

**Título del Proyecto de Investigación  
al que corresponde el Reporte Técnico:**

Análisis del ciclo de inventario para la elaboración de la bebida Sotol

**Tipo de financiamiento**

Sin financiamiento

Fecha de Inicio: 01/mayo/2019  
Fecha de Término: 31/diciembre/2021

**Tipo de Reporte**

Parcial

Final

**Autor (es) del reporte técnico:**

Juan Manuel Madrid Solórzano  
Ludovico Soto Nogueira

# Perfil ambiental del sotol artesanal

## Resumen

El destilado sotol es producido en el norte de México. La producción anual estimada de sotol es de unos 5200 hL al año. Esta industria crece al 5% anual. El Consejo Mexicano del Sotol (CMS) y el Consejo de Certificación del Sotol (CCS) son organismos reguladores dedicados a vigilar que los productores de sotol cumplan con la Norma Oficial Mexicana NOM-159-SCFI-2004. Actualmente, estos organismos reguladores tratan de mejorar el proceso de producción de sotol y los lineamientos de buenas prácticas para contribuir a generar una producción más limpia. Este trabajo reporta un estudio de caso de la producción artesanal de sotol en el estado de Chihuahua en México. Se utilizó la técnica de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para calcular el desempeño del impacto ambiental del alcohol destilado de sotol, con el fin de identificar los puntos críticos de los sistemas y proponer intervenciones de mejora. Se utilizó el software SimaPro v.8.5.2® para el ACV, aplicando el método CML-IA baseline V3.05 / EU25 para seleccionar las categorías de impacto ambiental. El sistema estudiado incluye las etapas de cosecha, cocción, molienda, fermentación, destilación, embotellado y envasado. Los resultados indican que cada una de las etapas para la elaboración del sotol afecta al ecosistema marino. Las etapas de molienda y embotellado son las de mayor impacto ambiental. Una botella de 750 ml de sotol artesanal provoca 5,92 kg de CO<sub>2</sub> eq.

## Abstract

Sotol is a Mexican distilled spirit of Mexican produced in Northern Mexico. The estimated annual production of sotol is at around 5200 hL per year. This industry grows at an average rate of five percent per year. The Mexican Sotol Council (MSC) and the Sotol Certificate Council (SCC) are regulatory bodies entities dedicated to monitoring that sotol producers must comply with the Official Mexican Standard NOM-159-SCFI-2004. Currently, those regulatory bodies entities try to improve the sotol production process and good practice guidelines to contribute generate a to cleaner production. This paper reports a case study

of artisanal sotol production in Chihuahua state in Mexico. Life Cycle Analysis Assessment (LCA) technique was used to compute the sotol is distilled spirit environmental impact performance to identify systems' hotspots and propose improvement interventions. SimaPro software v.8.5.2® is used for LCA, applying CML-IA baseline V3.05 / EU25 method to evaluate and select environmental impact categories. The system boundary included the stages of harvest, cooking, milling, fermentation, distillation, bottling, and packaging. Findings indicate that each of the stages required for sotol beverage processing significantly affects the marine ecosystem. The milling and bottling stages are the highest environmental impact. A 750 mL bottle of artisan sotol causes 5.92 kg CO<sub>2</sub> eq, based on the empirical data.

### **Palabras clave**

ACV; producción de sotol; impacto ambiental; licor; Chihuahua.

### **Usuarios potenciales (del proyecto de investigación)**

Los fabricantes de casas de producción de sotol deberían centrarse en reducir el consumo de energía causado por el transporte de los insumos y los equipos para la molienda.

### **Agradecimientos**

Agradecemos a la casa productora de sotol 5 Tragos por proporcionar los datos empíricos para el desarrollo del proyecto.

## **1. Introducción y Antecedentes**

El estado de Chihuahua se localiza en la frontera Norte de México y colinda con el Sur de Estados Unidos de América y en México con los estados de Durango, Coahuila de Zaragoza, Sonora y Sinaloa. La superficie del estado representa el 12.6% del total de México, con una superficie de 247,200 Km<sup>2</sup> (Ortega-Ochoa et al., 2008). En esta extensión predominan los ecosistemas de matorral desértico y pastizal, ambos cubren alrededor del 65% del área total del estado. Asimismo, en el 75% de su superficie predomina el clima seco semiárido y árido con precipitaciones que oscilan entre los 300 y 500 milímetros

anuales (Alcalá de Jesús et al., 2014; Córdova Bojórquez and Romo Aguilar, 2014; Reyes-Gómez and Núñez-López, 2014).

Bajo estos ecosistemas, crece una planta llamada sotol del género *Dasyliirion*. Esta especie se desarrolla a temperaturas extremas que pueden oscilar en invierno desde los -14 °C hasta los 30°C; en tiempo de veranos son temperaturas de 10 °C a 42 °C aproximadamente (Ortega-S et al., 2013). Los pobladores nativos de esta región supieron sacar provecho de dicha planta para satisfacer distintas necesidades, por ejemplo, como fuente de alimento (Ladyman, 2004; Riley, 2008) y fabricación de utensilios domésticos (Becerra-López et al., 2020). Actualmente es usado mayormente en la producción artesanal de la bebida alcohólica denominada sotol. En el año 2002 este producto adquirió la Denominación de Origen (DO), que es compartida entre los estados de Chihuahua, Coahuila y Durango (Rodríguez García, 2020).

La producción artesanal de sotol inicia con la búsqueda y corte de la planta en su hábitat natural o silvestre por dos días; se aprovecha únicamente el tallo, también conocida como piña, que es la materia prima. Después, se continúa con el cocimiento de estas en hornos rudimentarios a nivel del suelo y es sometida a un proceso de molienda para generar una pasta; posteriormente, se agrega agua a esa pasta de piña de sotol molida y pasa al proceso de fermentación. El tratamiento finaliza con un doble destilado para obtener un producto final a 45% Alc. Vol. que es diluido a 40% Alc. Vol. con agua destilada para obtener una presentación comercial llamado sotol blanco o joven. El proceso de producción se rige por la norma NOM-159-SCFI-2004 (Venegas Montes, 2020). También, existen las presentaciones de sotol reposado y añejo, almacenados en barricas de roble americano oscuro desde cuatro hasta más de doce meses, respectivamente.

Actualmente existen dos asociaciones que buscan ser el organismo certificador y regulador de la producción y comercialización de este producto; el primero, es el Consejo Mexicano del Sotol A.C. (CMS) instituido en el año de 2006 y, el segundo, el Consejo Certificador del Sotol (CCS) constituido en el 2018. De acuerdo con estimaciones de ambos consejos, se producen 500,000 litros anuales de sotol listo para su venta bajo condiciones favorables en el mercado de consumo. Se considera que esta industria presenta un crecimiento del 5% anual.

De acuerdo con esos dos organismos reguladores, el 70% de la producción total de sotol es generada en el estado de Chihuahua. El CMS estima que en la región de la DO existe alrededor de 250 productores de sotol. La elaboración de esta bebida destilada es mayormente artesanal por lo que existen varias familias que habitan en estas regiones de incrementar sus ingresos monetarios a través de la producción o comercialización de esta bebida (Rodríguez García, 2020).

