

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL
DEPARTAMENTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE
ALIMENTOS



ESTANDARIZACIÓN DEL PROCESO HIDROTÉRMICO DE
COCCIÓN DE PIÑAS DE SOTOL (*Dasyilirion cedrosanum*)

Por:

XOCHITL MARIANA RODRÍGUEZ NAVARRO

TESIS

Presentada como Requisito Parcial para Obtener el Título de:
INGENIERO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

Buenavista, Saltillo, Coahuila. México

Junio, 2023

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL
DEPARTAMENTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

ESTANDARIZACIÓN DEL PROCESO HIDROTÉRMICO DE COCCIÓN DE PIÑAS
DE SOTOL (*Dasyliirion cedrosanum*)

Por:

XOCHITL MARIANA RODRÍGUEZ NAVARRO

TESIS

Presentada como Requisito Parcial para Obtener el Título de:
INGENIERO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

Aprobada como requisito por el comité de asesoría



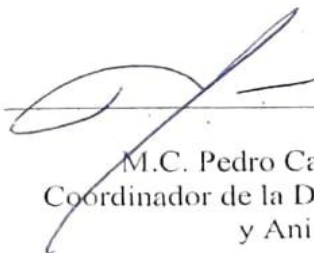
Dr. Armando Robledo Olivo
Asesor Principal



Dra. Ana Verónica Charles Rodríguez
Asesor



M.C. Tomasa Quiterio Gutiérrez
Asesor Externo



M.C. Pedro Carrillo López
Coordinador de la División de
y Animal



MANIFIESTO DE HONESTIDAD ACADÉMICA

La suscrita **Xóchitl Mariana Rodríguez Navarro**, alumna del programa docente de Ingeniero en Ciencia y Tecnología de Alimentos, con número de matrícula **41164641** y autor de la presente tesis manifiesta que:

1. Reconozco que el plagio académico constituye un delito que está penado en nuestro país.
2. Las ideas, opiniones, datos e información publicadas por otros autores y que han sido incluidas en este trabajo, han sido debidamente citadas, reconociendo la autoría de la fuente original.
3. Toda la información consultada ha sido analizada e interpretada por el suscrito y redactada según su criterio y apreciación, de tal manera que no se ha incurrido en el “copiado y pegado” de dicha información.
4. Reconozco la responsabilidad sobre los derechos del autor de los materiales bibliográficos consultados por cualquier vía y manifiesto no haber hecho mal uso de ellos.
5. Entiendo que la función y alcance de mi comité de asesoría está circunscrito a la orientación de guía respecto a la metodología de investigación realizada para el presente trabajo, así como el análisis e interpretación de los resultados obtenidos. Por lo tanto, eximo de toda responsabilidad relacionada al plagio académico a mi comité de asesoría y acepto que cualquier responsabilidad al respecto es únicamente mía.

ATENTAMENTE

Xóchitl Mariana R. N
Xóchitl Mariana Rodríguez Navarro
Tesisista

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a DIOS por darme la oportunidad de concluir con este proyecto, por darme la oportunidad de seguir adelante superándome día con día, por darme la fuerza y seguir adelante a pesar de las adversidades que se me presentaron en este tiempo y por permitirme cumplir un sueño de muchos de los que quiero lograr.

Agradezco a **MI ALMA TERRA MATER** por formarme y llenarme de conocimiento que ahora toca llevarlo al campo laboral, por darme la oportunidad de culminar mi carrera profesional.

Agradezco al **Dr. Armando Robledo Olivo**, por darme la oportunidad de ser su tesista, por su apoyo al momento de realizar este proyecto, por considerarme y darme la oportunidad de dar el último paso de la carrera y la confianza que me ha brindado.

Agradezco a la **M. C. Tomasa Quiterio Gutiérrez** por el apoyo, su atención y su tiempo que me brindo, el material y equipos que me facilito que utilice para realizar el experimento.

Agradezco a todos los maestros que contribuyeron en mi formación profesional.

Agradezco a mis compañeros y amigos por sus consejos y apoyo que me brindaron en el transcurso de la carrera.

DEDICATORIAS

A mis padres por todo el amor que me han dado todo el tiempo. Por la confianza que me dieron para poder emprender y concluir esta nueva etapa de mi vida. Por todo su apoyo tanto emocional como económico, sus consejos y orientaciones todos los días, por enseñarme a no rendirme nunca y dar lo mejor de mí para lograr todos mis propósitos.

A mis hermanos Félix Rafael, Jorge Alberto, Pedro, Mónica Citlali, Ana Alejandra y José Manuel por existir y por darme ese apoyo emocional que necesite para no darme por vencida, por orientarme y por todos los ánimos que me dieron para concluir esta etapa de mi vida.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	4
DEDICATORIAS.....	5
ÍNDICE GENERAL.....	i
LISTA DE CUADROS	iii
LISTA DE FIGURAS	iv
RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN.....	3
Hipótesis	5
Objetivos.....	5
General.....	5
Específicos.....	5
ANTECEDENTES	6
PLANTA DASYLIRION	6
SOTOL ARTESANAL	7
CARACTERISTICAS BIOQUIMICAS DEL DASYLIRION	7
FRUCTANOS E INULINA EN DASYLIRION	8
GRADOS BRIX	9
PROCESOS DE TERMOHIDROLISIS	9
OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS.....	10
DISEÑO FACTORIAL	¡Error! Marcador no definido.
METODOLOGÍA.....	11
DETERMINACIÓN DE GRADOS BRIX	11
DETERMINACIÓN DE AZUCARES TOTALES.....	11

DETERMINACION DE AZUCARES MONOMERICOS (ANTRONA)	12
DETERMINACION DE FIBRA DETERGENTE ACIDA	12
PROCESO DE TERMO-HIDRÓLISIS	14
DISEÑO EXPERIMENTAL	14
ANÁLISIS ESTADÍSTICO	16
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	17
Caracterización bioquímica de las piñas de sotol	17
Diseño experimental para determinar el tamaño de piña	19
Diseño experimental para determinar el proceso de termo hidrólisis	22
CONCLUSIONES	27
REFERENCIAS	28

INDICE DE CUADRO

Cuadro 1. Elaboración de diluciones de la solución patrón de Antrona, para la elaboración de la curva de calibración.....	12
Cuadro 2. Valores de factores y sus respectivos niveles para ser considerados en el diseño experimental de termo-hidrólisis de <i>Dasyllirion</i> sp.	14
Cuadro 3. Orden experimental de combinaciones de factores tamaño y tiempo de cocción a 40°C, y sus respectivos niveles para el proceso de termo-hidrólisis de <i>Dasyllirion</i> sp.	14
Cuadro 4. Orden experimental de combinaciones de factores tiempo y temperatura, y sus respectivos niveles para el proceso de termo-hidrólisis de piñas grandes de <i>Dasyllirion</i> sp.15	
Cuadro 5. Análisis de pesos por fecha de acopio de piñas de <i>Dasyllirion</i> sp.	18
Cuadro 6. Análisis de grados Brix, azúcares totales, y FAD, por tamaño de piñas de <i>Dasyllirion</i> sp previo a los tratamientos de hidrólisis.	18
Cuadro 7. Análisis de varianza.....	19
Cuadro 8. Análisis de varianza.....	23

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Grafica de porcentaje de humedad por fecha de acopio de piñas de <i>Dasyilirion</i> sp.	17
Figura 2. Grafica de Azúcares totales en piñas de <i>Dasyilirion</i> sp., sometidas a diferentes tiempos de cocción a 40°C. Letras minúsculas diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$)......	20
Figura 3. Grafica de Azúcares totales en piñas de <i>Dasyilirion</i> sp., sometidas a diferentes tiempos de cocción a 40°C. Letras minúsculas diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$)......	21
Figura 4. Grafica de porcentaje de fibra acida detergente en piñas de <i>Dasyilirion</i> sp., sometidas a diferentes tiempos de cocción a 40°C. Letras minúsculas diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$)......	22
Figura 5. Grafica de azucars monoméricos en piñas de <i>Dasyilirion</i> sp., sometidas a diferentes tiempos de cocción y diferentes temperaturas. Letras minúsculas diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$)......	24
Figura 6. Grafica de efectos principales para la cuantificación de azúcares monoméricos en piñas de <i>Dasyilirion</i> sp., sometidas a diferentes tratamientos.	25
Figura 7. Grafica de optimización del proceso de cocción de piñas de <i>Dasyilirion</i> sp., sometidas a diferentes tiempos y temperaturas de cocción.	26

RESUMEN

En el norte de México se conoce con el nombre genérico de sotol (*Dasyliirion* spp.) a un grupo de especies rosetófilas de importancia ecológica e industrial. La importancia industrial del sotol radica principalmente en su uso para la elaboración de bebidas destiladas, con denominación de origen. El objetivo principal de este experimento es incrementar la concentración de azúcares monoméricos en piñas de sotol mediante la optimización del proceso de cocción. En la fase experimental, se realizó la caracterización bioquímica de las piñas de sotol (sólidos solubles totales, azúcares totales, y monosacáridos), previo y posterior al tratamiento térmico. Los tratamientos hidrotérmicos evaluados fueron a 40, 80 y 120°C, con tiempos de 15, 30, 60 y 120 minutos. Al someter a un proceso hidrotérmico se espera que este proceso favorezca la liberación de estos azúcares, por el calor que se aplica a sus moléculas y el tiempo que permanecen en contacto con el calor, se espera que este proceso favorezca a la producción de sotol. Los resultados obtenidos en la fase experimental favorecen el aumento de azúcares fermentables, esto nos indica que al utilizar procesos de cocción controlados en las piñas de sotol permite hacer uso eficiente de la energía, optimizando el proceso.

