

Contribución de almacenamiento de carbono en agave potatorum: estrategia de desarrollo sostenible para comunidades mezcaleras del municipio de Tecali de Herrera, Puebla

Ramírez Acevedo, Anabel

2025-03

<https://hdl.handle.net/20.500.11777/6243>

<http://repositorio.iberopuebla.mx/licencia.pdf>

UNIVERSIDAD IBEROAMERICANA PUEBLA

DEPARTAMENTO DE ARTE, DISEÑO Y
ARQUITECTURA



**“CONTRIBUCIÓN DE ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN
AGAVE POTATORUM: ESTRATEGIA DE DESARROLLO
SOSTENIBLE PARA COMUNIDADES MEZCALERAS DEL
MUNICIPIO DE TECALI DE HERRERA, PUEBLA”**



TESIS

que para obtener el Grado de
MAESTRÍA EN HÁBITAT Y EQUIDAD SOCIO TERRITORIAL

Presenta: **ANABEL RAMÍREZ ACEVEDO**

Director de Trabajo: **MTRO. JERONIMO CHAVARRÍA HERNÁNDEZ**

Heroica Puebla de Zaragoza, Puebla
Marzo 2025

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Dios por permitirme concluir esta etapa de mi formación académica, superando las adversidades que, en su momento, hicieron que pausara este proceso.

A la Universidad Iberoamericana de Puebla, especialmente a la Maestría en Hábitat y Equidad Socio Territorial, por brindarme la oportunidad de estudiar en un entorno académico tan humano y enriquecedor.

Mi agradecimiento también al CONACYT por el valioso apoyo otorgado durante mis estudios de maestría, sin el cual no habría sido posible llevar a cabo este proyecto.

A mi director de tesis, Mtro. Jéronimo Chavarría Hernández, por su constante dirección, orientación y acompañamiento a lo largo de todo este proceso académico.

A mis lectores de tesis, Dra. María Eugenia Ibarrarán Viniegra y Dr. Alberto Romeo Saldaña Vázquez, por sus observaciones y aportaciones que contribuyeron a mejorar significativamente este trabajo.

Al Dr. Oscar D. Soto Badillo por su confianza y apoyo financiero para la elaboración de estudios de laboratorio relacionados con esta tesis.

Al MC. Mauricio Mora Pérez y al Ing. Álvaro Velez Soto por su valiosa colaboración, cuyo trabajo estoy segura continuará impulsando este proyecto en beneficio de los productores.

A los productores y maestros mezcaleros de La Magdalena Cuaxixtla, por compartir generosamente sus conocimientos sobre el *Agave potatorum* y el proceso de producción de mezcal, sin los cuales este proyecto no habría sido posible.

A todos mis profesores de la Maestría en Hábitat y Equidad Socio Territorial por las enseñanzas, herramientas y perspectivas brindadas, que me permitieron abordar los retos relacionados con el hábitat y la sustentabilidad.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi querida familia Chávez Ramírez, especialmente a mi esposo Ernesto y a nuestros hermosos hijos Dante y Giannis, quienes son mi mayor motivación y razón de ser.

A mi madre, quien me acompaña en cada paso de mi vida con sus sabios consejos y amor incondicional.

A mis hermanas, que siempre han sido mi apoyo fundamental y mis consejeras más cercanas.

A mis sobrinos, que llenan de alegría mi vida y ahora también de felicidad a mis pequeños hijos.

A mi abuelo, que aunque esté lejos, siempre está presente en mi corazón y pensamientos.

Sólo cuando reconozcamos el valor oculto en la naturaleza y sus ciclos, podremos entender cómo nuestras acciones pueden contribuir a su equilibrio y al bienestar de las comunidades
(Ramírez, 2025).

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	5
ÍNDICE DE CUADROS	8
ÍNDICE DE FIGURAS	9
RESUMEN	11
ABSTRACT	12
1 INTRODUCCIÓN	13
1.1 Planteamiento del Problema	16
1.2 Pregunta de Investigación	19
1.3 Objetivo General	19
1.4 Objetivos Particulares	20
1.5 Justificación	20
1.6 Antecedentes	24
1.6.1 Trayecto del mezcal en las últimas décadas	24
2 MARCO TEORICO CONCEPTUAL	26
2.1 Desarrollo Sostenible	26
2.2 Cambio climático - Gases de efecto invernadero	27
2.3 Contribución de la Naturaleza para las Personas	29
2.4 Almacenes de carbono	32
2.4.1 Ciclo de carbono	32
2.4.2 Contenido y captura de carbono en la vegetación.	34
2.4.3 Clasificación de almacenes de carbono en las comunidades vegetales.	34
2.4.4 Métodos para estimar la biomasa y carbono	36
2.4.4.1 Carbono de biomasa aérea (BA)	36
2.4.4.2 Carbono del suelo	38

2.5 Mercados de carbono	40
2.5.1 Marco de proyectos de captura de carbono	40
2.5.2 Asignación de precio al carbono	45
2.6 Análisis del mercado voluntario en México	47
3 ÁREA DE ESTUDIO	52
3.1 Descripción de la zona de estudio	52
3.2 Especie estudiada	54
4 METODOLOGÍA	55
4.1 Postura metodológica	55
4.2 Métodos para la recolección de información	55
4.2.1 Trabajo de campo para analizar la percepción y manejo tradicional del <i>Agave potatorum</i> para su aprovechamiento sostenible y captura de carbono	55
4.2.2 Trabajo de campo para estimar el carbono almacenado en la biomasa aérea y suelo de los sistemas de producción de <i>Agave potatorum</i>	56
4.2.2.1 Sitios de muestreo	56
4.2.2.2 Medición y estimación de biomasa aérea y contenido de carbono en <i>Agave potatorum</i>	60
4.2.2.3 Medición y estimación de carbono del suelo	62
4.3 Métodos para análisis e interpretación de datos	65
4.3.1 Trabajo de campo para analizar la percepción y manejo tradicional del <i>Agave potatorum</i> para su aprovechamiento sostenible y captura de carbono	65
4.3.2 Trabajo de campo para estimar el carbono almacenado en la biomasa aérea y suelo de los sistemas de producción de <i>Agave potatorum</i>	66
4.3.2.1 Sitios de muestreo	66
4.3.2.2 Estimación de biomasa aérea y contenido de carbono en <i>Agave potatorum</i>	67
4.3.2.3 Estimación de carbono del suelo	72
4.3.2.4 Cálculo del carbono del área del proyecto	73

4.3.2.5 Cálculo del carbono equivalente (CO ₂ e)	73
5 RESULTADOS	75
5.1 Analizar la percepción y manejo tradicional del <i>Agave potatorum</i> para su aprovechamiento sostenible y captura de carbono.	75
5.2 Estimar el carbono almacenado en la biomasa aérea y suelo de los sistemas de producción de <i>Agave potatorum</i>	77
5.2.1 Estimación de biomasa aérea y contenido de carbono en <i>Agave potatorum</i>	77
5.2.2 Estimación de carbono del suelo	80
5.2.3 Cálculo del carbono del área del proyecto	81
5.2.4 Cálculo del carbono equivalente (CO ₂ e)	82
5.3 Discusión de Resultados	85
5.4 Propuesta de alternativas de manejo y aprovechamiento sostenible de <i>Agave potatorum</i> , que a su vez influyen en la acumulación de carbono en comunidades del municipio de Tecali de Herrera, Puebla.	87
5.5 Introducción de los sistemas de producción de <i>Agave potatorum</i> a los mercados de carbono.	94
6 CONCLUSIONES	96
REFERENCIAS	98
ACRÓNIMOS	110
UNIDADES DE REFERENCIA	112
ANEXOS	113

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2 .3.1 CNP y su relación con la calidad de vida expresadas en valores instrumentales y relacionales.	31
Cuadro 2 .5.2.1 Características de PET de Sistemas de comercio de emisiones en América del Norte.	46
Cuadro 2 .6.1 Proyectos con venta de créditos de carbono en el mercado voluntario en México.	49
Cuadro 3 .1.1. Población de las localidades vinculada a la producción de mezcal. ...	53
Cuadro 4 .2.2.1.1 Descripción topográfica y ecológica de los predios muestreados de <i>Agave potatorum</i>	59
Cuadro 4.3 .2.1.1 Variables medidas en <i>Agave potatorum</i> por sitio de muestreo.	67
Cuadro 4.3 .2.2.1. Variables consideradas para la generación del modelo de regresión de peso de piña.	68
Cuadro 4.3 .2.2.2 Variables consideradas para la generación del modelo de regresión de peso de hoja.	68
Cuadro 4.3 .2.2.3. Peso húmedo y seco acumulado en hoja y piña (g) de <i>Agave potatorum</i>	70
Cuadro 4.3 .2.2.4. Contenido de C acumulado en hoja y piña (%) de <i>Agave potatorum</i>	72
Cuadro 4.3 .2.3.1. Contenido de C acumulado en suelo (%).	72
Cuadro 4.3 .2.5.1. Valor de la compensación de carbono almacenado después de 10 años.	74
Cuadro 5 .2.3.1. Resultados del contenido de carbono por cada sitio muestreado. .	81
Cuadro 5 .2.4.1. Carbono almacenado en <i>Agave potatorum</i> por cada sitio muestreado.	83
Cuadro 5 .2.4.2 Valor de la compensación de carbono almacenado después de 10 años.	83
Cuadro 5 .2.4.3. Valor de la compensación de carbono almacenado después de 10 años de <i>Agave potatorum</i> en Torija, Cuautinchán con una densidad de 6 mil plantas/ha.	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 .1.1 Producción nacional histórica de mezcal.	17
Figura 1 .5.1 Principales beneficios del manejo sostenible del carbono del suelo en varias escalas espaciales (de Izac, 1997).	23
Figura 2 .4.1.1 Transferencia de carbono entre los diferentes reservorios de un ecosistema forestal.	33
Figura 2 .5.1.1 Procesos para el desarrollo, implementación y acreditación de un proyecto.	42
Figura 2 .5.1.2 La situación de los sistemas de comercio de emisiones en el mundo 2024.	44
Figura 3 .1.1 Predios de las localidades del lugar del estudio del municipio de Tecali de Herrera, vinculados a la fábrica de producción de mezcal en La Magdalena Cuaxixtla.	52
Figura 4 .2.2.1.1 Uso actual de la tierra del mapa base del lugar de estudio.	58
Figura 4 .2.2.1.2 Sitio de muestreo Cozahuatla.	59
Figura 4 .2.2.1.3 Sitio de muestreo Tehuizcolotla.	59
Figura 4 .2.2.1.4 Sitio de muestreo Torija.	59
Figura 4 .2.2.2.1 Medición de diámetro y altura de <i>Agave potatorum</i>	61
Figura 4 .2.2.2.2 Registro de datos de la medición de <i>Agave poraturm</i>	61
Figura 4 .2.2.2.3 Pesado de piña de <i>Agave potatorum</i>	61
Figura 4 .2.2.2.4 Pesado de hoja de <i>Agave potatorum</i>	61
Figura 4 .2.2.2.5 Muestra de la sección media de la hoja más recientemente madura, (3a - 6a hoja desde el centro).	62
Figura 4 .2.2.2.6. Muestra de la sección media de la piña en corte transversal.	62
Figura 4 .2.2.3.1 Toma de muestra de suelo.	63

Figura 4 .2.2.3.2 Profundidad de muestra 20 cm (10 cm material obscuro y 10 de material de tepetate permeable).	63
Figura 4 .2.2.3.3 Preparación de la muestra de suelo.	64
Figura 4 .2.2.3.4 Toma de datos de las muestras de suelo y etiquetado.	64
Figura 5 .2.1.1 Contenido de carbono de biomasa aérea (BA).	79
Figura 5 .2.2.1Contenido de carbono de carbono del suelo.	80
Figura 5 .2.3.1 Carbono presente en la biomasa aérea y suelo.	82
Figura 5 .4.1 Elementos vinculados a la fábrica de mezcal de La Magdalena Cuaxixtla para el manejo y aprovechamiento sostenible de <i>Agave potatorum</i>	89

RESUMEN

La presente investigación evalúa el potencial de los sistemas de producción de *Agave potatorum* para capturar carbono y promover el desarrollo sostenible en comunidades mezcaleras del municipio de Tecali de Herrera, Puebla. Esta contribución de la naturaleza para las personas (CNP), destaca la relevancia de esta planta no solo para la producción de mezcal, sino también para la mitigación del cambio climático y la sostenibilidad ambiental. Sin embargo, el *Agave potatorum* enfrenta serios desafíos derivados a la alta demanda del mezcal y el manejo inadecuado de los sistemas de producción, tanto cultivados como silvestres de solo extracción y no recuperación del agave, lo que ha provocado su sobre-explotación y ponen en riesgo la identidad cultural asociada a las prácticas tradicionales.

Además, el largo ciclo productivo del *Agave potatorum*, que en promedio tarda hasta 10 años para madurar, se ve agravado por la extracción prematura y las limitadas políticas institucionales de regulación y apoyo, junto con los efectos del cambio climático que intensifican la vulnerabilidad del agave y las actividades que dependen de él, generando preocupación entre los productores sobre la disponibilidad local de la especie y los impactos en la biodiversidad y los medios de vida.

A pesar de estos desafíos, la investigación identificó varias iniciativas bioculturales que contribuyen a la preservación del *Agave potatorum*, como la reforestación, la conservación del suelo y el agua, la implementación de sistemas agroforestales, por mencionar algunas. Los resultados obtenidos muestran que las prácticas de manejo eficientes han incrementado significativamente el almacenamiento de carbono en la biomasa aérea del agave y en el suelo, reduciendo inclusive el ciclo de producción. Los modelos predictivos desarrollados indican que es posible alcanzar un alto potencial de captura de carbono, lo que ofrece la posibilidad de acceder a mercados de carbono, generando beneficios económicos derivados de los Certificados de Reducción de Emisiones (CRE's).

Palabras clave: agave, captura de carbono, CNP, cambio climático, mercado de carbono y desarrollo sostenible.

ABSTRACT

This research evaluates the potential of *Agave potatorum* production systems to capture carbon and promote sustainable development in mezcal-producing communities in the municipality of Tecali de Herrera, Puebla. This contribution of nature to people (CNP) highlights the importance of this plant not only for mezcal production but also for climate change mitigation and environmental sustainability. However, *Agave potatorum* faces serious challenges due to the high demand for mezcal and the inadequate management of production systems, both cultivated and wild, focusing solely on extraction and lack of proper recovery, which has led to its over-exploitation and puts at risk the cultural identity associated with traditional practices.

Furthermore, the long production cycle of *Agave potatorum*, which on average takes up to 10 years to mature, is worsened by premature extraction and limited institutional policies for regulation and support, along with the effects of climate change that intensify the vulnerability of the agave and the activities dependent on it, raising concerns among producers about the local availability of the species and the impacts on biodiversity and livelihoods.

Despite these challenges, the research identified several biocultural initiatives contributing to the preservation of *Agave potatorum*, such as reforestation, soil and water conservation, and the implementation of agroforestry systems, among others. The results obtained show that efficient management practices have significantly increased carbon storage in the aerial biomass of the agave and in the soil, even reducing the production cycle. The developed predictive models indicate that it is possible to achieve a high carbon capture potential, providing the opportunity to access carbon markets, generating economic benefits from the issuance of Emission Reduction Certificates (CERs).

Keywords: agave, carbon capture, CNP, climate change, carbon market, and sustainable development.

1 INTRODUCCIÓN

La naturaleza constituye el fundamento de nuestra calidad de vida al proporcionar servicios vitales esenciales y una rica diversidad biológica (IPBES, 2019, p.22); provee soporte vital básico (regulador), bienes materiales (material) e inspiración espiritual (inmaterial), conocidos como contribuciones de la naturaleza para las personas. Sin embargo, esta invaluable aportación, está siendo severamente alterada por factores humanos como prácticas insostenibles y el cambio climático (IPBES, 2019; Saldaña, 2021).

En el contexto del municipio de Tecali de Herrera, Puebla, específicamente en la localidad de La Magdalena Cuaxixtla, los habitantes poseen una cosmovisión arraigada a la tierra y un profundo conocimiento de la vegetación local. Especies como el *Agave potatorum*, conocido como maguey “papalometl”, posee importancia socioeconómica crucial, integrando biodiversidad y cultura.

Esta especie, una de las 159 variedades de agaves endémicas de México, es conocido por su tradición en la producción de mezcal, pero también por su capacidad para almacenar carbono tanto en sus tejidos como en los suelos (García, 2018; Torres et al., 2015). Este proceso, que se lleva a cabo a través de su metabolismo ácido crasuláceo (MAC), no solo contribuye a la reducción de dióxido de carbono en la atmósfera, sino que también fortalece la capacidad de los ecosistemas locales para adaptarse a los efectos del cambio climático (Nobel, 1995; Pimienta et al., 2005).

Los agaves son capaces de adaptarse a diferentes condiciones, pudiendo contribuir a la reforestación y restauración de suelos degradados (Pimienta-Barríos & Nobel, 1994), a la agricultura sostenible, a la conservación de recursos hídricos, etc.; esta planta ofrece soluciones innovadoras para enfrentar los desafíos ambientales presentes y futuros. Actualmente México se centra en la implementación de estas acciones, diseñando instrumentos que obedecen a la política de mitigación, a través de la creación de un mercado de carbono obligatorio en México “Sistema de Comercio de Emisiones” (SCE).

Esta iniciativa ofrece oportunidades para que especies como el *Agave Potatorum* se incorporen a estrategias de captura de carbono y desarrollo sostenible. Aun cuando esta serie de CNP que proporcionan los agaves, estos enfrentan dificultades significativas debido a la presión sobre los recursos naturales por la creciente demanda de mezcal, una de las actividades más predominantes que amenazan a esta especie es la extracción intensiva de la planta sin renovación adecuada, así como la pérdida de identidad cultural relacionada con las prácticas tradicionales de cultivo (García et al., 2010; Plascencia et al., 2018). Estos factores ponen en riesgo no solo su existencia, sino también el conocimiento ancestral asociado a su manejo. Además de las condiciones climáticas adversas, como sequías e irregularidades en las precipitaciones que agravan la situación y amenazan la producción del agave (IPBES, 2018; Ayala et al., 2018).

En respuesta a estas adversidades, surge la necesidad de desarrollar estrategias a través de la recuperación de los saberes bioculturales de las comunidades locales para el manejo sostenible del *Agave potatorum* en la producción de mezcal, así como su capacidad para capturar carbono, y fortalecer a las comunidades a adaptarse a los cambios climáticos; prácticas como la reforestación, los sistemas agroforestales con especies nativas, la conservación de suelos y agua mediante zanjas bordo, son algunas de ellas, creando oportunidades para acceder a los mercados de carbono y obtener beneficios económicos.

Por tanto, esta investigación se enfoca en explorar el potencial del sistema de producción de *Agave potatorum*, contribuyendo a la resiliencia climática y al bienestar socioeconómico de las comunidades mezcaleras en Tecali de Herrera.

El trabajo de tesis está estructurado en seis secciones: introducción, marco teórico conceptual, área de estudio, metodología, resultados y conclusiones. Cada una de estas secciones está diseñada para proporcionar una comprensión profunda de los factores ambientales, sociales, económicos e institucionales que influyen en el manejo y la sostenibilidad del *Agave potatorum* en torno a la producción de mezcal y captura carbono.

En la primera sección de introducción, pone en contexto la problemática de la investigación, misma que da origen a las preguntas de investigación y el planteamiento del objetivo central del trabajo, enseguida una descripción que justifica el trabajo de investigación y un análisis de los antecedentes que lo acompañan.

El marco teórico conceptual, correspondiente a la segunda sección, refiere los conceptos intrínsecos del desarrollo sostenible, cambio climático, CNP y su analogía e influencia del carbono. Se hace también un análisis del mercado voluntario de carbono en México (MVC), en relación a la implementación de iniciativas, mecanismos y proyectos para la mitigación de emisiones.

En la tercera sección, se delimita el área de estudio y la ubicación geográfica del proyecto de investigación, se hace una breve caracterización física y social para dar idea de la situación actual; así como las particularidades de la especie estudiada (*Agave potatorum*).

La cuarta parte plantea la metodología seguida en la investigación participativa rural con los productores para entender la interrelación de los sistemas de producción de agaves para la producción de mezcal, identificación de problemas y posibles propuestas de acción, donde se describen los instrumentos utilizados para la recolección de datos, análisis de laboratorio y métodos para su análisis e interpretación.

En la quinta sección de resultados, se da respuesta a las preguntas de investigación, abordando la problemática y objetivo del proyecto de tesis, realizando la comparación de los resultados con estudios formales donde han sido evaluados almacenes de carbono en condiciones similares al lugar de estudio, manifestando que es imprescindible el aprovechamiento sostenible del *Agave potatorum* para la preservación de la producción del mezcal y las CNP.

Finalmente, en la última sección de conclusiones se hace una correlación de los resultados aludiendo a su importancia, concernientes de manera directa con los problemas, objetivos y las preguntas de investigación planteadas.

