Estructura temática y evolución temporal de la investigación sobre el aprovechamiento del agave: un análisis bibliométrico

Thematic structure and temporal evolution of research on agave utilization: A bibliometric analysis

Recepción del artículo: 24/04/2026 • Aceptación para publicación: 23/08/2026 • Publicación: 01/09/2026

Edna Elena Suárez-Patlán
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. C. E. San Martinito. Tlahuapan, Puebla, México
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7883-625X

Azucena Olvera-Ortiz
Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Ingeniería Agroindustrial. Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria. Estado de México, México.
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4656-2354

Rosa L. García-Rebolledo
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. C. E. San Martinito. Tlahuapan, Puebla, México.
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2818-5898

Valeria Martínez-Aquino*
Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Ingeniería Agroindustrial. Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria. Texcoco, Estado de México, México.
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6713-3604

Juan Quintanar Olguin
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. C. E. San Martinito. Tlahuapan, Puebla, México.
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2388-5027

*Autor para correspondencia:
martinez-aquinoValeria@outlook.com

Resumen

El género *Agave* posee relevancia histórica, cultural y agroindustrial, mientras que el aprovechamiento de sus productos y subproductos ha adquirido interés por sus aplicaciones energéticas, biotecnológicas, alimentarias y materiales. El objetivo de este estudio fue analizar la producción científica indexada en Scopus sobre el aprovechamiento de productos y subproductos del agave mediante una red de coocurrencia de palabras clave, para identificar las principales líneas temáticas y sus tendencias temporales. La base estuvo constituida por 87 registros publicados entre 2001 y 2025, exportados en formato RIS y analizados mediante *VOSviewer*. La red permitió identificar cinco clústeres relacionados con el origen y aprovechamiento agroindustrial del agave, los usos biotecnológicos de su biomasa, la microbiota y los compuestos fitoquímicos, el aprovechamiento sustentable de los subproductos y otros usos alternativos. La visualización de superposición mostró una evolución desde estudios relacionados con el cultivo, la caracterización fisicoquímica y el manejo de residuos hacia líneas vinculadas con la biomasa, la biodegradación, la sostenibilidad, la bioenergía, los procesos enzimáticos y los compuestos fitoquímicos. Estos resultados muestran la diversificación de la investigación sobre el agave y la coexistencia de aplicaciones tradicionales, biotecnológicas, alimentarias y de materiales.

Palabras clave: Biomasa lignocelulósica, biorrefinería, fermentación, bioenergía, valorización de residuos.

Abstract

The genus *Agave* has historical, cultural, and agroindustrial relevance, while the utilization of its products and by-products has gained attention because of their energy, biotechnological, food, and material applications. This study aimed to analyze the scientific literature indexed in Scopus on the utilization of agave products and by-products through a keyword co-occurrence network to identify the main thematic lines and their temporal trends. The database consisted of 87 records published between 2001 and 2025, exported in RIS format and analyzed using *VOSviewer*. The network identified five clusters related to the origin and agroindustrial use of agave, biotechnological uses of its biomass, microbiota and phytochemical compounds, sustainable utilization of by-products, and other alternative uses. The overlay visualization showed a shift from studies related to cultivation, physicochemical characterization, and waste management toward research lines associated with biomass, biodegradation, sustainability, bioenergy, enzymatic processes, and phytochemical compounds. These findings show the diversification of agave research and the coexistence of traditional, biotechnological, food, and material applications.

Keywords: Lignocellulosic biomass; biorefinery, fermentation, bioenergy, waste valorization.

Introducción

El género *Agave* comprende cerca de 200 especies distribuidas principalmente en las regiones áridas y semiáridas del continente americano; México es el principal centro de diversidad y aprovechamiento. Estas plantas presentan el metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM), una adaptación fisiológica que favorece la eficiencia en el uso del agua y la supervivencia en ambientes con temperaturas elevadas y disponibilidad hídrica limitada. Estas características, junto con la diversidad de productos derivados del género, sustentan el interés por los agaves como cultivos potenciales para regiones expuestas a sequía y cambio climático (Stewart, 2015; Davis & Ortiz-Cano, 2023).

Los agaves son aprovechados por la agroindustria para producir bebidas de relevancia económica y cultural, entre las que destacan el tequila, el mezcal, la bacanora y la raicilla. Actualmente, la expansión de las cadenas productivas de bebidas derivadas del agave ha incrementado la demanda de materia prima y, en consecuencia, la generación de residuos durante su transformación. En el caso del tequila, durante 2024 se produjeron 495.8 millones de litros, de los cuales se exportaron 400.3 millones de litros, y se emplearon 1.8 millones de toneladas de agave (Consejo Regulador del Tequila, 2025). Por su parte, en 2023 se produjeron 12.2 millones de litros de mezcal, equivalentes a una reducción de 13.6 % respecto de los 14.2 millones registrados en 2022 (Consejo Mexicano Regulador de la Calidad del Mezcal, 2024). La escala productiva de estas agroindustrias ha intensificado el interés por el manejo y aprovechamiento de los residuos y coproductos derivados de los procesos de cocción, fermentación y destilación. Entre ellos destacan el bagazo, las hojas descartadas durante la jima y las vinazas, que representan una fracción importante de la biomasa procesada y pueden constituir un problema ambiental cuando su manejo es inadecuado (Ruiz-Camou et al., 2023).

El bagazo es uno de los principales residuos sólidos derivados del procesamiento del agave. Este material lignocelulósico contiene celulosa, hemicelulosa y lignina, por lo que ha sido estudiado como materia prima para diferentes procesos de valorización y para el desarrollo de materiales de valor agregado (Valdez-Vázquez et al., 2020). Entre las alternativas investigadas se encuentra la transformación termoquímica del bagazo mediante pirólisis para obtener *biochar* y otros productos (Sangaré et al., 2022). También se ha estudiado la obtención de fibras celulósicas, biocompuestos y materiales fúngicos destinados a embalajes sustentables (De Anda-Rodríguez et al., 2025; Manzanares-Meza et al., 2025).Asimismo, los hidrolizados obtenidos del bagazo han sido evaluados como sustratos para producir biomasa de levadura enriquecida en proteína mediante hidrólisis enzimática y fermentación sumergida (Leal-Urbina et al., 2026).

Las vinazas constituyen uno de los principales residuos líquidos de la destilación y se caracterizan por su elevada carga orgánica y potencial contaminante. Sin embargo, estas corrientes residuales pueden someterse a procesos biológicos de tratamiento y valorización orientados a disminuir su carga orgánica y recuperar biomasa microbiana. En vinazas derivadas del procesamiento de *Agave americana*, la fermentación con un consorcio de levaduras permitió obtener biomasa y reducir la demanda química de oxígeno, lo que muestra una posible ruta para el aprovechamiento biológico de este residuo (Robles Calderón et al., 2025).