Palabras clave: estandarización, piñas de sotol, proceso hidrotérmico

ABSTRACT

In northern Mexico, a group of rosetophilous species of ecological and industrial importance is known by the generic name of sotol (*Dasyliirion* spp.). The industrial importance of sotol lies mainly in its use for the production of distilled beverages, with denomination of origin. The main objective of this experiment is to increase the concentration of monomeric sugars in sotol pineapples by optimizing the cooking process. In the experimental phase, the biochemical characterization of sotol pineapples (total soluble solids, total sugars, and monosaccharides) was carried out before and after thermal treatment. The hydrothermal treatments evaluated were at 40, 80 and 120°C, with times of 15, 30, 60 and 120 minutes. When subjected to a hydrothermal process, it is expected that this process will favor the release of these sugars, due to the heat that is applied to their molecules and the time that they remain in contact with the heat, it is expected that this process will favor the production of sotol.

Keywords: standardization, sotol pineapples, hydrothermal process

INTRODUCCIÓN

En el norte de México, se conoce con el nombre genérico de sotol (*Dasyilirion* spp.) a un grupo de especies rosetófilas de importancia ecológica e industrial en Durango y otras entidades ubicadas en el desierto Chihuahuense (Pinales-Quero *et al.*, 2017). La planta de sotol cumple una función ecológica importante, debido a la biomasa aportada a los suelos someros de lomerío y con afloramiento rocoso, donde crece esta especie (Becerra-López *et al.*, 2020). La importancia industrial del sotol radica principalmente en su uso para la elaboración de bebidas destiladas, con denominación de origen, a las cuales se les conoce con el mismo nombre de la planta (sotol). La comercialización del sotol aporta recursos económicos a los habitantes de áreas marginadas del norte-centro de México, en las cuales se utilizan las poblaciones naturales de varias especies de plantas para abastecer los requerimientos de la industria (Reyes-Valdés *et al.*, 2019).

Diferentes estudios indican que Coahuila presenta un alto potencial de plantas de sotol; de los siete millones de hectáreas que representan el hábitat de la planta, tres son reconocidas como buenas para su aprovechamiento. No obstante, solo dos especies resultan de gran importancia en este estado, *Dasyilirion cedrosanum* y *Dasyilirion duranguensis* (Becerra-López *et al.*, 2020).

A partir de la cocción y fermentación de las piñas de la planta Sotol, se preparada la bebida alcohólica “Sotol”. La fermentación de las piñas de sotol se puede realizar derivado del contenido de carbohidratos, como fructooligosacáridos y celulosa (Zavala-Díaz de la Serna 2020) siendo ésta última el componente más abundante (Madrid-Solorzano, 2018).

Durante la elaboración de la bebida, una adecuada cocción de la piña de sotol permite obtener un mosto con un alto contenido de azúcares fermentables. Estos azúcares servirán de sustrato para las levaduras durante el proceso fermentativo, además de determinar el mejor rendimiento en la producción de etanol durante la etapa de la destilación (Chagua-Rodríguez *et al.*, 2020). Aunque el 70% de la producción de sotol de venta internacional, se realiza de manera tecnificada por la empresa Vinomex S.A. de C.V. (Madrid-Solórzano, 2021), aún hay pequeños productores que realizan la elaboración de sotol de manera artesanal, y con bajos rendimientos derivados de un proceso de cocción deficiente. Debido a esto el objetivo

general de la investigación es optimizar el proceso hidrotérmico de cocción, para incrementar la concentración de azúcares monoméricos en piñas de sotol.

Hipótesis

La optimización de los parámetros del tratamiento hidrotérmico favorecerá la liberación de azúcares monoméricos en la fracción sólida.

Objetivos

General

Incrementar la concentración de azúcares monoméricos en piñas de sotol mediante la optimización del proceso hidrotérmico.

Específicos

- Caracterizar bioquímicamente las piñas de sotol, cuantificando los grados Brix, azúcares totales, y fibra detergente ácida.
- Optimizar el proceso de cocción mediante un proceso hidrotérmico tomando como factores de variación la temperatura, y el tiempo de proceso.
- Validar el proceso hidrotérmico obtenido bajo las condiciones óptimas derivadas del diseño experimental

ANTECEDENTES

PLANTA *Dasyllirion*

El 40% del territorio mexicano es conformado por zonas áridas y semiáridas. Incluyen una parte considerable del desierto más grande de Norteamérica, el desierto Chihuahuense, de las regiones con mayor riqueza de especies en el mundo (Granados-Sánchez. 2011; Orozco-Sifuentes *et al.*, 2019). Se albergan alrededor de 6000 especies vegetales de tamaños variables y formas complejas, con un alto porcentaje (50%) de endemismo (Rzedowsky, 1965; Sarukhan *et al.*, 2009; Orozco-Sifuentes *et al.*, 2019).

Desde la antigüedad las especies del desierto han sido utilizadas para el consumo humano, como material de construcción, como barreras naturales, como fibra, como forraje para el ganado y recientemente para la obtención de sustancias de interés económico como las gomas, resinas, látex, almidón y metabolitos secundarios dirigidos a aplicaciones médicas (González-Medrano, 2012; Orozco-Sifuentes *et al.*, 2019).

De los géneros de mayor importancia económica, ecológica y cultural de las zonas áridas es el *Dasyllirion* (Familia Asparagaceae). Estas plantas son llamadas comúnmente sotoles y de ellas se obtiene una bebida alcohólica tradicional llamada “sotol”, esta cuenta con una protección a la denominación de origen para Chihuahua, Coahuila y Durango. No todas las especies de este género son aptas para dicho propósito (Orozco-Sifuentes *et al.*, 2019).

Se reconocen 22 especies en la actualidad del género *Dasyllirion* distribuidas en zonas desérticas de Norteamérica, desde el sur de Estados Unidos de América hasta Oaxaca (Boqler,1998; Tropicos,2016; Orozco-Sifuentes *et al.*, 2019). El género es clasificado en diferentes familias, entre ellas *Liliaceae*, *Agavaceae*, *Nolinaceae*, *Ruscaceae* y *Asparagaceae* (Villaseñor,2016; Tropicos,2016; Orozco-Sifuentes *et al.*, 2019).

El sotol crece de forma natural en suelos delgados y pedregosos con bajo contenido de materia orgánica (Cano-Pineda y Martínez-Burciaga, 2007; Reyes-Valdés, 2013). Las plantas de este género se identifican por rasgos distintivos; por la forma de sus hojas, con variaciones en cuanto longitud y amplitud, por la orientación de las espinas en el margen, por la presencia o ausencia de la cera particular de estas, así como su forma particular de su superficie foliar (Bogler,1994; Orozco-Sifuentes *et al.*, 2019). Se caracterizan por poseer

tallos cortos y robustos, hojas largas arrosetadas con espinas en los bordes. La estructura del tallo cuenta con un almacén de reservas adaptado para un entorno con variaciones en el aporte de recursos, es un factor importante para la supervivencia de las plántulas (Sierra-Tristan *et al.*, 2008; Reyes-Valdés, 2013). Presentan un escapo floral de hasta 5 metros de altura y su fruto es una capsula indehisciente con una semilla (Orozco-Sifuentes *et al.*, 2019).

Es una planta de aspecto casi feroz, tolerante a la sequía y un tesoro salvaje de desierto. Una de las características más llamativas de esta especie son sus hojas que se arquean hacia el centro, dando origen a uno de sus nombres “Cuchara del desierto”.