En la literatura que aborda la elaboración de sotol, se observa que la comunidad académica ha abordado el estudio del sotol desde dos disciplinas de estudio. En el área de Agricultura y Ecología, ha sido de suma importancia desarrollar tratamientos pregerminativo para la producción de plántulas de *Dasyliirion* bajo condiciones de laboratorio-invierno con el propósito de reforestar áreas de donde se ha perdido poblaciones naturales de la especie; además, se conoce que la aplicación de sustratos y fertilización química a plántulas de sotol no ayudan a mejorar su desarrollo (Arce-González et al., 2007; Reyes Silva et al., 2013; Sierra-Tristán et al., 2008); también, se han desarrollado modelos de regresión lineal para estimar los kilogramos a conseguir de una cosecha de plantas (Olivas-García et al., 2013). Sin embargo, falta investigar sobre la biología de crecimiento de la especie en su hábitat natural, la implementación de plantaciones comerciales e identificar las especies de *Dasyliirion* idóneas para una plantación comercial y que éstas sean reglamentadas su uso en la NOM-159-SCFI-2004. Reyes-Valdés et al. (2019) sugieren que las especies *Dasyliirion cedrosanum*, *Dasyliirion duranguensis*, *Dasyliirion wheeleri* y *Dasyliirion leiophyllum* son idóneos para producir la bebida. En el área de Biotecnología (Química) son tres líneas de investigación que han sido de mayor interés sobre la producción de la bebida; estas son, regulación de la calidad del producto, el impacto sobre la salud de los consumidores y la agroindustria.

En la primera, el interés ha sido en determinar las levaduras que actúan en el proceso de fermentación con dos propósitos, elevar la concentración de azúcares y de etanol por adhesión de enzimas y determinar cuáles influyen en manifestar mejores propiedades organolépticas; así como también, los beneficios del uso de tecnología de punta en las etapas de cocimiento, molienda y destilación para el control de calidad del producto (Cárdenas-Díaz et al., 2009; Gardea et al., 2012; Lorena et al., 2009). Con respecto a los efectos sobre la salud, ha sido de interés determinar la calidad de distintas marcas de sotol

a partir de caracterizar los compuestos volátiles y de metales que resultan de la etapa de destilación, de igual manera, la concentración de carbamato de etilo (De León-Rodríguez et al., 2008; Díaz de León et al., 2017; Lachenmeier et al., 2009; Trujillo-Orozco et al., 2011).

Por último, en lo agroindustrial, existe interés por diversificar el aprovechamiento de la especie *Dasyilirion*. Se ha propuesto desarrollar harina a partir de las semillas de la planta, la fabricación de probióticos y sustitutos de azúcar a partir de los frútanos del tallo del sotol (Orozco-sifuentes et al., 2019). El bagazo del sotol, desperdicio que se genera en la etapa de destilación, ha sido sometido a experimentación para ser usado como material para desarrollar fermentación en estado sólido, aunque el resultado fue negativo (Flores-Gallegos et al., 2019; Flores-Maltos et al., 2014).

Desde un enfoque del impacto ecológico en la elaboración del sotol, acorde con la revisión de la literatura, existe una preocupación por reforestar las áreas de donde los productores de sotol han cosechado la especie *Dasyilirion* por varias décadas y, asimismo, implementar plantaciones comerciales de la especie por dos motivos: un aumento del consumo del sotol en el mercado interno y uno externo, este último se origina de manera incipiente en los Estados Unidos de Norteamérica y, como consecuencia, se ha tenido un aumento de personas de la región interesadas en diversificar sus ingresos monetarios a partir de la compra del destilado a productores de sotol y su comercialización con una marca comercial propia. Esta última información se puede ver reflejado en la cantidad de productores y comercializadores registrados en el CSS, 12 y 21 respectivamente (Venegas Montes, 2020).

En la Figura 1 se muestra un Diagrama de Ven en donde se presentan los aportes de las disciplinas de estudio antes mencionadas con relación al sotol, así como sugerencias para futuras investigaciones; esto último, resaltado en el texto con **negrita**. Asimismo, se presenta el porcentaje en el que han sido abordados cada una de estas líneas de investigación en los textos analizados; por ejemplo, agroindustria y salud, representan el 9% y el 11% de reportes científicos, respectivamente. Acorde con las dos asociaciones CMS y CCS, la producción de sotol artesanal tiene un impacto económico y social sobre los pobladores pertenecientes a la DO, es por ello el enorme interés en consolidar dos líneas de investigación, la producción de plántulas y regular la calidad del producto, ya que ambos

suman el 80% de las investigaciones hechas. Sin embargo, no se encontraron evidencias de trabajos en los que se analice la huella de carbono en la elaboración de la bebida de sotol, con el fin de crear propuestas para mitigar sus efectos negativos en la salud humana y en el medio ambiente; por lo tanto, una evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero que se emite durante el proceso de elaboración del sotol soportaría a estas líneas de investigación para identificar mejoras en el proceso productivo.

## **2. Planteamiento y marco teórico**

Una de las herramientas usadas para diagnosticar la afectación al medio ambiente en procesos de elaboración de bebidas alcohólicas es el Análisis del Ciclo de Vida (ACV) (Baiano, 2021; Leinonen et al., 2018), la cual es una metodología rígida por normas internacionales estandarizadas, tales como la ISO 14011:2004, ISO 14021, ISO/TR 14047, ISO/TE 14048, ISO/TR 14049 Y ISO 14050, entre otras (Jannah et al., 2020; Page, 2017; Patón-Romero et al., 2019). En la literatura, es posible encontrar varios ejemplos de aplicación de un ACV en la industria vitivinícola, cervecera y de licores destilados. En los vinos, se ha calculado el impacto ambiental del consumo y producción por botella (Amienyo et al., 2014) en presentaciones de 0.75 L y 1 L tanto para vino blanco y rojo (Ferrara and De Feo, 2018), fabricados por pequeños productores de distintas calidades de vino (Iannone et al., 2016), usando uvas orgánicas y no orgánicas (Martins et al., 2018; Ponstein et al., 2019); inclusive, el estudio del perfil ambiental del sector vinícola tiene alcance en procesos más específicos de su proceso de elaboración como son, evaluar el impacto ambiental del proceso de envejecimiento del vino en barriles por un período de tiempo (García-Alcaraz et al., 2020b) y comparación de técnicas usadas para su limpieza y desinfección de barriles (García-Alcaraz et al., 2020a).

Respecto al ACV de la producción de cerveza, se ha identificado aquellas etapas del sistema de producción que más energía y agua consumen, las emisiones que más contribuyen al calentamiento global y la generación de residuos (Koroneos et al., 2005; Olajire, 2020); así como, evaluar el impacto ambiental de fábricas cerveceras de distintos tamaños y el uso de distintos materiales para el envase primario, como son, el vidrio y el tereftalato de polietileno (Cimini and Moresi, 2018).

Con respecto a bebidas alcohólicas destiladas, se ha calculado la huella de carbono tanto de la producción de una botella de ginebra clásica de 700 ml como el de la compañía completa (Leivas et al., 2019); también, se ha calculado las emisiones de CO<sub>2</sub> de una destilaría de coñac (Becker et al., 2020) y una de whisky (Eriksson et al., 2016).

El vodka es otra bebida evaluada con ACV bajo tres tipos de escenarios; primero, cuando se produce a partir de materia prima caducada adquirida localmente para su producción a escala artesanal; segundo, cuando se usa el trigo de origen local como materia prima también para una elaboración artesanal y, por último, cuando es usado el trigo de origen local como materia prima pero para su producción en gran volumen y este es enviado al consumo del mercado estadounidense (Bhattacharyya et al., 2019). Finalmente, con respecto a una bebida tradicional en México, se ha evaluado el impacto ambiental del proceso de elaboración artesanal del mezcal (Maciel Martínez et al., 2020).

Con base a lo antes descrito, se evidencia que el ACV en la elaboración del vino es el que más ha sido examinado, enseguida de la cerveza y en menor cantidad los licores destilados; en esta última clasificación, México cuenta con una amplia variedad de bebidas destiladas en las que se desconocen sus principales retos ambientales; por lo anterior, es necesario aplicar ACV en varias de estas porque presentan entre si distintos contextos geográficos, volumen de fabricación, tipos de materia prima y sistema de producción. Con el propósito de llegar a un nivel de profundidad de análisis como el que se ha realizado en la industria vinícola o cervecera, se considera de gran importancia el conocer el perfil ambiental de las bebidas que se producen en las distintas regiones de México, como es el sotol. Por lo tanto, este trabajo reporta un ACV de sotol que evalúe el impacto ambiental de su proceso de producción artesanal.