1.1 Planteamiento del Problema

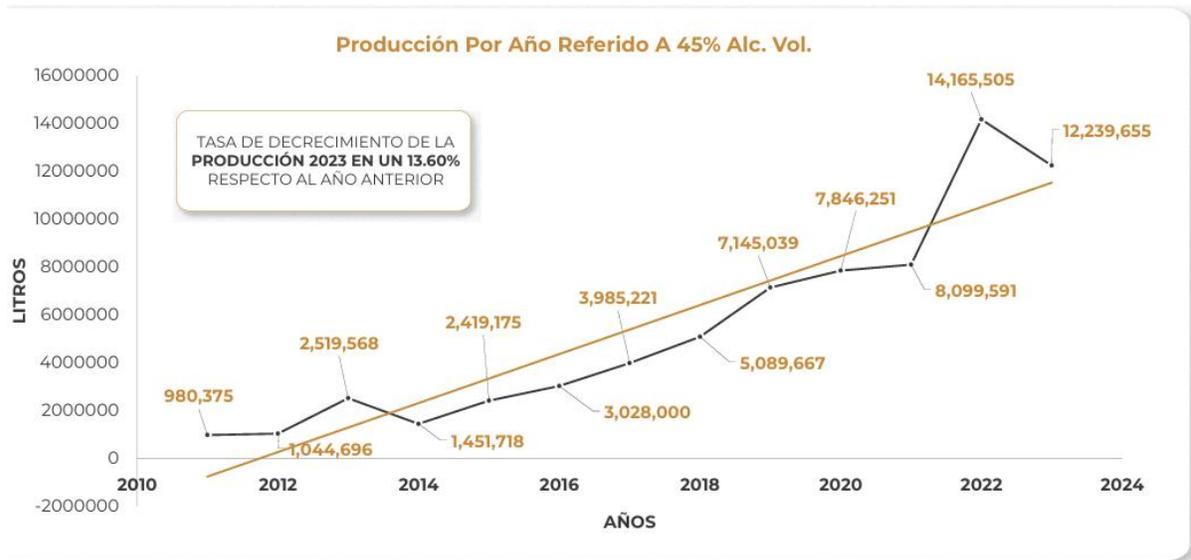
El *Agave potatorum*, una especie nativa de los Estados de Puebla y Oaxaca, juega un papel trascendental en la producción de mezcal, siendo uno de los recursos más importantes para las comunidades mezcaleras de Tecali de Herrera, Puebla (García-Mendoza, 2010). Este agave no solo es esencial para la economía local, sino que también simboliza la identidad cultural de la región, arraigada en prácticas ancestrales que se han transmitido a lo largo de generaciones (Torres-García et al., 2013). Sin embargo, la creciente demanda de mezcal y la sobreexplotación del *Agave potatorum* enfrentan serios inconvenientes que comprometen tanto su sostenibilidad como el equilibrio socioeconómico y ambiental de la región (Ruiz-Luna & García-Mendoza, 2021).

Durante la última década, el consumo de mezcal a nivel nacional ha experimentado un crecimiento acelerado (Figura 1.1.1), alcanzando una producción de 14.2 millones de litros en el 2022, con un aumento del 74.89% respecto al año anterior, esto de acuerdo con el Consejo Regulador de Mezcal (CRM) (CRM, 2022). Por otro lado, datos más recientes indican una disminución en la producción. Según el CRM, en 2023 la producción nacional de mezcal fue de 12.24 millones de litros, reflejando una reducción del 13.6% en comparación con 2022 (CRM, 2024).

Esta disminución se atribuye a diversos factores, entre ellos la crisis económica global, la inflación y la volatilidad del tipo de cambio, la sobreproducción y caída en los precios del agave, así como el impacto del cambio climático. Estos factores han afectado significativamente la producción de mezcal, repercutiendo en los productores y las comunidades que dependen de esta industria. No obstante, la demanda sigue siendo alta (El Economista, 2024).

En términos de producción nacional, Oaxaca continúa siendo el líder, concentrando el 90.51% de la producción total, seguido por Puebla con el 4.94%, que logró incrementar su producción anual a más de 1.5 millones de litros en comparación con el año anterior (CRM, 2024).

Figura 1.1.1 Producción nacional histórica de mezcal.



Fuente: CRM, 2024, p. 4.

A pesar del crecimiento de la industria, los pequeños productores y las comunidades tradicionales no han experimentado beneficios significativos, enfrentando obstáculos burocráticos y estructurales que limitan su participación en los mercados (Hernández, 2018).

La diversidad de especies de agave utilizadas en la producción de mezcal es significativa, con 14 especies reguladas por la Norma Oficial Mexicana NOM-070. En Puebla, se emplean tres especies principales (*Agave angustifolia*, *Agave potatorum* y *Agave marmorata*), destaca el *Agave potatorum* como el más demandado entre las marcas certificadas. Esta alta demanda está llevando a prácticas industriales que priorizan la cantidad sobre la calidad, lo que pone en riesgo la autenticidad del mezcal y las técnicas tradicionales que han caracterizado a la producción local (Colunga-García Marín & Zizumbo-Villarreal, 2007; Delgado-Lemus, 2008, citado por Torres, 2009).

El marco regulatorio de la Denominación de Origen del Mezcal (DOM) ha intensificado las tensiones, no solo expandiendo territorialmente, sino también aumentando la producción intensiva de agave, lo que ha exacerbado problemas previos como la extracción insostenible y el desplazamiento de material vegetal entre regiones (López, (s.f.)). Estas prácticas reflejan un modelo capitalista que privilegia el beneficio económico a corto plazo sobre la sostenibilidad ambiental y social (Cuéllar, 2017).

En algunas comunidades del Valle de Tehuacán en Puebla, la explotación descontrolada del *Agave potatorum* ya ha resultado en la disminución drástica de las poblaciones *locales*, amenazando la biodiversidad y los medios de vida. Se estima una reducción del 30 al 90% en un período de 30 años (Torres, 2016).

En áreas como La Magdalena Cuaxixtla, la escasez de materia prima es similar y ha obligado a los productores a depender de agaves de localidades cercanas como Coahuatla, Concepción Cuautla, San Buenaventura Tetlananca y Santiagotzingo, en Tecali de Herrera y de Torija, Cuautinchán, entre otras. Esta dependencia no siempre satisface la demanda total, lo que ha ocasionado un aumento en el precio del agave, pasando de \$6,000/ton hasta \$12,000/ton en la región. Esta situación ha llevado a la extracción prematura del agave, antes de completar su ciclo de crecimiento, que varía entre 7 y 12 años, dependiendo de las tierras (A. Vélez, comunicación personal, junio 2 de 2020).

Tan sólo para el ciclo 2019 la producción de mezcal en la Magdalena Cuaxixtla fue de 1,750 litros, la cual requirió 25 ton de piñas, equivalentes a 4,500 plantas de agave; operando a un 35% de su capacidad instalada en la fábrica de mezcal de 5,000 litros (15,000 plantas de agave), lo que representa un déficit y así actualmente.

Además, el cambio climático agrava aún más esta situación, afectando tanto la producción agrícola como los indicadores generales de bienestar y desarrollo en las comunidades rurales (Earley, 1997; Boege y Toledo, 2007).

La variación climática en Tecali de Herrera, Puebla, se manifiesta en el aumento de temperaturas y alteraciones en las precipitaciones. El aumento de temperaturas estresa las plantas, reduciendo su crecimiento y producción de savia (IPCC, 2021). Las alteraciones en las precipitaciones, como sequías o lluvias intensas, pueden afectar la salud de las plantas y aumentar el riesgo de enfermedades (Lemos et al., 2022). También la desertificación puede reducir la disponibilidad de tierras adecuadas para el cultivo (FAO, 2020). El cambio en la biodiversidad y el incremento de plagas de igual forma impactan la producción (Altieri & Nicholls, 2021).

Para mitigar estos efectos, es conveniente adoptar prácticas de manejo sostenible que integren la preservación de la identidad cultural, que equilibren la explotación del *Agave potatorum* con su conservación y restauración, asegurando así su disponibilidad futura para las generaciones venideras (Castillo y Toledo, 2000; Maass et al., 2007).

1.2 Pregunta de Investigación

El presente estudio busca responder la siguiente pregunta de investigación planteada:

¿Cómo implementar prácticas sostenibles en los sistemas de producción de *Agave potatorum* en las comunidades mezcaleras de Tecali de Herrera, Puebla, para maximizar la captura de carbono y otras CNP?

1.3 Objetivo General

Evaluar el potencial de almacenamiento de carbono en los sistemas de producción de *Agave potatorum* como estrategia de desarrollo sostenible para comunidades mezcaleras del municipio de Tecali de Herrera, Puebla.

1.4 Objetivos Particulares

- Analizar la percepción y conocimiento tradicional de los productores sobre el uso y manejo del *Agave potatorum*, identificando factores que influyan en su aprovechamiento sostenible y en la acumulación de carbono en los ecosistemas locales.
- Estimar la cantidad de carbono almacenado en la biomasa aérea y en el suelo de los sistemas de producción de *Agave potatorum*, para cuantificar el potencial de las CNP.

1.5 Justificación

Las tierras secas (“tierra seca” se usa para describir ecosistemas limitados por agua) abarcan aproximadamente el 40% de la superficie terrestre global y juegan un papel principal en la regulación del clima global a través del almacenamiento de carbono en la vegetación y los suelos. Esta vasta extensión alberga a más de 2 mil millones de personas, lo que subraya la importancia de considerar estos ecosistemas en las estrategias globales de mitigación del cambio climático y gestión sostenible (UNCCD, 2017; FAO, 2011, citado por Hanan et al., 2021, p.1).

Las tierras secas contienen aproximadamente el 30% del carbono global en la biomasa aérea y subterránea, así como en los primeros 30 cm del suelo, representando reservas significativas de carbono que son fundamentales para la estabilidad ambiental y la sostenibilidad (Plaza et al., 2018, citado por Hanan et al., 2021, p. 3). Dentro de este contexto, los agaves mezcaleros, especialmente adaptados a los climas áridos, desempeñan un papel de gran relevancia.

Tan sólo la región con DOM, abarca una gran extensión territorial, comprende 9 entidades federativas (Oaxaca, Guerrero, Durango, San Luis Potosí y Zacatecas, todos estos Estados con el cien por ciento de su territorio, 4 municipios de Guanajuato, 11 de Tamaulipas, 29 de Michoacán y 115 municipios de Puebla; un total de 963 municipios), los cuales representan 500 mil kilómetros cuadrados, equivalentes al 53 por ciento del territorio nacional (Gaceta del Senado, 2017), que posee un enorme potencial para la captura de carbono a través de estas plantas (Gaceta del Senado, 2017). De acuerdo a la Comisión Nacional de Zonas Áridas (CONAZA), de la población total de México, el 18 por ciento habita en ese tipo de ecosistemas (CONAFOR, nd).

Diversos estudios científicos afirman que los agaves, gracias a su metabolismo MAC, tienen un alto rendimiento en la fijación de carbono. Este proceso es particularmente eficiente, ya que no solo optimiza la captura de CO₂, sino que minimiza la pérdida de agua en la planta durante la fotosíntesis nocturna (García et al., 2010).

Los primeros estudios sobre el intercambio de gases en los agaves, comenzaron a finales de los años 60, con trabajos pioneros como los de Neales et al. (1968), Ehrler (1969) y Kristen (1969). Neales et al. (1968) fueron los primeros en documentar la apertura nocturna de los estomas en *Agave americana*. Sus mediciones de fotosíntesis y transpiración, evidenciaron la naturaleza MAC de esta especie, con una absorción neta de CO₂ del 75% y una pérdida de agua mayormente ocurrida durante la noche (García et al., 2010, p. 8).

A principios de la década de 1990, se recopilaron los rendimientos óptimos de biomasa en especies con MAC. Las condiciones óptimas para la productividad de los agaves no se habían establecido durante la década de 1980, e incluso hoy en día, es un tema de mucho debate. La productividad en algunas especies fue la siguiente: *Agave salmiana* 42 (t ha/año), *Agave mapisaga* 38 (t ha/año), *Agave fourcroydes* 15-20-30 (t ha/año), *Agave tequilana* 25 (t ha/año), *Agave deserti* 7 (t ha/año), *Agave sisalana* 5 (t ha/año) y *Agave lechuguilla* 4 (t ha/año) (García et al., 2010, p. 11).

En el registro, el *Agave potatorum* carece de datos específicos sobre su biomasa y potencial de captura de carbono, información que esta investigación pretende obtener. Un estudio de la Universidad de Guadalajara (UdeG) destacó que el *Agave tequilana Webber*, además de prosperar en suelos áridos, es muy eficaz para absorber CO₂ (Tequila Inteligente, 2020). Según González (2020), en junio de ese año, la región tequilera contaba con más de 650 millones de agaves en 217,000 hectáreas (ha). Si esta cifra se mantiene, se podría capturar anualmente hasta 29 millones de toneladas de CO₂, lo que equivaldría a las emisiones generadas por 3 millones de hogares en un año (Tequila Inteligente, 2020).

Con respecto a la superficie registrada de agaves para la industria del mezcal, el CRM en su informe 2022, reportó 76,544.93 (ha) con 46.15 millones de plantas (CRM, 2022). Los rendimientos por hectárea son variados, que van de 18 a 93 ton/ha, siendo el Estado de Puebla el de mayor rendimiento (SIAP, 2022).

Las reservas de carbono de las tierras secas son significativas y deben considerarse una parte central y esencial de los cálculos del ciclo global del carbono. En la Figura 1.5.1. se muestra los principales beneficios para los productores.

Estos beneficios resultan del hecho que la materia orgánica es un elemento clave en los suelos y que determina una serie -o cascada- de propiedades o funciones relativas a las propiedades del suelo, el efecto amortiguador, la capacidad de recuperación y la sostenibilidad. La biodiversidad depende del contenido de materia orgánica y su aumento en el suelo permitirá nuevas funciones. Esto implica el desarrollo de prácticas específicas de uso y manejo de la tierra (FAO, 2002, p.47).

Figura 1.5.1 Principales beneficios del manejo sostenible del carbono del suelo en varias escalas espaciales (de Izac, 1997).



Fuente: FAO, 2002, p. 37.

La gestión sostenible de los agaves mezcaleros no solo es esencial para la conservación de la biodiversidad y las CNP, sino que también representa una oportunidad para mejorar los medios de vida de las comunidades mezcaleras, promoviendo prácticas agrícolas que incrementen rendimientos en los sistemas de producción, además de las reservas de carbono del suelo y la vegetación.

Este enfoque no solo apoya la mitigación del cambio climático a través del secuestro de carbono, sino que también fortalece la resiliencia de las comunidades locales frente a los desafíos ambientales y socioeconómicos (Tequila I., 2020; CRM, 2022).

1.6 Antecedentes

1.6.1 Trayecto del mezcal en las últimas décadas

A lo largo de la historia, el mezcal destilado de agave ha sido consumido durante siglos, pero su producción y uso han evolucionado en respuesta a los cambios en las estructuras sociales y económicas de las sociedades productoras y consumidoras (Plascencia et al., 2018, p. 39). En México, el Estado ha establecido regulaciones y ha institucionalizado entidades y mecanismos para proteger los destilados de agave y sus productores (Plascencia et al., 2018, p. 40).

En los últimos años se ha observado un esfuerzo por organizar y fortalecer la industria del mezcal, incluyendo la homogeneización de la calidad del producto y la obtención de economías de escala. Esto se ha respaldado mediante la creación de la Norma Oficial Mexicana (NOM-070-SCF0-1994), la Denominación de Origen del Mezcal (1994), el establecimiento del Consejo Regulador del Mezcal (1997) para garantizar el cumplimiento de la normativa, así como la formación de la Cámara Nacional de la Industria del Mezcal (CANAIMAZ) (1994). A pesar del crecimiento significativo en la producción y las exportaciones del mezcal, persisten riesgos como la disponibilidad de maguey, agua y leña, así como la insuficiente resiembra del maguey y el saqueo de los recursos (IPN, s.f., p. 4).

La primera denominación de origen mexicana se otorgó al tequila en 1974, sentando un precedente para las denominaciones posteriores de otros destilados de agave, como el mezcal en 1994 (López, s.f., p. 1). Según el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI), una denominación de origen reconoce un producto característico de una región debido a factores naturales como el clima, el suelo, los minerales y el agua, así como al conocimiento humano sobre sus métodos de elaboración. Las denominaciones de origen no solo promueven el crecimiento económico, sino que también fortalecen la identidad cultural y la cohesión comunitaria en torno a las tradiciones locales (IMPI, 2016, p. 12).

El aumento en el consumo nacional e internacional de los mezcales mexicanos como bebidas de prestigio, ha provocado ajustes significativos dentro del sector. Esto incluye la expansión del territorio protegido por la DOM y la revisión de la NOM-070-SCF0-2016 para la elaboración del mezcal, particularmente en cuanto a las categorías de mezcales permitidas (Hernández, 2018, p. 181).

El marco regulatorio ha demostrado flexibilidad al adaptarse a nuevas realidades, como el cambio en el criterio central para definir una denominación de origen, priorizando ahora la región geográfica de producción sobre el insumo específico. Esto ha permitido la inclusión de todas las especies de agave reconocidas por su importancia económica en la elaboración de mezcal (NOM-070-SCFI-2016) (López, s.f., p. 6).

Sin embargo, es importante reconocer que el proceso de regulación y expansión también presenta desafíos socioeconómicos y ambientales. Se ha observado una creciente concentración de la producción y comercialización en grandes empresas, excluyendo a pequeñas y medianas empresas con recursos limitados, lo que podría afectar negativamente a los productores artesanales y locales (Plascencia et al., 2018, p. 36).

El contexto específico de Puebla, con la inclusión de 115 municipios en la DOM (Véase Anexo 1), mediante modificaciones publicadas en el Diario Oficial de la Federación en 2015, revela que el 97% de estos municipios enfrenta niveles de marginación de medio a muy alto. Esto subraya la importancia del mezcal como un motor económico y cultural en regiones con bajos niveles de bienestar, donde la producción artesanal del mezcal no solo proporciona sustento, sino que también fortalece la identidad local y promueve la gestión sostenible del desarrollo rural (Ayala, 2018, párr. 5).

2 MARCO TEORICO CONCEPTUAL

2.1 Desarrollo Sostenible

El término "desarrollo sostenible" se introdujo inicialmente en el informe titulado *Nuestro Futuro Común*, conocido también como el "Informe Brundtland", el cual fue publicado en 1987 por la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (CMMAD). Este informe identificó la interrelación entre el ambiente y el desarrollo, y propuso que todas las naciones adoptaran el desarrollo sostenible como objetivo principal de sus políticas nacionales e internacionales (Álvarez, 2015, p. 5).

Desde entonces, el desarrollo sostenible ha sido definido como aquel que "responde a las necesidades del presente de manera equitativa, sin comprometer las posibilidades de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades" (Andrade, 2017). Este enfoque se consolidó en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CNUMAD) en Río de Janeiro en 1992, donde se establecieron estrategias para detener y revertir la degradación ambiental (Foladori & Tommasino, 2000, citado por Andrade, 2017, p. 36).

Posteriormente, en 2015 se adoptó la agenda 2030 para el desarrollo sostenible, que enfatiza la necesidad de un crecimiento económico inclusivo que garantice el progreso social y la equidad, mientras se mantiene la eficiencia ecológica de los sistemas biofísicos (Cuéllar, 2017, p. 34).

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas (ONU) proporcionan un marco integral para abordar los desafíos globales, incluyendo aquellos relacionados con la producción y consumo responsables (ODS 12), acción climática (ODS 13), y conservación de la vida de ecosistemas terrestres (ODS 15), todos pertinentes para este estudio (Chaplin-Kramer et al., 2019; IPBES, 2018a, 2018b, 2018c, 2018d, 2019; WWF, 2018; Sander, 2020).

Recientemente, la Plataforma Intergubernamental Científico-Normativa sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas (IPBES) ha presentado el concepto de "contribuciones de la naturaleza para las personas", relacionado con los servicios ecosistémicos, el cual resalta la relevancia de la naturaleza para la salud y el bienestar de las personas (Díaz et al., 2015; 2018; citado por Bedoya et al., s.f.).

En el entorno de la producción de *Agave potatorum* y la industria del mezcal en Tecali de Herrera, Puebla, este concepto implica abordar de manera integral los aspectos ambientales, sociales y económicos. Integrar el desarrollo sostenible en la producción de *Agave potatorum* y la tradición cultural del mezcal con mecanismos innovadores como los bonos de carbono, es una oportunidad para fortalecer la resiliencia de las comunidades locales y promover un desarrollo económico inclusivo y equitativo (Ayala et al., 2018). Al hacerlo, se puede contribuir significativamente a la conservación de los recursos naturales, fortalecer la mejora de la calidad de vida y la promoción de prácticas agrícolas y comerciales responsables.