En este contexto, el aprovechamiento de los productos y subproductos del agave constituye un campo de investigación en el que convergen enfoques agroindustriales, biotecnológicos, energéticos, alimentarios y ambientales, algunas de cuyas rutas de bioprocesamiento microbiano y enzimático se sintetizan en la Figura 1. Sin embargo, la producción científica se encuentra distribuida entre distintas áreas disciplinares, lo que dificulta reconocer su organización temática y las tendencias que han orientado su evolución. Por ello, el objetivo de la presente investigación fue analizar la producción científica indexada en Scopus sobre el aprovechamiento de productos y subproductos del agave mediante una red de coocurrencia de palabras clave, con el propósito de identificar sus principales líneas temáticas y tendencias temporales.

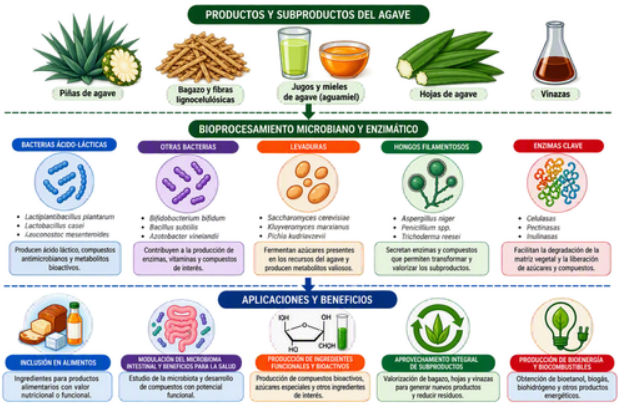

Figura 1. Rutas de bioprocesamiento microbiano y enzimático de productos y subproductos del agave.
Fuente: Elaboración propia con apoyo de Microsoft Copilot.

Materiales y métodos

Obtención de la base de datos

La información bibliográfica se obtuvo de la base de datos Scopus. La búsqueda se orientó a recuperar publicaciones relacionadas con el agave, sus productos y

subproductos mediante la combinación de los términos "agaves", "products" y "by-products". Los registros recuperados se exportaron en marzo de 2025 en formato RIS para su procesamiento y análisis bibliométrico. La base exportada estuvo constituida por 87 registros publicados entre 2001 y 2025 e incluyó artículos científicos, artículos de revisión, capítulos de libro, trabajos de congreso y libros, publicados en inglés y español. El archivo contenía información sobre autoría, título, resumen, palabras clave, año de publicación, fuente, tipo documental, idioma, afiliación institucional, DOI, URL del registro y número de citas registrado en Scopus al momento de la exportación.

El archivo RIS se incorporó directamente a *VOSviewer*. No se realizó una depuración documental posterior a la exportación ni una etapa adicional de selección por título, resumen, palabras clave o texto completo. En consecuencia, no se aplicaron criterios de exclusión posteriores a la recuperación de los registros y la totalidad de los documentos contenidos en el archivo se incorporó al análisis bibliométrico.

Análisis bibliométrico

El análisis bibliométrico se realizó mediante *VOSviewer*, versión 1.6.17 (Van Eck y Waltman, 2021). La unidad de análisis estuvo constituida por las palabras clave incluidas en los registros bibliográficos y se construyó una red de coocurrencia a partir de estas. La selección, distribución y agrupamiento se efectuaron mediante los procedimientos automáticos y los parámetros predeterminados del programa, sin establecer previamente el número de clústeres. Se generaron una visualización de red y una visualización de superposición basada en el año promedio de publicación. No se aplicaron configuraciones adicionales distintas de las disponibles por defecto en el programa. El procedimiento general tomó como referencia a Orduña-Flores et al. (2024).

Resultados y discusión

Mapa de visualización de redes

La red de coocurrencia de palabras clave generada mediante VOSviewer permitió identificar cinco clústeres temáticos (Figura 2). La denominación de cada clúster fue asignada por los autores considerando las palabras clave con mayor prominencia visual y la relación temática entre los elementos de cada agrupación. El primer clúster, denominado origen y aprovechamiento agroindustrial del agave, incluyó palabras clave como *agave, tequila, mezcal, Agave tequilana, México y cultivation*. El segundo, usos

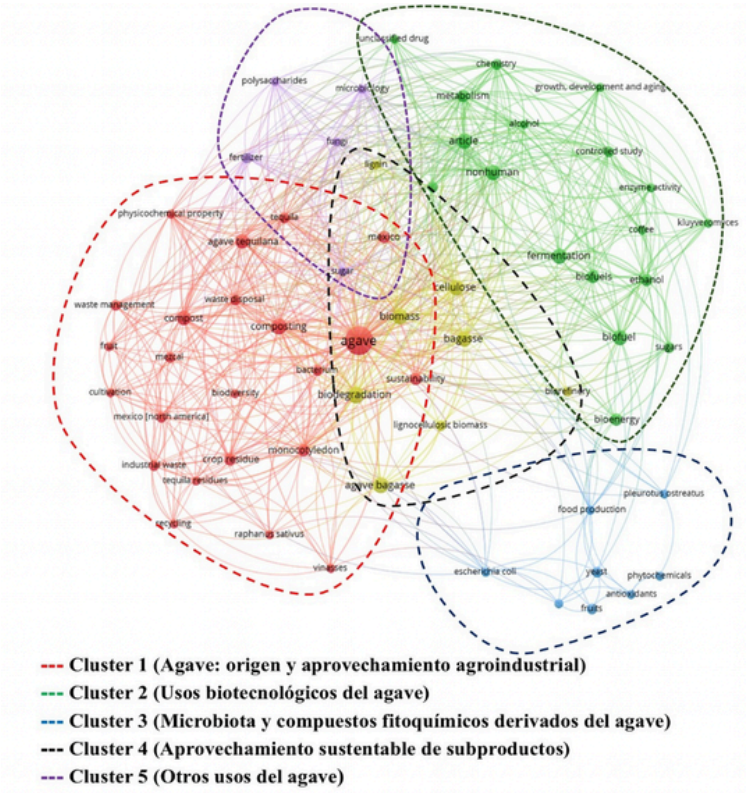

Figura 1. Red de coocurrencia de palabras clave relacionadas con el aprovechamiento de productos y subproductos del agave.
Fuente: Elaboración propia.

biotecnológicos del agave, agrupó palabras clave como *biomass, lignocellulosic biomass, biofuel, ethanol y fermentation*. El tercero, microbiota y compuestos fitoquímicos derivados del agave, estuvo representado por yeast, *Kluyveromyces, phytochemicals y antioxidants.* El cuarto, aprovechamiento sustentable de subproductos, reunió palabras clave como bagasse, biodegradation, sustainability y biorefinery. Finalmente, el clúster otros usos del agave integró palabras clave como f*ood production, Pleurotus ostreatus, Raphanus sativus* y *fruits*.