### **3. Objetivos (general y específicos)**

El objetivo de este proyecto es determinar el impacto ambiental del proceso de producción de la bebida sotol, desde la extracción de la materia prima hasta que la bebida está lista para su venta para identificar oportunidades de mejora del proceso productivo mediante un análisis de ciclo de vida.

Los objetivos específicos de este trabajo son los siguientes:

- a) Realizar una revisión de literatura para conocer el conocimiento acumulado sobre el proceso de elaboración del sotol.
- b) Revisar literatura sobre ACV desarrollados en productos similares.
- c) Caracterizar el proceso de producción artesanal e industrial del sotol.
- d) Determinar las categorías de impacto ambiental a evaluar en el ACV.
- e) Identificar áreas de mejora del sistema de producción bajo estudio.

#### **4. Metodología**

La metodología del ACV aplicar en la elaboración de la bebida sotol, ésta se apega a las guías de las normas del organismo International Organization for Standardization (ISO) y consta de varios pasos que a continuación se describen (ISO 14040, 2006; ISO 14044, 2006).

Primero, definición de objetivos y alcance, consiste en las siguientes actividades: a) describir el sistema bajo estudio, b) establecer la unidad funcional (UF), c) determinar la metodología de evaluación del impacto y la selección de las categorías de impacto, d) establecer el período de tiempo, y e) origen geográfico.

Segundo, análisis de inventario, que consiste en analizar cada uno de los flujos de entrada y salida del proceso de producción como son: consumo de agua y energía, en kilogramos; así como también, determinar cuáles son los pasos del proceso de producción que pueden ser excluidos por existir suficiente literatura. En este paso es necesario desarrollar un cuestionario para el levantamiento de datos y adaptado a la Unidad de Función (UF). Frecuentemente, los datos que son considerados para el inventario del ciclo de vida de productos agrícolas son desde levantar la cosecha de la materia prima hasta el empaque del producto, listo para su venta, llamado en inglés como “Cradle to Grave” (Vázquez-Rowe et al., 2017).

Tercero, evaluación de impacto, consiste en categorizar y valorar cada resultado de las entradas y salidas del inventario de ciclo de vida para conocer su impacto al medio ambiente. Es en este paso en donde se identifican cuáles son los procesos del sistema bajo estudio que más contribuyen al daño ambiental; asimismo, determinar las sustancias que más impactan por categoría, como son: dióxido de sulfuro (SO<sub>2</sub>), óxido de nitrógeno (NO),

compuestos orgánicos volátiles sin metano (VOC), plomo (Pb), metales, hollín, entre otros. Establecer las categorías de impacto ambiental será a partir de comparar estudios previos en la revisión de literatura y se seleccionarán aquellos que hayan sido evaluados con mayor frecuencia.

Por último, presentación e implementación de los resultados, se interpretan los resultados del ACV. Por ejemplo, se debe realizar un análisis de sensibilidad que ayuda a analizar qué tan sensible es la salida, por los cambios en una entrada mientras se mantienen constantes las otras entradas; por ejemplo, en el proceso de elaboración de sotol se utiliza leña de madera; por lo tanto, un análisis de sensibilidad consistiría en determinar si el aumento de los Kg de leña resulta en un comportamiento exponencial de las emisiones de gases contaminantes (Sierra Pérez, 2016). Con las conclusiones del análisis de los resultados, se generan recomendaciones a implementar en el proceso productivo bajo estudio.

## 5. Resultados

Es importante mencionar que los resultados de este reporte técnico se encuentran publicados en un artículo, de propia autoría, en la revista “Frontiers in Sustainable Food System” que se encuentra indicada en la sección de anexos (ver sección 11). En el análisis de los datos entre las distintas presentaciones de envasado del sotol (blanco, reposado y añejo) no se presentaron diferencias significativas en los impactos; así que, los resultados que aquí se presentan es para mostrar el impacto ambiental de una presentación de botella de sotol de 750 ml, cualquiera que sea su presentación comercial.

Las categorías de impacto analizadas fueron FD (Fossil depletion), GWP (Global Warming Potential for a time horizon 100-year), ODP (Ozone layer depletion), HTP (Human toxicity potential), FAETP (Fresh water aquatic ecotoxicity), MAETP (Marine aquatic ecotoxicity), TETP (Terrestrial ecotoxicity), POCP (Photochemical oxidant creation potential), AP (Acidification potential), EP (Eutrophication potential).

En la Tabla 5.1 se muestra la caracterización de los resultados por unidad funcional en las principales categorías de impacto que se encuentran en situación crítica. Cada una de las etapas para la elaboración de la bebida sotol afectan considerablemente sobre el ecosistema marino (MAETP), siendo la molienda y envasado las etapas críticas.

Por otra parte, si no se consideran las etapas críticas, el recurso de combustible fósil (FD) es afectado considerablemente por la etapa de cocimiento (33%) y de destilación (35%). Esta última, afecta de modo importante a la categoría AP, con un 41%. Asimismo, la cosecha de sotol afecta mayormente a las categorías HTP y FAETP en alrededor del 31%. El proceso de cocimiento afecta de modo relevante al resto de las categorías.

Tabla 5.1. Principales categorías de impacto ambiental para una botella de 750 ml de sotol.

Categorías de impacto	Etapas de la elaboración de la bebida alcohólica sotol							Totales	Unidades
	I	II	III	IV	V	VI	VII		
MAETP	245.39	352.29	8450.46	73.69	359.94	1879.08	110.47	11471.35	kg 1,4-DB eq
FD	4.53	5.81	35.30	0.40	6.16	21.72	0.504	74.45	MJ
HTP	0.38	0.17	33.47	0.35	0.30	1.10	0.016	35.80	kg 1,4-DB eq
FAETP	0.14	0.10	6.67	0.06	0.12	0.35	0.024	7.49	kg 1,4-DB eq
GWP	0.32	0.44	2.99	0.02	0.46	1.61	0.040	5.92	kg CO <sub>2</sub> eq
TETP	7.1E-04	1.5E-03	0.041	4.2E-04	1.7E-03	2.7E-03	2.2E-04	0.04	kg 1,4-DB eq
AP	9.2E-04	2.2E-03	0.167	1.4E-04	2.4E-03	8.8E-03	1.3E-04	0.03	kg SO <sub>2</sub> eq

NOTA: I = Cosecha; II = Cocimiento; III = Molienda; IV = Fermentación; V = Destilación; VI = Envasado; VII = Embalaje. Los datos son tomados de la publicación hecha de esta investigación (autoría propia) desde: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fsufs.2021.769478/full>

En la Figura 5.1 se reporta el porcentaje de contribución de cada una de las etapas de la elaboración de la bebida destilada con respecto a los gases de efecto invernadero. Se observa que una botella de sotol de 750 ml produce 5.92 kg CO<sub>2</sub> eq, las etapas que más contribuyen con emisiones de CO<sub>2</sub> son: molienda y envasado, con un 51% y 27%, respectivamente. Nuevamente, si no se toma en cuenta las etapas críticas, son la destilación y el cocimiento las que más influyen en el impacto ambiental por producir una botella de sotol. Es importante mencionar que esta figura fue traducida al español de la publicación de propia autoría en la revista indicada en la sección 11 de este reporte técnico.