2.2 Cambio climático - Gases de efecto invernadero

El cambio climático se ha convertido en un desafío ambiental de gran magnitud, intensificado en las últimas décadas por el incremento de los gases de efecto invernadero (GEI) liberados a la atmósfera debido a actividades humanas (Marcos et al., 2015, Introducción, párrafo 1). De acuerdo con el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), el aumento tanto económico como poblacional sigue siendo un factor determinante en las emisiones de CO₂ producidas por la quema de combustibles fósiles a nivel mundial (IPCC, 2014).

Además, el sector agrícola, forestal y otros usos del suelo (AFOLU) tiene una contribución importante a las emisiones globales de GEI, especialmente a través de la deforestación y las técnicas agrícolas intensivas (IPCC, 2014). En el caso de México, este sector representa el 10.1% de las emisiones, según el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGyCEI), 2015 (IPCC, 2014, p. 34).

A pesar de que los bosques son fuentes netas de emisión de GEI, tienen un potencial considerable para mitigar el cambio climático a través de la captura de carbono en diferentes ecosistemas vegetales, considerados como sumideros de carbono (Masera, 1996; Benjamín & Masera, 2001, p. 5).

Según en la actualización del INEGI y CEI 1990-2019, de las 736.63 MtCO₂e de emisiones de GEI registradas en México, aproximadamente 201.94 MtCO₂e fueron absorbidas por la vegetación, especialmente en bosques y selvas. El balance neto entre las emisiones y las absorciones en 2019 resultó en 534.69 MtCO₂e. El dióxido de carbono es el principal gas de efecto invernadero en el país, representando el 70% de las emisiones, y la contribución de México a las emisiones globales se estima en un 1.4% (SEMARNAT, 2023).

México cuenta con condiciones naturales propicias para implementar acciones efectivas de mitigación en el uso de recursos naturales. Según el informe de la situación del medio ambiente 2018, el país posee una extensa cobertura de tierras (194.22 millones de ha) con diversos tipos de vegetación, destacando áreas xerófilas (25.7%), bosques (17.6%), selvas (15.1%), pastizales (14.7%), agrícolas (16.9%) y otros tipos de vegetación, que juegan un papel importante como sumideros de carbono (SNIARN, 2021, p. 99).

A pesar de estos activos naturales, México enfrenta problemas relevantes, como la alta tasa histórica de deforestación. Durante varios períodos se observó una pérdida anual de cientos de miles de hectáreas de bosques y selvas, lo cual compromete su capacidad para capturar carbono y mitigar las emisiones (SNIARN, 2021, p. 107).

Los sistemas agrícolas no solo son esenciales para garantizar la seguridad alimentaria, sino que también pueden desempeñar un papel clave en la mitigación del cambio climático. Esto depende tanto de la eficiencia de estos sistemas como de las condiciones ambientales en las que se llevan a cabo las prácticas agrícolas.

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y estudios recientes han destacado que los suelos agrícolas son reservorios significativos de carbono y tienen el potencial de expandir su capacidad de secuestro de carbono mediante prácticas agrícolas sostenibles (FAO, 2002; CONAFOR citado por Orihuela, 2014). La intensificación de la producción agrícola y ganadera bajo principios de sostenibilidad puede fortalecer la resiliencia de los sistemas agrícolas al cambio climático, al tiempo que mejora la fertilidad del suelo y reduce la degradación ambiental (Cuéllar, 2017).

Ambas agendas, desarrollo sostenible y cambio climático, reconocen la interdependencia entre las dimensiones ambiental, económica y social. Es esencial integrar políticas y prácticas que no solo promuevan el crecimiento económico, sino que también aseguren la conservación de los recursos naturales y mejoren la calidad de vida de las comunidades, sin comprometer el bienestar de las generaciones futuras (SEMARNAT, 2015).

En este sentido, el cambio climático representa desafíos importantes para la industria del mezcal en Tecali de Herrera. Incluir el enfoque de desarrollo sostenible en la producción de *Agave potatorum* es clave para mitigar los impactos locales. Dentro de las estrategias de captura de carbono, prácticas como la reforestación en las áreas circundantes son fundamentales para enfrentar esta problemática. La implementación de proyectos de captura de carbono no solo podría generar créditos de carbono para los mercados voluntarios, sino también aumentar la resiliencia de la comunidad frente a los efectos del cambio climático.

2.3 Contribución de la Naturaleza para las Personas

Las CNP son los beneficios que el ser humano obtiene del buen funcionamiento de los ecosistemas que habita. Dichas contribuciones son la base del bienestar de las sociedades, pues de ellas dependen la producción de alimentos, medicamentos, fibras, madera, agua limpia, identidad social y cultural (Saldaña, 2021, p. 2).

El concepto de CNP tiene como objetivo ampliar la comprensión de los servicios de los ecosistemas, incorporando diferentes visiones sobre la relación entre la naturaleza y los seres humanos. Fue creado para reconocer el impacto cultural y espiritual de la biodiversidad (IPBES, 2018, p.39).

Desde una perspectiva más completa, las CNP pueden clasificarse en tres grandes grupos: reguladoras, materiales e inmateriales (Cuadro 2.3.1).

Contribuciones reguladoras: incluyen servicios como la regulación del clima, la calidad del agua y la mitigación de desastres naturales, esenciales para la estabilidad ambiental y la resiliencia de las comunidades (IPBES, 2018). Por ejemplo, los ecosistemas naturales juegan un papel esencial en la estabilización del clima global y la adaptación a eventos extremos (IPBES, 2018, p. 39).

Contribuciones materiales: representan los recursos tangibles que la naturaleza proporciona, como alimentos, medicinas, madera y otros productos derivados que sustentan la economía y el bienestar humano (Saldaña, 2021). De acuerdo con Saldaña (2021), "los recursos naturales son fundamentales para la subsistencia y el desarrollo económico de las comunidades, aportando materias primas esenciales para diversas industrias".

Contribuciones inmateriales: comprenden los beneficios culturales, espirituales y recreativos que las personas obtienen de la naturaleza, como la recreación al aire libre, la conexión emocional con el entorno natural y las prácticas culturales tradicionales vinculadas a lugares naturales (IPBES, 2018).

Estos beneficios "son fundamentales para la salud mental, la cohesión social y la identidad cultural de las comunidades" (IPBES, 2018, p. 39).

Cuadro 2.3.1 CNP y su relación con la calidad de vida expresadas en valores instrumentales y relacionales.



Fuente: (imagen tomada del informe IPBES/6/15/Add.4; https://ipbes.net/sites/default/files/ipbes_6_15_add.4_eca_spanish_0.pdf)

A pesar de su relevancia, las CNP confrontan diversas dificultades. La degradación de los ecosistemas, la desigualdad en el acceso a los recursos, la pérdida de conocimientos tradicionales y la falta de una valoración adecuada de estas contribuciones son problemas críticos que afectan tanto a los ecosistemas como al bienestar humano (IPBES, 2019; Sander et al., 2020).

Es esencial implementar políticas que promuevan la conservación de los ecosistemas, el uso sostenible de los recursos, la integración de conocimientos tradicionales y ciencia moderna, así como la valoración adecuada de las CNP, junto con estrategias que fortalezcan la resiliencia frente al cambio climático (IPCC, 2021).

La comunidad de Tecali de Herrera, depende en gran medida de los recursos naturales locales, particularmente del *Agave potatorum*, la leña, como una contribución material clave. La sostenibilidad de la producción de mezcal está intrínsecamente ligada a la salud de los ecosistemas locales, que proporciona no solo el agave sino también CNP como la regulación del agua y la conservación del suelo. Además, integrar el conocimiento tradicional de los agricultores con estrategias de manejo sostenible, mejoran la efectividad de estos proyectos, asegurando que las CNP se mantengan intactas y que los beneficios económicos y ecológicos sean compartidos equitativamente entre los miembros de la comunidad.

2.4 Almacenes de carbono

2.4.1 Ciclo de carbono

La captura de carbono es un proceso biogeoquímico crucial dentro de la CNP, considerado uno de los más importantes para la mitigación de las emisiones de CO₂. Según Ordoñez (2008), los ecosistemas terrestres, y especialmente los bosques, funcionan como importantes reservorios de carbono. En estos ecosistemas, la vegetación y los suelos son los principales elementos que almacenan carbono. Sin embargo, cualquier alteración en el suelo que afecte estos ecosistemas puede cambiar su capacidad para manejar el carbono (p. 4).

El ciclo del carbono comienza cuando los organismos fotosintetizadores capturan el CO₂ de la atmósfera. Este gas, en combinación con el agua, se transforma en carbohidratos, mientras que el oxígeno es liberado como subproducto. Una parte de los carbohidratos formados se utiliza para que el organismo obtenga energía, mientras que el CO₂ generado durante este proceso metabólico es liberado a través de las hojas o raíces de las plantas. Los animales, al consumir las plantas, también ingieren estos carbohidratos y, en su respiración, liberan CO₂. Cuando las plantas y animales mueren, sus restos son descompuestos por los microorganismos del suelo, lo que convierte el carbono almacenado en CO₂ y CH₄, liberándolos nuevamente a la atmósfera (Schimel, 1995; Smith et al., 1993).

De acuerdo con Orihuela (2014), el proceso de fotosíntesis implica la acumulación de carbono en términos de biomasa, lo que da como resultado la productividad neta del ecosistema durante un periodo específico. Esta productividad varía dependiendo del tipo de vegetación, la fase de desarrollo forestal o la serie de sucesiones ecológicas. Para entender la dinámica de los flujos de carbono en cada situación, es fundamental considerar los principales procesos dentro del ecosistema, así como los disturbios que influyen en el desarrollo de la vegetación (p. 54-55).

Finalmente, Ordoñez (1999, citado por Ordoñez, D. 2008) señala que el CO₂ es considerado almacenado mientras forma parte de la biomasa, desde el momento en que se incorpora a las estructuras biológicas hasta que es liberado al suelo o la atmósfera (Figura 2.4.1). Este almacenamiento se interrumpe cuando el CO₂ es liberado, ya sea por la descomposición de la materia orgánica o por la combustión de la biomasa, momento en el cual el CO₂ regresa al ciclo biológico del carbono (p. 7).

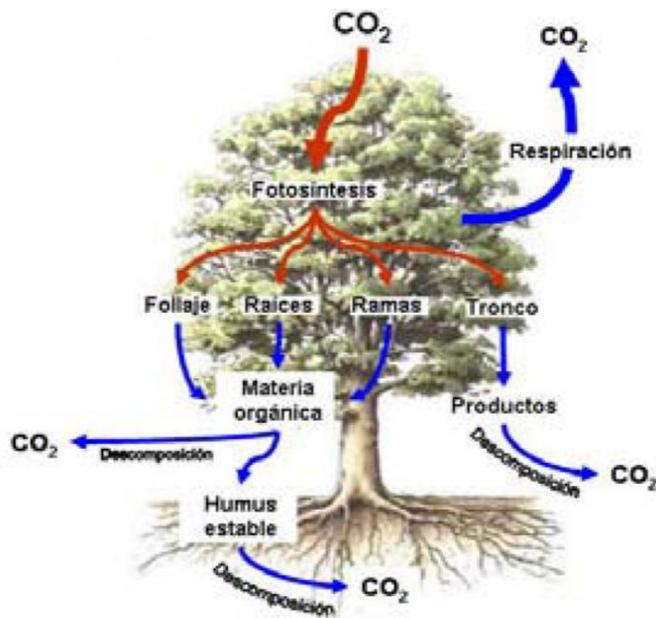


Figura 2.4.1.1 Transferencia de carbono entre los diferentes reservorios de un ecosistema forestal.

Fuente: Ordoñez, 1999; diseño Samuel Palacios, p.7.

En este contexto, la fotosíntesis también varía según el tipo de fijación de carbono en las plantas, dependiendo de su metabolismo (C3, C4 o MAC se refiere al tipo de fotorrespiración de las plantas). Para la especie *Agave potatorum* utilizada en la producción de mezcal, el metabolismo MAC es especialmente relevante.

2.4.2 Contenido y captura de carbono en la vegetación.

El contenido de carbono hace referencia al carbono que queda almacenado en la biomasa, resultado de su incorporación durante el proceso de fotosíntesis. Por lo tanto, la cantidad de carbono almacenado está directamente relacionada con la cantidad de biomasa presente (McPherson, 1998; Aguaron y McPherson, 2012; citado por PMC, 2015, p. 2). La captura de carbono se refiere al flujo de este elemento desde la atmósfera hacia la vegetación durante una temporada de crecimiento, es decir, a la cantidad de carbono que se almacena anualmente (McPherson, 1998; Aguaron y McPherson, 2012; citado por PMC, 2015, p. 3). Además, la cantidad de carbono absorbido y almacenado depende de diversos factores, como las características del sitio, la composición de especies, la estructura, el clima, el manejo y las variaciones entre ecosistemas y tipos de vegetación (Pardos, 2010; citado por PMC, 2015, p. 3).

2.4.3 Clasificación de almacenes de carbono en las comunidades vegetales.

El IPCC identifica cinco principales reservorios de carbono dentro de las comunidades vegetales (IPCC, 2003; citado por PMC, 2015, p. 3).

Biomasa aérea (BA)

Este concepto abarca toda la biomasa por encima del suelo. En algunos casos, se excluyen las raíces finas de menos de 2 mm de diámetro, dado que no siempre se pueden diferenciar claramente de la materia orgánica del suelo o el mantillo (IPCC, 2007 citado por PMC, 2015, p. 3).

Biomasa subterránea (BS)

Hace referencia a toda la biomasa viva presente en las raíces. En algunas ocasiones, las raíces finas con un diámetro menor a 2 mm se excluyen de este concepto, debido a que frecuentemente no es posible diferenciarlas de la materia orgánica presente en el suelo o el mantillo (IPCC, 2007, citado por PMC, 2015, p. 3).

Materia orgánica muerta (MOM)

Incluye toda la biomasa no viva que no se encuentra en el mantillo, ya sea en la superficie o enterrada en el suelo. Dentro de esta categoría se incluye la madera muerta, las raíces muertas y los tocones (IPCC 2003, citado por PMC, 2015, p. 3).

Mantillo

Se refiere a la biomasa no viva que yace sobre el suelo, en distintos estados de descomposición. Esta capa incluye las hojas caídas y el horizonte de fermentación (IPCC 2005, citado por PMC, 2015, p. 3, p. 4).

Carbono del suelo

Este término hace referencia al carbono orgánico presente en los suelos, tanto minerales como orgánicos (incluyendo la turba), a una profundidad específica determinada por el país y aplicada de manera consistente en las series temporales. Las raíces finas vivas se consideran parte de la materia orgánica del suelo cuando no pueden ser diferenciadas empíricamente (IPCC 2005, citado por PMC 2015, p. 4). Estos depósitos también se conocen como "Stocks" de Carbono. En un inventario de carbono se calcula cuánto carbono está fijado en cada uno de los "Stocks" o almacenes de un ecosistema, y se utiliza para conocer la capacidad del ecosistema para capturar o secuestrar carbono de la atmósfera (PMC, 2011, p. 17).

En proyectos con el objetivo de vender CNP de captura de carbono, realizar un inventario de carbono en los diferentes reservorios es el punto de partida. Los cambios en estos "almacenes" deberán medirse periódicamente; a este proceso se le denomina monitoreo, y consiste en repetir mediciones y cálculos a lo largo del tiempo. Para monitorear tanto la cantidad de carbono asociada a los diferentes stocks de un ecosistema, así como su dinámica, se requieren sitios permanentes, es decir, de dimensiones fijas con mediciones en intervalos definidos (anualmente o bien cada dos o tres años, dependiendo de la disponibilidad de tiempo y recursos del proyecto) (PMC, 2011, p. 18). Para este trabajo de tesis, se realizará el inventario de carbono en dos reservorios: Biomasa aérea (BA) y Carbono del suelo en el sistema de producción de *Agave potatorum*.

La captura de carbono en los agaves podría ser un componente clave para el desarrollo sostenible de la región. Implementar prácticas de cultivo que maximicen la retención de carbono en los suelos y la biomasa vegetal contribuiría a la estabilidad ambiental y a la resiliencia climática de la comunidad. Además, al integrar estos procesos con la producción de mezcal, se podría promover un modelo económico que valore tanto los productos derivados del agave como las CNP que esta planta proporciona, fortaleciendo así el bienestar económico y ecológico de Tecali de Herrera.

2.4.4 Métodos para estimar la biomasa y carbono

2.4.4.1 Carbono de biomasa aérea (BA)

Los estudios sobre captura de carbono se centran en medir la productividad a través del muestreo de biomasa y en determinar el carbono orgánico presente en las plantas. Esto permite calcular la cantidad de CO₂ que la planta ha capturado durante el proceso de fotosíntesis (Lieth & Whittaker, 1975, citado por Sierra, 2010).

La capacidad de los ecosistemas para almacenar carbono en la biomasa aérea varía según factores como la composición de especies, la edad y la densidad de población de cada estrato dentro de la comunidad vegetal (Schulze et al., 2000; citado por Bolaños et al., 2017, p. 12).

Para estimar el contenido de carbono, se utilizan metodologías basadas en el peso de la biomasa, que luego se seca para determinar su peso en seco. Generalmente, se realizan algunos muestreos, cuyos materiales se analizan en laboratorio (Sierra, 2010, p. 7). Posteriormente, se aplican cálculos a través de ecuaciones de captura de carbono para obtener resultados más específicos.

Dentro de las técnicas más comunes se encuentra el método directo, o destructivo, que implica medir parámetros como el diámetro a la altura del pecho (DAP), la altura total (AT), el diámetro de la copa (DC) y la longitud de la copa (LC) de un árbol. Luego, el árbol es derribado y se pesa cada una de sus partes (fuste, ramas, raíces y follaje) para calcular la biomasa total (González, 2008, citado por García, 2018, p. 25).

Este método es útil para construir ecuaciones alométricas y factores de expansión de biomasa y carbono (Rügnitz et al., 2009, p. 28).

Las ecuaciones alométricas son útiles para estimar la biomasa y el volumen en función de variables como el diámetro y la altura (Vallejo y Noriega, 2008; citado por Bolaños et al., 2017, p. 13). En lugares como Tecali de Herrera, donde el agave es predominante, es esencial desarrollar ecuaciones locales que permitan calcular de manera precisa la biomasa aérea y el carbono almacenado en estas plantas, y luego extrapolar estos resultados a ecosistemas similares.

Para ecosistemas como los de Tecali de Herrera donde el agave es una planta predominante, es importante desarrollar ecuaciones alométricas locales para estimar con precisión la biomasa aérea y el carbono almacenado en estas plantas. Estas ecuaciones permiten extrapolar los resultados a otros sitios con ecosistemas similares en términos de dimensiones y densidad arbórea, calculando la cantidad de carbono almacenado en la biomasa, mediante concentraciones de carbono en biomasa vegetal determinadas por estudios específicos (Emanuelli, 2011, citado por García, 2018).

Para la determinación del carbono en la biomasa aérea (BA), expresado en toneladas de carbono por hectárea (t C/ha), se puede emplear la fórmula siguiente:

$$\Delta CBA = (BA * CF)$$

donde la variación en la cantidad de carbono en la biomasa aérea (CBA) es igual a la Biomasa aérea (BA) en t MS/ha, toneladas de materia seca por hectárea, multiplicada por la fracción de carbono (t C /t MS, normalmente se utiliza el valor estándar del IPCC de 0.5) (Rügnitz et al. 2009, p. 34).

La importancia de los agaves en la captura de carbono no solo se limita a su eficiencia fotosintética, sino también a su capacidad de adaptación a suelos pobres y condiciones climáticas adversas.

Esto los convierte en componentes esenciales para estrategias de conservación y manejo sostenible en la región, donde la producción de mezcal es una actividad económica clave. Estimar adecuadamente la biomasa y el carbono en los agaves, es por tanto fundamental para comprender su contribución al ciclo de carbono y su papel en la mitigación del cambio climático en esta comunidad.

2.4.4.2 Carbono del suelo

El almacenamiento de carbono en los suelos es el resultado del balance entre la incorporación de material vegetal muerto (desecho de hojas y raíces) y las pérdidas de los procesos de descomposición y mineralización (respiración heterotrófica) (García, 2018, p. 22).

El carbono en los suelos puede encontrarse en forma orgánica e inorgánica (Jackson, 1964, citado por García, 2018). La acumulación de carbono orgánico en el suelo es un proceso importante para mitigar efectos del cambio climático, ya que el suelo, además de ser un sumidero, es un reservorio de carbono estabilizado (Etchevers, 2006, citado por García, 2018) (p. 22).

El contenido de carbono de los suelos se estima a partir del contenido de materia orgánica, de la densidad aparente y de la fracción de carbono determinada en laboratorio (Bolaños et al., 2017, p. 25). Los factores que determinan el potencial como sumidero del suelo son la profundidad, el peso del suelo, la textura, los tipos y combinaciones de arcillas presentes, el grado de humedad y el volumen ocupado por fragmentos gruesos donde el carbono orgánico no puede enlazarse fácilmente (Gardi et al., 2014; citado por Bolaños et al., 2017, p. 26).