SOTOL ARTESANAL

La producción de sotol artesanal comenzó con la búsqueda y corte de la planta en su hábitat natural, se utiliza únicamente el tallo, conocida como piña. Después se somete a cocción de estas en hornos rudimentarios a nivel del suelo, se somete a un proceso de molienda, para crear una pasta; se le agrega agua a la piña molida y se pone a fermentar. El compuesto que es utilizado por la levadura para llevar a cabo la fermentación es la inulina. La inulina ($(C_6H_{10}O_5)_n \cdot H_2O$) compuesto similar al almidón, está formado por unidades de fructosa y constituyen una de las materias primas de reserva de las piñas del agave que no es directamente fermentable, pero que se transforma en fructosa y glucosa por hidrólisis ácida durante la cocción de la piña (Morales, 1997; Quiroz y Gomez, 1999; Bautista-Justo *et al.*, 2001). Posteriormente la piña fermentada se destila dos veces, esto para obtener un producto final a 45% de alcohol, este es diluido en agua destilada para tener un valor de 40% de alcohol, esto para obtener una presentación comercial llamado sotol blanco o joven. Las especies adecuadas para producir la bebida son *Dasyliirion cedrosanum*, *Dasyliirion duranguensis*, *Dasyliirion wheeleri* y *Dasyliirion leiophyllum* (Madrid-Solórzano, 2021).

CARACTERÍSTICAS BIOQUÍMICAS DEL **DASYLIRION**

Las plantas de sotol crecen en los desiertos y semidesiertos. Un estudio sobre la composición química de las plantas *Dasyliirion* masculinas y femeninas no mostró diferencias significativas entre sexos (Cruz-Requena *et al.*, 2007; Reyes-Valdés, 2013).

Se sabe que los tallos acumulan principalmente fructanos que son estructuralmente diferentes a los de los agaves (Mancilla-Margalli y López, 2006; Reyes-Valdés, 2013). Los fructanos son compuestos con una aparente función dual en las plantas, ya que tienen un papel como fotosintatos y por otra parte como osmolitos, elevando así la tolerancia al estrés hídrico en varias especies vegetales (Spollen y Nelson, 1994; Wang y Nobel, 1998; Reyes-Valdés, 2013). Parte de esta habilidad de los fructanos depende de su capacidad para asociarse con las membranas a través de un efecto de retención de agua que aumenta su estabilidad (Demel et al., 1998; Hinch et al., 2000; Valluru y Van den Ende, 2008; Reyes-Valdés, 2013). Los fructanos de sotol y del agave, cuyo interés se centra en la fermentación para producir alcohol (Ávila-Fernández et al., 2009; Reyes-Valdés, 2013), no se consideran en nuestra cultura como un producto útil para consumir como alimento.

Sin embargo, además de construir una fuente de fibra dietética, los fructanos son compuestos con interesantes cualidades nutritivas por su bajo aporte calórico (Urías-Silvas et al., 2008; Reyes-Valdés, 2013). Además de que los fructanos del sotol muestran propiedades nutraceuticas, como la gran actividad promotora in vitro de bifidobacterias y lactobacillus (López y Urías-Silvas, 2007; Reyes-Valdés, 2013).

FRUCTANOS E INULINA EN **DASYLIRION**

Los fructanos son polímeros de reserva, que algunas plantas sintetizan a partir de moléculas de sacarosa y fructuosa, con importancia en la industria de alimentos funcionales. Los fructanos de origen vegetal tienen un menor grado de polimerización que los de origen microbiano, y estructuras más complejas; se diferencian entre sí por su estructura y grado de polimerización (GP). Los fructanos con mayor importancia a nivel mundial son la inulina y la oligofruetosa (Godínez-Hernández, Cesar I, et al., 2016).

La inulina es una sustancia prebiótica que funciona de la misma manera que la fibra alimentaria. Es un polisacárido que está elaborado por cadenas moleculares de fructán de tipo β (2 \leftarrow 1), provocando cambios significativos en las composiciones de la microflora intestinal y mejorando los hábitos intestinales (Collado Yurrita, Luis, et al., 2014). El tratamiento térmico da como resultado que la inulina se descomponga en fructuosa, glucosa y sacarosa. La fructuosa es el principal azúcar fermentable incluso cuando se agrega azúcar.

La primera evidencia de polisacáridos de fructosa en las especies de Agaves, (especie similar al *Dasyliirion*), fue proporcionada por Sanchez-Marroquin y Hope (1953). Posteriormente López *et al.*, (2003) establecieron la estructura molecular de los fructanos del maguey para el tequila, y encontraron la presencia de estructuras ramificadas y un mayor nivel de polimerización que los de la achicoria (Godinez-Hernandez, Cesar I, *et al.*, 2016).

GRADOS BRIX

La calidad del sotol está fuertemente relacionada con la concentración de grados Brix (°Bx). Estos representan una escala arbitraria para medir las densidades de las soluciones de azúcares, y estas equivalen al porcentaje en peso de sólidos solubles de la muestra que son los azúcares que posee. La concentración de grados Brix de las piñas de sotol depende de varios factores: como lo son altura, diámetro de roseta y diámetro de macollo, mientras mayores dimensiones tenga la piña, esta tendrá más grados Brix (Saucedo *et al.*, 2020).

Se ha informado que el sotol (*Dasyliirion* sp.) se compone de azúcares complejos como fructooligosacáridos, polímeros de fructosilo y moléculas más pequeñas como glucosa y fructosa. La concentración de azúcares reductores en los extractos de piña sotol cocida puede rondar el 31.9%, dependiendo de la relación agua/peso másico de piña utilizada. Durante la fermentación, los azúcares reductores se ajustan en torno al 10.5%, dando una concentración de azúcares solubles de 10°Brix, descendiendo a 5°Brix al final de la fermentación (De la Garza-Toledo 2008).

PROCESOS DE TERMOHIDROLISIS

Los procesos de hidrólisis térmica se basan en la aplicación de agua caliente, provocando alteraciones en la estructura de la lignocelulosa, principalmente a través de la eliminación de la hemicelulosa. Al someter las muestras vegetales a un proceso de hidrólisis térmica, se logra reducir la cristalinidad de la celulosa, aumentar el tamaño de poro, y modificar o remover la lignina, lo que genera una mayor exposición de los azúcares presentes, y que puedan ser utilizados por los microorganismos. En el proceso de termohidrólisis es fundamental el tiempo y el tamaño de partícula. El tiempo de exposición es fundamental, ya que gracias a esto se obtienen mayores concentraciones de azúcares (Chavez-Garcia *et al.*,

2020). La celulosa es el material organico mas abundante del sotol, y se producen grandes cantidades de desechos de celulosa al año durante la elaboración de la bebida sotol.

OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS

La calidad es el principal criterio para el diseño de procesos de alimentos, ya que satisfacer al consumidor asegura el éxito del producto y del proceso; la optimización permite el diseño de sistemas flexibles puesto que admite encontrar las condiciones óptimas y las rutas para obtener un producto con calidad, por ello, es importante la construcción del modelo de optimización que puede utilizarse exitosamente, entre otros objetivos, para mejorar la calidad de los productos (Boom *et al.*, 2009).

En este sentido, (Magrab *et al.*, 2010) menciona que hay una fuerte relación entre la calidad del producto y el retorno de inversión de la compañía. Por lo cual, la calidad del producto debe considerarse como el punto de partida para el diseño de proceso de alimentos. Entonces es esencial que los indicadores de calidad sean medibles, previsibles y se relacione con los indicadores técnicos, económicos, ambientales que integran el diseño de procesos.

METODOLOGÍA

La presente investigación se realizó en el Laboratorio de Fermentaciones y Biomoléculas del Departamento de Ciencia y Tecnología de Alimentos de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

Materia prima

Las piñas de sotol fueron recolectadas en el mes de enero del 2021 y trasladadas hasta el laboratorio y almacenadas a temperatura ambiente por una semana, posteriormente se almacenaron a 4°C hasta su uso.

DETERMINACIÓN DE GRADOS BRUX

La piña de sotol fue cortada en trozos de 10 gramos y molida con 40 ml de agua. Para una determinación de grados Brix se agregaron 3 gotas en un refractómetro PAL-1 (ATAGO U.S.A., Inc). Al finalizar la cuantificación, se limpió el refractómetro cuidadosamente con agua destilada y con toalla de microfibra. Se registraron los datos mostrados en la pantalla del equipo. Para tal fin se realizaron 3 repeticiones.