Agave: origen y aprovechamiento agroindustrial

El primer clúster articuló palabras clave relacionadas con el origen, el cultivo y la transformación agroindustrial del agave, entre ellas agave, *tequila, mezcal, Agave tequilana, Mexico* y *cultivation*. La asociación de estas palabras clave refleja una línea de investigación en la que la importancia biológica y territorial del género se vincula estrechamente con su aprovechamiento para la elaboración de bebidas destiladas. Esta relación resulta particularmente relevante en México, reconocido como el principal centro de diversidad y aprovechamiento de los agaves, donde se han registrado 159 especies, de las cuales 119 son endémicas del país (Trejo et al., 2018). Además de su importancia productiva, estas plantas desempeñan funciones ecológicas relacionadas con la retención y formación del suelo, la reducción de la erosión, la infiltración de agua y la provisión de recursos para distintas especies animales (Torres-García et al., 2019).

Dentro de esta agrupación, la presencia de las palabras clave tequila, mezcal y *Agave tequilana* evidencia el peso que poseen las bebidas destiladas en la producción científica sobre el género. Históricamente, los agaves se han utilizado como fuente de alimentos, bebidas, fibras, materiales de construcción, cercas vivas, productos medicinales y elementos ornamentales; sin embargo, las cadenas productivas del tequila y el mezcal han adquirido una importancia agroindustrial creciente (Torres-García et al., 2019). El tequila se produce a partir de *Agave tequilana* F.A.C. Weber 'Azul', mientras que en la elaboración de mezcal se utilizan diversas especies de agave, cuya selección depende del territorio, la disponibilidad de la materia prima y las prácticas productivas locales (Arellano-Plaza et al., 2022). Esta diversidad de especies, territorios y prácticas contribuye a la amplitud temática observada en el clúster.

La relación entre el aprovechamiento agroindustrial y la investigación sobre el agave también comprende los residuos y subproductos generados durante la elaboración de tequila y mezcal. En este contexto, la literatura asociada con esta línea temática ha abordado alternativas como la producción de bioetanol (Barrera et al., 2016; Rijal et al., 2016), hidrógeno (Contreras-Dávila et al., 2017; Toledo-Cervantes et al., 2018), azúcares fermentables (Pérez-Pimienta et al., 2019), productos obtenidos mediante pirólisis (Sangaré et al., 2022), materiales de papel y bioplásticos (Alemán-Nava et al., 2018), materiales absorbentes (Molina et al., 2023), ingredientes para alimentación animal (Ramirez-Cortina et al., 2012) y compostas de uso agrícola (Crespo et al., 2013). Así, el clúster relaciona la investigación sobre el cultivo y las bebidas destiladas con las alternativas de aprovechamiento de la biomasa residual.

Usos biotecnológicos del agave

La relación temática entre *lignocellulosic biomass*, *ethanol* y *fermentation* refleja el interés por emplear el bagazo y otros residuos del agave como sustratos para procesos biotecnológicos. Las asociaciones observadas indican que esta línea de investigación se ha orientado hacia la transformación de la biomasa residual mediante procesos fermentativos, principalmente para obtener biocombustibles y productos de valor agregado. En este contexto, el bagazo se ha estudiado como materia prima dentro de esquemas de biorrefinería que integran etapas de pretratamiento, hidrólisis y conversión biológica de los carbohidratos disponibles (Palomo-Briones et al., 2018; Alemán-Nava et al., 2018).

El bagazo constituye uno de los principales residuos sólidos generados por las agroindustrias del tequila y el mezcal. Su composición varía de acuerdo con la especie de *Agave* y las condiciones empleadas durante la cocción, extracción y elaboración de la bebida. No obstante, se caracteriza por contener celulosa, hemicelulosa y lignina, componentes que explican la presencia de palabras clave vinculadas con biomasa lignocelulósica, biocombustibles y fermentación. Se han reportado proporciones de fibra lignocelulósica de 42 a 69 %, celulosa de 38 a 53 % y hemicelulosa de 22 a 54 % (Valdez-Vázquez et al., 2020). Esta composición permite considerar el bagazo como una fuente potencial de carbohidratos fermentables y de fracciones aprovechables para la obtención de materiales y otros productos. Estudios de caracterización también han documentado el contenido de holocelulosa y lignina, así como propiedades térmicas y mecánicas que favorecen el aprovechamiento de las fibras en materiales biodegradables y matrices poliméricas (Hidalgo-Reyes et al., 2015).

Sin embargo, la disposición estructural de la celulosa, la hemicelulosa y la lignina limita el acceso directo de los microorganismos y las enzimas a los carbohidratos. Por esta razón, el aprovechamiento biotecnológico del bagazo suele requerir pretratamientos dirigidos a modificar la matriz lignocelulósica, aumentar su biodegradabilidad y facilitar la liberación de azúcares fermentables. Entre las alternativas evaluadas se encuentran los pretratamientos

biológicos, enzimáticos, químicos, hidrotérmicos y fisicoquímicos, cuya selección influye en la recuperación de carbohidratos y en el rendimiento de las etapas posteriores de fermentación o digestión anaerobia (Pérez-Pimienta et al., 2019; Valdez-Vázquez et al., 2020). El fraccionamiento de esta biomasa también permite recuperar lignina, celulosa y polisacáridos con posibilidades de uso en la producción de biocombustibles y compuestos de mayor valor agregado.

Una vez liberados los azúcares, los hidrolizados pueden emplearse como sustratos en procesos fermentativos. En esta línea se han evaluado alternativas para producir bioetanol a partir del bagazo y de las hojas de agave (Barrera et al., 2016; Rijal et al., 2016), así como hidrógeno mediante la fermentación de hidrolizados enzimáticos de *Agave tequilana* (Contreras-Dávila et al., 2017; Toledo-Cervantes et al., 2018). También se ha estudiado la producción de biogás y bioetanol a partir de bagazo sometido a explosión de vapor e hidrólisis enzimática, lo que confirma la relación entre los pretratamientos, la liberación de compuestos fermentables y la recuperación energética de la biomasa (Estrada-Maya y Weber, 2022).