Existen diversos métodos para realizar la determinación de carbono algunos son: a) combustión seca en un analizador automático como el equipo Shimadzu 5050 (Etchevers et al., 2001), b) con el analizador elemental de gases CHON (Jurado et al., 2013), c) por digestión húmeda utilizando la técnica de Walkley y Black (Segura et al., 2005), d) por ignición (Davis, 1974), e) espectroscopia ultravioleta, visible (UVVIS) e infrarroja (IR) (Labrador, 2001) (García, 2018, p. 27).

Para determinar la cantidad de Carbono acumulado en el componente suelo (Mg ha-1), se puede emplear la fórmula:

$$CC = Pm * DAp * \%C$$

donde la cantidad de carbono es igual a profundidad de la muestra (Pm)(cm), multiplicada por la densidad aparente del suelo (DAp) (g cm-3) y el porcentaje de carbono por cada muestra (%C) (Acosta et al., 2009, 109).

Las comunidades mezcaleras de Tecali de Herrera son conocidas por su rica biodiversidad y suelos característicos, presentan un notable potencial para la captura de carbono. La capacidad de los suelos en esta región para almacenar carbono se debe, en gran parte, a las prácticas tradicionales de manejo del suelo y a las características geológicas y climáticas del área.

Estos suelos, ricos en materia orgánica y con una textura favorable, permiten una eficiente fijación del carbono, convirtiendo a Tecali de Herrera en una región de interés para estudios sobre mitigación del cambio climático a través de la captura y almacenamiento de carbono en el suelo, Sin embargo, estos suelos son especialmente vulnerables a la erosión si no se gestionan adecuadamente, lo que podría comprometer su capacidad para almacenar carbono y aumentar los riesgos ambientales locales.

El análisis y cuantificación del carbono en los suelos de Tecali de Herrera pueden proporcionar datos valiosos para la implementación de estrategias de manejo sostenible, contribuyendo así a los esfuerzos globales para reducir las concentraciones de CO₂ en la atmósfera y combatir el cambio climático.

2.5 Mercados de carbono

2.5.1 Marco de proyectos de captura de carbono

Para considerar formalmente los proyectos de captura de carbono dentro de los esfuerzos internacionales para estabilizar o disminuir la concentración atmosférica de GEI, la Convención Marco sobre Cambio Climático de Naciones Unidas (CMNUCC) (1992), establece tanto el control de emisiones como la remoción mediante captura en sumideros. En 2015, se firmó el Acuerdo de París, ratificado en México por el Senado de la República en septiembre de 2016. El acuerdo establece compromisos vinculantes para que las naciones firmantes impulsen la descarbonización de sus sistemas económicos y limiten el incremento de la temperatura media global a un rango "muy inferior a los 2°C", con un objetivo ideal de no superar los 1.5°C, en línea con las recomendaciones científicas para mitigar impactos climáticos críticos (Acuerdo de París, 2015).

Sin embargo, recientes estudios han indicado que el mundo podría superar el umbral de 1.5°C mucho antes de lo previsto. Investigaciones de Alemania y Austria sugieren que, sin reducciones significativas de emisiones, es altamente probable que se supere este límite en las próximas dos décadas (Cannon, 2024). Además, un estudio de Alex Cannon de Environment and Climate Change Canada señala que el excepcionalmente caluroso año 2024 indica una inminente violación del acuerdo. Proyecciones que inicialmente estimaban alcanzar el 1.5°C para 2045 han sido revisadas, con expectativas actuales centradas alrededor de 2030 (Cannon, 2024). Estas conclusiones resaltan la necesidad urgente de acciones climáticas para mitigar los impactos de superar este umbral, que incluyen fenómenos climáticos extremos, pérdida de biodiversidad y mayor riesgo por el aumento del nivel del mar (Cannon, 2024).

En cuanto a México, en 2022 actualizó su Contribución Nacionalmente Determinada (NDC) para 2030, elevando su meta de reducción de emisiones de GEI del 22% al 35% en comparación con las emisiones proyectadas para ese año (Gobierno de México, 2022).

La reforma a la Ley General de Cambio Climático (LGCC) del 13 de julio de 2018, incluye las directrices del Acuerdo de París y establece la obligación de crear un mercado de carbono en México.

En su artículo 94, la LGCC otorga atribuciones a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) para establecer el Sistema de Comercio de Emisiones (SEMARNAT, 2019). De acuerdo con la SEMARNAT (2019), el SCE se describe como un instrumento de mercado diseñado para reducir los GEI. Se basa en el principio de "límite y comercio" (cap and trade), donde el gobierno establece un límite máximo para las emisiones totales de ciertos sectores económicos regulados, que debe reducirse cada año. Los sectores regulados, como la energía y la industria (con emisiones anuales iguales o mayores a 100 mil toneladas de CO₂), representan el 68% de las emisiones del país. Las instalaciones en estos sectores deben contar con un permiso de emisión por cada tonelada de CO₂ que liberan al ambiente (SEMARNAT, 2019).

Existen tres maneras para que los sectores regulados cumplan con sus metas de emisiones:

1. Reducir las emisiones mediante mejoras en la eficiencia de los procesos productivos o el uso de fuentes de energía con menor contenido de carbono.
2. Comprar permisos a compañías que hayan reducido sus emisiones y tengan un excedente de permisos, o participar en subastas.
3. Usar créditos de compensación (offsets), generados por proyectos de reducción de emisiones o captura de carbono en sectores no regulados por el sistema (como son los sectores forestal, agrícola y de residuos) (SEMARNAT, 2019).

Los proyectos de carbono son considerados muy beneficiosos, ya que suelen estar asociados con valiosos co-beneficios sociales y de biodiversidad, que contribuyen a la sostenibilidad y estabilidad del proyecto (Rainforest Alliance, 2009, p. 8).

El carbono fijado como resultado de las actividades del proyecto, dentro de un área definida y en un período de tiempo determinado, puede considerarse como un crédito si se produce de acuerdo con los sistemas, estándares y requisitos de un esquema creíble de carbono (Rainforest Alliance, 2009, p. 5).

El sistema de compensaciones en México se basa en la experiencia de proyectos pertenecientes al Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) y a estándares de carbono voluntarios como VCS (Verified Carbon Standard), CAR (Climate Action Reserve), GS (Gold Standard) y Plan Vivo. (Hernández, 2020, p. 8). Independientemente de los mecanismos de acreditación o estándares empleados durante el proceso para la emisión de reducciones de emisiones, existen etapas definidas para asegurar la conclusión exitosa de los proyectos (Figura 2.5.1.1).

Figura 2.5.1.1 Procesos para el desarrollo, implementación y acreditación de un proyecto.



Fuente: Ibarra, R. (febrero, 2022).
Webinar: Desarrollo de Proyectos de Carbono Forestal.

Después de la viabilidad, el diseño del proyecto (PDD) se convierte en el documento más importante para el éxito del desarrollo de un proyecto. En este documento se describe cómo el proyecto seguirá la metodología, y cómo cumplirá todos los requerimientos del estándar seleccionado, y cuáles serán las actividades y que resultará de ellas. El PDD funciona como un plan de manejo general para hacer operativo el proyecto (Rainforest Alliance, p. 20).

Los proyectos forestales actuales resultan más adecuados y ventajosos para los mercados voluntarios. El mercado voluntario apoya el desarrollo de proyectos innovadores y recompensa los llamados "co-beneficios" de los proyectos de reforestación, forestación y deforestación evitada, como la conservación de la biodiversidad y el apoyo a estilos de vida sostenibles (Rainforest Alliance, 2009, p. 7).

Los proyectos de reforestación pueden generar beneficios que van más allá de los ingresos por carbono, incluyendo el aprovechamiento de productos forestales no maderables (Rainforest Alliance, 2009, p. 8).

México ha mostrado un interés constante por vincular su modelo de mercado con otros esquemas de acción climática establecidos en América. Como parte de estos esfuerzos, el país ha participado activamente en la iniciativa del Western Climate Initiative (WCI), firmando acuerdos clave con diversas regiones. Entre ellos, destacan los memorandos de entendimiento con California (2014), Quebec (2015) y las provincias de Quebec y Ontario en Canadá (2016). Esta colaboración se profundizó en diciembre de 2017, cuando México se unió a la declaración sobre el precio al carbono en las Américas, un compromiso orientado a fortalecer los mercados de carbono a nivel regional e impulsar la estandarización de los precios en los diferentes sistemas implementados (Ranero, 2018, p. 20).

Dados los acuerdos firmados con participantes en el WCI, es posible que México opte por utilizar el esquema adoptado en California (Ranero, 2018, p. 22). Según el reporte international carbon action partnership (ICAP, 2024). Sobre el estado de los SCE en todo el mundo (Figura 2.5.1.2), existen un total de 28 SCE en vigor, que cubren aproximadamente el 16% del total de GEI globales, otros ocho están en desarrollo y 12 más en consolidación. Casi un tercio de la población mundial vive en el marco de un SCE vigente (ICAP, 2024, p. 9).

Actualmente el mercado de carbono mexicano ha experimentado avances significativos desde la fase piloto iniciada en 2019. Aunque se había previsto que el mercado formal comenzara en 2022, actualmente el SCE sigue en fase piloto, y los bonos de carbono operan únicamente en el mercado voluntario (BMV, 2022).

Cada gobierno diseña su SCE de tal manera que se adapte a las condiciones de su economía, lo que permite proteger su competitividad al mismo tiempo que se garantiza alcanzar los beneficios ambientales de la reducción de emisiones (México2, 2016).

La implementación de estos proyectos podría posicionar a la región como un modelo para iniciativas similares en otras partes del país, ayudando a cumplir con los compromisos internacionales de México en la reducción de emisiones de GEI y promoviendo el desarrollo sostenible a nivel local.

Figura 2.5.1.2 La situación de los sistemas de comercio de emisiones en el mundo 2024.



Fuente: ICAP, 2024, p. 9.

A partir de enero de 2024, existen 36 sistemas de comercio de emisiones (SCE) en vigor a nivel mundial, con 14 adicionales en desarrollo y 8 en consideración.

2.5.2 Asignación de precio al carbono

Establecer un precio para las emisiones de carbono es una estrategia fundamental para disminuir las emisiones de GEI y fomentar la inversión en tecnologías más sostenibles. Sin embargo, este enfoque se adapta de manera diferente según los principios y políticas de cada nación. Las emisiones de GEI conllevan un costo global, ya que contribuyen al cambio climático, lo que motiva la necesidad de implementar un precio sobre el carbono. Este mecanismo busca transferir la responsabilidad de los costos derivados de las emisiones desde la sociedad en su conjunto hacia las entidades que las generan (Salmán, 2020, p. 35).

De acuerdo con Pizarro (2021), los dos métodos más destacados para establecer un precio al carbono son los impuestos y los sistemas de permisos de emisión comercializables (ETS, por sus siglas en inglés). Ambos enfoques tienen como objetivo incorporar los costos sociales que generan las emisiones de carbono. La diferencia clave radica en la forma en que se regula el precio y el volumen de las emisiones: en un impuesto sobre el carbono, es el gobierno quien fija el precio y deja que el mercado determine el total de las emisiones; en cambio, en un sistema de ETS, el gobierno establece un límite máximo de emisiones, pero el mercado se encarga de fijar el precio de los permisos (p. 9). Además, existen enfoques híbridos que combinan características de ambos sistemas.

Determinar el precio adecuado del carbono es un desafío complejo, ya que involucra diversos factores técnicos, científicos y políticos, además de depender de la metodología empleada para su cálculo. De acuerdo con el 'Report of the High-Level Commission on Carbon Prices', para que el precio del carbono sea coherente con los objetivos del Acuerdo de París, se estima que debería estar entre los USD 40 y 80 por tonelada de CO₂ en 2020, y entre USD 50 y 100 para 2030 (CPLC, 2017, p. 11). En México, este precio es significativamente más bajo, del orden de USD \$2 por tonelada de CO₂e.

Según un informe reciente de Ecosystem Marketplace (EM), los precios globales de los créditos de carbono experimentaron un aumento del 60% entre 2020 (USD 2.5) y 2021 (USD 4.0) según la Plataforma Mexicana de Carbono (s. f.). Por otro lado, en el análisis realizado por SEMARNAT-INECC-GGGI (2024) sobre el precio y la comercialización de créditos en el MVC en México, se identificó que los precios por crédito varían entre los 3.8 USD y los 25 USD. El precio más elevado corresponde a un proyecto de carbono azul con cobeneficios bioculturales. En promedio, el precio por crédito en México se encuentra entre los 8.21 USD y 9.53 USD. Las empresas intermediarias extranjeras, que revenden los créditos, suelen ofrecer precios más altos (entre 12 y 14 USD), mientras que las empresas mexicanas que adquieren los créditos directamente, tienden a ofrecer precios más bajos (entre 6 y 8 USD).

En lo que respecta a los permisos de emisión transables, dos de los principales sistemas en América son el WCI y el Regional Greenhouse Gas Initiative (RGGI). El WCI es una iniciativa conjunta entre varios Estados de EE. UU. y provincias de Canadá, con el objetivo de coordinar sus políticas de mitigación mediante un sistema compartido de permisos de emisión transables (p. 15). México ha decidido integrarse al WCI (Pizarro, 2021). En el Cuadro 2.5.2.1 se presentan las características principales de los PET en las Américas. Para obtener una visión más amplia, véase el Anexo 2, donde se detallan las características de los sistemas de comercio de emisiones en el mundo.

Cuadro 2.5.2.1 Características de PET de Sistemas de comercio de emisiones en América del Norte.

Sistema de Comercio de Emisiones	Emisiones Cubiertas (anual)	Precio (USD)
WCI (California, Québec & Nueva Escocia)	416.83 MtCO ₂ e (2019)	\$15.73
EEUU –Iniciativa Regional de GEI (RGGI)	52.9 MtCO ₂ e (2014)	\$5.27

Fuente: The World Bank, International Carbon Action Partnership, IETA & ICAP.

2.6 Análisis del mercado voluntario en México.

Según el informe sobre el mercado voluntario de carbono en México, hasta mayo de 2023, el país contaba con un total de 248 proyectos en este mercado. De esos, 116 ya estaban oficialmente registrados y generando créditos certificados. Por otro lado, 123 proyectos se encuentran en fase de desarrollo o aprobación, mientras que 9 proyectos ya habían transferido sus emisiones desde el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL). Esto significa que aproximadamente la mitad de los proyectos en México están generando créditos, mientras que el resto aún se encuentran en proceso de implementación (SEMARNAT-INECC-GGGI, 2024).

La mayoría de estos proyectos se concentran en el sector forestal, que representa el 87.5% del total. Estos proyectos están distribuidos en 25 estados del país, aunque la gran mayoría (85%) se encuentra en 10 entidades federativas: Estado de México (37), Durango (28), Hidalgo (24), Quintana Roo (23), Oaxaca (20), Campeche (20), Chihuahua (16), Veracruz (13), Michoacán (9) y Jalisco (6). En cuanto a los desarrolladores, 55 entidades están gestionando estos proyectos, pero solo 7 controlan más de la mitad de los mismos, todos enfocados en iniciativas forestales. Este panorama podría cambiar con el tiempo debido al desarrollo de nuevos proyectos, la implementación de impuestos al carbono y ya en operación en varios Estados como Querétaro, Yucatán, Estado de México y Guanajuato, asimismo, la entrada en funcionamiento del SCE (SEMARNAT, 2023; Ranero, 2018).

Los estándares utilizados para los proyectos, los más comunes son CAR y VCS, que en conjunto representan el 95.2% de los proyectos en México. El estándar CAR, que cubre el 81.85% de los proyectos, ha adaptado protocolos específicos para México debido al interés de California en obtener créditos de compensación de carbono de este país. Por otro lado, el programa VCS, que representa el 13.31% de los proyectos, no cuenta con protocolos específicos, pero sí con metodologías universales aplicables a nivel mundial (SEMARNAT-INECC-GGGI, 2024).

Estos protocolos y metodologías son esenciales para que cada proyecto cumpla con los requisitos necesarios para la certificación y la generación de créditos. En el sector forestal, se estima que los proyectos abarcan alrededor de 1.6 millones de ha, de las cuales 692,000 ha están siendo utilizadas para actividades como manejo forestal mejorado, reforestación, restauración, REDD+, agroforestería y restauración de humedales. Aproximadamente 10,000 ejidatarios se benefician directamente de estos proyectos, y unas 80,200 personas adicionales en las comunidades cercanas también se ven favorecidas (SEMARNAT-INECC-GGGI, 2024).

Un factor clave para el éxito de los proyectos forestales es su atractivo comercial. La gran cantidad de créditos generados, junto con los co-beneficios que estos proyectos ofrecen, como la conservación del suelo, el control climático, la captación de agua y la creación de empleo verde, son aspectos fundamentales para su viabilidad. En términos de comercialización, los créditos de carbono en México se venden principalmente a través de acuerdos bilaterales con compradores finales o inversionistas. El MVC en el país no está centralizado, lo que significa que la comercialización depende de la oferta y demanda global (SEMARNAT-INECC-GGGI, 2024).

México ha implementado diversos proyectos forestales para la venta de créditos de carbono en el mercado voluntario, los cuales son validados por agencias de certificación. Estos proyectos han sido diseñados para generar títulos comercializables que pueden ser adquiridos por inversores y compradores internacionales (Ranero, 2018, p. 17). En el Cuadro 2.6.1. se muestran los proyectos en México que han sido validados bajo los estándares del mercado voluntario o las normas nacionales.

Cuadro 2.6.1 Proyectos con venta de créditos de carbono en el mercado voluntario en México.

Proyecto	Actividades	Estándar	Localización	Año de operación	Superficie (ha)	Créditos vendidos (tCO ₂ e)
Scolec Te	Forestación Sist. agroforestales Reforestación Restauración forestal Deforestación evitada	Plan Vivo	Chiapas	1997	8,958.25	518,613
Sierra Gorda	Forestación	VCS-CCB	Querétaro	1997	360	19,392
Secuestro de Carbono en Comunidades de Pobreza Extrema en la Sierra Gorda	Forestación Reforestación	VCS y CCBA Gold	Querétaro y San Luis Potosí	1997	383,567	-
Secuestro de Carbono en Comunidades Indígenas y Rurales en Oaxaca	Sist. agroforestales Reforestación	-	Oaxaca	2000	3,196.43	76,821
Fresh Breeze Afforestation Project	Forestación	VCS	Tabasco, Nayarit y Chiapas	2009	4,269.82	25,000
Sustainable Climate-Friendly Coffee	Reforestación	VCS	Oaxaca	2014	292	-
Captura de Carbono en San Juan Lachao, Oaxaca	Manejo forestal mejorado	CAR	Oaxaca	2014	2,388.0	10,225
Carboin	Reforestación, mantenimiento regeneración natural, enriquecimiento de sistemas agroforestales, recuperación de áreas degradadas, restauración de áreas agrícolas degradadas	Normas ANCE	Oaxaca	2009	1,672.3	20,410
Captura de carbono San Rafael Ixtapalucan		Verified Carbon Standard	Puebla	-	3,651	-
Amigos de Calakmul		Verified Carbon Standard	Yucatán	2003	4,270	-

Fuente: Charchalac, 2012, p. 22; Ranero, 2018, p. 18; Rontard et al., 2020, p. 217.

Existen diversas iniciativas en México que integran el cultivo de agave en proyectos de captura de carbono, contribuyendo a la mitigación del cambio climático y al desarrollo sostenible de las comunidades rurales. A continuación, se presentan algunos ejemplos destacados:

Proyecto mil millones de agaves

El proyecto tiene como objetivo plantar un billón de agaves en México, especialmente en áreas áridas y semiáridas, para la captura de carbono, restauración del suelo y conservación de agua. Además, busca generar ingresos para los agricultores mediante la venta de créditos de carbono, aprovechando la resiliencia del agave en suelos pobres. El proyecto ha captado la atención internacional debido a su potencial de escalar y mitigar los efectos del cambio climático a nivel global (ECPA, 2022).

Integración del agave en sistemas agroforestales

Algunas iniciativas en México han integrado el agave en sistemas agroforestales, lo que permite no solo capturar carbono sino también mejorar la fertilidad del suelo y aumentar la biodiversidad. Estos proyectos suelen ser impulsados por comunidades locales, que logran beneficios tanto ecológicos como económicos. Además de la captura de carbono, los agricultores pueden vender créditos de carbono en mercados internacionales (Vía Orgánica, 2021).

Iniciativas Comunitarias en San Miguel de Allende

En San Miguel de Allende, comunidades locales han comenzado a usar el agave en proyectos de restauración de suelos, aprovechando su resistencia a la sequía. Estos proyectos están alineados con los esquemas de Pagos por Servicios Ambientales (PSA), respaldados por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), y buscan mejorar las condiciones del suelo y secuestrar carbono a través de prácticas agrícolas sostenibles (Mongabay, 2022).