DETERMINACIÓN DE AZUCARES TOTALES

Para la determinación de azúcares totales, se empleó la técnica de Dubois (1956). Este método se fundamenta en la sensibilidad de los carbohidratos a la aplicación de ácidos fuertes y temperaturas altas. Bajo estas condiciones, toman lugar una serie de reacciones complejas, comenzando con la deshidratación simple, posteriormente la producción de varios derivados del furano que condensa consigo mismo y con otros subproductos para producir compuestos coloridos generados por la condensación con el fenol. Para realizar esta técnica, se colocaron en tubos de ensaye 500 µl de muestra, se le añadieron 500 µl de fenol al 5% y se dejó en baño de agua con hielo durante 5 min. Posteriormente, se le añadieron 1000 µl de H₂SO₄ concentrado, se dejó reposar durante 15 min en el baño y después se agito en un vórtex. Las muestras se calentaron a 50°C durante 5 minutos, y se dejaron enfriar a temperatura ambiente durante 5 minutos. Finalmente se leyó la absorbancia a 470 nm en lector de microplacas (BIOBASE EL-10A).

DETERMINACION DE AZUCARES MONOMERICOS (ANTRONA)

Para la curva de calibración, se preparó una solución madre de glucosa 500 ppm, realizando diluciones como se muestran en el cuadro 1. Para el procedimiento, se colocaron 250 µl de las muestras a cada tubo por triplicado. Se pasaron los tubos a baño con hielo por 5 minutos. Se adicionaron 500 µl de antrona (0.05 g de antrona y aforar a 25 ml de H₂SO₄ concentrado) a cada tubo y se agitó en vórtex. Se colocaron los tubos a baño maría a 80°C por 15 minutos, tapados. Posteriormente se pasaron a baño con hielo por 5 minutos para detener la reacción. Después se colocaron 280 µl de cada tubo y se pasaron a una microplaca de fondo plano. Se leyeron las absorbancias a 530 nm en espectrofotómetro UV con lector de microplaca, utilizando agua como blanco.

Cuadro 1. Elaboración de diluciones de la solución patrón de Antrona, para la elaboración de la curva de calibración

	<i>Concentración(ppm)</i>	<i>Vol. Solución madre(µl)</i>	<i>Vol. H2O(µl)</i>
1	0	0	2000
2	50	200	1800
3	100	400	1600
4	150	600	1400
5	200	800	1200
6	250	1000	1000
7	300	1200	800

DETERMINACION DE FIBRA DETERGENTE ACIDA

Equipo

- Aparato de reflujo. (Refrigerante y parrilla)
- Vasos berzelius
- Crisoles de filtro de vidrio
- Matraces de filtración

Reactivos

1. Solución ácido detergente
H₂SO₄ 1N estandarizado
Agregar 20 g de trimetil cetil bromuro de amonio/1 lt de solución normal de H₂SO₄
1N
2. Decahidroftaleno (Decalin)
3. Acetona grado reactivo
4. Hexano grado reactivo

Procedimiento

De las muestras de piña de sotol se tomó 1 ml y colocarlo en un vaso berzelius, se le agrego 100 ml de solución ácido detergente a temperatura ambiente junto con 2 ml de decahidronaftaleno, posteriormente se llevó a unas parrillas a calentar la solución para que esta hierva en un tiempo de entre 5-10 minutos cuando inicie la ebullición disminuir la temperatura para evitar la formación de espuma y reflujar por 1 hora, mantener la ebullición lenta durante todo el procedimiento. La solución se tituló a través de un crisol previamente tarado, lavar la muestra 2 veces con agua caliente, así como los lados del crisol, posterior a esos lavados, se realizó un lavado con acetona hasta que desaparezca totalmente el color, tener cuidado con la formación de grumos ya que esto evitaría el contacto con todas las partículas de la muestra (fibra). Por ultimo realizar un lavado con hexano mientras aun contenga acetona. Para liberar todo el hexano de las muestras secarlas a una temperatura de 105°C por 8 horas, sacarlas de la estufa colocarlas en un desecador para que estas se enfríen, posteriormente pesar y registrar el peso.

Cálculos

$$\% \text{ Fibra} = \frac{(\text{Peso Crisol} + \text{Fibra} - \text{Peso del crisol})}{\text{Peso de la Muestra Seca}} \times 100$$

PROCESO DE TERMO-HIDRÓLISIS

Para el estudio del proceso de hidrolisis se utilizaron 100 g de material vegetal cortado en tamaños aproximados de 10x5x1 cm, y se colocaron en una olla de presión junto con 500 ml de agua destilada. Se consideraron dos factores en tres niveles, como se describe en la Cuadro 2.

Cuadro 2. Valores de factores y sus respectivos niveles para ser considerados en el diseño experimental de termo-hidrólisis de *Dasyilirion* sp.

Factor	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
<i>Temperatura</i>	40	80	120
<i>Tiempo</i>	15	30	60

DISEÑO EXPERIMENTAL

Para el diseño experimental se desarrollaron dos diseños Factoriales 4^3 y 3^2 , considerando los factores de tamaño-tiempo, y tiempo-temperatura, respectivamente. Las corridas diseñadas se muestran en el Cuadro 3 y Cuadro 4.

Cuadro 3. Orden experimental de combinaciones de factores tamaño y tiempo de cocción a 40°C, y sus respectivos niveles para el proceso de termo-hidrólisis de *Dasyilirion* sp.

Orden	Tamaño	Tiempo
1	grande	30
2	grande	120
3	Chica	0
4	Chica	30
5	Chica	30
6	chica	120
7	mediana	120
8	grande	60
9	mediana	60
10	mediana	120
11	mediana	0
12	mediana	0
13	chica	60
14	mediana	60
15	grande	0
16	chica	60

17	grande	30
18	mediana	30
19	chica	0
20	grande	120
21	grande	60
22	mediana	30
23	grande	0
24	chica	120

Cuadro 4. Orden experimental de combinaciones de factores tiempo y temperatura, y sus respectivos niveles para el proceso de termo-hidrólisis de piñas grandes de *Dasyilirion* sp.

<i>Orden</i>	<i>Temperatura</i>	<i>Tiempo</i>
1	40	15
2	40	30
3	40	60
4	40	15
5	40	30
6	40	60
7	40	15
8	40	30
9	40	60
10	80	15
11	80	30
12	80	60
13	80	15
14	80	30
15	80	60
16	80	15
17	80	30
18	80	60
19	120	15
20	120	30
21	120	60
22	120	15
23	120	30
24	120	60

25	120	15
26	120	30
27	120	60

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El diseño experimental y los datos fueron procesados con el software estadístico Minitab (versión 17.1.0), donde se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y una prueba de comparación de medias de Tukey ($p < 0.05$). Todos los experimentos fueron realizados por triplicados, y los resultados se representaron como la media de los datos \pm desviación estándar.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización bioquímica de las piñas de sotol

La obtención de la materia prima adecuada es esencial para cualquier proceso alimentario. Es por ello por lo que para la selección de la adecuada piña de *Dasyilirion* sp., se realizó la determinación de pérdida de humedad (cuadro 5) al tenerla en espera para su tratamiento.

Al mantener las piñas a temperatura ambiente hubo una pérdida de humedad, lo que se vio reflejado en el peso. Mientras más grande fue la piña hubo menos pérdida de humedad. Con respecto a porcentajes (Figura 1), la piña grande es la que se ve menos afectada en la pérdida de humedad, debido a que se mantuvo 3 días a temperatura ambiente y solo perdió el 5% de su peso inicial. Otros factores que interfieren en esta pérdida de humedad son el tiempo de exposición al medio y la edad de la piña. La variación de pérdida de humedad entre las piñas de los diferentes tamaños al transcurso de los días se presenta en mayor medida en la piña chica debido a que tienen mayor contacto con el ambiente ya que afecta el centro de la piña por lo que pierde mayor cantidad de agua a diferencia de las más grandes. El factor que interfiere en la pérdida de esto es la exposición al medio ambiente. Solórzano J.M.M et al., 2019 realizaron un estudio en el que hubo variación con respecto al espesor de la piña de sotol.

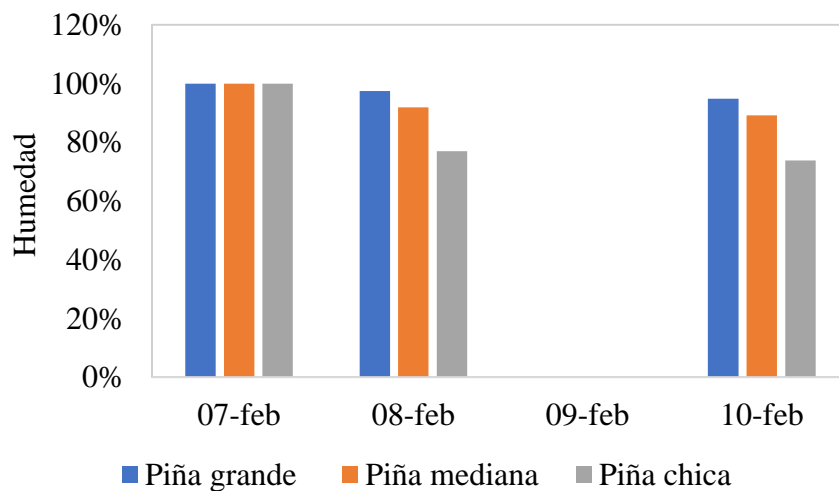


Figura 1. Grafica de porcentaje de humedad por fecha de acopio de piñas de *Dasyilirion* sp.