La proximidad entre *lignocellulosic biomass, ethanol* y *fermentation* representa, por tanto, una secuencia tecnológica recurrente en la literatura analizada: acondicionamiento de la biomasa, liberación de azúcares y conversión mediante microorganismos. La presencia de *biofuel* dentro del mismo clúster amplía esta relación hacia el aprovechamiento energético de los residuos, mientras que las conexiones con otras palabras clave sugieren la diversificación hacia materiales y productos biotecnológicos. Así, el clúster no solo relaciona la disponibilidad del bagazo con la producción de biocombustibles, sino también con una perspectiva de aprovechamiento integral de sus fracciones lignocelulósicas.

Microbiota y compuestos fitoquímicos derivados del agave

El tercer clúster agrupó palabras clave relacionadas con microorganismos y compuestos fitoquímicos, entre ellas yeast, Kluyveromyces, phytochemicals y antioxidants. Esta configuración reúne dos líneas de investigación vinculadas con el aprovechamiento del agave: el estudio de las comunidades microbianas que participan en las fermentaciones y la caracterización de compuestos bioactivos presentes en la planta, sus productos y sus residuos. Aunque ambos enfoques se encuentran próximos en la red, corresponden a objetos de estudio distintos y su relación debe interpretarse como una convergencia temática dentro del clúster, no necesariamente como una interacción biológica demostrada.

La presencia de palabras clave relacionadas con levaduras refleja la importancia de la microbiota en las fermentaciones de bebidas de agave. Estos procesos suelen desarrollarse como fermentaciones abiertas y espontáneas, en las que intervienen comunidades constituidas por levaduras, bacterias ácido-lácticas, bacterias acéticas y otros microorganismos. La composición de estas comunidades puede variar según la región, la especie de *Agave*, las condiciones ambientales, la materia prima y las prácticas productivas locales (Jara-Servin et al., 2025). La literatura ha registrado más de 50 especies de hongos y un número semejante de bacterias ácido-lácticas y acéticas en fermentaciones de bebidas de agave, lo que muestra la diversidad microbiana asociada con estos sistemas (Colón-González et al., 2025).

Dentro de estas comunidades, las levaduras desempeñan un papel central en la transformación de los azúcares fermentables y en la producción de etanol, biomasa y metabolitos que contribuyen a las características de las bebidas. Entre las especies identificadas recurrentemente en distintas regiones productoras se encuentran *Saccharomyces cerevisiae, Kluyveromyces marxianus, Torulaspora delbrueckii* y diversas especies de *Pichia* (Acosta-García et al., 2023; Colón-González et al., 2025). Su presencia en fermentaciones elaboradas bajo condiciones y prácticas distintas sugiere que estas levaduras poseen características fisiológicas que favorecen su adaptación a los mostos de agave, los cuales contienen azúcares fermentables, pero también compuestos que pueden limitar el desarrollo microbiano.

La aparición de *Kluyveromyces* como palabra clave del clúster responde, por tanto, al interés por levaduras capaces de aprovechar los carbohidratos presentes en los mostos y otros sustratos derivados del agave. En particular, *K. marxianus* ha sido aislada de fermentaciones realizadas en diferentes regiones productoras y forma parte de las especies recurrentes en estos ambientes (Colón-González et al., 2025). Además de su participación en la fermentación, el estudio de estas levaduras puede contribuir a comprender la dinámica de las comunidades microbianas y su relación con la transformación de los sustratos. Sin embargo, la selección de cepas o el diseño de cultivos iniciadores requiere considerar que las fermentaciones tradicionales dependen de interacciones entre varias poblaciones y no únicamente de una especie dominante.

Por otra parte, se identificó una la línea temática relacionada con las palabras clave *phytochemicals* y *antioxidants*. Los agaves contienen diferentes grupos de metabolitos secundarios, entre ellos saponinas, flavonoides, compuestos fenólicos y fitosteroles, cuya concentración y composición pueden variar entre especies, estructuras vegetales y condiciones de extracción. Estos compuestos se han identificado tanto en

las plantas como en hojas, fibras y otros materiales residuales generados durante su procesamiento, por lo que su recuperación representa una alternativa adicional para el aprovechamiento de los subproductos agroindustriales (Álvarez-Chávez et al., 2021; Bermúdez-Bazán et al., 2021).

Entre las actividades biológicas estudiadas se encuentran la capacidad antioxidante y los efectos antimicrobianos y antiinflamatorios atribuidos a diversos extractos y metabolitos del género. En *Agave angustifolia* y *Agave sisalana*, por ejemplo, se ha confirmado la presencia de metabolitos secundarios y se han observado diferencias en la actividad antioxidante según la especie y el disolvente empleado para la extracción (Mkhize et al., 2024). De manera más amplia, las revisiones sobre productos y subproductos del agave han documentado que las saponinas, los flavonoides y los compuestos fenólicos presentan interés para posibles aplicaciones alimentarias, farmacológicas y funcionales (Álvarez-Chávez et al., 2021; Bermúdez-Bazán et al., 2021).

La presencia conjunta de palabras clave microbiológicas y fitoquímicas muestra que ambas líneas forman parte del aprovechamiento biológico y funcional del agave. No obstante, la red no permite establecer por sí misma una interacción directa entre los microorganismos fermentativos y los metabolitos secundarios. Los resultados indican, más bien, que el campo se ha diversificado hacia el estudio paralelo de la microbiota, los procesos fermentativos y los compuestos bioactivos. Una mayor articulación entre estos enfoques permitiría examinar cómo las condiciones de fermentación influyen en la transformación o disponibilidad de determinados compuestos, así como evaluar aplicaciones biotecnológicas derivadas de estos procesos.

Aprovechamiento sustentable de subproductos del agave

El cuarto clúster reunió palabras clave relacionadas con el aprovechamiento de los residuos agroindustriales del agave, entre ellas *bagasse, biodegradation, sustainability* y *biorefinery*. La asociación entre estas palabras clave evidencia una línea de investigación orientada a transformar el bagazo, las hojas y las vinazas en materias primas susceptibles de reincorporarse a procesos productivos. En este sentido, la presencia de *sustainability* y *biorefinery* refleja el interés por desarrollar alternativas de aprovechamiento que reduzcan la acumulación de residuos y diversifiquen los productos obtenidos de la biomasa del agave.