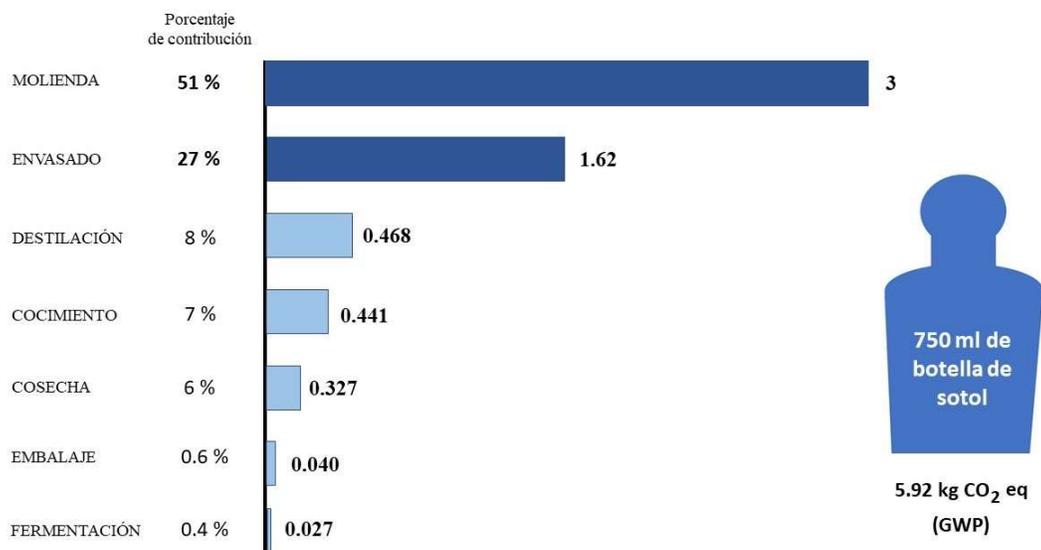


Figura 5.1. Detalles de contribución por cada proceso de elaboración del sotol artesanal en el índice GWP (Global-warming potencial). NOTA = el porcentaje de contribución es calculado tomando como referencia la contribución total de GWP de una botella de 750 ml de sotol. Los valores son proporcionados en kg CO<sub>2</sub> eq.

## 6. Productos generados

Los productos generados son dos:

1. Ponencia en el 1er Congreso Internacional de Investigación Emprendimiento e Innovación realizada en Colombia. El cual se encuentra registrado en CATHI con el identificador <http://cathi.uacj.mx/20.500.11961/15309>

2. Artículo en revista de investigación indexada en Scopus y que pertenecen al listado de revistas JCR, publicado el 10 de noviembre de 2021, acceder desde:

<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fsufs.2021.769478/full>

Este artículo se encuentra registrado en CATHI con el identificador:

<http://cathi.uacj.mx/20.500.11961/19014>.

## 7. Conclusiones

El ACV del sistema de producción de sotol evaluado tuvo un alcance “Cradle to Gate”, es decir, que la obtención de datos fue desde la extracción de la materia prima hasta que la

bebida está lista para su venta. Es importante indicar que la mayoría de los datos del inventario proceden de datos primarios, es decir, proporcionados directamente de la empresa productora de sotol artesanal.

Después de realizar el ACV para el sotol artesanal se observa que las áreas de molienda y envasado son áreas de oportunidad y mejora en el proceso productivo, ya que en conjunto aportan 4.62 kg CO<sub>2</sub> eq., lo que equivale al 78.04% de las emisiones totales. Asimismo, se observa que el transporte de insumos para la elaboración de la bebida es una condición desfavorable para los productores de sotol del estado de Chihuahua, ya que las botellas de vidrio, cartón de embalaje, tapas y estampados son abastecidos desde el centro del país, lo que resulta en un alto consumo energético.

Acorde con los resultados de este reporte, se proponen tres recomendaciones a los organismos certificadores y reguladores de la producción y comercialización de sotol. Primero, se sugiere que estos organismos regulen el tipo de equipo a usarse en el proceso de molienda del sotol; que la capacidad del equipo esté acorde con la capacidad de litros a producir por temporada, es decir, que no exista consumo de energía innecesaria como lo hacen con el proceso actual. También, se recomienda que se regule el peso de las botellas genéricas a utilizar para el envasado del producto, buscando adquirir aquellas con el menor peso en el mercado. Por último, se aconseja que se regule en la producción de sotol artesanal el uso de leña como combustible en los procesos de destilación y cocimiento, en vez del uso de combustible fósil, ya que estas regulaciones ayudarán a evitar un mayor impacto al ecosistema.

Finalmente, se concluye que, con las regulaciones apropiadas en el proceso de elaboración del sotol, esta bebida podría ser considerada entre las de menor impacto al medio ambiente por no contar con una etapa de cultivo, como sucede con el vino. Aunque, acorde con la literatura que aborda la elaboración de sotol, existe un interés por generar siembras comerciales de plántulas, por lo que una investigación futura es determinar la huella de carbono del cultivo de la especie *Dasyliirion*.

## **8. Contribución e impacto del proyecto**

El ACV ha sido ampliamente usado como una herramienta que asegura la sustentabilidad en la generación de energía renovable; asimismo, se ha utilizado para evaluar y comparar

entre distintos sistemas y es considerado una manera de convencer a empresarios o industriales de que su proceso de manufactura puede ser mejorado al demostrar que este consumirá la menor cantidad de energía para su operación (Alsayed and Tayeh, 2019).

Si se explora en la base de datos de Science Direct, se puede observar que hay un aumento considerable de publicaciones sobre ACV. En la Figura 8.1 se muestra que publicaciones referentes al ACV presentan un continuo crecimiento; existe una tendencia exponencial de su aplicación en distintos sectores productivos privados y públicos con el propósito de tomar decisiones adecuadas para gestionar los impactos ambientales de un sistema, desde la materia prima hasta la gestión de los residuos.

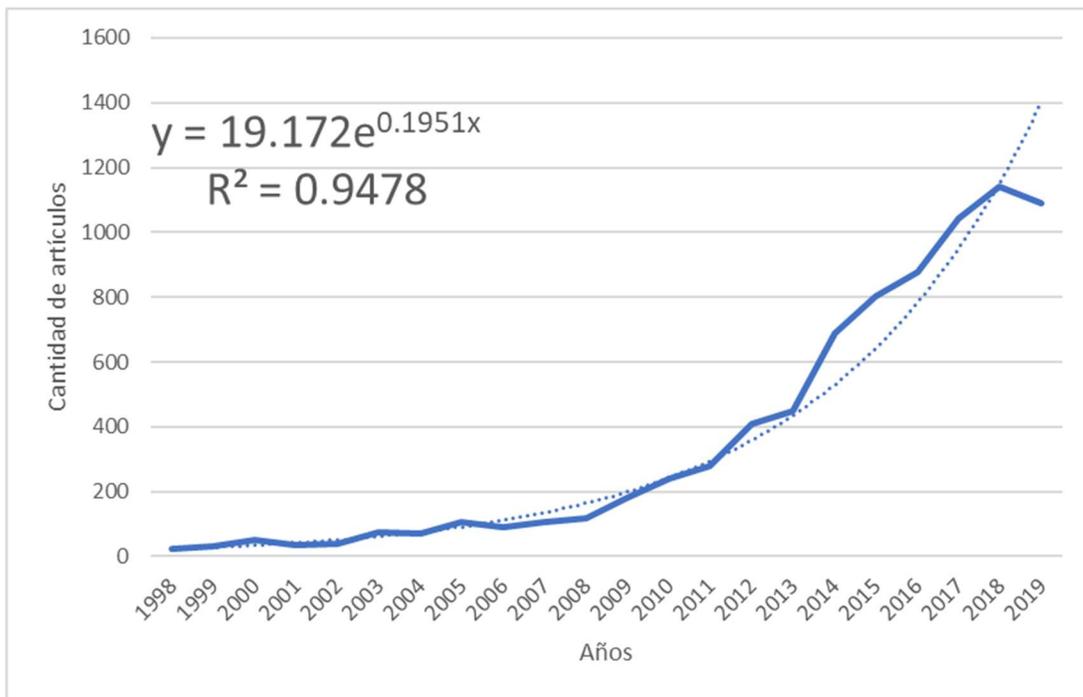


Figura 8.1 Tendencia del ACV.