Proyecto agave carbono

El proyecto se enfoca en la integración del agave en la lucha contra el cambio climático en México, utilizando este cultivo para capturar carbono y restaurar tierras degradadas. Este proyecto se lleva a cabo principalmente en zonas áridas y semiáridas, donde el agave es tradicionalmente cultivado. A través del cultivo de agave, se promueve la captura de CO₂ y se mejora la calidad del suelo, contribuyendo tanto a la restauración de tierras como al desarrollo económico de las comunidades mediante la generación de créditos de carbono (ECP, 2022).

Aunque el cultivo de agave no es tan comúnmente asociado con proyectos de carbono como los bosques o las plantaciones forestales, su potencial para la captura de carbono es significativo. Este tipo de proyectos está en sus primeras etapas, pero con la implementación de metodologías adecuadas y el desarrollo de mercados para créditos de carbono, podrían convertirse en una fuente importante de ingresos para las comunidades rurales en México, mientras contribuyen a la mitigación del cambio climático.

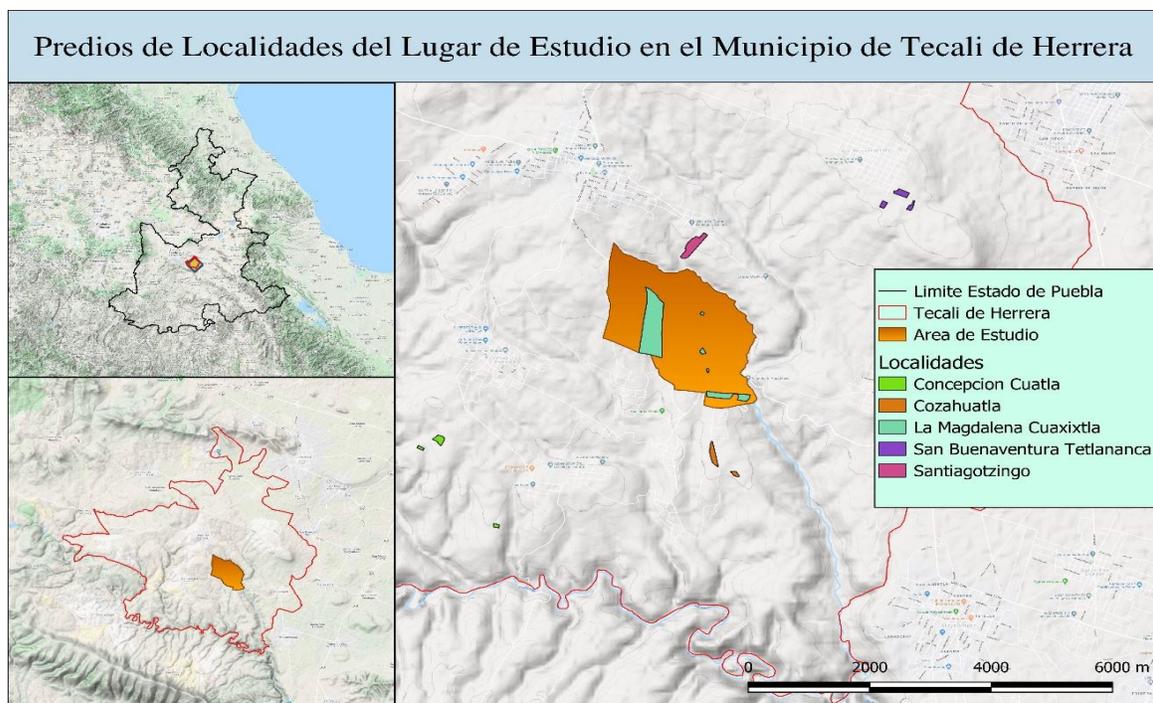
3 ÁREA DE ESTUDIO

3.1 Descripción de la zona de estudio

El presente trabajo se desarrolló con localidades que presentan el sistema de producción de *Agave potatorum*, vinculadas a la producción de mezcal que abastece la fábrica ubicada en La Magdalena Cuaxixtla del municipio de Tecali de Herrera, Puebla, ubicada aproximadamente a 3.7 km de la cabecera municipal.

En la Figura 3.1.1, se presenta la distribución espacial y superficies cultivadas con agave de estas localidades: La Magdalena Cuaxixtla (44.00 ha), Cozahuatla (7.50 ha), Concepción Cuatla (3.30 ha), San Buenaventura Tetlananca (4.20 ha) y Santiagotzingo (7.50 ha) del municipio de Tecali de Herrera, y la localidad de Torija (11.50 ha) en el municipio de Cuautinchán, Puebla, dando un total de 78.00 ha.

Figura 3.1.1 Predios de las localidades del lugar del estudio del municipio de Tecali de Herrera, vinculados a la fábrica de producción de mezcal en La Magdalena Cuaxixtla.



Fuente: Elaboración propia con información proporcionada por los productores.

La Magdalena Cuaxixtla, localidad que vincula a localidades con respecto a la producción de mezcal, de acuerdo a datos del censo poblacional del INEGI (2020), tiene una población total de 697 habitantes. Las demás localidades georreferenciadas con predios de agave mezcalero, se clasifican para mayor contexto en el Cuadro 3.1.1.

Cuadro 3.1.1. Población de las localidades vinculada a la producción de mezcal.

Entidad	Municipio	Localidades	Población
Puebla	Tecali de Herrera	La Magdalena Cuaxixtla	697
Puebla	Tecali de Herrera	Cozahuatla	108
Puebla	Tecali de Herrera	Concepción Cuautla	1,933
Puebla	Tecali de Herrera	San Buenaventura Tetlananca	1,780
Puebla	Tecali de Herrera	Santiagotzingo	40
Puebla	Cuautinchán	Torija	1,547
Total			6,105

Fuente: Elaboración propia con datos del censo de población y vivienda, INEGI (2020).

La Magdalena Cuaxixtla tiene un grado de marginación alto, de acuerdo a INEGI en el catálogo de claves de entidades federativas, municipios y localidades, octubre 2015. Por lo que buena parte de la población aun padece carencias, resultado de la falta de acceso a servicios básicos como viviendas adecuadas, agua entubada, drenaje, salud, educación, etc. Estos indicadores tienen una importante relación con las condiciones de vida.

Continuando con la descripción de La Magdalena Cuaxixtla, el relieve predominante son las llanuras con roca sedimentaria (100 %), de tipo arenisca con 202 ha (43 %) y caliche con 269 ha (57 %), donde se pueden identificar tres grupos de suelo Hh+Be+l/2/D (Feozem háplico + Cambisol eutricto + Litosol) con poca profundidad (Litosoles) y (Cambisoles) asociados a una capa superficial oscura, rica en materia orgánica y nutrientes (Feozems háplicos) con textura media y dúpica, suelos poco desarrollados muy susceptibles a la erosión.

Presenta también un clima subhúmedo, con dos sugrupos C(w1)(w) templado subhúmedo con 99.87 ha (21.2 %) y C(w0)(w) templado seco con 371.53 ha (78.80 %); las precipitaciones oscilan entre 600 a 800 mm, y temperatura de entre 16 a 18 °C. Por tipo de uso de suelo y vegetación se tienen pastizal inducido 236 ha (50.11%) y agricultura de temporal anual 235 ha (49.89 %) (SEMARNAT, 2013b).

3.2 Especie estudiada

El *Agave potatorum* es una planta endémica de Puebla y Oaxaca, perteneciente a la familia Asparagaceae. Conocida como "maguey papalote" o "papalometl" (del náhuatl, "papalotl" = mariposa y "metl" = maguey), es monocárpica y tarda entre 8 y 12 años en florecer. No se reproduce asexualmente y generalmente presenta una roseta pequeña con 50 a 80 hojas verde glauco, de forma lanceolada y márgenes ondulados. En junio, se forma su inflorescencia (quiot), que puede alcanzar entre 3 y 6 m de altura, con 11 umbelas de 10 flores cada una. Las flores son polinizadas por murciélagos del género *Leptonycteris* (Estrella-Ruíz, 2008). Las semillas de agave por lo general son aplanadas y muy livianas, lo que les permite desplazarse con el viento varios metros de la planta madre (Torres, 2009, p. 55).

4 METODOLOGÍA

4.1 Postura metodológica

La investigación no es aplicada a un solo enfoque metodológico, según Sampieri (2018); más bien, adopta una orientación mixta que implica la recolección y el análisis de datos tanto cualitativos como cuantitativos. Esta combinación permite una comprensión más amplia del fenómeno bajo estudio. El trabajo se desarrolló bajo el marco de la investigación participativa rural con los productores que, en conjunto con maestros mezcaleros, se realizaron recorridos de campo para delimitar el polígono de La Magdalena Cuaxitla e identificar los sistemas de producción de *Agave potatorum*, seleccionar sitios de muestreo y cosechar plantas adultas de agave (maguey sazón) para análisis de laboratorio correspondiente. Se llevaron a cabo mediciones necesarias para desarrollar ecuaciones alométricas que determinaran el contenido de carbono en la biomasa aérea y el suelo.

4.2 Métodos para la recolección de información

4.2.1 Trabajo de campo para analizar la percepción y manejo tradicional del *Agave potatorum* para su aprovechamiento sostenible y captura de carbono.

Según la UNAM (2011), el diagnóstico participativo (DP) es la fase inicial de la metodología de investigación participativa (MIP), puede ser definido como una actividad semiestructurada, realizada en el campo y diseñada para obtener información oportuna e hipótesis sobre sustentos de la comunidad (p. 564).

El DP busca conocer a la comunidad como un sistema, entender cómo funciona desde el punto de vista del campesino y la lógica con la que maneja y aprovecha los recursos naturales disponibles. De esta forma se podrá llegar a la identificación de problemas y posibles soluciones para fortalecer su sistema de producción (p. 565).

Esta fase semiestructurada se realizó durante el período de enero de 2020 a noviembre de 2021. Se visitaron predios de *Agave potatorum* y fábricas de mezcal en las localidades participantes para observar prácticas productivas, conocer el conocimiento ecológico y agronómico tradicional de los productores y discutir con ellos los problemas y oportunidades para mejorar los sistemas de producción. Los datos se obtuvieron mediante observación participante junto a productores y maestros mezcaleros de La Magdalena Cuaxixtla. Se realizó un análisis cualitativo relacionado con el manejo, aprovechamiento y ecología del *Agave potatorum*, complementado con revisión documental para enriquecer la comprensión en el ámbito del mezcal y su actividad en la región.

Se reconoce que el aprovechamiento de los recursos y usos sobre los sistemas en los que se encuentran, son factores determinantes de la pérdida de diversidad biológica, así como de las CNP.

4.2.2 Trabajo de campo para estimar el carbono almacenado en la biomasa aérea y suelo de los sistemas de producción de *Agave potatorum*.

4.2.2.1 Sitios de muestreo

Los proyectos de manejo de carbono suelen abarcar áreas heterogéneas en microclima, uso del suelo, cobertura vegetal y grados de conservación o perturbación ecológica. Esta variabilidad influye directamente en la distribución espacial de la biomasa y los stocks de carbono. La estratificación del área en subunidades homogéneas mejora la precisión del muestreo, optimiza el trabajo de campo al reducir costos operativos y aumenta la robustez metodológica en la cuantificación de resultados (Brown et al., 2023). No obstante, en sistemas productivos pequeños o diversificados —dependiendo de los requisitos del mercado de créditos de carbono— puede priorizarse una estratificación a escala de proyecto en lugar de subdividir las unidades (CIFOR-ICRAF, 2020).

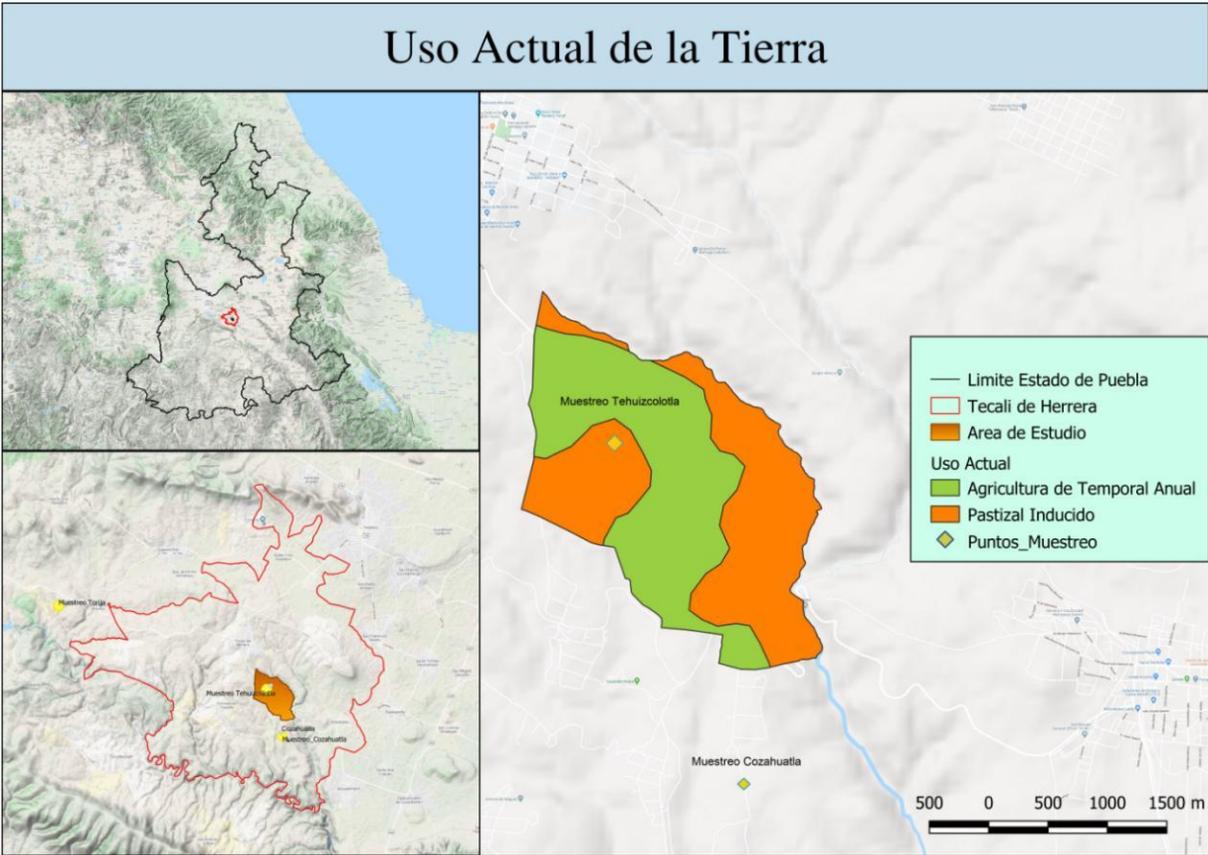
Para este objetivo, se realizaron recorridos con los productores para definir los sitios de muestreo en las localidades. Se seleccionaron tres predios representativos según el uso de la tierra: agricultura de temporal anual y permanente, y pastizal inducido. Estos sitios fueron definidos con base en la cartografía del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Se incluyó el predio Torija del municipio de Cuautinchán, debido a su manejo diferenciado en el sistema de producción con prácticas de conservación de suelo y agua, como zanjas bordo, muy relevantes para la investigación. La asociación de estas prácticas con el *Agave potatorum* fue discutida con expertos locales (A. Cruz, D. Cruz, A. Vélez, S. Vélez y L. Meza, comunicación personal, marzo 16 de 2020).

Se hace referencia a estudios relevantes como el de Nobel (1987) en *Agave tequilana*, que concluyó sobre la influencia del agua del suelo en la productividad y la absorción de CO₂ por las plantas, así como estudios más recientes como el de Ramírez et al. (2014) en diversas especies de agave, que destacan la influencia de la disponibilidad de humedad en la acumulación de biomasa. En la Figura 4.2.2.1.1 se muestra los predios de muestreo de acuerdo al uso de la tierra y prácticas de manejo de los sistemas de producción.

En contexto, La Magdalena Cuaxitla es una comunidad con características geográficas y socioeconómicas particulares. Su clima es templado seco, y sus suelos, poco profundos formados sobre roca sedimentaria, principalmente caliche, lo que favorece el crecimiento del *Agave potatorum*. Aunque presentan una capa superficial rica en materia orgánica y nutrientes, estos suelos son frágiles y propensos a la erosión. Históricamente la población ha dependido de actividades agropecuarias y del aprovechamiento del agave para la producción de mezcal.

En cuanto al uso del suelo, la mayor parte del territorio se destina al pastizal inducido y a la agricultura de temporal, actividades esenciales para la economía local. Sin embargo, la combinación de suelos poco desarrollados y el manejo de los recursos naturales hace que la zona sea vulnerable a la degradación si no se implementan estrategias sostenibles.

Figura 4.2.2.1.1 Uso actual de la tierra del mapa base del lugar de estudio.



Fuente: Elaboración propia con información de INEGI y recorridos de campo con productores. La Magdalena Cuaxitla, Municipio de Tecali de Herrera.

En el siguiente cuadro 4.2.2.1.1. se hace una descripción para cada predio con la información anteriormente señalada.

Descripción de los predios

Cuadro 4.2.2.1.1 Descripción topográfica y ecológica de los predios muestreados de *Agave potatorum*.

Municipio	Localidad	Tipo de vegetación	Clima	Precipitación media anual (mm)	Temperatura media anual (°C)	Suelo	Ubicación de predio muestreados		
							Latitud	Longitud	Altura
Tecali de Herrera	La Magdalena Cuaxixtla (Tehuizcolotla)	Pastizal inducido	C(w0)(w) C(w1)(w)	600 a 700	16 a 18	Hh+Be+I/2/D	609507	2087498	2,072
Tecali de Herrera	Cozahuatla	Agricultura de temporal anual	C(w0)(w)	600 a 700	16 a 18	Hh+Be+I/2/D	596584.48	2092553.54	2,010
Cuautinchán	Torija	Agricultura de temporal permanente	C(w1)(w)	700 a 800	16 a 18	Hh+Be+I/2/D	610492	2084648	2,070

Fuente: Elaboración propia con datos de SEMARNAT, 2013.

En las Figuras 4.2.2.1.2, 4.2.2.1.3 y 4.2.2.1.4, se presenta cada sitio de muestreo para mayor apreciación.

Figura 4.2.2.1.2 Sitio de muestreo Cozahuatla.



Fuente: Fotografía propia, trabajo de campo (marzo, 2020)

Figura 4.2.2.1.3 Sitio de muestreo Tehuizcolotla.



Fuente: Fotografía propia, trabajo de campo (febrero, 2021).

Figura 4.2.2.1.4 Sitio de muestreo Torija.



Fuente: Fotografía propia, trabajo de campo (junio, 2020).

4.2.2.2 Medición y estimación de biomasa aérea y contenido de carbono en *Agave potatorum*.

El procedimiento utilizado para la recolección de datos y la estimación de biomasa en *Agave potatorum* se basó en la metodología de modelos predictivos para la producción de productos forestales no maderables: agaves mezcaleros del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) en 2009. Esta metodología fue complementada con un estudio similar realizado en Sotol por el mismo INIFAP en 2005.

La metodología aplicada es la siguientes:

a) Diseño de muestreo y tamaño de muestra

Se establecieron cuadrantes de 256 m² para llevar a cabo un muestreo selectivo y destructivo. Esta actividad requirió coordinarse con los productores durante la temporada de cosecha, dado que el *Agave potatorum* es seleccionado para aprovechamiento una vez que alcanza la madurez adecuada, que suele ser entre 7 a 10 años de edad, dependiendo de las condiciones del suelo y el contenido de azúcares necesarios para la producción de mezcal (maguey-sazón).

El tamaño de muestra fue determinado siguiendo las recomendaciones de Montgomery et al. (2004), citado por INIFAP (2009), establece que se deben estudiar al menos 60 individuos para cumplir con el supuesto de normalidad de los errores del modelo de regresión (p. 19).

b) Medición de Biomasa aérea

Para los agaves seleccionados, se llevaron a cabo las siguientes mediciones: altura total de la planta (cm), así como el diámetro menor y mayor de la “roseta” (cm) (Figuras 4.2.2.2.1 y 4.2.2.2.2), variables que están correlacionadas con el peso fresco de la piña y la hoja en kilogramos (kg), que fueron registradas para la construcción de ecuaciones alométricas destinadas a estimar la biomasa.

Figura 4.2.2.2.1 Medición de diámetro y altura de *Agave potatorum*.



Fuente: Fotografía propia, trabajo de campo (junio, 2020).

Figura 4.2.2.2.2 Registro de datos de la medición de *Agave potatorum*.



Fuente: Fotografía propia, trabajo de campo (junio, 2020).

Para determinar el peso fresco total de la planta de agave (Figura 4.2.2.2.3 y 4.2.2.2.4), se procedió de la siguiente manera: se pesaron por separado las hojas y las piñas, utilizando una báscula romana y herramientas de trabajo para extraer las mismas.

Figura 4.2.2.2.3 Pesado de piña de *Agave potatorum*.



Fuente: Fotografía propia, trabajo de campo (junio, 2020).