Dentro de esta agrupación, el bagazo ocupa un lugar relevante debido a su disponibilidad y composición lignocelulósica. Su aprovechamiento se ha orientado hacia la obtención de biocombustibles, materiales celulósicos, compuestos de interés biotecnológico y productos para uso agrícola. Las hojas también representan una fuente potencial de fibras, carbohidratos y compuestos bioactivos, mientras que las vinazas pueden incorporarse a procesos de tratamiento y valorización biológica. En conjunto, estas corrientes residuales permiten plantear esquemas de biorrefinería en los que una misma materia prima se transforma mediante distintas rutas para obtener productos energéticos, materiales y biológicos (Alemán-Nava et al., 2018; Pérez-Pimienta et al., 2024).

La relación entre *bagasse, biodegradation* y *biorefinery* también muestra la participación de procesos biológicos en la transformación de la biomasa residual. Entre las aplicaciones reportadas se encuentra la producción de biometano mediante pretratamientos biológicos, enzimáticos, químicos e hidrotérmicos del bagazo (Valdez-Vázquez et al., 2020). Otros esquemas de biorrefinería han considerado la obtención de biocombustibles, materiales y productos para uso agrícola (Alemán-Nava et al., 2018). También se han desarrollado alternativas para obtener proteínas unicelulares y materiales de valor agregado a partir de los residuos del agave (Leal-Urbina et al., 2026; Warren-Vega et al., 2025). Estas aplicaciones pueden contribuir a disminuir la disposición inadecuada de los residuos y generar nuevas opciones de aprovechamiento para las cadenas agroindustriales del agave. No obstante, los beneficios ambientales y económicos dependen de las condiciones del proceso, la escala de implementación y la viabilidad en cada contexto productivo. Estas corrientes residuales pueden incorporarse a esquemas de biorrefinería para obtener productos energéticos, materiales y biológicos mediante distintas rutas de transformación. Por lo que, la configuración del clúster sugiere un cambio en la manera de abordar los subproductos, desde su tratamiento como residuos hasta su consideración como recursos aprovechables.

Otros usos del agave

El quinto clúster reunió palabras clave vinculadas con aplicaciones alternativas del agave, particularmente en los ámbitos alimentario, agrícola y de los materiales. La presencia de palabras clave como *food production, Pleurotus ostreatus, Raphanus sativus* y *fruits* muestra la diversificación de las investigaciones hacia usos distintos de la producción de bebidas y biocombustibles. Por esta razón, el clúster se denominó otros usos del agave, ya que integra aplicaciones heterogéneas que comparten el aprovechamiento de la planta o de sus derivados en nuevos procesos y productos.

Esta diversificación también se observa en el aprovechamiento de las fibras de especies como *Agave sisalana, A. angustifolia* y *A. fourcroydes*, evaluadas para la fabricación de textiles, materiales biodegradables y biocompuestos (Araújo et al., 2023; Colin-Torres et al., 2024; Pathan et al., 2026). En particular, algunas fibras presentan

propiedades físicas, mecánicas y térmicas que favorecen su incorporación como refuerzo en matrices poliméricas y su posible aplicación en materiales industriales y de construcción (Colin-Torres et al., 2024).

Otros estudios han considerado residuos y compuestos derivados del agave para desarrollar materiales absorbentes y productos de interés cosmético o farmacológico (Molina et al., 2023; da Costa et al., 2025). Estas aplicaciones amplían las posibilidades de aprovechamiento del género y muestran que la investigación no se limita a las cadenas del tequila y el mezcal, sino que comprende distintas alternativas alimentarias, agrícolas, funcionales y materiales. En conjunto, la diversidad de palabras clave y aplicaciones reunidas en este clúster refleja una línea heterogénea, pero con posibilidades de contribuir a la diversificación de las cadenas productivas del agave.

Estructura temática y evolución temporal de la investigación sobre el aprovechamiento del agave

La Figura 3 presenta la visualización de superposición de la red de coocurrencia de palabras clave relacionadas con el aprovechamiento del agave, sus productos y subproductos. El tamaño de los nodos representa la ocurrencia de las palabras clave, mientras que los enlaces muestran sus relaciones de coocurrencia. La escala cromática corresponde al año promedio de publicación de los documentos asociados con cada palabra clave. Las tonalidades azuladas representan temas abordados en años anteriores, las verdes corresponden a periodos intermedios y las amarillas identifican los temas de incorporación más reciente dentro del periodo representado.

La palabra clave agave ocupa una posición central y constituye uno de los nodos visualmente más prominentes de la red. Además, mantiene relaciones con palabras clave asociadas con el cultivo, la transformación agroindustrial, la biomasa, la biodegradación y la sostenibilidad. Esta configuración muestra su función articuladora dentro de la producción científica analizada y coincide con la identificación del agave como un recurso relevante para la bioeconomía de las regiones semiáridas, debido a su metabolismo CAM, eficiencia en el uso del agua y capacidad de adaptación a condiciones de disponibilidad hídrica limitada (Pérez-Pimienta et al., 2024).

Entre las palabras clave representadas en tonalidades azuladas se encuentran *cultivation, Mexico [North America], Agave tequilana, physicochemical property, Agave bagasse, vinasses, compost* y *recycling*. Esta distribución temporal sugiere que los estudios iniciales estuvieron relacionados con el cultivo y la caracterización del agave, así como con el manejo y aprovechamiento agrícola de los residuos generados durante su transformación. La presencia de *tequila* y *mezcal* en tonalidades azul-verde también refleja la importancia de las bebidas destiladas en las primeras líneas de investigación sobre el género, en concordancia con otros análisis bibliométricos que han identificado al tequila y al mezcal como componentes relevantes de la producción científica sobre las aplicaciones del agave (Gómez Flores et al., 2024).