La caracterización de carbohidratos de las piñas de *Dasyilirion* sp., en los diferentes tamaños recolectados, se muestran en la Cuadro 5. Los grados Brix son el porcentaje de sólidos solubles presentes en alguna sustancia. Este valor nos permite estimar la cantidad de azúcar presente en el fruto o material vegetal. La concentración de grados Brix en las piñas de sotol son mayores en las que tienen dimensiones más grandes. Los azúcares totales se refiere a los glúcidos que tienen sabor dulce, los cuales se clasifican en monosacáridos, disacáridos y polisacáridos. (De la Garza-Toledo 2008). Los azúcares totales son la suma de los azúcares presentes naturalmente en las piñas de *Dasyilirion* sp.

Cuadro 5. Análisis de pesos por fecha de acopio de piñas de *Dasyilirion* sp.

	Diámetro (cm)	07-feb-21 (kg)	08-feb-21 (kg)	10-feb-21 (kg)
<i>Piña grande</i>	49	39.0	38.0	37.0
<i>Piña mediana</i>	33	18.5	17.0	16.5
<i>Piña chica</i>	20	6.5	5.0	4.8

*Por tratarse de la piña completa, no se realizaron repeticiones del análisis.

El mejor tamaño de la piña de *Dasyilirion* sp., es la más grande, ya que cuenta con mayor cantidad de polisacáridos que se pueden convertir en azúcares fermentables (Cuadro 6).

Cuadro 6. Análisis de grados Brix, azúcares totales, y FAD, por tamaño de piñas de *Dasyilirion* sp previo a los tratamientos de hidrólisis.

Muestra	°Bx	Azúcares Totales (mg/g sotol)	Fibra Acido Detergente (%)
<i>Piña grande</i>	4.1±0.6	25.05±6.74	22.0±0.3
<i>Piña mediana</i>	2.5±0.3	23.09±10.17	43.5±1.3
<i>Piña chica</i>	2.1±0.2	22.27±2.14	27.8±7.9

Diseño experimental para determinar el tamaño de piña

En el siguiente Cuadro muestra los análisis de varianza para los azúcares totales, obtenidos de los tratamientos derivados del diseño factorial 4³. Para el proceso de termo hidrólisis de piñas chicas, medianas, y grandes de *Dasyilirion* sp., evaluando los tiempos de residencia a 40°C.

Cuadro 7. Análisis de varianza

<i>Fuente</i>	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
<i>Modelo</i>	11	1882.61	171.147	262.65	0.000
<i>Lineal</i>	5	1673.52	334.704	513.65	0.000
<i>Tamaño</i>	2	390.94	195.471	299.98	0.000
<i>Tiempo</i>	3	1282.58	427.526	656.10	0.000
<i>Interacciones de 2 términos</i>	6	209.09	34.849	53.48	0.000
<i>Tamaño*Tiempo</i>	6	209.09	34.849	53.48	0.000
<i>Error</i>	12	7.82	0.652		
<i>Total</i>	23	1890.43			

La piña tiene un incremento en la liberación de azúcares totales cuando se somete a 60 minutos en cocción. La piña mediana alcanza un punto alto de liberación de azúcares a los 60 y 120 minutos. La piña chica libera más azúcares cuando se somete a cocción a 120 minutos (Figura 2).

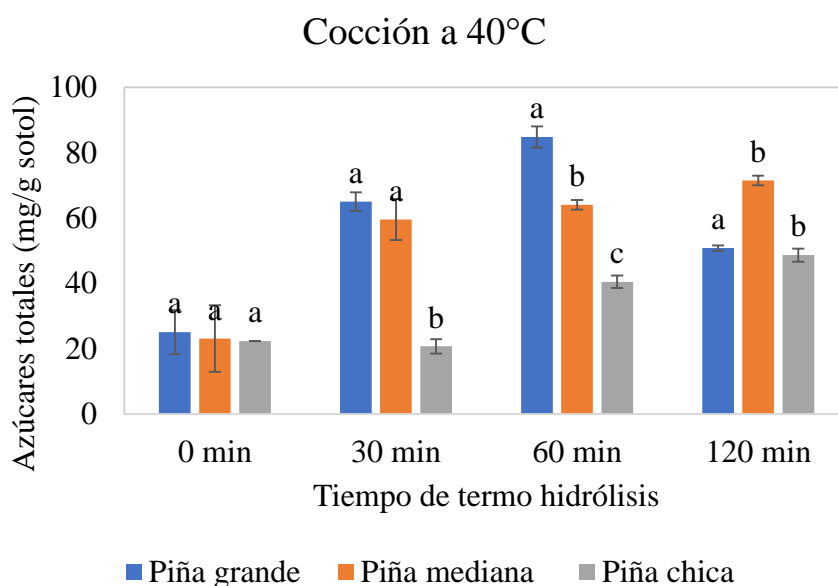


Figura 2. Gráfica de Azúcares totales en piñas de *Dasyllirion* sp., sometidas a diferentes tiempos de cocción a 40°C. Letras minúsculas diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$).

Como se puede observar en la gráfica la piña grande tiene una mayor liberación de azúcares totales en un menor tiempo de cocción a comparación con la piña chica y mediana. Los azúcares monoméricos son glúcidos sencillos que no se descomponen en compuestos más simples. Los monosacáridos aluden a un conjunto de moléculas vitales para el sostenimiento de la vida, porque son agentes estructurales que poseen grandes reservas de energía. (Texco-López, Andrés *et al.*, 2019) La liberación de azúcares Monoméricos es semejante a los azúcares totales, la piña grande presenta una mayor liberación al someterlo a cocción durante 30 minutos (Figura 3). Por otra parte, la piña mediana presenta mayor liberación a los 60 minutos y la chica a los 120 minutos. En la Figura 3 podemos observar que la piña grande libera mayor cantidad de azúcares en un tiempo de cocción menor que la mediana y la chica, de esta manera se ahorra tiempo y gasto de energía. La liberación de azúcares totales se presentan más en las piñas grandes ya que estas contienen más azúcares y al momento de someterla a un tratamiento hidrotérmico favorece a que se desprendan en mayores cantidades esto podría mejorar la producción de alcohol, algo similar se ve en el estudio realizado por (Texco-López, Andrés *et al.*, 2019), los resultados obtenidos en este se destacan en el ahorro de tiempo al ser aplicado un pretratamiento hidrotérmico comparado con el pretratamiento tradicional. Efecto del pretratamiento hidrotérmico (alta presión) e hidrolisis enzimática de cladodios de *opuntia ficus-indica* sobre la liberación de azúcares y su uso potencial en la producción de bioetanol.

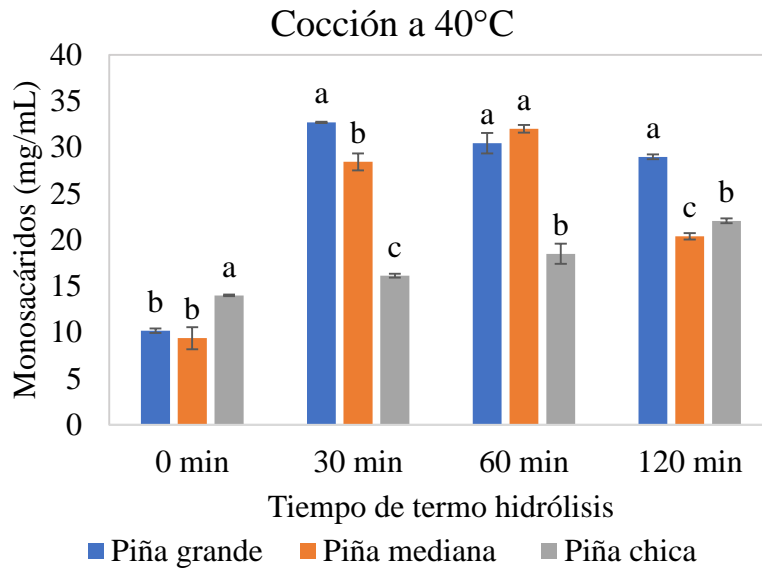


Figura 3. Grafica de Azúcares totales en piñas de *Dasyllirion* sp., sometidas a diferentes tiempos de cocción a 40°C. Letras minúsculas diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$).