Este estudio permitirá realizar comparaciones con otros procesos de destilación similares, como es el vino, porque será reportado un análisis del ciclo de inventario del proceso de producción del sotol; asimismo, la equiparación ayudará a identificar mejores técnicas y tecnología disponible para la mejora del proceso de fermentación del sotol y su embotellado. De igual manera, se podrá distinguir opciones para una mejor gestión de los desperdicios del proceso.

También, a partir del ACV se puede originar propuestas de inclusión de mejores prácticas ambientales dentro de las regulaciones de lo que podría ser el organismo acreditador, los lineamientos de la Denominación de Origen del Sotol (DO) y la Norma Oficial Mexicana (NOM-159-SCFI-2004).

## 9. Impacto económico, social y/o ambiental en la región

México cuenta con una amplia variedad de bebidas destiladas en las que se desconocen sus principales retos ambientales; por lo anterior, es necesario aplicar ACV en varias de estas porque presentan entre sí distintos contextos geográficos, volumen de fabricación, tipos de materia prima y sistema de producción. Con el propósito de llegar a un nivel de profundidad de análisis como el que se ha realizado en otras industrias de bebidas alcohólicas, como es en la industria vinícola o cervecera, se considera de gran importancia el conocer el perfil ambiental de las bebidas que se producen en las distintas regiones de México, como es el sotol, para generar una producción más limpia de este destilado.

## 10. Referencias (bibliografía)

- Adhikari, B., Prapasongsa, T., 2019. Environmental Sustainability of Food Consumption in Asia. *Sustain.* . <https://doi.org/10.3390/su11205749>
- Alcalá de Jesús, M., Pando Moreno, M., Reyes-Gómez, V.M., Núñez-López, D., 2014. Edafología (Suelos), in: Barajas, N., Cruz-Angón, A., Valero-Padilla, J., Treviño Fernández, J.C. (Eds.), *Biodiversity in Chihuahua: A State of the Art Study*. National Commission for the Knowledge and Use of Biodiversity (CONABIO), México, pp. 46–50.
- Alsayed, M.F., Tayeh, R.A., 2019. Life cycle cost analysis for determining optimal insulation thickness in Palestinian buildings. *J. Build. Eng.* 22, 101–112. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.11.018>
- Alves, V., Gonçalves, J., Figueira, J.A., Ornelas, L.P., Branco, R.N., Câmara, J.S., Pereira, J.A.M., 2020. Beer volatile fingerprinting at different brewing steps. *Food Chem.* 326, 126856. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126856>
- Amienyo, D., Camilleri, C., Azapagic, A., 2014. Environmental impacts of consumption of Australian red wine in the UK. *J. Clean. Prod.* 72, 110–119.

<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2014.02.044>

- Antillón, R.C., Maxwell, T.D., 2015. La Arqueología de la región y del sitio de villa Ahumada, Chihuahua. University of New Mexico, Maxwell Museum of Anthropology, New Mexico, United State American.
- Arce-González, L., Reyna, J.V., Oyervides, A.V., Emilio, A.G.D.T.Y., Gómez, R.C., 2003. Rompimiento de latencia en semillas de sotol (*Dasyilirion cedrosanum* Trel) mediante escarificación física y ácido sulfúrico.
- Arce-González, L., Valdés, J., Valdés, A., Gallegos, A., Padilla, G., 2007. Germination tests on sotol (*Dasyilirion cedrosasanum* Trel.) seeds using dry extracts of lechuguilla (*Agave lechuguilla* Torr.) under laboratory conditions.
- Arena, A.P., 2000. Spreading Life-Cycle Assessment to Developing Countries. *J. Ind. Ecol.* 4, 3–6. <https://doi.org/10.1162/108819800300106348>
- Baiano, A., 2021. Craft beer: An overview. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 20, 1829–1856. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/1541-4337.12693>
- Becerra-López, J.L., Rosales-Serna, R., Ehsan, M., Becerra-López, J.S., Czaja, A., Estrada-Rodríguez, J.L., Romero-Méndez, U., Santana-Espinosa, S., Reyes-Rodríguez, C.M., Ríos-Saucedo, J.C., Domínguez-Martínez, P.A., 2020. Climatic Change and Habitat Availability for Three Sotol Species in México: A Vision towards Their Sustainable Use. *Sustainability* 12, 2–12. <https://doi.org/10.3390/su12083455>
- Becker, S., Bouzdine-Chameeva, T., Jaegler, A., 2020. The carbon neutrality principle: A case study in the French spirits sector. *J. Clean. Prod.* 274, 122739. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122739>
- Bhattacharyya, N., Goodell, A., Rogers, S., Demond, A., 2019. Environmental impacts of wheat-based vodka production using life cycle assessment. *J. Clean. Prod.* 231, 642–648. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.226>
- Blas-Yañez, S., Thomé-Ortiz, H., Vizcarra-Bordi, I., Espinoza-Ortega, A., 2018. Street sale of pulque and sociospatial practices: A gender perspective in central Mexico. *J. Ethn. Foods* 5, 311–316. <https://doi.org/10.1016/J.JEF.2018.10.005>
- Bobba, S., Deorsola, F.A., Blengini, G.A., Fino, D., 2016. LCA of tungsten disulphide (WS2) nano-particles synthesis: state of art and from-cradle-to-gate LCA. *J. Clean.*

- Prod. 139, 1478–1484. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.091>
- Bohnes, F.A., Hauschild, M.Z., Schlundt, J., Laurent, A., 2018. Life cycle assessments of aquaculture systems: a critical review of reported findings with recommendations for policy and system development. *Rev. Aquac.* <https://doi.org/10.1111/raq.12280>
- Bosona, T., Gebresenbet, G., 2018. Life cycle analysis of organic tomato production and supply in Sweden. *J. Clean. Prod.* 196, 635–643. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.06.087>
- Bujaidar Ávila, F., 2017. Denominación de Origen y Norma Oficial Mexicana del Sotol: Dos propósitos distintos, in: Martínez Gutiérrez, G.A., Langlé Argüello, L.A. (Eds.), 1er. Congreso Nacional de Agave-Mezcal. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca, México, p. 16.
- Calina, D., Hartung, T., Mardare, I., Mitroi, M., Poulas, K., Tsatsakis, A., Rogoveanu, I., Docea, A.O., 2021. COVID-19 pandemic and alcohol consumption: Impacts and interconnections. *Toxicol. Reports* 8, 529–535. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2021.03.005>
- Cárdenas-Díaz, D.I., Castro, E., N. Aguilar, C., Soto Cruz, O., La, D., De la Garza-Toledo, H., 2009. Sotol fermentation; enzymatic treatment of residues, in: National Congress of Biotechnology and Bioengineering. Mexican Society of Biotechnology and Bioengineering, Guerrero, México.
- Cimini, A., Moresi, M., 2018. Mitigation measures to minimize the cradle-to-grave beer carbon footprint as related to the brewery size and primary packaging materials. *J. Food Eng.* 236, 1–8. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.05.001>
- Córdova Bojórquez, G., Romo Aguilar, M.L., 2014. Contexto Socioeconómico, in: Barajas, N., Cruz-Angón, A., Valero-Padilla, J., Treviño Fernández, J.C. (Eds.), Biodiversity in Chihuahua: A State of the Art Study. National Commission for the Knowledge and Use of Biodiversity (CONABIO), México, pp. 65–84.
- De León-Rodríguez, A., Escalante-Minakata, M. del P., Jiménez-García, M.I., Ordoñez-Acevedo, L.G., Flores Flores, J.L., Barba de la Rosa, A.P., 2008. Characterization of volatile compounds from ethnic agave alcoholic beverages by gas chromatography-mass spectrometry. *Food Technol. Biotechnol.* 46, 448–455.
- Díaz de León, A.C., Orea Lara, G., Pensaben Esquivel, J.M., 2017. Determination of the

quality of sotol produced in the state of Durango, in: Martínez Gutiérrez, G.A., Langlé Argüello, L.A. (Eds.), 1st National Agave-Mezcal Congress. Interdisciplinary Research Center for Integral Regional Development Oaxaca Unit, Oaxaca, México, p. 54.