En tonalidades principalmente verdes se observan palabras clave como *biomass, cellulose, biodegradation, composting, sustainability, fermentation, biofuel* y *bioenergy*. Este patrón muestra la incorporación posterior de enfoques relacionados con la transformación de la

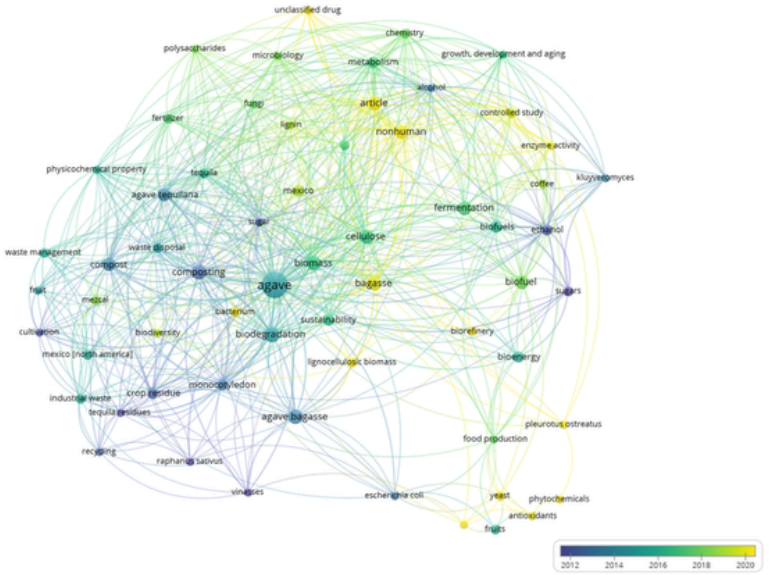

Figura 3. Visualización de superposición de la red de coocurrencia de palabras clave sobre el aprovechamiento de productos y subproductos del agave.
Fuente: Elaboración propia.

biomasa, los procesos biológicos y la valorización de los residuos agroindustriales. En particular, la asociación entre *biomass, cellulose, bagasse* y *biodegradation* permite reconocer una transición desde el manejo convencional de los residuos hacia su consideración como materias primas para distintos procesos de aprovechamiento. Esta interpretación es consistente con estudios que han documentado el potencial del bagazo y otros residuos del agave como insumos para aplicaciones energéticas, biotecnológicas y materiales dentro de esquemas de valorización y economía circular (Warren-Vega et al., 2025).

La distribución temporal de las palabras clave vinculadas con la fermentación no fue uniforme. Mientras que *fermentation* se ubicó principalmente en tonalidades verdes, *ethanol, sugars* y *Kluyveromyces* presentaron tonalidades predominantemente azuladas. Por ello, estas últimas se interpretaron como antecedentes de la investigación sobre la transformación fermentativa de los carbohidratos derivados del agave y no como temas de incorporación reciente. Las relaciones de coocurrencia que mantienen con *biofuel, bioenergy* y *biorefinery* muestran la continuidad y diversificación de esta línea de investigación. La importancia de las levaduras en las fermentaciones del agave y en la producción de compuestos asociados con estos procesos también ha sido documentada en estudios sobre competencia microbiana y diversidad de levaduras en ambientes fermentativos (Acosta-García et al., 2023; Colón-González et al., 2025).

Las tonalidades amarillas se observaron especialmente en palabras clave como *bagasse, enzyme activity, Pleurotus ostreatus, yeast, phytochemicals, antioxidants* y *fruits*. Su ubicación temporal sugiere una incorporación más reciente de estudios relacionados con procesos enzimáticos, microorganismos, compuestos bioactivos y aplicaciones alimentarias o funcionales. En particular, la asociación entre *phytochemicals* y *antioxidants* muestra la ampliación del campo hacia la caracterización y el aprovechamiento de componentes funcionales del agave. De manera complementaria, investigaciones recientes han descrito el potencial de materiales celulósicos derivados del agave para aplicaciones alimentarias y de empaque, lo que refleja la diversificación de las líneas de aprovechamiento (Manzanares-Meza et al., 2025).

En conjunto, la visualización de superposición muestra una evolución temática desde los estudios sobre el cultivo, la caracterización fisicoquímica y el manejo de residuos hacia enfoques relacionados con la biomasa, la biodegradación, la sostenibilidad, la bioenergía, los procesos enzimáticos y los compuestos fitoquímicos. Esta evolución no representa la sustitución de las líneas iniciales, sino su diversificación y coexistencia con aplicaciones biotecnológicas, alimentarias y funcionales.

Conclusiones

El análisis bibliométrico permitió identificar las principales líneas temáticas de la producción científica relacionada con el aprovechamiento del agave, sus productos y subproductos. La red de coocurrencia de palabras clave mostró cinco clústeres asociados con el origen y aprovechamiento agroindustrial del agave, los usos biotecnológicos de su biomasa, la microbiota y los compuestos fitoquímicos, el aprovechamiento sustentable de los subproductos y otros usos alternativos.

La estructura de la red refleja la amplitud temática de este campo de investigación y la relación entre las líneas vinculadas con el cultivo y la producción de tequila y mezcal y aquellas orientadas al aprovechamiento de la biomasa residual. En particular, la presencia de palabras clave relacionadas con el bagazo, la celulosa, la biodegradación, los biocombustibles y la biorrefinería muestra el interés por transformar los residuos agroindustriales en materias primas para la obtención de productos energéticos, materiales y biológicos. Asimismo, las asociaciones con levaduras, procesos fermentativos, compuestos fitoquímicos y antioxidantes evidencian la diversificación de las investigaciones hacia aplicaciones biotecnológicas y funcionales.

La visualización de superposición mostró una evolución desde los estudios relacionados con el cultivo, la caracterización fisicoquímica y el manejo de los residuos hacia líneas vinculadas con la transformación de la biomasa, la sostenibilidad, la bioenergía, los procesos enzimáticos y los compuestos fitoquímicos. Esta evolución no representa la sustitución de las líneas iniciales, sino su diversificación y coexistencia con aplicaciones alimentarias, biotecnológicas y de materiales.

En conjunto, los resultados muestran que el aprovechamiento de los productos y subproductos del agave constituye un campo multidisciplinario con posibilidades de ampliar las cadenas de valor y fortalecer la integración de esta biomasa en esquemas de aprovechamiento más diversificados.