La fibra detergente ácida es el residuo que queda después de la digestión del material vegetal con H_2SO_4 y CTAB (Figura 4). Los residuos de fibra predominante con este método son celulosa y lignina, por lo que nos permite evaluar los polisacáridos remanentes para uso fermentativo. No existe diferencia en la cantidad de fibra detergente ácida entre la piña cruda y la cocida, la única que presenta un poco de diferencia es la piña mediana comparando, pero es muy poco. Como se puede observar en la figura 4 la piña que tiene mayor porcentaje de fibra se encuentra entre la piña chica cruda y la mediana cocida. La que tiene menor porcentaje de fibra es la mediana cruda.

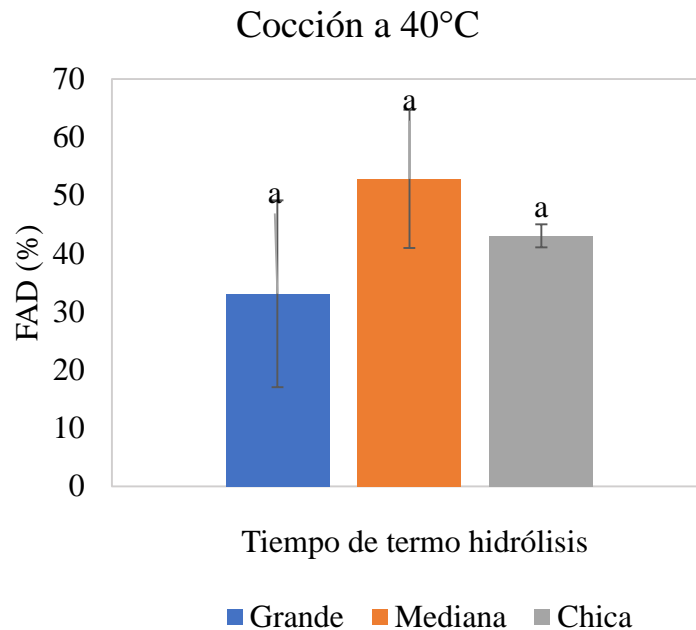


Figura 4. Grafica de porcentaje de fibra acida detergente en piñas de *Dasyilirion* sp., sometidas a diferentes tiempos de cocción a 40°C. Letras minúsculas diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$).

Diseño experimental para determinar el proceso de termo hidrólisis

En esta etapa se utilizó la piña grande tomando en cuenta los resultados de la etapa anterior. Los factores evaluados en los niveles establecidos presentaron valores entre 18 y 35 mg/mL de contenido de monosacáridos totales. El Cuadro 8 muestra los análisis de varianza para los azúcares monoméricos, obtenidos de los tratamientos derivados del diseño factorial 3². Para el proceso de termo-hidrólisis de piñas grandes de *Dasyilirion* sp., los factores tiempo y temperatura en los niveles individuales evaluados, así como su interacción, mostraron efectos significativos ($p < 0.05$).

Cuadro 8. Análisis de varianza

<i>Fuente</i>	<i>GL</i>	<i>SC Ajust.</i>	<i>MC Ajust.</i>	<i>Valor F</i>	<i>Valor p</i>
<i>Modelo</i>	8	317.86	39.733	5.63	0.001
<i>Lineal</i>	4	189.57	47.393	6.71	0.002
<i>Tiempo</i>	2	69.54	34.772	4.93	0.020
<i>Temperatura</i>	2	120.03	60.013	8.50	0.003
<i>Interacciones de 2 términos</i>	4	128.29	32.073	4.54	0.010
<i>Tiempo*Temperatura</i>	4	128.29	32.073	4.54	0.010
<i>Error</i>	18	127.06	7.059		
<i>Total</i>	26	444.93			

Si la piña se somete a una temperatura baja, los monosacáridos no se liberan a su máximo nivel (Figura 5). En cambio, si el tratamiento es a una temperatura alta y un tiempo prolongado para tener la liberación que se necesita, los carbohidratos pueden verse afectados, mostrando diferencia estadística significativa con los tratamientos a 15 y 30 minutos a 120°C. Como se puede observar en la Figura 5, conforme se incrementa el tiempo de cocción de la piña, los monosacáridos disminuyen su valor. Al igual que si la temperatura de tratamiento es alta hay mayor disminución de monosacáridos en la piña. Donde se obtiene la mayor liberación de estos azúcares es una temperatura de 80°C, con el menor tiempo de exposición evaluado. Los monosacáridos se constituyen por grupos aldehídos, una cetona, e hidroxilos.

Las temperaturas pueden efectuar cambios químicos a estos grupos funcionales, provocando su ciclación, isomerización, enolización, deshidratación, oxidación y/o reducción (Arias-Giraldo & López-Velasco, 2019). El efecto de la temperatura sobre los azúcares se relaciona con la presencia de agua en los alimentos, debido a que la formación de especies furfúricas es desfavorable cuando la matriz presenta un contenido considerable de agua, y se torna favorable en condiciones de deshidratación y baja humedad (Arias-Giraldo & López-Velasco, 2019).

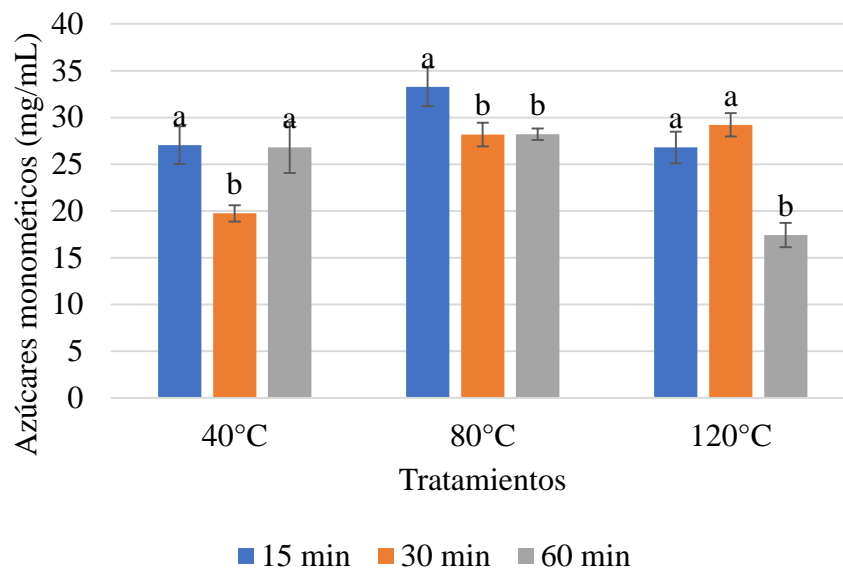


Figura 5. Grafica de azúcares monoméricos en piñas de *Dasyllirion* sp., sometidas a diferentes tiempos de cocción y diferentes temperaturas. Letras minúsculas diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$).

Para el caso de los efectos principales en la liberación de los azúcares monoméricos, los resultados obtenidos se muestran en la Figura 6. Se aprecia que cuando el tiempo de exposición a los tratamientos se incrementa, la acumulación de azúcares disminuye, lo anterior posiblemente por la degradación térmica de los azúcares monoméricos que sufren caramelización, siendo éste un proceso no reversible (Duarte-Casar, R. (2022).

Para el caso del efecto de la temperatura, el mejor resultado se obtuvo con una temperatura media de 80°C, debido a que temperaturas mayores a 160°C sufren de desnaturalización por pirólisis (Arias-Giraldo, S., & López-Velasco, D. M. (2019). El efecto de la temperatura sobre los azúcares también se relaciona con la presencia de agua en los alimentos, puesto que la formación de especies furfúricas es desfavorable cuando la matriz presenta un contenido considerable de agua, y se torna favorable en condiciones de deshidratación y baja humedad (Arias-Giraldo, S., & López-Velasco, D. M. (2019).