- Eriksson, O., Jonsson, D., Hillman, K., 2016. Life cycle assessment of Swedish single malt whisky. *J. Clean. Prod.* 112, 229–237.  
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2015.07.050>
- Ferrara, C., De Feo, G., 2018. Life Cycle Assessment Application to the Wine Sector: A Critical Review. *Sustain.* . <https://doi.org/10.3390/su10020395>
- Flores-Gallegos, A.C., Cruz-Requena, M., Castillo-Reyes, F., Rutiaga-Quiñones, O.M., Torre, L.S., Paredes-Ortíz, A., Soto, O.N., Rodríguez-Herrera, R., 2019. Sotol, an alcoholic beverage with rising importance in the worldwide commerce, in: Mihai Grumezescu, A., Maria Holban, A. (Eds.), *Alcoholic Beverages: Volume 7: The Science of Beverages*. Woodhead Publishing, pp. 141–160.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815269-0.00005-2>
- Flores-Maltos, D.A., Mussatto, S.I., Contreras Esquivel, J.C., Buenrostro, J.J., Rodríguez, R., Teixeira, J.A., Aguilar, C.N., 2014. Typical Mexican agroindustrial residues as supports for solid-state fermentation. *Am. J. Agric. Biol. Sci.* 9, 289–293.
- Foster, T., 2018. West Texas In a Bottle: EBSCOhost [WWW Document]. *Texas Mon.* URL <http://web.a.ebscohost.com/ehost/detail/detail?vid=6&sid=8869d427-db39-4dc7-903f-ecb446afc9d6%40sessionmgr4007&bdata=Jmxhbm9ZXMmc2l0ZT1laG9zdC1saXZl#db=a9h&AN=127588334> (accessed 1.9.19).
- García-Alcaraz, J.L., Flor Montalvo, F., Martínez Cámara, E., Sáenz-Diez Muro, J.C., Jiménez-Macías, E., Blanco-Fernández, J., 2020a. Comparative environmental impact analysis of techniques for cleaning wood wine barrels. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 60, 102301.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102301>
- García-Alcaraz, J.L., Flor Montalvo, F.J., Martínez Cámara, E., Pérez de la Parte, M.M., Jiménez-Macías, E., Blanco-Fernández, J., 2020b. Economic-environmental impact analysis of alternative systems for red wine ageing in re-used barrels. *J. Clean. Prod.*

- 244, 118783. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118783>
- Gardea, A.A., Findley, L.T., Orozco-Avitia, J.A., Bañuelos, N., Esqueda, M., Huxman, T.H., 2012. Bacanora and sotol: so far, so close. *Soc. Stud. J. Contemp. food Reg. Dev.* 153–168.
- Gaytán, M.S., 2018. The perils of protection and the promise of authenticity: Tequila, mezcal, and the case of NOM 186. *J. Rural Stud.* 58, 103–111.  
<https://doi.org/10.1016/J.JRURSTUD.2017.12.017>
- Gilbey, A., Ernst, E., Tani, K., 2013. A systematic review of reviews of systematic reviews of acupuncture. *Focus Altern. Complement. Ther.* 18, 8–18.  
<https://doi.org/10.1111/fct.12004>
- Goedkoop, M., Oele, M., Vieira, M., Leijting, J., Ponsioen, T., Meije, E., 2016. Manual: SimaPro Tutorial [WWW Document]. SimaPro Tutor. URL  
[https://support.simapro.com/articles/Manual/SimaPro-Tutorial/?l=en\\_US&c=Products%3ASimaPro%3ASP\\_Tutorials&fs=Search&pn=1](https://support.simapro.com/articles/Manual/SimaPro-Tutorial/?l=en_US&c=Products%3ASimaPro%3ASP_Tutorials&fs=Search&pn=1)  
(accessed 3.28.19).
- Grossman, E.R., Benjamin-Neelon, S.E., Sonnenschein, S., 2020. Alcohol Consumption during the COVID-19 Pandemic: A Cross-Sectional Survey of US Adults. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 17, 9189. <https://doi.org/10.3390/ijerph17249189>
- Gutiérrez-Ortiz, J.A., Gutiérrez-de Alba, E., 2019. *The Sotol War: From pre-Hispanic times to the law regulating sotol activity*, 1st ed. ed. Sispro, Chihuahua, México.
- Hallström, E., Håkansson, N., Åkesson, A., Wolk, A., Sonesson, U., 2018. Climate impact of alcohol consumption in Sweden. *J. Clean. Prod.* 201, 287–294.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.295>
- He, N.X., Bayen, S., 2020. An overview of chemical contaminants and other undesirable chemicals in alcoholic beverages and strategies for analysis. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 19, 3916–3950. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/1541-4337.12649>
- Horne, R.E., Grant, T., Verghese, K., 2009. Life cycle assessment: origins, principles, and context, in: *Life Cycle Assessment : Principles, Practice, and Prospects*. CSIRO PUBLISHING, Australia, pp. 1–8.
- Iannone, R., Miranda, S., Riemma, S., De Marco, I., 2016. Improving environmental performances in wine production by a life cycle assessment analysis. *J. Clean. Prod.*

- 111, 172–180. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2015.04.006>
- INEGI, I.N. de E. y G., 2020. Compendium of municipal geographic information of the United Mexican States. Chihuahua. México.
- ISO 14040, 2006. Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework [WWW Document]. Int. Organ. Stand. URL <https://www.iso.org/standard/37456.html> (accessed 5.14.20).
- ISO 14044, 2006. Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines [WWW Document]. Int. Organ. Stand. URL <https://www.iso.org/standard/38498.html> (accessed 5.14.20).
- Jannah, M., Fahlevi, M., Paulina, J., Nugroho, B.S., Purwanto, A., Subarkah, M.A., Kurniati, E., Wibowo, T.S., Kasbuntoro, Kalbuana, N., Cahyono, Y., 2020. Effect of ISO 9001, ISO 45001 and ISO 14000 toward financial performance of Indonesian manufacturing. *Syst. Rev. Pharm.* 11, 894–902. <https://doi.org/10.31838/srp.2020.10.134>
- Jeong, B., Wang, H., Oguz, E., Zhou, P., 2018. An effective framework for life cycle and cost assessment for marine vessels aiming to select optimal propulsion systems. *J. Clean. Prod.* 187, 111–130. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.184>
- Jiménez, A., 2010. Negocios 100% mexicanos [WWW Document]. *Entrep. México*. URL <http://web.b.ebscohost.com/ehost/detail/detail?vid=4&sid=fb554ee8-59f2-4729-b3af-32af162eb9f6%40pdc-v-sessmgr01&bdata=Jmxhbmc9ZXMmc2l0ZT1laG9zdC1saXZl#AN=48147764&db=zbh> (accessed 3.7.19).
- Koroneos, C., Roubas, G., Gabari, Z., Papagiannidou, E., Moussiopoulos, N., 2005. Life cycle assessment of beer production in Greece. *J. Clean. Prod.* 13, 433–439. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2003.09.010>
- Kubo, R., Funakawa, S., Araki, S., Kitabatake, N., 2014. Production of indigenous alcoholic beverages in a rural village of Cameroon. *J. Inst. Brew.* 120, 133–141. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/jib.116>
- Kühnen, M., Hahn, R., 2017. Indicators in Social Life Cycle Assessment: A Review of Frameworks, Theories, and Empirical Experience. *J. Ind. Ecol.* 21, 1547–1565. <https://doi.org/10.1111/jiec.12663>