Figura 4.2.2.2.4 Pesado de hoja de *Agave potatorum*.



Fuente: Fotografía propia, trabajo de campo (junio, 2020).

c) *Determinación de contenido de carbono*

De la biomasa fresca obtenida durante las mediciones, se extrajo una muestra que se envió al laboratorio para determinar su peso seco (Figura 4.2.2.2.5 y 4.2.2.2.6). Este proceso permite calcular el contenido de carbono almacenado en las muestras analizadas. La investigación del contenido de carbono se realizó mediante métodos estándares de laboratorio que incluyen la combustión de la muestra.

Figura 4.2.2.2.5 Muestra de la sección media de la hoja más recientemente madura, (3a - 6a hoja desde el centro).



Fuente: Fotografía propia, trabajo de campo (febrero, 2021).

Figura 4.2.2.2.6. Muestra de la sección media de la piña en corte transversal.



Fuente: Fotografía propia, trabajo de campo (febrero, 2021).

4.2.2.3 Medición y estimación de carbono del suelo

Para la medición y estimación del carbono en las muestras de suelo, se siguió la metodología establecida en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF), 2002, la cual define las especificaciones para el estudio, muestreo y análisis de la fertilidad, salinidad y clasificación de suelos.

El procedimiento de trabajo de campo para la medición de carbono en el suelo se detalló de la siguiente manera:

a) Muestreo de suelo en campo

Para la evaluación del depósito de carbono en el suelo, se siguieron recomendaciones de profundidad de muestreo de al menos 30 cm, adaptándose según las características específicas del suelo. Esta profundidad se dividió en tres horizontes (0-10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm), capa superficial, media y profunda del suelo. Debido a consideraciones de costos de laboratorio se tomó una muestra compuesta por cada sitio de muestreo. El procedimiento fue el siguiente:

1. Selección de sitios de muestreo: se seleccionaron sitios representativos dentro de cada predio de estudio, considerando diferentes usos del suelo y variabilidad edáfica.
2. Toma de muestras: se extrajo una muestra compuesta de suelo en cada sitio de muestreo. Se tomaron muestras en cada horizonte (0-10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm), asegurando una representación de las características del suelo en cada profundidad.

Figura 4.2.2.3.1 Toma de muestra de suelo.



Fuente: Fotografía propia, trabajo de campo (febrero, 2021).

Figura 4.2.2.3.2 Profundidad de muestra 20 cm (10 cm material obscuro y 10 de material de tepetate permeable).



Fuente: Fotografía propia, trabajo de campo (febrero, 2021).

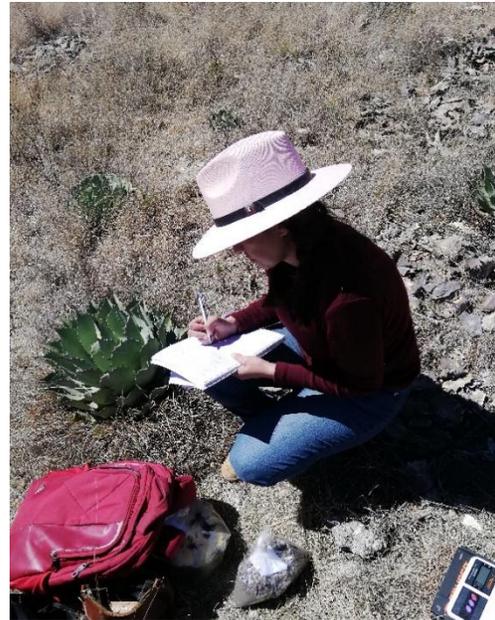
3. Preparación de muestras: Se combinó material de todas las capas de suelo recolectadas. La muestra se homogenizó de manera cuidadosa para obtener una muestra representativa del sitio de muestreo. Esta homogeneización se realizó para asegurar que la muestra final reflejara las características ahí encontradas.

Figura 4.2.2.3.3 Preparación de la muestra de suelo.



Fuente: Fotografía propia, trabajo de campo (febrero, 2021).

Figura 4.2.2.3.4 Toma de datos de las muestras de suelo y etiquetado.



Fuente: Fotografía propia, trabajo de campo (febrero, 2021).

b) Determinación de contenido de carbono

1. Análisis de laboratorio para la determinación de carbono: Las muestras compuestas enviadas al laboratorio se secaron a temperatura ambiente para evitar alteraciones en la estructura del suelo. Posteriormente, se tamizaron y se homogeneizaron para obtener una muestra representativa del sitio de muestreo.

Las muestras preparadas fueron sometidas a análisis por combustión. Este método permite la determinación precisa del porcentaje de carbono en cada muestra de suelo.

4.3 Métodos para análisis e interpretación de datos

4.3.1 Trabajo de campo para analizar la percepción y manejo tradicional del *Agave potatorum* para su aprovechamiento sostenible y captura de carbono.

Para el análisis de la información, se aplicó un enfoque mixto, integrando tanto datos cualitativos como cuantitativos a través de la observación participante. Esta metodología permitió una comprensión profunda del contexto productivo y social de La Magdalena Cuaxixtla, al involucrarse activamente con los productores de *Agave potatorum* y los maestros mezcaleros.

Durante el trabajo de campo, se realizaron recorridos en los cuales se identifican prácticas de manejo del agave, como la selección y conservación de semillas, el uso de viveros rústicos para la reproducción de plántulas, la reforestación, la implementación de sistemas agroforestales con especies nativas, el monitoreo de azúcares (grados brix) para determinar la madurez óptima de la planta y la certificación de predios ante el CRM.

Además, se observaron diferencias en la densidad de plantación desde 1,000 hasta 10,000 plantas por hectárea y el uso de fertilización química en algunos predios, lo que influye en los tiempos de maduración del agave, su desarrollo fisiológico y la calidad de la materia prima obtenida. Posteriormente, esta información se verificó en campo mediante un muestreo representativo, donde se realizaron conteos directos y se extrapolaron los resultados a hectáreas.

Estas variaciones en el manejo impactan no solo la productividad de los sistemas de producción, sino también la sostenibilidad del ecosistema, ya que prácticas como el uso de terrazas, la conservación de suelos y la integración de especies arbóreas nativas pueden mejorar la retención de humedad y el almacenamiento de carbono en los ecosistemas locales.

La observación participante, además, permitió recolectar información sobre los factores que afectan la producción, como la disponibilidad de materia prima, las condiciones de manejo y las estrategias implementadas para mejorar la sostenibilidad del cultivo.

Esta experiencia directa facilitó el análisis de las percepciones de los productores sobre el impacto de sus prácticas y cómo estas influyen en la acumulación de carbono, lo que es fundamental para entender la relación entre la producción de agave y las CNP.

A través de este proceso se identifican las principales preocupaciones de los productores, como la reducción de la disponibilidad de agave y las alteraciones en los ciclos de crecimiento, que se atribuyen a factores como la demanda creciente y el cambio climático. A partir de estas observaciones, se definieron posibles soluciones y estrategias para mejorar la conservación y el manejo sostenible.

4.3.2 Trabajo de campo para estimar el carbono almacenado en la biomasa aérea y suelo de los sistemas de producción de *Agave potatorum*.

4.3.2.1 Sitios de muestreo

El mayor crecimiento observado de *Agave potatorum* en los sitios de muestreo fue en el predio de Torija. Este fenómeno puede atribuirse a la combinación de características físicas y químicas del suelo, las cuales proporcionaron condiciones óptimas para el crecimiento de los agaves. Se destaca que la fertilización aplicada por los productores, utilizando NPK (nitrógeno, fósforo y potasio), resultó beneficiosa para el crecimiento y la producción de biomasa. Así mismo la implementación de prácticas de zanjas bordo para la conservación del suelo y agua, fue muy provechoso.

Según Zúñiga et al. (2018), estudios similares han demostrado que la fertigración puede incrementar significativamente la producción de materia seca en plantas de tipo MAC como el *Agave tequilana*.

Otro factor relevante identificado en los sitios de muestreo es el contenido de materia orgánica (MO). Según Ibarra et al. (2007), los tres sitios de muestreo presentaron condiciones de suelo con un contenido rico en MO, con valores en el rango de 3 a 3.99%, lo cual es favorable para el desarrollo de *Agave potatorum* (p. 191).

En el cuadro 4.3.2.1.1 se detallan las variables medidas de *Agave potatorum* para cada sitio de muestreo, Coahuatla 21, Torija 25 y Tehuizcolotla 20, un total de 65 individuos muestreados. La metodología indica un mínimo de 60 individuos para el supuesto de normalidad de los errores del modelo de regresión.

Cuadro 4.3.2.1.1 Variables medidas en *Agave potatorum* por sitio de muestreo.

Sitio	VARIABLES								Fertilización
	Altura de planta (cm)		Diámetro de cobertura (cm)		Peso de piña (kg)		Peso de hoja (kg)		
	Rango mínimo	Rango máximo	Rango mínimo	Rango máximo	Rango mínimo	Rango máximo	Rango mínimo	Rango máximo	
Coahuatla	26	50	43.5	70	3	11	4.5	12	No
Tehuizcolotla	22	35	42	60	2	6	3.5	8	No
Torija	42	65	52	82	5	21	8	26	Si

Fuente: Elaboración propia con información de trabajo de campo.

4.3.2.2 Estimación de biomasa aérea y contenido de carbono en *Agave potatorum*.

a) Base de datos

La información de campo del *Agave potatorum* se recopiló y organizó en una tabla excel, que constituye la base de datos principal para este estudio. La muestra de estudio comprende un total de 65 registros de datos obtenidos durante las mediciones y muestreos realizados en campo (Anexo 3).

b) Generación del modelo predictivo (ecuación alométrica) de biomasa

Una vez recopilada la información de campo, se procedió a desarrollar modelos de regresión lineal o ecuaciones alométricas. La alometría se enfoca en analizar los patrones de crecimiento de los organismos y la relación entre las dimensiones de sus partes, esto se utilizó para establecer una ecuación que predice el peso fresco de la "piña" del *Agave potatorum*. En este contexto, la variable dependiente en el modelo es el peso fresco de la piña, mientras que las variables independientes incluidas en el análisis se detallan en el cuadro 4.3.2.2.1.

Cuadro 4.3.2.2.1. Variables consideradas para la generación del modelo de regresión de peso de piña.

Tipo de variable	Clave	Descripción
Dependiente (y)	Peso piña	Peso fresco de la "piña" (kg)
Independiente (x1)	Altura	Altura total de la planta (cm)
Independiente (x2)	Diámetro de cobertura	Diámetro mayor y menor de la roseta (cm)
Independiente (x3)	Altura/Cobertura	Relación Altura/Cobertura, área de la fig. (cm ²)
Independiente (x4)	Volumen	Volumen de un sólido (cm ³)

Fuente: INIFAP, 2009, p. 28.

Para estimar el peso de la "hoja" del *Agave potatorum*, se desarrolló un modelo de regresión lineal utilizando variables independientes (cuadro 4.3.2.2.2) seleccionadas por su posible influencia en el crecimiento y desarrollo de la hoja. La variable dependiente en este modelo es el peso fresco de la hoja.

Cuadro 4.3.2.2.2 Variables consideradas para la generación del modelo de regresión de peso de hoja.

Tipo de variable	Clave	Descripción
Dependiente (y)	Peso hoja	Peso fresco de la "hoja" (kg)
Independiente (x1)	Altura	Altura total de la planta (cm)
Independiente (x2)	Diámetro de cobertura	Diámetro mayor y menor de la roseta (cm)
Independiente (x3)	Altura/Cobertura	Relación Altura/Cobertura, área de la fig. (cm ²)
Independiente (x4)	Volumen	Volumen de un sólido (cm ³)

Fuente: INIFAP, 2009, p. 28.

Para mejorar el ajuste del modelo de regresión lineal simple utilizado en el *Agave potatorum*, se consideró la derivación de una nueva variable basada en el volumen de la planta (V), definido como el hemisferio superior de un esferoide según González et al., 1980, citado por INIFAP, 2009.

La fórmula utilizada fue $V = \pi \times r^2 \times \text{altura}(h)$, donde r es el radio promedio de la "roseta" de hojas y h es la altura total de la planta.

Las variables independientes seleccionadas previamente (altura total, diámetro mayor y diámetro menor), se integraron junto con esta nueva variable derivada (V) en el modelo de regresión lineal simple. Este enfoque permitió capturar mejor la variabilidad en el peso fresco de la piña y de la hoja del *Agave potatorum* (Anexo 4-5).

El análisis estadístico y la generación del modelo se llevaron a cabo utilizando el software R, específicamente en su interfaz gráfica R-Commander. El procedimiento del análisis se encuentra disponibles en el Anexo 6 del estudio.

Este enfoque metodológico aseguró una mejor precisión en la estimación de la biomasa aérea y el contenido de carbono en el *Agave potatorum*, facilitando así la interpretación de los datos obtenidos en el estudio de campo.

c) Determinación de biomasa seca

Las muestras tomadas en campo fueron enviadas al laboratorio para su procesamiento. El proceso incluyó el lavado y secado de las muestras en un horno a una temperatura de 90°C, asegurando que alcanzaran un peso constante, lo cual es importante para obtener mediciones precisas de biomasa seca.

Para calcular la biomasa seca de cada componente (hojas y piñas), se utilizó la siguiente fórmula, basada en la relación entre el peso seco y el peso fresco de la muestra:

$$BS_{\text{componente}} = (PS_{\text{muestra}}/PH_{\text{muestra}}) * BH_{\text{componente}}$$

Donde: BS = Biomasa seca del componente (kg);

PS = Peso seco de la muestra (g);

PH = Peso húmedo de la muestra (g);

BH = Biomasa húmeda del componente (kg).

Fuente: Rüginitz et al. 2009, p.59

Los datos obtenidos de peso seco de la muestra vegetal se muestran en el Cuadro 4.3.2.2.3.

Cuadro 4.3.2.2.3. Peso húmedo y seco acumulado en hoja y piña (g) de *Agave potatorum*.

Sitio de muestreo	Predio	Muestra de Hoja		Muestra de Piña		
		Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	°Brix
1	Cozahualta	1,000.00	264.54	1,000.00	417.18	20
2	Tehuizcolotla	1,000.00	295.17	1,000.00	651.01	26
3	Torija	1,000.00	270.58	1,000.00	427.58	22

Fuente: Elaboración propia con datos de laboratorio del Colpos y trabajo de campo.

d) Cálculo de stocks de carbono de biomasa aérea (BA)

Para determinar los stocks de carbono en la biomasa aérea (BA) del *Agave potatorum*, se aplicó una ecuación alométrica genérica basada en datos dimensionales obtenidos durante el estudio de campo. A continuación, se detalla el proceso paso a paso:

Paso 1. Cálculo de biomasa aérea utilizando ecuación alométrica genérica

$$B_{AU} = f(\text{datos dimensionales})$$

Donde: B_{AU} = es la biomasa aérea de una unidad, en kilogramos de materia seca por árbol (kg M.S./árbol);

f (datos dimensionales): es una ecuación alométrica relacionando la biomasa aérea (kg M.S./árbol) a los datos dimensionales medidos en campo.

Paso 2. Cálculo de biomasa aérea por hectárea

$$B_A = (\sum_{AU}/1000) \times (10000/ \text{área de la parcela})$$

Donde: B_A = Biomasa aérea sobre el suelo (t MS/ha);

\sum_{AU} = Sumatoria de la biomasa aérea de todos los árboles de la parcela (kg M.S./área de la parcela);

Factor 1000 = Conversión de las unidades de la muestra de kg MS/t MS

Factor 10000 = Conversión del área (m²) a hectárea

Paso 3. Cálculo del stock de carbono en la biomasa aérea por hectárea

$$\Delta C_{BA} = (B_A * CF)$$

Donde: ΔC_{BA} = Cantidad de carbono en la biomasa aérea (t C/ha, equivalente a t C ha⁻¹ ó Mg C ha⁻¹); B_A = Biomasa aérea (t MS/ha);

CF = Fracción de carbono (t C /t MS). El valor estándar del IPCC para CF = 0,5.

Fuente: Adaptado de ARAM0001 2005, citada por Rüginitz et al. 2009, p. 34.

Se considera aceptable sin diferenciar especies, contenido de carbono en materia seca de un 50.0 %, sugerido por el IPCC, 1994. El contenido de carbono en la materia seca del *Agave potatorum* fue determinado a partir de análisis de laboratorio de Fertilidad de Suelos y Química Ambiental del Colegio de Postgraduados (COLPOS). Se obtuvo un promedio del % de carbono en hojas de 40.5% y en piñas de 40.9%. Estos valores son significativamente inferiores al estándar ampliamente utilizado del 50% recomendado.

El proceso de análisis consistió en la preparación de la muestra vegetal, que fue molida y tamizada por malla 40 (0.5 mm). Posteriormente, las muestras fueron secadas en un horno a una temperatura de 90°C durante dos horas y se realizó el análisis por combustión seca a 900°C utilizando un determinador automático Shimadzu. Los datos obtenidos del % de carbono de la muestra vegetal se muestran en el cuadro 4.3.2.2.4.

Cuadro 4.3.2.2.4. Contenido de C acumulado en hoja y piña (%) de *Agave potatorum*.

Sitio de muestreo	Predio	% de carbono	
		Hoja	Piña
1	Cozahualta	41.21	40.89
2	Tehuizcolotla	41.94	42.03
3	Torija	38.39	39.81

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos del laboratorio COLPOS.

4.3.2.3 Estimación de carbono del suelo

a) Métodos de laboratorio para análisis de carbono del suelo

En el laboratorio del COLPOS, se siguieron los siguientes métodos para el análisis de carbono en las muestras de suelo: las muestras se secaron a temperatura ambiente por dos a tres días, posteriormente se molieron y tamizaron por malla 10 (2 mm), luego por malla 100 (250 micras) y colocaron en horno a 100°C por una hora para completar el secado.

El procedimiento continúa con el análisis de muestras por combustión seca (900° C) con un Determinador automático Shimadzu y se obtuvo el % del carbono total.

Los datos obtenidos del % de carbono de la muestra de suelo son los siguientes:

Cuadro 4.3.2.3.1. Contenido de C acumulado en suelo (%).

Sitio de muestreo	Predio	% de carbono del suelo
1	Cozahualta	4.13
2	Tehuizcolotla	4.31
3	Torija	4.20

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de laboratorio COLPOS.

b) Cálculo del stock de carbono del suelo

Para calcular la cantidad de C acumulado en el suelo de cada sitio de muestreo, se utilizó la siguiente fórmula, basada en Acosta et al. (2002):

$$CC = Pm * DAp * \%C$$

Donde: CC = cantidad de carbono (Mg ha⁻¹);

Pm = profundidad de la muestra (cm);

D_{Ap} = densidad aparente del suelo (g cm⁻³);

C = porcentaje de carbono por cada muestra.

4.3.2.4 Cálculo del carbono del área del proyecto

Para obtener el carbono total del área delimitada por el proyecto, se debe sumar el carbono estimado en cada uno de los estratos y categorías de uso del suelo. En este estudio, se determinó el carbono en dos estratos: la biomasa aérea y el carbono del suelo.

$$\Delta C_{\text{proyecto}} = \sum \Delta C_{\text{estratos}}$$

$\Delta C_{\text{proyecto}}$ = Cantidad de carbono del área proyecto definido (t C)

$\sum \Delta C_{\text{estratos}}$ = sumatoria de la cantidad de carbono de todos los estratos de todas las categorías de uso de la tierra medidas (t C)

Fuente: Rüginitz et al. 2009, p. 49.

4.3.2.5 Cálculo del carbono equivalente (CO₂e)

Como se mencionó previamente, las reducciones de emisiones generadas por los proyectos forestales se cuantifican a través de CRE y se comercializan en los mercados internacionales de carbono. En el contexto de proyectos forestales y de almacenamiento de carbono, las reducciones de emisiones se expresan como CRE's, los cuales representan una tonelada métrica de dióxido de carbono equivalente (CO₂e). El CO₂e se calcula en función del potencial de calentamiento global del carbono almacenado. Una tonelada de carbono corresponde a 3,67 toneladas de CO₂e, basado en la relación de los pesos moleculares 44/12. Para calcular la cantidad de CO₂e almacenado a partir del carbono en un depósito específico, se debe multiplicar la cantidad de carbono por 3,67 (Rüginitz et al. 2009, p. 50).

Para ilustrar el cálculo del CO₂e, se presenta el siguiente modelo, donde se utilizará la información generada en un ejemplo práctico como el Cuadro 4.3.2.5.1.

Cuadro 4.3.2.5.1. Valor de la compensación de carbono almacenado después de 10 años.

Valor de la compensación de carbono después de 10 años (dólar estadounidense transformado a pesos mexicanos)					
Predios	Sumatoria t C/ha	Sumatoria t CO₂/ha	Superficie área de estudio (ha)	Valor de la compensación de carbono/ ha	Valor total por superficie (ha)

Explicación de las columnas:

Sumatoria t C/ha: Suma de toneladas de carbono por hectárea calculadas a partir de la biomasa aérea (fórmulas descritas previamente en las secciones correspondientes).

