12 % de proteína cruda, nivel suficiente para el mantenimiento de las cabras en la época seca del año.

¿Con qué complementar el nopal y maguey picado?

- Vaina de mezquite
- Alfalfa henificada

Equipamiento para hacer ensilados integrales de maguey, mezclas frescas de nopal y para el aprovechamiento racional del rastrojo de maíz

- Máquina (azul) picadora original para materiales frescos y fibrosos (maguey y nopal)
- Molino (naranja) de martillos M-power para materiales secos (vaina de mezquite, rastrojo y alfalfa henificada)
- Tambos de 200 litros (2)
- Pala
- Coa
- Machete
- Lima triangular
- Garrafa para combustible
- Embudo para combustible
- Careta protectora
- Báscula

Formulaciones recomendadas para mezclas balanceadas

- F1 – Maguey sólo ensilado o nopal fresco picado + 13.5 % de vaina de mezquite molida; o 10 % de alfalfa henificada picada; o 5 % de vaina de mezquite molida y 5 % de alfalfa henificada picada
- F2 – Para ensilar 86.5 % de maguey picado + 13.5 % de vaina de mezquite molida
- F3 – Para ensilar 90 % de maguey picado + 10 % de alfalfa henificada picada
- F4 – Para ensilar 90 % de maguey picado + 5 % de vaina de mezquite molida + 5 % de alfalfa henificada picada

Las cantidades para un contenedor o silo de 200 litros son:

- F1 - 200 kg de maguey picado
- F2 - 173 kg de maguey picado + 27 kg de vaina de mezquite molida
- F3 - 180 kg de maguey picado + 20 kg de alfalfa henificada picada
- F4 - 173 kg maguey picado + 14 kg alfalfa henificada picada + 13 kg vaina de mezquite molida

El nopal no requiere ser ensilado. Se puede proporcionar directamente complementado con la misma proporción de harina de vaina de mezquite o de alfalfa henificada picada, recomendada para el maguey ensilado.

Recomendaciones técnicas

Para el buen funcionamiento y durabilidad de las máquinas, se deben lavar a presión después de usarse, engrasar los rodamientos y cambiar el aceite del motor según el manual del fabricante, así como utilizar cada máquina para el material indicado. El usuario en turno debe recibir y entregar las máquinas limpias y funcionando.

Informes sobre:

Máquina picadora de maguey y nopal

Taller de Maquinados Industriales S.A. de C.V.
J. Carmen Martínez Núñez
Av. 20 de Noviembre # 1905, Barrio de Tlaxcala
San Luis Potosí, SLP. Tel. (444) 8-14-16-57
tamisa33@hotmail.com

Máquina picadora y molidora de materiales secos

Agroterra
Lic. José Palacios
Av. De los Insurgentes # 1740-C, Irapuato, Gto.
Tel. (462) 1-72-45-92 Cel. (462) 1-76-57-37
agroterra_2012@hotmail.com



Instituto de Investigación de Zonas Desérticas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí

“Equipamiento para el aprovechamiento de nopal y maguey como suplemento para el ganado en la época seca”

Guía para la elaboración de ensilados integrales de maguey y de mezclas frescas de nopal como forraje complementario



Autores:

Cesar I. Godínez H.; Octavio Negrete S.; Rigoberto Castro R.; Héctor M. Durán G.; Juan R. Aguirre R.

Noviembre-2015