- Laca, Amanda, Gancedo, S., Laca, Adriana, Díaz, M., 2021. Assessment of the environmental impacts associated with vineyards and winemaking. A case study in mountain areas. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 28, 1204–1223.  
<https://doi.org/10.1007/s11356-020-10567-9>
- Lachenmeier, D.W., Kanteres, F., Kuballa, T., López, M.G., Rehm, J., 2009. Ethyl Carbamate in Alcoholic Beverages from Mexico (Tequila, Mezcal, Bacanora, Sotol) and Guatemala (Cuxa): Market Survey and Risk Assessment. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 6, 349–360. <https://doi.org/10.3390/ijerph6010349>
- Lachenmeier, D.W., Sohnius, E.-M., Attig, R., López, M.G., 2006. Quantification of Selected Volatile Constituents and Anions in Mexican Agave Spirits (Tequila, Mezcal, Sotol, Bacanora). *J. Agric. Food Chem.* 54, 3911–3915.  
<https://doi.org/10.1021/jf060094h>
- Ladyman, J.A.R., 2004. *Dasyliirion wheeleri* S. Wats. Wheeler sotol, Wildland shrubs of the United States and its Territories: thamnnic descriptions: volume 1. United States Department of Agriculture.
- Leinonen, I., MacLeod, M., Bell, J., 2018. Effects of Alternative Uses of Distillery By-Products on the Greenhouse Gas Emissions of Scottish Malt Whisky Production: A System Expansion Approach. *Sustain.* <https://doi.org/10.3390/su10051473>
- Leivas, R., Laso, J., Hoehn, D., Margallo, M., Fullana-i-Palmer, P., Aldaco, R., 2019. Product vs Corporate Carbon Footprint: A Case Study for the Spirit Drinks Sectors. *Chem. Eng. Trans.* 76, 223-228 SE-Research Articles.  
<https://doi.org/10.3303/CET1976038>
- Li, J., Ma, X., Liu, H., Zhang, X., 2018. Life cycle assessment and economic analysis of methanol production from coke oven gas compared with coal and natural gas routes. *J. Clean. Prod.* 185, 299–308.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.100>
- Lorena, L., Aguilar, C.N., De La Garza, H., 2009. Technical changes of Sotol production, in: *Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería*. Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería, Guerrero, México.
- Maciel Martínez, J., Baltierra-Trejo, E., Taboada-González, P., Aguilar-Virgen, Q., Marquez-Benavides, L., 2020. Life Cycle Environmental Impacts and Energy

- Demand of Craft Mezcal in Mexico. *Sustain.* . <https://doi.org/10.3390/su12198242>
- Madrid-Solórzano, J.M., García-Alcaraz, J.L., Macías, E.J., Cámara, E.M., Fernández, J.B., 2021. Life Cycle Analysis of Sotol Production in Mexico . *Front. Sustain. Food Syst.* .
- Martins, A.A., Araújo, A.R., Graça, A., Caetano, N.S., Mata, T.M., 2018. Towards sustainable wine: Comparison of two Portuguese wines. *J. Clean. Prod.* 183, 662–676. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.02.057>
- Mayer, B., 2019. Climate Assessment as an emerging obligation under customary international law. *Int. Comp. Law Q.* 1–38. <https://doi.org/10.1017/S0020589319000095>
- Meneses, M., Torres, C.M., Castells, F., 2016. Sensitivity analysis in a life cycle assessment of an aged red wine production from Catalonia, Spain. *Sci. Total Environ.* 562, 571–579. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2016.04.083>
- Merchan, A., Combelles, A., 2014. Comparison of Life cycle Impact Assessment methods in a case of crop in Northern France, in: Conference 2014, 4th International Conference on Life Cycle Approaches. [avniR] editions, France, pp. 239–242.
- Miah, J.H., Koh, S.C.L., Stone, D., 2017. A hybridised framework combining integrated methods for environmental Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing. *J. Clean. Prod.* 168, 846–866. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.187>
- Moreno-Contreras, I., Arteaga Luna, M.C., Escudero González, E., 2012. Nuevos avistamientos de la sita canadiense (*Sitta canadensis*) en el norte del estado de Chihuahua, México. *Huitzil* 13, 137–140.
- Olajire, A.A., 2012. The brewing industry and environmental challenges. *J. Clean. Prod.* 256, 102817. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.03.003>
- Olivas-García, J.M., Anchondo-Nájera, J.Á., Luján-Álvarez, C., Hernández-Salas, J., 2013. Sotol (*Dasyilirion* spp.) production tables for the state of Chihuahua and technical manual for use., 1st Ed. ed. Faculty of Agricultural and Forestry Sciences, Universidad Autónoma de Chihuahua, Delicias, Chih.
- Orozco-sifuentes, M.M., García-martínez, J.E., Arévalo-sanmiguel, C.A., Ramírez-godina, F., Reyes-Valdés, M.H., 2019. Nutritive potential of sotol (*dasyilirion cedrosanum*) seeds. *Fitotec. Mex. Mag.* 42, 385–392.

- <https://doi.org/10.35196/rfm.2019.4.385-392>
- Ortega-Ochoa, C., Martínez-Nevárez, J., Villalobos, C., Britton, C.M., Sosebee, R.E., 2008. Chihuahua's Cattle Industry and a Decade of Drought: Economical and Ecological Implications. *Rangelands* 30, 2–7.
- <https://doi.org/https://doi.org/10.2111/1551-501X-30.6.2>
- Ortega-S, J.A., Ibarra-Flores, F.A., Melgoza, A., Gonzalez-Valenzuela, E.A., Martin-Rivera, M.H., Ávila-Curiel, J.M., Ayala-Alvares, F., Pinedo, C., Rivero, O., 2013. Exotic grasses and wildlife in northern Mexico. *Wildl. Soc. Bull.* 37, 537–545.
- <https://doi.org/10.1002/wsb.325>
- Patón-Romero, J.D., Baldassarre, M.T., Rodríguez, M., Piattini, M., 2019. Application of ISO 14000 to Information Technology Governance and Management. *Comput. Stand. Interfaces* 65, 180–202.
- <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.csi.2019.03.007>
- Ponstein, H.J., Meyer-Aurich, A., Prochnow, A., 2019. Greenhouse gas emissions and mitigation options for German wine production. *J. Clean. Prod.* 212, 800–809.
- <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.11.206>
- Raju, G., Singh, H., Sarkar, P., Singla, E., 2016. A framework for evaluation of environmental sustainability in pharmaceutical industry, in: Mandal, D.K., Syan, C.S. (Eds.), *CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, New Delhi, pp. 797–806.
- [https://doi.org/10.1007/978-81-322-2740-3\\_77](https://doi.org/10.1007/978-81-322-2740-3_77)
- Ramírez-Guzmán, K.N., Torres-León, C., Martínez-Medina, G.A., de la Rosa, O., Hernández-Almanza, A., Álvarez-Pérez, O.B., Araujo, R., González, L.R., Londoño, L., Ventura, J., 2019. Traditional Fermented Beverages in Mexico, in: *Fermented Beverages*. Elsevier, pp. 605–635.
- Regional Association of Foresters North Central Zone, 2019. Study of the Coyame julimes Abasto Basin, Chihuahua, Mex. Ministry of Environment and Natural Resources, Chihuahua, México.
- Research And Markets, 2021. Global Alcoholic Beverages Market Report (2020 to 2030) [WWW Document]. URL <https://www.globenewswire.com/news-release/2020/05/19/2035460/0/en/global-alcoholic-beverages-market-report-2020to->