Literatura citada

- Álvarez-Chávez, J., M. Villamiel, L. Santos-Zea y A.K. Ramírez-Jiménez. (2021). Agave by-products: An overview of their nutraceutical value, current applications, and processing methods. *Polysaccharides.* *2*(3): 720-743. https://doi.org/10.3390/polysaccharides2030044
- Acosta-García, E.D., J.B. Páez-Lerma, M.R. Moreno-Jiménez, J.A. Rojas-Contreras y N.O. Soto-Cruz. (2023). Yeast competition during alcoholic fermentation of agave. Its comprehension as a way to reach sustainable mezcal production. *International Journal of Food Science & Technology. 58*(12): 6674-6688. https://doi.org/10.1111/ijfs.16784
- Alemán-Nava, G.S., I.A. Gatti, R. Parra-Saldívar, J.F. Dallemand, B.E. Rittmann y H.M.N. Iqbal. (2018). Biotechnological revalorization of Tequila waste and by-product streams for cleaner production - A review from bio-refinery perspective. *Journal of Cleaner Production.* 172: 3713-3720. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.134
- Araújo, R., A. Arruda, H. Idogava y J. Lino. (2023). Potentialities of Agave sisalana fibers in the design of bioinspired materials and artifacts. *Materials Circular Economy. 5*(1): 12. https://doi.org/10.1007/s42824-023-00083-9
- Arellano-Plaza, M., J.B. Páez-Lerma, N.O. Soto-Cruz, M.R. Kirchmayr y A. Gschaedler Mathis. (2022). Mezcal production in Mexico: Between tradition and commercial exploitation. *Frontiers in Sustainable Food Systems.* 6: 832532. https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.832532
- Barrera, I., M.A. Amezcua-Allieri, L. Estupiñan, T. Martínez y J. Aburto. (2016). Technical and economical evaluation of bioethanol production from lignocellulosic residues in Mexico: Case of sugarcane and blue agave bagasses. *Chemical Engineering Research and Design.* 107: 91-101. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.10.015
- Bermúdez-Bazán, M., G.A. Castillo-Herrera, J.E. Urias-Silvas, A. Escobedo-Reyes y M. Estarrón-Espinosa. (2021). Hunting bioactive molecules from the Agave genus: An update on extraction and biological potential. *Molecules. 26*(22): 6789. https://doi.org/10.3390/molecules26226789
- Colin-Torres, J., M.M. González-Peña, M. Hidalgo-Reyes y A. Pérez-López. (2024). Desempeño físico-mecánico de un biocompuesto de matriz epóxica reforzado con fibra de Agave angustifolia Haw. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente.* *30*(1): 1-16. https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2023.02.012
- Colón-González, M., X. Aguirre-Dugua, M.G. Guerrero-Osornio, J.A. Avelar-Rivas, A. DeLuna, E. Mancera y L. Morales. (2025). Thriving in adversity: Yeasts in the agave fermentation environment. *Yeast.* *42*(1-3): 16-30. https://doi.org/10.1002/yea.3989
- Consejo Mexicano Regulador de la Calidad del Mezcal. (2024). *Informe de actividades 2024.* [Publicación en línea]. Disponible en: https://comercam-dom.org.mx/wp-content/uploads/2024/04/PUBLICO_INFORME_2024.pdf [consultado 14 septiembre 2026].
- Consejo Regulador del Tequila. (2025). *Continuará el trabajo coordinado para fortalecer a la agroindustria tequilera*. Consejo Regulador del Tequila. [Publicación en línea]. Disponible en: https://www.crt.org.mx/2025/03/05/continuara-el-trabajo-coordinado-para-fortalecer-a-la-agroindustria-tequilera/ [consultado 14 septiembre 2026].
- Contreras-Dávila, C.A., H.O. Méndez-Acosta, L. Arellano-García, F. Alatriste-Mondragón y E. Razo-Flores. (2017). Continuous hydrogen production from enzymatic hydrolysate of Agave tequilana bagasse: Effect of the organic loading rate and reactor configuration. *Chemical Engineering Journal*. 313: 671-679. https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.12.084
- Crespo, M., D. González, R. Macías, A. Rodríguez, L. Rendón, I. Del Real y J.T.M. Pablo. (2013). Evaluación de la composta de bagazo de agave como componente de sustratos para producir plántulas de agave azul tequilero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 4*(8): 1161-1173.
- Da Costa, L.T.S., J.A.R. Fracasso, R.P. Gonçalves, W.R.P. Martins, F.A.A.D. Oliveira, E.B. Coelho, G.O. Barbosa, N.A. Zoppe, K.A.A. Miyashiro, J.P. Gomes, B.C. Silva, D.B. Barbosa, V.F. Ximenes, P. de O. Neto y L. dos Santos. (2025). Pharmacological potential of Agave sisalana plant residue: Antioxidant and antifungal activities. *Cosmetics. 12* (6): 259. https://doi.org/10.3390/cosmetics12060259
- Davis, S.C. y H.G. Ortiz-Cano. (2023). Lessons from the history of Agave: Ecological and cultural context for valuation of CAM. *Annals of Botany*. 132 (4): 819-833. https://doi.org/10.1093/aob/mcad072
- De Anda-Rodríguez, F.A., M.R. Corona-Ramírez, C.D. Patiño-Arévalo, M.A. Zárate-Navarro, A.I. Zárate-Guzmán y L.A. Romero-Cano. (2025). Mycomaterials from agave bagasse: A valorization strategy for sustainable tequila packaging. *Fermentation.* *11*(9): 500. https://doi.org/10.3390/fermentation11090500