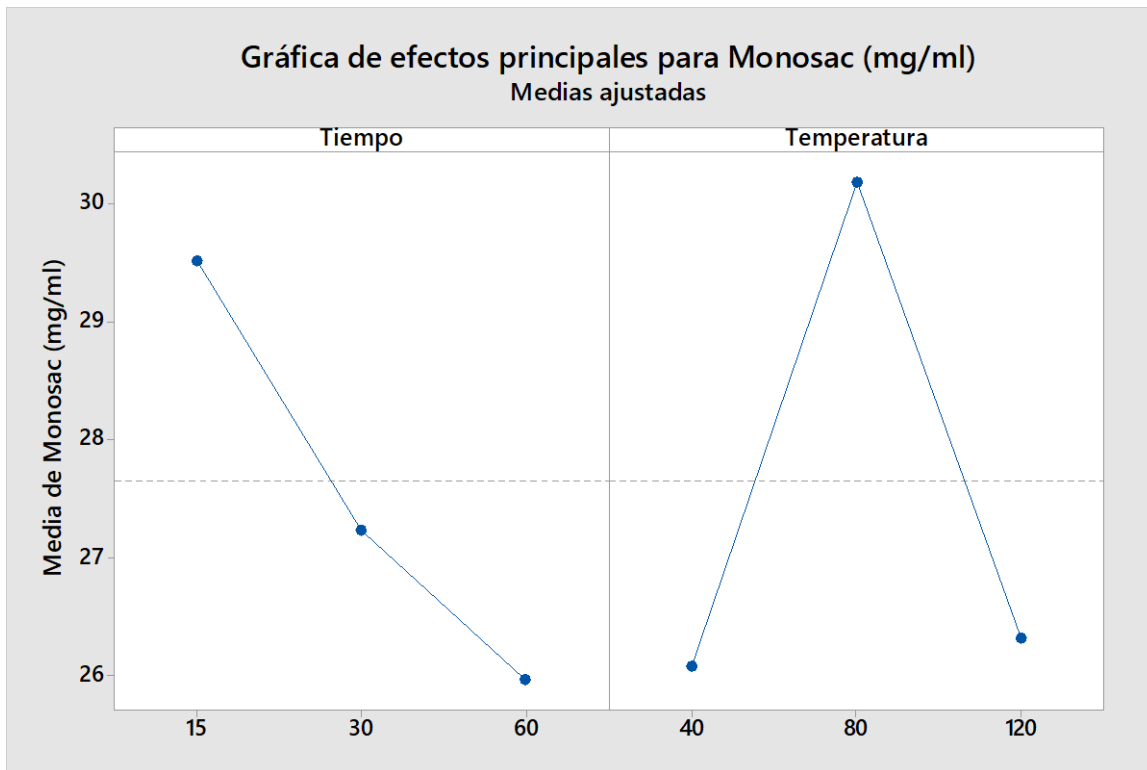


Figura 6. Grafica de efectos principales para la cuantificación de azúcares monoméricos en piñas de *Dasyilirion* sp., sometidas a diferentes tratamientos.

Estimación de las condiciones óptimas del proceso hidro-térmico

El modelo estimado por el análisis Factorial ($R^2 = 88.76\%$) logró determinar, que los valores de mayor efecto para la liberación de azúcares monoméricos para el proceso de termo-hidrólisis son un tiempo de 15 minutos, y una temperatura de 80°C, con un valor estimado de azúcares monoméricos de 33.45 mg/ml (Figura 7).

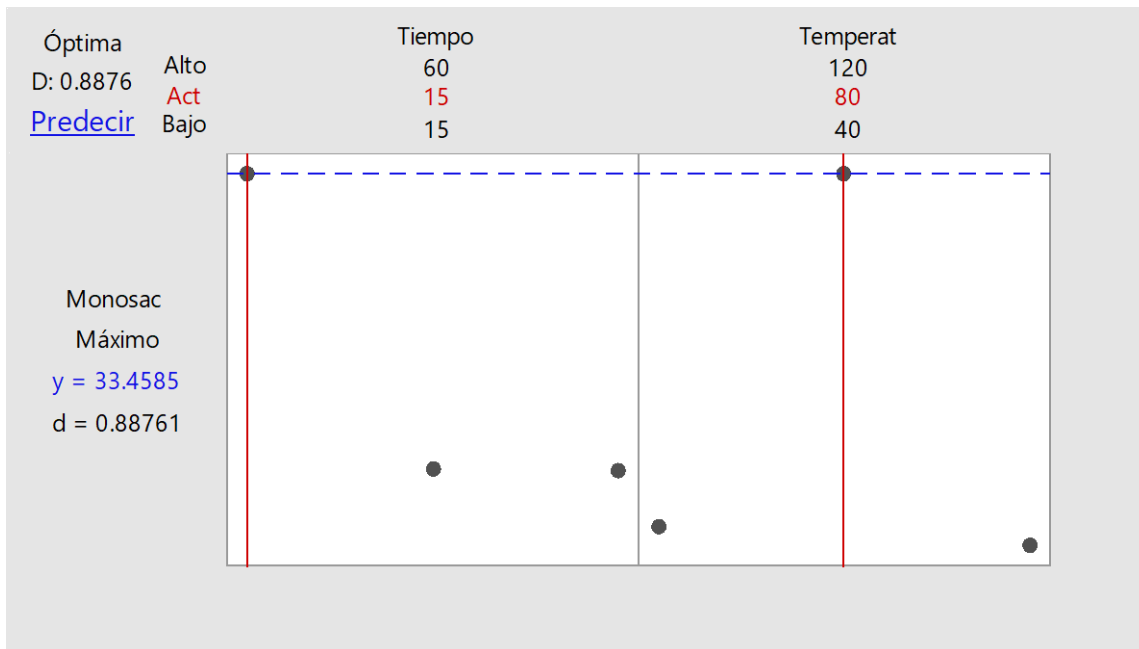


Figura 7. Grafica de optimización del proceso de cocción de piñas de *Dasyilirion* sp., sometidas a diferentes tiempos y temperaturas de cocción.

CONCLUSIONES

El tamaño de la piña de *Dasyilirion* sp., afecta la pérdida de humedad al paso de los días de la gima, siendo las más pequeñas (<20 cm de diámetro) las que se deshidratan más fácilmente. Las piñas de sotol grandes (>35 cm de diámetro) mantienen más tiempo el peso inicial, haciéndolas aptas para la producción de sotol.

Las piñas que tienen mayor cantidad de azúcares antes y después de someterse a un tratamiento hidrotérmico (piña cruda) son las grandes (>35 cm de diámetro).

El tratamiento térmico más efectivo es a 80°C durante 15 minutos, para piñas de *Dasyilirion* sp., cortadas en trozos de 10x5x1 cm, debido a que presentan mayor liberación de azúcares monoméricos, lo que favorecerá la producción de la bebida alcohólica sotol.

REFERENCIAS

Acosta, S. (1959). Propagación vegetativa de leñosas y forestales.

Editorial LA HACIENDA. Barcelona España. 36p.

Arias-Giraldo, S., & López-Velasco, D. M. (2019). Reacciones químicas de los azúcares simples empleados en la industria alimentaria. *Lámpsakos*, (22), 123-135.

Álvarez, C., Reyes-Sosa, F. M. and Díez, B. (2016). Enzymatic hydrolysis of biomass from wood. *Microbial biotechnology*, 9(2): 149-156.

Bautista-Justo, M., García-Oropeza, L., Corona, J. B., & Parra-Negrete, L. A. (2001). El Agave tequilana Weber y la producción de tequila. *Acta Universitaria*, 11(2), 26-34.

Barbosa, L. A. L. (2005). El sotol en Coahuila, potencialidades. *Bebidas y regiones: historia e impacto de la cultura etílica en México*, 63.

Becerra-López, J.; Rosales-Serna, R.; Ehsan, M.; Becerra-López, J. S.; Czaja, A.; Estrada-Rodríguez, J. & Domínguez-Martínez, P. (2020). Climatic Change and Habitat Availability for Three Sotol Species in Mexico: A Vision towards Their Sustainable Use. *Sustainability*, 12(8), 3455.

Bogler, D. J. (1994). *Taxonomía y filogenia de Dasylirion (Nolinaceae)* (Tesis doctoral, Universidad de Texas en Austin).

Bogler, D. J. (1998). Three new species of Dasylirion (Nolinaceae) from Mexico and a clarification of the D. longissimum complex. *Brittonia*, 50(1), 71-86.

Boom, R. M., Van Straten, G., Van Boxtel, A. J. B., & Esveld, D. C. (2009). Multi objective optimization to improve the product range of baking systems. *Journal of Food Process Engineering*, 32(5), 709-729.

Campos-González, J. A. (2014). El tramado de la cestería tarahumara. Identidad, construcción y disposición de un objeto artesanal. *Universidad Autónoma de Ciudad Juárez*.

Carmen, H. P., Valero Gracia, M. S., & Castro López, M. Efecto de los prebióticos en la homeostasis del tracto gastrointestinal.