- 2030-covid-19-impact-and-recovery.html (accessed 8.18.21).
- Reyes-Gómez, V.M., Núñez-López, D., 2014. Ecosistemas y uso de suelo, in: Barajas, N., Cruz-Angón, A., Valero-Padilla, J., Treviño Fernández, J.C. (Eds.), *La Biodiversidad En Chihuahua: Estudio de Estado*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), pp. 51–54.
- Reyes-Valdés, M.H., Palacios, R., Rivas-Martínez, E.N., Robledo-Olivo, A., Antonio-Bautista, A., Valdés-Dávila, C.M., Villarreal-Quintanilla, J.Á., Benavides-Mendoza, A., 2019. The Sustainability of Mexican Traditional Beverage Sotol: Ecological, Historical, and Technical Issues, in: *Processing and Sustainability of Beverages*. Elsevier, pp. 103–137. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815259-1.00004-5>
- Reyes Silva, A.I., Morales Muñoz, C.F., Pérez Reyes, M.E., Molphe Balch, E.P., 2013. In vitro Propagation of Mexican Nolinaceae. *Investig. Cienc.* 21, 12–20.
- Riley, T., 2008. Diet and seasonality in the Lower Pecos: evaluating coprolite data sets with cluster analysis. *J. Archaeol. Sci.* 35, 2726–2741. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2008.04.022>
- Rodríguez García, J., 2020. Estadística del Consejo Mexicano del Sotol A.C.
- Rosales-Mata, S., Ríos-Saucedo, J.C., Rosales-Serna, R., García-Rodríguez, J.L., 2018. Tratamientos pregerminativos de remojo y temperatura en semilla de *Dasyliroton cedrosanum*, in: *XIV Congreso Nacional Sobre Recursos Bióticos de Zonas Áridas*. México, p. 160.
- Sierra-Tristán, J.S., Lara-Macías, C.R., Carrillo-Romo, R., Mendoza-Castillo, A., Morales-Nieto, C., Royo-Márquez, M.H., 2008. *The sotols Dasyliroton spp of Chihuahua*, 1st Ed. ed. National Institute of Forestry, Agricultural and Livestock Research (inifap), Chihuahua, México.
- Sierra Pérez, J., 2016. The introduction of eco-design for promoting the use of eco-materials: the cork as building material.
- Trujillo-Orozco, A., Gómez-Salazar, S., Bárcena-Soto, M., Carreon-Alvarez, A., Estrada-Vargas, A., Prado-Ramírez, R., Casillas, N., 2011. Detection of Cu, Pb, Cd and Zn in Mexican Spirituous Beverages by Differential Pulse Polarography (DPP). *ECS Trans* 36, 363–372. <https://doi.org/10.1149/1.3660630>
- Vargas, J., 2009. Entrevista El proceso del sotol en una vinata. *Cuad. Front.* 8, 32–36.

- Vázquez-Rowe, I., Cáceres, A.L., Torres-García, J.R., Quispe, I., Kahhat, R., 2017. Life Cycle Assessment of the production of pisco in Peru. *J. Clean. Prod.* 142, 4369–4383. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.11.136>
- Venegas Montes, C., 2020. Consejo Certificador del Sotol.
- Villavicencio Gutiérrez, E., Cano Pineda, A., Juárez Santana, A., 2007. Guía para la micropropagación y producción in vitro de plantas de sotol (*Dasyliirion cedrosanum* Tre.). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Yang, L., van Dam, K.H., Majumdar, A., Anvari, B., Ochieng, W.Y., Zhang, L., 2019. Integrated design of transport infrastructure and public spaces considering human behavior: A review of state-of-the-art methods and tools. *Front. Archit. Res.* 8, 429–453. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.08.003>
- Yasin, Y.M., Kerr, M.S., Wong, C.A., Bélanger, C.H., 2020. Factors affecting nurses' job satisfaction in rural and urban acute care settings: A PRISMA systematic review. *J. Adv. Nurs.* 76, 963–979. <https://doi.org/10.1111/jan.14293>

## 11. Anexos

Evidencia de los productos generados son los siguientes:

1. Ponencia en el 1er Congreso Internacional de Investigación Emprendimiento e Innovación realizada en Colombia. El cual se encuentra registrado en CATHI con el identificador <http://cathi.uacj.mx/20.500.11961/15309>
2. Artículo en revista de investigación indexada en Scopus y que pertenecen al listado de revistas JCR, publicado el 10 de noviembre de 2021, acceder desde: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fsufs.2021.769478/full>

Este artículo se encuentra registrado en CATHI con el identificador: <http://cathi.uacj.mx/20.500.11961/19014>.

## 11.1. Taxonomía de los Roles de Colaborador (esta tabla continua en la siguiente página)

Tabla 11.1 Taxonomía de los roles de colaboradores

Roles	Definición de los roles	Nombre de él(la) investigador(a)	Figura	Grado de contribución	Actividades logradas durante el proyecto	Tiempo promedio semanal (en horas) dedicado al proyecto
Responsabilidad de la dirección del proyecto	Coordinar la planificación y ejecución de la actividad de investigación. Organiza los roles de cada colaborador, tiene la habilidad de identificar potenciales de cada individuo para generar una sinergia de equipo colaborativo.	Juan Manuel Madrid Solorzano	Director del proyecto	Principal	El proyecto se finalizó llevando a cabo actividades que arrojan datos que no se habían contemplado, superando las expectativas de las conclusiones.	8 horas
Responsabilidad de supervisión	Elaborar la planificación de las actividades de la investigación (cronogramas y controles de seguimiento), describe los roles identificados por el director del proyecto y facilita el apoyo constante a todos los roles para conseguir un trabajo integral, coherente y que llegue a buen término.	Ludovico Soto Nogueira	Supervisor del proyecto	Apoyo	Supervisión de cada etapa que resultó en etapas finalizadas	4 horas
Realización y redacción de la propuesta	Preparación, creación y redacción de la propuesta de investigación, específicamente la redacción, revisión de coherencia del texto, presentación de los datos y la normatividad aplicable para garantizar el cumplimiento de los requisitos.	Juan Manuel Madrid Solorzano	Redactor de la propuesta	Principal	Se redactó el informe técnico de actividades a realizar y de aquellas logradas; asimismo, se presentó la propuesta antes del CATHI que resultó en su aprobación	4 horas
Desarrollo o diseño de la metodología	Contribuir con el diseño de la metodología, modelos a implementar y el sustento teórico, empírico y científico para la aplicabilidad de los instrumentos en la ejecución del proyecto	Juan Manuel Madrid Solorzano	Diseñador de la metodología	Principal	Se revisó literatura para determinar el método y el marco teórico en base de datos de la UACJ y de la Universidad de Zaragoza.	4 horas
Recopilación/ recolección de datos e información	Ejecuta las estrategias propuestas en acciones encaminadas a obtener la información, haciendo la recopilación de datos y la inclusión de la evidencia en el proceso.	Juan Manuel Madrid Solorzano	Recopilador de los datos	Principal	Se asistió a una destilería de sotol en la Ciudad de Aldama, Chihuahua para recopilar los datos.	4 horas

Tabla 11.1 Taxonomía de los roles de colaboradores (continuación).

Elaboración del análisis formal de la investigación	Aplicar métodos estadísticos, matemáticos, computacionales, teóricos u otras técnicas formales para analizar o sintetizar los datos del estudio. Verifica los resultados preliminares de cada etapa del análisis, los experimentos implementados y otros productos comprometidos en el proyecto.	Juan Manuel Madrid Solorzano	Analista de datos	Principal	Se aplicó el método de Análisis del Ciclo de Vida acorde con la norma ISO 1440 y 1444.	6 horas
Preparación, creación y/o presentación de los productos	Preparación de la redacción del reporte técnico final. Revisión crítica, recopilación de las observaciones y comentarios.	Juan Manuel Madrid Solorzano Ludovico Soto Nogueira	Editor de reporte técnico	-- Principal -- Apoyo	Se redactó reporte técnico y se realizó una publicación en la revista Frontiers in Sustainable Food Systems.	4 horas

### 11.1.1. Estudiantes participantes en el proyecto

Nombre de estudiante(s)	Matrícula	Tiempo promedio semanal (en horas) dedicado al proyecto	Actividades logradas en la ejecución del proyecto
Rubí Morfin Díaz	147402	4	Apoyo en exploración en campo y desarrollo del proyecto para su titulación titulado: Diseño de experiencias para el comensal de La Sotolera en Ciudad Juárez