Sumatoria t CO₂/ha: Suma de toneladas de CO₂ equivalente por hectárea, se obtiene multiplicando Sumatoria t C/ha por 3.67.

Superficie área de estudio (ha): Superficie total de los predios en estudio.

Valor de la compensación de carbono/ha (USD): Valor del precio del carbono por tonelada métrica de CO₂ equivalente, basado en los precios actuales de comercialización en el MVC, se tomará de referencia el precio más bajo de USD 4 por t/CO₂.

Valor total por superficie (ha) (USD): Valor total estimado de la compensación de carbono para la superficie total de los predios, se obtiene multiplicando el valor de la compensación de carbono/ha por la superficie área de estudio (ha).

La combinación de *Agave potatorum* con sistemas agroforestales ofrece una ruta prometedora para la integración de prácticas agrícolas sostenibles con la mitigación del cambio climático. Esto no solo protege y diversifica las actividades productivas locales, sino que también contribuye de manera significativa a los esfuerzos globales de reducción de emisiones de carbono.

5 RESULTADOS

5.1 Analizar la percepción y manejo tradicional del *Agave potatorum* para su aprovechamiento sostenible y captura de carbono.

En La Magdalena Cuaxixtla, los productores muestran preocupación por la reducción del *Agave potatorum*, la cual atribuyen principalmente a la creciente demanda y al manejo inadecuado de esta especie para la producción del mezcal, sumado a pocos esfuerzos institucionales, además del cambio climático que pone en riesgo su reproducción y crecimiento. Esta preocupación se ve reflejada en la necesidad cada vez mayor de viajar distancias mayores para obtener la materia prima, lo que está afectando seriamente su disponibilidad local.

De continuar con prácticas sólo extractivas, la especie estará destinada a desaparecer, como ya está sucediendo en algunas comunidades de la región del Valle de Tehuacán-Cuicatlán (Torres, 2009, p. 63). Además, el cambio climático está impactando negativamente a los agaves de diversas maneras, las variaciones en las temperaturas y los patrones de precipitación están alterando los ciclos de crecimiento y desarrollo de las plantas, lo que reduce tanto la calidad como la cantidad de la materia prima disponible para la producción de mezcal y a su vez, disminución de almacenamiento de carbono. La conservación del *Agave potatorum* no solo es crítico para garantizar la sostenibilidad de la industria del mezcal, sino también para preservar los beneficios económicos, ambientales y culturales que proporciona.

A pesar de estas dificultades, se han implementado diversas iniciativas destinadas a preservar el *Agave potatorum*; esto incluye la adopción de técnicas de producción que varían según las condiciones ambientales y los sistemas de manejo, que van desde prácticas con densidades de plantación baja hasta muy alta (1,000 a 10,000 plantas/ha), uso de fertilizantes químicos en algunos casos y la implementación de prácticas de conservación de suelo y agua, así como sistemas agroforestales y prácticas de reforestación que contribuyen al aumento de los almacenes de carbono en los ecosistemas locales, etc.

Estas modificaciones afectan el tiempo requerido para que el agave madure y esté listo para la cosecha, que en promedio tarda 10 años. Además, los productores han avanzado en la certificación de predios y la fábrica ante el CRM, lo que les permite acceder a mercados formales.

En las prácticas de manejo biocultural de los sistemas de producción de *Agave potatorum*; ya se tienen organizados algunos procesos en torno a la producción sostenible del mezcal, esto incluye áreas específicas para la producción de semilla y predios custodiados por los productores, donde se recolecta el mejor material genético. Este material es llevado a viveros rústicos donde se cuida el desarrollo inicial de las plantas hasta antes de su trasplante al campo, en promedio de 1 a 2 años de edad para mayor sobrevivencia. La protección de los hábitats naturales del agave y la mejora de la diversidad genética son aspectos clave.

Una vez que la planta está lista, la reforestación se lleva a cabo en la temporada de lluvias y es distribuido en los predios de La joya, Tehuizcolotla, Las golondrinas de la localidad de La Magdalena Cuaxixtla (predios certificados por el CRM); predio de Cozahuatla de la localidad del mismo nombre y demás sitios ubicados en localidades vecinas; Concepción Cuautla, San Buenaventura Tetlananca y Santiagotzingo del municipio de Tecali de Herrera, Puebla. Las plantaciones son de edades varias (1,2, 3, 4 hasta 10 años) y en algunos predios están establecidos en sistemas agroforestales con especies nativas como el mezquite (*Prosopis laevigata*), que se usa en la leña para cocer las piñas de agave.

Los predios seleccionados para sitios de muestreo (Tehuizcolotla y Cozahuatla), tienen densidades altas de 10,000 plantas por hectárea, con sólo labores de barbecho ligero para establecer la plantación y esperar hasta edad de cosecha. Últimamente se ha implementado el monitoreo de azúcares en el agave (*grados brix*).

Otro sitio seleccionado es el predio de Torija del municipio de Cuautinchán por presentar manejo diferenciado; una densidad baja de 1,000 plantas por hectárea, terrazas de formación sucesiva, uso de fertilización química (triple 17) para el crecimiento de la planta y labores de capado de qurote, alcanzando las características aprovechables al 7mo año.

Aunque los esfuerzos actuales muestran avances significativos en la conservación de la biodiversidad y las CNP proporcionados por el *Agave potatorum*, es crucial seguir fortaleciendo estas iniciativas para asegurar su sostenibilidad a largo plazo.

5.2 Estimar el carbono almacenado en la biomasa aérea y suelo de los sistemas de producción de *Agave potatorum*.

Las acciones implementadas en las comunidades de estudio, han generado diversas mejoras, incrementando significativamente los almacenes de carbono. Estos beneficios potenciales pueden promoverse en el mediano plazo mediante una gestión adecuada, iniciando con la cuantificación de estos almacenamientos en los sistemas de producción a *Agave potatorum*.

5.2.1 Estimación de biomasa aérea y contenido de carbono en *Agave potatorum*

a) Modelo predictivo o ecuación alométrica de biomasa

Se desarrollaron dos modelos predictivos (ecuaciones alométricas) para la biomasa verde del *Agave potatorum*: uno para el peso fresco de la piña y otro para el peso fresco de la hoja, ambos aplicables a agaves con características físicas similares y una edad de cosecha aproximada de 10 años.

El mejor modelo para el peso de piña, se calculó mediante una regresión simple, utilizando el peso de la piña como variable dependiente y el volumen de la planta como variable independiente, con un coeficiente de correlación alto de $r = 0.8689$ y un coeficiente de determinación $r^2 = 0.8712$.

$$Y_p = 0.6811447615 + 0.0000094474 (X) \quad \text{Donde:}$$

Y_p = peso fresco de la piña (kg), X = volumen (cm^3) \rightarrow volumen = $\pi \times r^2 \times \text{altura}(h)$

Para el modelo peso de la hoja (como variable dependiente) y volumen de la planta (variable independiente), también presentó un valor alto con un coeficiente de correlación alto de $r = 0.8577$ y un coeficiente de determinación $r^2 = 0.8601$.

$$Y_h = 1.9317543909 + 0.0000120591 (X) \quad \text{Donde:}$$

Y_h = peso fresco de la hoja (kg), X = volumen (cm^3) \rightarrow volumen = $\pi \times r^2 \times \text{altura}(h)$

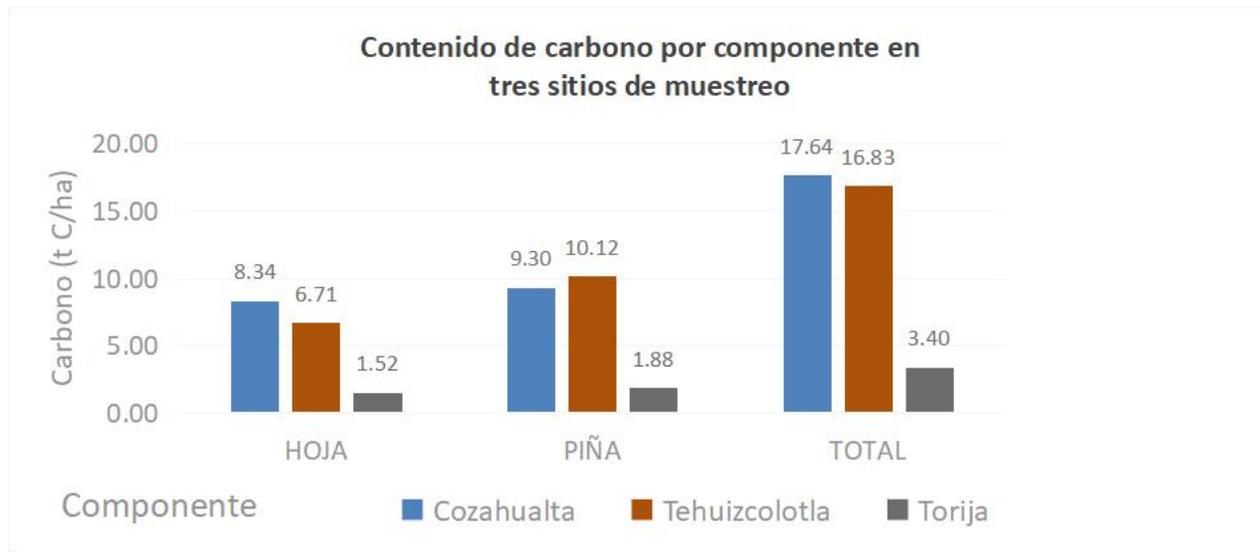
Estas ecuaciones permiten estimar la biomasa fresca de manera indirecta, utilizando variables de fácil medición como la altura de la planta y el diámetro de la cobertura del agave. Esta resulta útil y confiable para predecir el peso fresco de la piña y la hoja en función del volumen de la planta.

b) Cálculo de stocks de carbono de biomasa aérea (BA)

Durante las mediciones en los *Agaves potatorum* con características aptas para la producción de mezcal, se observaron rangos de variación en altura de las plantas de 41 a 65 cm, diámetro promedio de la cobertura de 52 a 82 cm, peso de la piña de 5 a 21 kg y peso de la hoja de 6 a 26 kg, lo que representa una biomasa fresca total por planta que oscila entre 8 y 45 kg. Notablemente, el predio de Torija mostró el mayor peso fresco de biomasa, con valores que van desde 13 hasta 45 kg por planta, duplicando la biomasa fresca en comparación con los otros dos predios muestreados (8 a 24 kg por planta).

El contenido de carbono de la biomasa aérea de los sitios muestreados varió significativamente, siendo más alto en Coahuatla con 17.64 (t C/ha), seguido por Tehuizcolotla con 16.83 (t C/ha), y Torija con 3.40 (t C/ha), en la Figura 5.2.1.1 se presenta el contenido de carbono de la biomasa aérea para cada uno de los sitios de muestreo.

Figura 5.2.1.1 Contenido de carbono de biomasa aérea (BA).



Fuente: Elaboración propia.

Esta variación refleja la influencia de la densidad de plantación, aunque el cálculo por planta muestra una cantidad mayor en Torija (8.68 kg de M.s./planta), comparado con Coahuatla (4.30 kg de M.s./planta) y Tehuizcolotla (4.10 kg de M.s./planta).

Si Torija tuviera una densidad de plantación de poco más de la mitad que Coahuatla y Tehuizcolotla (10,000 plantas/ha), el carbono almacenado sería aproximadamente 20.40 t C/ha, por lo que se puede interpretar que la incidencia de prácticas de conservación de suelo, gestión del agua, y nutrición del agave, influyen en la producción de biomasa, lo que representa más materia prima para los productores en la elaboración de mezcal, reduciendo inclusive de 10 años de cosecha a 7 años y este es proporcional al carbono de la biomasa aérea y del suelo.

Es esencial enfatizar que se deben implementar prácticas amigables con el medio ambiente y proporcionar los nutrientes necesarios para el cultivo, como abonos orgánicos para maximizar los beneficios económicos, sociales y ambientales para las comunidades rurales.

5.2.2 Estimación de carbono del suelo

a) Cálculo de stocks de carbono del suelo

El suelo es la principal fuente de carbono en los predios muestreados, desempeñando una función esencial en el reciclaje y almacenamiento de carbono a través de procesos como la desnitrificación y la descomposición de materia orgánica. Gracias a su alta capacidad para secuestrar carbono, puede retenerlo durante largos períodos de tiempo (Melillo, et al., 1996 citado por Acosta, 2009). Las muestras analizadas en laboratorio, tomadas a profundidades de 0 a 20 cm, mostraron un contenido promedio de carbono (C) del 4.20%. Al realizar la estimación del contenido de C, se obtuvo mayor cantidad en el predio de Torija, que también destacó por almacenar la mayor cantidad de carbono en la biomasa aérea por planta. La Figura 5.2.2.1 ilustra el contenido de carbono del suelo para cada uno de los sitios de muestreo.

Figura 5.2.2.1 Contenido de carbono de carbono del suelo.



Fuente: Elaboración propia.

5.2.3 Cálculo del carbono del área del proyecto

Con respecto al carbono acumulado de los 3 sitios muestreados, se expone en el cuadro 5.2.3.1 los resultados. El predio de Coahuatla mostró la mayor cantidad de carbono en la biomasa aérea con 17.64 t C/ha, seguido por Tehuizcolotla con 16.83 t C/ha. Torija presentó el menor contenido de carbono en la biomasa aérea con 3.40 t C/ha, esto influenciado por la densidad de plantas por hectárea. Sin embargo, al calcular por planta, Torija alcanzó un promedio de 20.4 t C/ha (si tuviese 6,000 plantas/ha, otra densidad promedio que se maneja en el lugar de estudio), indicando un alto contenido por planta a pesar de la baja densidad. En cuanto al contenido de carbono en el suelo, Torija también registró el valor más alto con 82.32 t C/ha, seguido por Coahuatla con 75.44 t C/ha y Tehuizcolotla con 61.28 t C/ha.

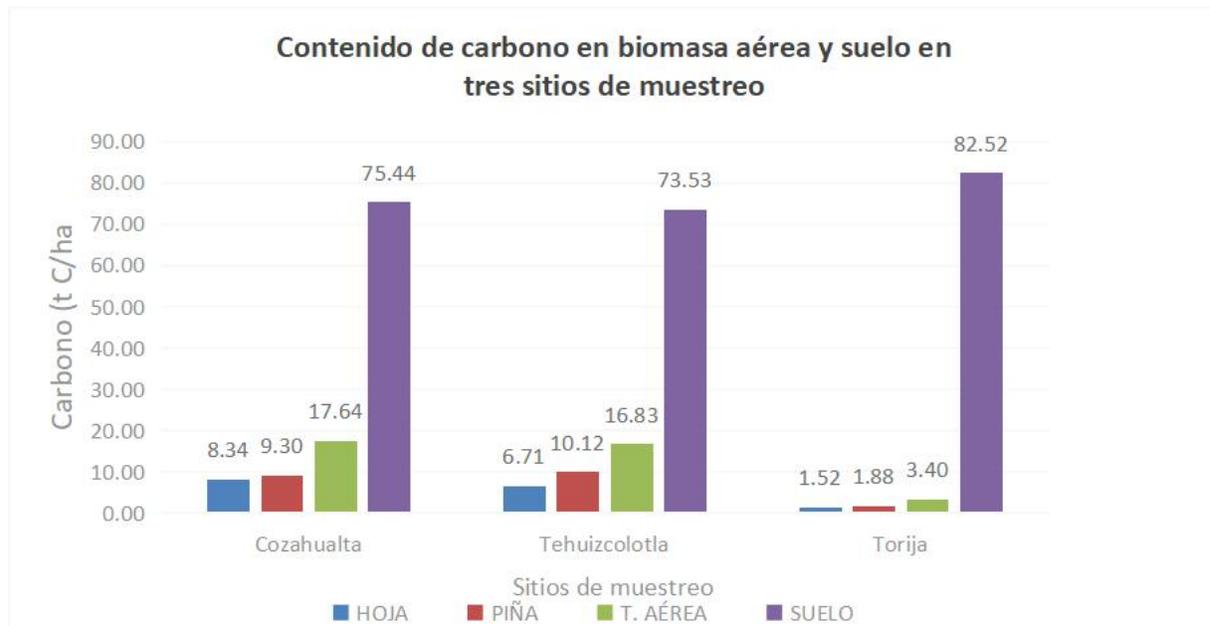
Cuadro 5.2.3.1. Resultados del contenido de carbono por cada sitio muestreado.

Predio	Superficie (ha)	Biomasa aérea BA (t C/ha)			Carbono del suelo (t C/ha)
		Hoja	Piña	Total aérea	
Coahuatla	7.50	8.34	9.30	17.64	75.44
Tehuizcolotla	44.00	6.71	10.12	16.83	73.53
Torija	11.50	1.52	1.88	3.40	82.32
	63.00				911.92

Fuente: Elaboración propia.

El carbono total no representa la suma de carbono de biomasa aérea (BA) y el carbono del suelo, ya que también incluye carbono de biomasa subterránea (BS), materia orgánica muerta (MOM) y mantillo. Para el propósito de esta tesis y dadas las limitaciones de recursos, se estimaron únicamente los primeros stocks (BA y suelo). De manera gráfica, se presenta a continuación Figura 5.2.3.1 el contenido de carbono en biomasa aérea y suelo en los tres sitios de muestreo.

Figura 5.2.3.1 Carbono presente en la biomasa aérea y suelo.



Fuente: Elaboración propia.

5.2.4 Cálculo del carbono equivalente (CO₂e)

Un proyecto que almacene (o secuestre) 13 t C/ha en promedio, podrá negociar en el mercado el equivalente a 46 CRE's por hectárea por año (46 t CO₂e/ha/año). Los resultados obtenidos se muestran en un ejemplo del valor de los CRE's en el Cuadro 5.2.4.1 y Cuadro 5.2.4.2.

La captura de carbono basado en agaves en el mercado voluntario de carbono, puede recibir pagos por créditos de carbono durante un período que puede extenderse de entre 20 y 30 años con verificaciones periódicas cada 5 años, que aseguran que el carbono sigue siendo capturado de manera efectiva. No obstante, este tiempo puede variar dependiendo de las condiciones del proyecto, las reglas de la certificadora que verifica el carbono capturado, y los acuerdos con los compradores de los créditos de carbono (Gold Standard, 2020; Verra, 2019).

Datos del secuestro de carbono en la Biomasa aérea BA de *Agave potatorum* en tres sitios de muestreo.

Cuadro 5.2.4.1. Carbono almacenado en *Agave potatorum* por cada sitio muestreado.

Predio	Superficie (ha)	Biomasa aérea BA (t C/ha)			
		Hoja	Piña	Total aérea	Total BA / superficie
Coahuatla	7.50	8.34	9.30	17.64	132.3
Tehuizcolotla	44.00	6.71	10.12	16.83	740.52
Torija	11.50	1.52	1.88	3.40	39.1
63.00					911.92

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 5.2.4.2 Valor de la compensación de carbono almacenado después de 10 años.

Valor de la compensación de carbono después de 10 años					
Predio	Sumatoria t C/ha	Sumatoria t CO ₂ /ha	Superficie área de estudio (ha)	Valor de la compensación de carbono/ ha	Valor total por superficie (ha)
Coahuatla	17.64	64.74	7.50	\$5,179.10	\$38,843.28
Tehuizcolotla	16.83	61.77	44.00	\$4,941.29	\$217,416.67
Torija	3.40	12.48	11.50	\$998.24	\$11,479.76
63.00					\$267,739.71

Fuente: Elaboración propia

Los ingresos por créditos de carbono serían aproximadamente de \$267,739.71 para la superficie total del proyecto de 63 hectáreas, con precios actuales de comercialización en el MVC, tomando como referencia el precio más bajo de 4 USD por t/CO₂ y ser conservadores, esto después de 10 años de crecimiento del *Agave potatorum* y nulas prácticas de manejo en los predios de Cozahuatla y Tehuizcolotla. Además, si consideramos una simulación en el predio de Torija con densidades de 6,000 plantas/ha (algo similar a densidades de nuevos predios que se vienen estableciendo), se obtendría lo siguiente:

Cuadro 5.2.4.3. Valor de la compensación de carbono almacenado después de 10 años de *Agave potatorum* en Torija, Cuautinchán con una densidad de 6 mil plantas/ha.

Valor de la compensación de carbono después de 10 años					
Predio	Sumatoria t C/ha	Sumatoria t CO₂/ha	Superficie área de estudio (ha)	Valor de la compensación de carbono/ ha	Valor total por superficie (ha)
Torija	20.40	74.87	11.5	\$5,989.44	\$68,878.56
					\$68,878.56

Fuente: Elaboración propia

Ahora los ingresos de créditos de carbono serían de \$68,878.56 por la superficie del predio de Torija de 11.5 ha y para todo el proyecto de 63 ha un total de \$336,618.27, esto con el precio más bajo en el mercado (4 USD). De acuerdo a SEMARNAT-INECC-GGGI (2024), el precio promedio por crédito en México fluctúa entre los 8.21 USD y 9.53 USD, lo que incrementaría más del doble el valor total. Una cantidad considerable a tomar en cuenta y que beneficiaría significativamente a la comunidad.