Carro, M.D.; Ranilla, M.J., Tejido, M.L. Utilización de aditivos en la alimentación del ganado ovino y caprino. Sitio argentino de producción 3: 26-37. (2006).

Castillo, A. M., & Tristán, J. S. S. (2003). CONTRIBUCIÓN AL CONOCIMIENTO Y DISTRIBUCIÓN DE LAS ESPECIES DE *Dasyilirion* spp.(SOTOL) EN CHIHUAHUA, MÉXICO. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 28(93), 25-40.

Chagua Rodríguez, P., Malpartida Yapias, R. J., & Ruíz Rodríguez, A. (2020). Tiempo de pasteurización y su respuesta en las características químicas y de capacidad antioxidante de aguamiel de *Agave americana* L. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 22(1), 45-57.

Chávez García, M.G. (2020). Thermo-hydrolysis for the reléase of monomeric sugars in agricultural. *BIO CIENCIAS*,

<http://revistabiociencias.uan.mx/index.php/BIOCIENCIAS/article/view/946>.

Collado Yurrita, L., San Mauro Martín, I., Calle-Purón, M. E., & Hernández Cabria, M. (2014). Eficacia de la ingesta de inulina sobre los indicadores del estreñimiento crónico; un meta-análisis de ensayos clínicos aleatorizados controlados. *Nutrición Hospitalaria*, 30(2), 244-252.

De La Garza-Toledo, H.; Martínez, M.; Lara, L.; Rodríguez-Herrera, R.; Rodríguez-Martínez, J.; Aguilar, C.N. Production of a Mexican Alcoholic Beverage: Sotol. *Res. J. Biol. Sci.* 2008, 3, 566–571.

Duarte-Casar, R. (2022). Caramelización para Cocineros. *Revista de Gastronomía y Cocina*, 1(1).

Godínez-Hernández, C. I., Aguirre-Rivera, J. R., Juárez-Flores, B. I., Ortiz-Pérez, M. D., & Becerra-Jiménez, J. (2016). Extracción y caracterización de fructanos de *Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 22(1), 59-72.

González, M. F. (2012). Las zonas áridas y semiáridas de México y su vegetación. *Secretaría de medio ambiente y recursos naturales. Instituto Nacional de ecología*.

- Granados-Sánchez, D., Sánchez-González, A., Granados Victorino, R. L., & Borja de la Rosa, A. (2011). Ecología de la vegetación del Desierto Chihuahuense. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 17(SPE), 111-130.
- Herrera, T. (2007). Los hongos en la cultura mexicana: bebidas y alimentos tradicionales fermentados, hongos alucinógenos. *Etnobiología*, 5(1), 108-116.
- Lara, L., & Fernandez, L. (2006). *Hidrólisis enzimática de piñas de sotol para incrementar la concentración de azúcar aplicando diferentes tratamientos* (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro).
- 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(11), 1558-1561.
- López Barbosa, L. A. (2005). El sotol en Coahuila, potencialidades y limitaciones. *Bebidas y regiones, historia e impacto de la cultura etílica en México*. Plaza y Valdés, SA México, 63-84.
- Madrid Solórzano, J. M. (2018). Propuesta para el desarrollo de nuevos productos a partir del Sotol. *Instituto de Arquitectura Diseño y Arte*.
- Madrid Solórzano, J. M. (2021). Análisis del ciclo de inventario para la elaboración de la bebida Sotol. *Instituto de Arquitectura Diseño y Arte*.
- Magrab, E. B., Gupta, S. K., McCluskey, F. P., & Sandborn, P. (2009). *Integrated product and process design and development: the product realization process*. CRC Press.
- Morales, O. M. (1997). Caracterización general del proceso de producción de la Tequilera Corralejo, SA de CV, ubicada en el municipio de Pénjamo, Gto.
- Pastrana, E. A. (2019). Denominación de origen. *Cuadernos Fronterizos*, (8).
- Pinales-Quero, I., González-Vázquez, V. M., Castillo-Reyes, F., Aguilar, C. N., Reyes-Valdés, M. H., & Rodríguez-Herrera, R. (2017). Genetic diversity of sotol (*Dasyilirion cedrosanum Trel.*) at different elevations. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 4(11), 201-211.

Quiroz-Márquez, J., & Gómez-Rodríguez, J. (1999). La producción de mezcal en Oaxaca. *Bebidas Mexicanas*, 8, 15-20.

Orozco-Sifuentes, M. M., Mendoza-Rodríguez, D. V., Hernández-Godínez, F., Martínez, O., Villarreal-Quintanilla, J. Á., & Reyes-Valdés, M. H. (2019). Nuevos iniciadores matK para código de barras de la vida en especies del género *Dasyilirion*. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 10(6), 1313-1324.

Reyes-Valdés, M. H., Benavides-Mendoza, A., Ramírez-Rodríguez, H., & Villarreal-Quintanilla, J. Á. (2013). Biología e importancia del sotol (*Dasyilirion* spp). Parte II: Ecofisiología, usos e interrogantes. *Planta*, 8(17), 16-20.

Reyes-Valdés, M. H., Palacios, R., Rivas-Martínez, E. N., Robledo-Olivo, A., Antonio-Bautista, A., Valdés-Dávila, C. M., ... & Benavides-Mendoza, A. (2019). The sustainability of mexican traditional beverage sotol: ecological, historical, and technical issues. In *Processing and Sustainability of Beverages* (pp. 103-137). Woodhead Publishing.

Ríos-Saucedo, J.; Hernández-Solís, J.; Jaquéz- Velásquez, L.; Hernández -López, L.; Domínguez-Martínez, P. y Santana-Espinoza, S. 2020. Concentración de grados brix en poblaciones naturales de sotol (*Dasyilirion* spp.) en Durango, México. *Ciencia e Innovación. Revista Científica Semestral. Investigación, Desarrollo e Innovación* Vol. 3 Núm. 2 / Julio - diciembre, 2020 ISSN-2594- 150X

Rivera, E. C. O., Chávez, G. E., & Sotelo, F. V. (2004). Producción y comercialización de licores de sotol (*Dasyilirion cedrosanum* Trel.) en Durango, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 29(95), 83-89.

Rodríguez García, J., 2020. Estadística del Consejo Mexicano del Sotol A.C.

Romero, E., Fernández, J., Noche, L., Tamara, L., & Mendoza, R. HONGOS EN LA INDUSTRIA DE LOS ALIMENTOS.

Rzedowski, J. (1965). Relaciones geográficas y posibles orígenes de la flora de México. *Botanical Sciences*, (29), 121-177.

Sarukhán, J., Koleff, P., Carabias, J., Soberón, J., Dirzo, R., Llorente-Bousquets, J., ... & De la Maza, J. (2009). *Capital natural de México, Síntesis: Conocimiento actual, evaluación y perspectivas de sustentabilidad* (No. 333.951672 COM SIN. CIMMYT.).

Saucedo, J. C. R., Solis, J. J. H., Velasquez, L. E. J., Hernandez-Lopez, L. J., Martinez, P. A. D., & Espinoza, S. S. CONCENTRACIÓN DE GRADOS BRIX EN POBLACIONES NATURALES DE SOTOL (*Dasyliirion* SPP.) EN DURANGO, MÉXICO.

Sobolik, K. D. (1991). *Dieta prehistórica y subsistencia en el pecos inferior reflejado en coprolitos de Baker Cave, condado de Val Verde, Texas*. Laboratorio de Investigación Arqueológica de Texas, Universidad de Texas en Austin.

Solano, G.; Cobos, V.; Fernández, J.L.; Ramírez R; Cabrales, D. Elaboración y evaluación de subproductos industriales para la alimentación animal. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, Tomo 35, No. 4. ISSN: 0034-7485 (2001).

Suárez-Machín, C., Garrido-Carralero, N. A., & Guevara-Rodríguez, C. A. (2016). Levadura *Saccharomyces cerevisiae* y la producción de alcohol. Revisión bibliográfica. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 50(1), 20-28.

Trelease, W. (1911). El grupo del desierto Nolineae. *Actas de la Sociedad Filosófica Americana*, 404-443.

Trelease, W. (2016). El Jardín Botánico de Missouri. En *Museum Origins* (pp. 283-288). Routledge.

Villaseñor, J. L. (2016). Lista de verificación de las plantas vasculares nativas de México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 87(3), 559-902.

Venegas Montes, C., 2020. Consejo Certificador del Sotol.

Zhu, J.Y., and Pan, X.J. (2010) Pretratamiento de biomasa leñosa para la producción de etanol celulósico: evaluación de tecnología y consumo de energía. *Bioresour Technol*, **100**: 4992–5002.