- Estrada-Maya, A. y B. Weber. (2022). Biogás y bioetanol a partir de bagazo de agave sometido a explosión de vapor e hidrólisis enzimática. *Ingeniería Investigación y Tecnología. 23*(2): e1887. https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2022.23.2.009
- Gómez Flores, N.E., M.S. López Vigil, H. Santos Alvarado, H. Islas Torres y E. Hernández Cortes. (2024). Análisis bibliométrico: Aplicaciones del extracto agave. Más allá del pulque y el tequila. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar. 8* (6): 3977-4000. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i6.15139
- Hidalgo-Reyes, M., M. Caballero-Caballero, L.H. Hernández-Gómez y G. Urriolagoitia-Calderón. (2015). Chemical and morphological characterization of Agave angustifolia bagasse fibers. *Botanical Sciences. 93*(4): 807-817. https://doi.org/10.17129/botsci.250
- Jara-Servin, A., L.D. Alcaraz, S.I. Juarez-Serrano, A. Espinosa-Jaime, I. Barajas, L. Morales, A. DeLuna, A. Hernández-López y E. Mancera. (2025). Microbial communities in agave fermentations vary by local biogeographic regions. *Environmental Microbiology Reports. 17*(1): e70057. https://doi.org/10.1111/1758-2229.70057
- Leal-Urbina, E., E. Dufoo-Hurtado, M. Gaytán-Martínez, E.N. Tec-Caamal y A.K. Ramírez-Jiménez. (2026). Emerging sustainable bioprocess for the valorization of agave bagasse for single-cell protein production. *Foods. 15*(6): 1033. https://doi.org/10.3390/foods15061033
- Manzanares-Meza, O.A., J. Morales-Castro, H.A. Ruiz, A.M. Avila-Galván, S. Rojas-Varela, B.E. Morales-Contreras, M.I. Guerra-Rosas, W. Rosas-Flores, J.G. Báez-González, S.A. Galindo-Rodríguez y M. Bautista-Villarreal. (2025). Nanocellulose from agaves: Obtention, characterization and potential application in food packaging and Pickering emulsions-A review. *Waste and Biomass Valorization.* https://doi.org/10.1007/s12649-025-03399-6
- Mkhize, N.G., M.C. Achilonu, I.T. Manduna, X.V. Ngubane y S.M. Nkosi. (2024). Phytochemical screening and antioxidant evaluation of Agave angustifolia and Agave sisalana. *Journal of Medicinal Plants for Economic Development. 8*(1): a263. https://doi.org/10.4102/jomped.v8i1.263
- Molina, A., A. Kothari, A. Odundo y M. Prakash. (2023). Agave sisalana: Towards distributed manufacturing of absorbent media for menstrual pads in semi-arid regions. *Communications Engineering. 2*(1): 77. https://doi.org/10.1038/s44172-023-00130-y
- Orduña-Flores, Á.J., E.E. Suárez-Patlán, D. Guerra-Ramírez, M.E. Fuentes-López y V. Martínez-Aquino. (2024). Revisión bibliométrica y optimización de la extracción asistida por ultrasonido de compuestos antioxidantes a partir de cáscara de cacao. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research. 7*(4): 1-16. https://doi.org/10.34188/bjaerv7n4-100
- Palomo-Briones, R., I. López-Gutiérrez, F. Islas-Lugo, K.L. Galindo-Hernández, D. Munguía-Aguilar, J.A. Rincón-Pérez, M.A. Cortés-Carmona, F. Alatriste-Mondragón y E. Razo-Flores. (2018). Agave bagasse biorefinery: Processing and perspectives. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 20: 1423-1441. https://doi.org/10.1007/s10098-017-1421-2
- Pathan, Y., N. Alapakam, R.V. Hemavathy, K. Vijetha, S.K. Suraparaju, V.K. Kanth, P.K. Singotia y A. Joshi. (2026). Extraction of natural fibres from *Agave fourcroydes* leaves and multi-property evaluation for potential textile applications. *Scientific Reports*. https://doi.org/10.1038/s41598-026-42567-z
- Pérez-Pimienta, J.A., J.P.A. Icaza-Herrera, J.A. Mendoza-Pérez, V. González-Álvarez, H.O. Méndez-Acosta y J. Arreola-Vargas. (2019). Mild reaction conditions induce high sugar yields during the pretreatment of Agave tequilana bagasse with 1-ethyl-3-methylimidazolium acetate. *Bioresource Technology.* 275: 78-85. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.12.041
- Pérez-Pimienta, J.A., H.O. Méndez-Acosta, S.C. Davis y D.K.Y. Tan. (2024). The role of agave as feedstock within a sustainable circular bioeconomy. *Frontiers in Chemical Engineering. 5*: 1343629. https://doi.org/10.3389/fceng.2023.1343629
- Ramirez-Cortina, C.R., M.S. Alonso-Gutierrez y L. Rigal. (2012). Valorización de residuos agroindustriales del tequila para alimentación de rumiantes. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. 18*(3): 449-457. https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.08.059
- Rijal, D., T. Vancov, S. McIntosh, N. Ashwath y G.A. Stanley. (2016). Process options for conversion of Agave tequilana leaves into bioethanol. *Industrial Crops and Products. 84*: 263-272. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.02.011
- Robles Calderón, R., F. Alcántara Boza, E. Benmites-Alfaro, O. Tinoco Gómez y J. Chirre Flores. (2025). Consortium of Candida utilis, Kluyveromyces marxianus and Saccharomyces cerevisiae yeasts for vinasse fermentation of Agave americana L. liquor for biomass production and reduction in chemical oxygen demand. *Fermentation. 11*(5): 281. https://doi.org/10.3390/fermentation11050281

- Ruiz-Camou, C., J. Núñez y R. Musule. (2023). Evaluating the environmental performance of mezcal production in Michoacán, México: A life cycle assessment approach. *The International Journal of Life Cycle Assessment. 28*(12): 1658-1671. https://doi.org/10.1007/s11367-023-02237-y
- Sangaré, D., S. Bostyn, M. Moscosa Santillán, P. García-Alamilla, V. Belandria y I. Gökalp. (2022). Comparative pyrolysis studies of lignocellulosic biomasses: Online gas quantification, kinetics triplets, and thermodynamic parameters of the process. *Bioresource Technology.* 346: 126598. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126598
- Stewart, J.R. (2015). Agave as a model CAM crop system for a warming and drying world. *Frontiers in Plant Science.* 6: 684. https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00684
- Toledo-Cervantes, A., J. Arreola-Vargas, S.V. Elias-Palacios, E.N. Marino-Marmolejo, G. Davila-Vazquez, V. González-Álvarez y H.O. Méndez-Acosta. (2018). Evaluation of semi-continuous hydrogen production from enzymatic hydrolysates of Agave tequilana bagasse: Insight into the enzymatic cocktail effect over the co-production of methane. *International Journal of Hydrogen Energy. 43*(31): 14193-14201. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.05.134
- Torres-García, I., F.J. Rendón-Sandoval, J. Blancas, A. Casas y A.I. Moreno-Calles. (2019). The genus Agave in agroforestry systems of Mexico. *Botanical Sciences.* *97*(3): 263-290. https://doi.org/10.17129/botsci.2202
- Trejo, L., V. Limones, G. Peña, E. Scheinvar, O. Vargas-Ponce, D. Zizumbo-Villarreal y P. Colunga-GarcíaMarín. (2018). Genetic variation and relationships among agaves related to the production of Tequila and Mezcal in Jalisco. *Industrial Crops and Products.* 125: 140-149. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.08.072
- Valdez-Vázquez, I., F. Alatriste-Mondragón, J. Arreola-Vargas, G. Buitrón, J. Carrillo-Reyes, E. León-Becerril, H.O. Méndez-Acosta, I. Ortiz y B. Weber. (2020). A comparison of biological, enzymatic, chemical and hydrothermal pretreatments for producing biomethane from agave bagasse. *Industrial Crops and Products*. 145: 112160. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112160
- Van Eck, N.J. y L. Waltman. (2021). *VOSviewer* versión 1.6.17 [programa informático]. Centre for Science and Technology Studies, Leiden University. Disponible en: https://www.vosviewer.com/ [consultado 14 septiembre 2026].
- Warren-Vega, W.M., R. Fonseca-Aguiñaga, C.F. López de la Cruz, A. Campos-Rodríguez, A.I. Zárate-Guzmán y L.A. Romero-Cano. (2025). Valorization of agave bagasse as a bio-template for circular economy: Applications in energy conversion, metabolite production, and sustainable material synthesis. *Biomass and Bioenergy*. 197: 107797. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107797