Si se considera la posibilidad de desarrollar un proyecto de carbono mediante sistemas agroforestales, como se menciona en la metodología estándar. Este cuadro proporcionará una visión clara del potencial económico de la compensación de carbono almacenado en *Agave potatorum*, facilitando la evaluación de su viabilidad para proyectos de desarrollo sostenible y la generación de ingresos.

Estos datos corresponden únicamente al stock de biomasa aérea del *Agave potatorum* (sin considerar los del suelo), lo que muestra gran potencial. Los sistemas de producción manejados eficientemente han mostrado rendimientos superiores de biomasa, lo que no solo beneficia la producción de mezcal, sino que también incrementa el almacenamiento de carbono.

Los resultados obtenidos destacan la relevancia de implementar un manejo sostenible del *Agave potatorum* para garantizar su disponibilidad a largo plazo, ya que los productores han identificado una disminución en su disponibilidad debido a la sobreexplotación por la alta demanda y las condiciones ambientales adversas. A través de la observación participante, se identificaron diversas *prácticas bioculturales* que fortalecen a las *CNP*, como la reforestación, los sistemas agroforestales con especies nativas, la conservación de suelos y agua mediante zanjas bordo, así como el monitoreo de la calidad de los agaves a través de la medición de azúcares entre otras. Estas estrategias no solo contribuyen a la regeneración de la especie, sino que también favorecen la estabilidad ecológica del ecosistema, asegurando un equilibrio entre el aprovechamiento del recurso y su conservación. Por lo tanto, el fortalecimiento de estas prácticas resulta clave para la sostenibilidad de la producción de mezcal y la preservación del *Agave Potatorum* en la región.

El análisis anterior da respuesta a la pregunta de investigación enunciada y objetivos planteados.

5.3 Discusión de Resultados

En comparación con los resultados del trabajo realizado, estudios previos han evaluado almacenes de carbono en ecosistemas áridos y semiáridos de México. Por ejemplo, Montaña et al. (2016) reportan que el carbono almacenado en la fitomasa total de estos ecosistemas fluctúa entre 2.3 a 19.5 (t C/ha), con un rango específico de 1.6 a 15.4 (t C/ha) para la biomasa aérea (p. 45). Específicamente el matorral Tehuacán-Cuicatlán, Tehuacanense, ubicado cerca del área de estudio, se registra un almacenamiento en sistemas naturales de 27.6 (t C/ha) (p. 46).

Por otro lado, Becerril et al., (2014), reportan valores de almacenamiento de carbono en ecosistema semiárido (vegetación dominante de matorral xerófilo, algunas zonas de bosque de coníferas y grandes extensiones de suelo de uso agrícola), que van desde 2.4 (t C/ha), 12.6 (t C/ha) y 21.20 (t C/ha), respectivamente, un promedio de 11 (t C/ha) (p. 13).

Además, Masera et al. (2001) mencionan que en bosques semiáridos se puede encontrar hasta 19 (t C/ha) de carbono, mientras que en pastizales y áreas agrícolas los valores oscilan entre 9 y 16 (t C/ha) (p. 302).

En nuestro estudio, el valor promedio estimado de almacenamiento de carbono en *Agave potatorum* es de 13.0 t C/ha (17.64 t C/ha en Coahuatla, 16.83 t C/ha en Tehuizcolotla) bajo condiciones similares, y 3.40 t C/ha en Torija (con potencial de más de 20.40 t C/ha si se incrementa la densidad de plantas), cifras muy cercanas a los valores promedio reportados por Montañó, Becerril y Masera.

El almacenamiento de carbono orgánico en el suelo (COS) en los matorrales áridos y semiáridos varía entre 2.1 y 72 (t C/ha), mientras que el C inorgánico del suelo (CIS) fluctúa entre 1.95 a 17.9 (t C/ha). En promedio, el COS en los matorrales de las regiones semiáridas Hidalguense y Tehuacanense es de 27.6 (t C/ha) (mín. de 11.9, máx. de 72 t C/ha); la estimación del CIS en el Valle de Tehuacán-Cuicatlán es de entre 12 a 14 t C/ha, en los primeros 20 cm (Montañó et al. 2016, p. 46).

Continuando con Masera et al. (2001), los valores reportados del suelo en bosques semiáridos son de 60 (t C/ha), pastizales y agricultura de 81 (t C/ha) (p. 302).

En el lugar de estudio, el valor promedio estimado de almacenamiento de carbono en suelo es de 73.01 (t C/ha), (82.32 t C/ha en Torija, 75.44 t C/ha en Coahuatla y 61.28 t C/ha en Tehuizcolotla), dentro de los rangos reportados por Montañó y Masera.

Las investigaciones en diferentes regiones áridas y semiáridas de México, indican que el cambio de uso de suelo y la pérdida de biodiversidad tienen un efecto negativo significativo sobre el almacén de carbono en los suelos, con reducciones que pueden alcanzar desde 30 a 94% (Montaño et al., 2016, p. 48).

Por ejemplo, en el Valle de Tehuacán-Cuicatlán, la transformación de bosques naturales a agricultura de maíz-frijol ha disminuido el COS y CIS en un 76%, pasando de 14.3 a 5.6 t C/ha (39%), aunque los sistemas agroforestales pueden mantener valores cercanos a los de la vegetación conservada, con 9.4 t C/ha de COS (Montaño et al., 2016, p. 49).

Algunos estudios sugieren que la transformación del matorral a cultivos no necesariamente disminuye el contenido de COS; en algunos casos, incluso puede incrementarlo. Esto podría estar relacionado con la fertilización de las parcelas, que favorece la producción de vegetación y, en consecuencia, aumenta la incorporación de carbono orgánico al suelo (Montaño et al. 2016, p. 50).

Por otro lado, Zúñiga, et al. (2018), documentan en su estudio del ciclo completo de *Agave tequiliana*, que el manejo del cultivo, incluyendo tratamientos de nutrición, resulta en una mayor producción de biomasa y una reducción en el tiempo de maduración fisiológica, manteniendo los niveles óptimos de azúcares en las piñas para la producción de bebidas (p. 553), resultados que son similares a los observados en el sitio de muestreo de Torija.

5.4 Propuesta de alternativas de manejo y aprovechamiento sostenible de *Agave potatorum*, que a su vez influyen en la acumulación de carbono en comunidades del municipio de Tecali de Herrera, Puebla.

Durante el desarrollo de la investigación, se lograron identificar diversas recomendaciones para el manejo sostenible de *Agave potatorum* a partir de los resultados del trabajo de campo y la revisión de fuentes documentales confiables y actualizadas.

Esta propuesta se adaptó del proyecto "Conservación in situ y manejo campesino de magueyes mezcaleros" (Illsey et al., 2005), complementado con el conocimiento de los productores de La Magdalena Cuaxixtla.

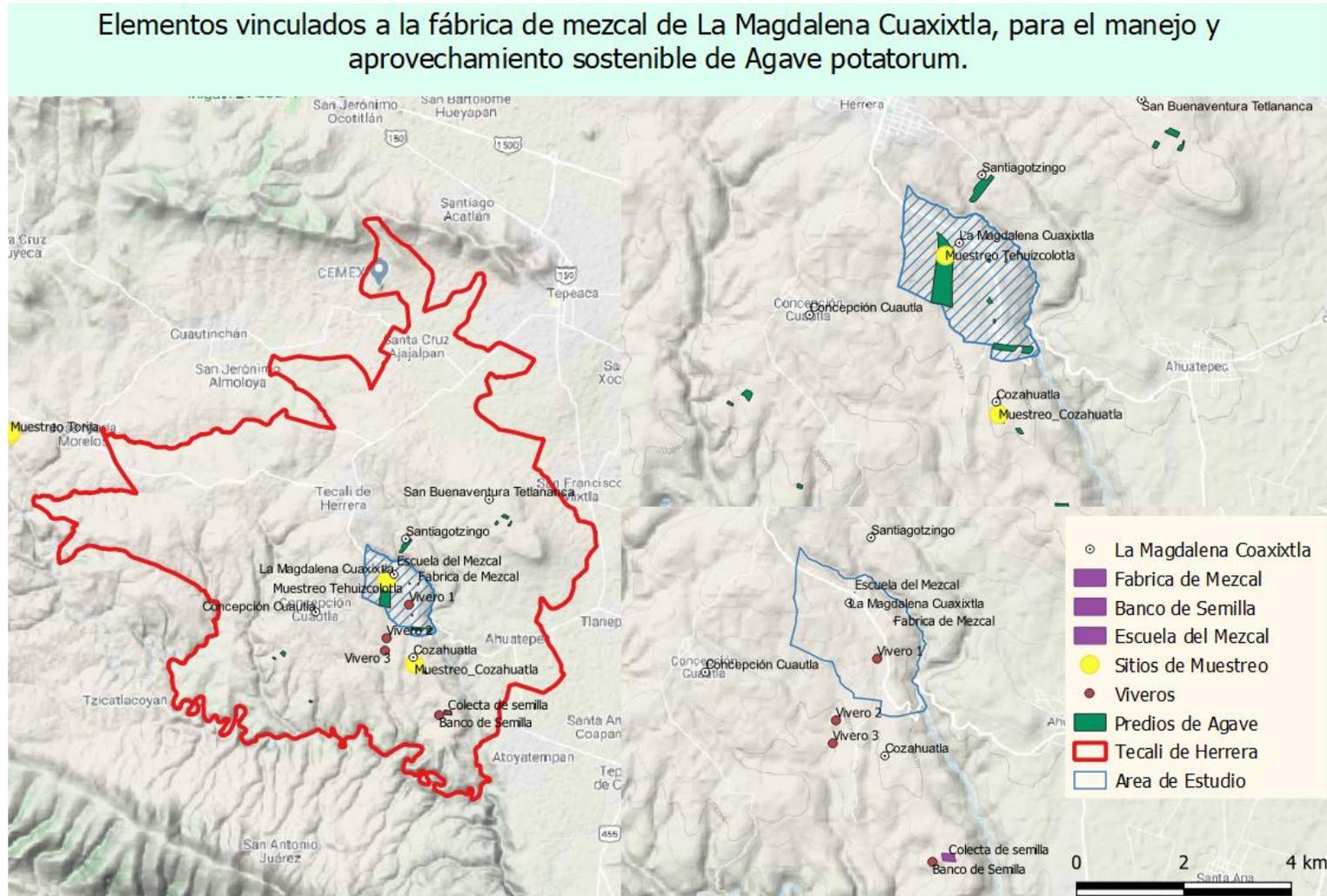
1. Planeación del territorio

El agave es un recurso eje para ordenar el uso del territorio. En La Magdalena Cuaxixtla se han identificado varios factores importantes que deben sistematizarse para conocer el estado de los agaves y demás recursos, con el fin de planificar a futuro. La delimitación del polígono de la localidad se realizó inicialmente con el grupo de productores y posteriormente se corroboró en los recorridos de campo.

En un mapa se ubicaron varios componentes vinculados a la fábrica de mezcal en La Magdalena Cuaxixtla (ver Figura 5.4.1), que se extiende a localidades aledañas y a otros municipios debido a la insuficiencia de materia prima de agave. Las localidades consideradas son: La Magdalena Cuaxixtla (44 ha), Cozahuatla (7.50 ha), Concepción Cuautla (3.30 ha), San Buenaventura Tetlananca (4.20 ha) y Santiagotzingo (7.50 ha) del municipio de Tecali de Herrera, así como otros municipios como Cuantinchán (Torija con 11.5 ha), Huatlatlauca, Tzicatlacoyan y Tlanepantla, con un total de 78 ha. Se definieron tres sitios de muestreo: Cozahuatla, La Magdalena Cuaxixtla (predio Tehuizcolotla) y Torija.

Se propone el uso de sistemas de información geográfica (SIG) para monitorear la distribución del agave en el territorio, asegurando que las áreas no se sobre-exploten y permitiendo una planificación precisa para la rotación de cultivos.

Figura 5.4.1 Elementos vinculados a la fábrica de mezcal de La Magdalena Cuaxixtla para el manejo y aprovechamiento sostenible de *Agave potatorum*.



Fuente: Elaboración propia con información proporcionada por los productores y trabajo de campo.

Otros componentes incluyen dos viveros para la producción de plántulas en La Magdalena Cuaxixtla, cerca de fuentes de agua para su manejo, y un banco de semillas en Coahuatla. Recientemente, se estableció en La Magdalena Cuaxixtla una escuela del mezcal para capacitar a los productores de la región.

La Magdalena Cuaxixtla cuenta con un área aproximada de 473 ha, distribuidas en tierras de uso agrícola (50%) y pastizal inducido (50%). La zona poblada está determinada alrededor de 54 ha y las áreas de *Agave potatorum* se estiman en 44 ha, con densidades de 10,000 plantas/ha; lo que representa un inventario de 440,000 plantas de diferentes edades, aproximadamente un 70% en edad de cosecha (10 años) y un 30% con renuevo (2 a 3 años de su establecimiento). También se identificaron áreas disponibles para ampliar las plantaciones de agave.

Para satisfacer las necesidades de producción anual de la fábrica de mezcal (5,000 litros), se requieren aproximadamente 15,000 agaves (83 ton). Si se realiza un aprovechamiento planificado, las 44 ha serían suficientes. Se propone dividir los predios en 10 unidades (de 4 ha cada una) y rotar la extracción, asegurándose de que no se vuelva a cortar en la misma área durante diez años para permitir la regeneración del agave. Una vez completado el ciclo, se regresa al primer sitio.

Las leyes mexicanas exigen un plan de manejo para extraer agave silvestre, pero no para plantaciones o cultivares. La Norma Oficial Mexicana NOM-005-RECNAT-1997 recomienda dejar sin aprovechar al menos un 20% de los agaves maduros para la reproducción (SEMARNAT, 1997), aunque otras fuentes sugieren hasta un 30% (Baraza et al., 2008).

Los predios de 4 ha se podrían aprovechar con 28,000 plantas (considerando una densidad manejada de 10 mil/plantas/ha y dejando un 30% sin aprovechar). También es posible ampliar la superficie de producción de agave en áreas potenciales disponibles en la localidad y alrededores.

Esto responde, a que, los polinizadores (murciélagos), no son atraídos por la escasa vegetación y floración, pues prefieren aquellas áreas con mayores densidades florales para forrajeo, afectando la reproducción de los agaves e inclusive las demás plantas que dependan de los mismos polinizadores (Baraza et al., 2008, p. 7).

2. Dejar semilleros suficientes

Se tiene un área natural destinada como banco de material genético (semilla) para la reproducción de agave, a unos 6 km de la localidad de La Magdalena Cuaxixtla. Para el ciclo 2019, se observó una baja polinización (semillas vanas); cada cápsula contiene entre 400 y 600 semillas, de las cuales en promedio 200 son vanas (A. Cruz, comunicación personal, 16 de marzo de 2020). Se sugiere ampliar los bancos de germoplasma con los demás predios establecidos, dejando plantas productoras de semilla para recuperar rápidamente la población de agave y conservar la diversidad genética y adaptaciones locales.

3. Recolectar la semilla, una vez que está madura y seca

Las semillas se recolectan entre noviembre y febrero, cuando el fruto está amarillo y antes de que se abra. La selección se realiza de abajo hacia arriba en la inflorescencia. Cada individuo en edad reproductiva puede producir alrededor de 1,000 a 2,000 semillas. Para darse una idea del establecimiento del agave, de un litro de semilla recolectado contiene aproximadamente 10 mil semillas (densidad de planta con la que se reforesta una hectárea (ha) en el área de estudio), se extrae de un mínimo de 5 a 10 agaves maduros (A. Cruz, comunicación personal, marzo 16 de 2020).

4. Producir planta en vivero

Para la producción de plántula de agave se tienen 2 viveros rústicos cerca de fuentes de agua (manantial) y un tercero en proceso de construcción para el área de estudio. La germinación de semillas se realiza hidratándolas durante 24 horas, con buenos resultados al dejar en remojo de 2 a 4 días (S. Vélez, comunicación personal, 16 de marzo de 2020).

El sustrato se compone de 50% composta, 40% peat moss y 10% perlita o vermiculita, o materiales regionales disponibles (arena, tepexil, tezontle, tepojal o cacahuatillo).

La siembra inicia en agosto y se realiza en almácigos (semilleros) con densidades de 15 a 20 cm. Las plántulas se trasplantan cuando alcanzan 4 a 8 hojas (de 1 a 2 años) y se les poda la raíz antes de trasladarlas al campo. El riego se realiza tres a cuatro veces por semana, reduciendo a cada 8-15 días conforme crecen (S. Vélez, comunicación personal, 16 de marzo de 2020).

La nutrición de las plantas se inicia desde que germina con aplicaciones de fertilizante orgánico basado en *Trichoderma* (hongos benéficos), una a dos veces por semana, utilizando también lixiviado de lombriz como biofertilizante (S. Vélez, comunicación personal, 16 de marzo de 2020).

Para el control de plagas y enfermedades, se recomienda el uso de prácticas de manejo integrado de plagas (MIP) que incluyan monitoreos regulares, uso de biopesticidas y prácticas culturales como la rotación de cultivos para evitar la proliferación de plagas específicas del agave.

5. Reforestar con agaves.

Los agaves se plantan al inicio de la temporada de lluvias (junio a octubre) con una densidad de 10,000 plantas/ha. Es importante monitorear el desarrollo de las plantas y realizar resiembras si es necesario (información recabada de muestreo de trabajo de campo y comunicación personal con productores, 16 de marzo de 2020).

6. Sistemas agroforestales

Se recomienda la siembra en sistemas agroforestales, combinando agaves con árboles en curvas a nivel para conservar el suelo mientras se produce agave y leña para el proceso de mezcal. Para 1,750 litros de mezcal en 2019 se usaron 50 ton de leña y 25 ton de agave. A plena capacidad, se requerirán 166 ton de leña y 83 ton de agave (A. Cruz, comunicación personal, 2 de junio de 2020).

Se propone el manejo de especies nativas como mezquite (*Prosopis laevigata*) y huizache (*Acacia farnesiana*), que fertilizan los suelos y pueden contribuir a la conservación del suelo y captura de CO₂.

7. Prácticas de conservación de suelo y agua

Estas prácticas contribuyen al fortalecimiento de la biodiversidad, reducen la pérdida de nutrientes y aumentan la capacidad de retención de agua (CONAFOR, 2023). Las técnicas incluyen las siguientes: zanjas trincheras, sistema de zanja-bordo, bordos en curvas a nivel, roturación, barreras de piedra en curvas a nivel, acomodo de material vegetal muerto, barreras vivas, terrazas y presas de diferentes tipos para la protección y restauración de suelos.

8. Estudios y estimaciones en sitios de muestreo

Los estudios para estimar cuántos agaves hay en cada comunidad, es decir los inventarios, están sirviendo para avanzar tanto en los tramites de certificación con el CRM (consiste en el registro de agave cultivado o silvestre, con la georeferenciación que constata la ubicación de los predios dentro de la zona geográfica con la DOM), como para estimar el potencial de los diferentes almacenamientos de carbono. Para especies arbóreas, se pueden usar ecuaciones alométricas existentes, mientras que para agave se generaron datos a través de los sitios de muestreo.

9. El agua; calidad para el mezcal

El agua es un ingrediente importante para la calidad del mezcal. Es importante conocer y proteger las áreas de recarga de las fuentes de agua, que no siempre están cerca de los manantiales, sino en partes altas del terreno.

10. Extraer sólo agaves maduros, sean velilla o capones. No sacar agaves tiernos.

Extraer agave tierno afecta su sabor y su rendimiento del mezcal y puede agotar la población de agave. Es fundamental extraer sólo agaves maduros (velilla o capones) para asegurar la calidad del mezcal.

11. Monitoreo

Para el monitoreo de la acumulación de carbono, se emplearán ecuaciones alométricas que permiten estimar la biomasa de agave y, por lo tanto, la captura de carbono. Además, el monitoreo de la concentración de azúcares (grados brix) con un refractómetro ayuda a evitar la extracción de agave tierno, optimizando el rendimiento del mezcal. Se necesitan 10 kg de piña para producir un litro de mezcal, y hasta 20-25 kg si la madurez es insuficiente (A. Cruz, D. Cruz, A. Vélez, S. Vélez & L. Meza, comunicación personal, 16 de marzo de 2020).

12. Establecimiento de redes y cooperación

Ampliar la red de colaboración entre los productores, maestros mezcaleros y demás actores, permitiendo no sólo la defensa de una DOM, sino la recuperación biocultural del territorio. La escuela del mezcal es un gran eslabón para seguir consolidando la actividad. El fortalecimiento de la educación y la colaboración entre actores locales son esenciales para maximizar los beneficios y asegurar la sostenibilidad del *Agave potatorum*.

5.5 Introducción de los sistemas de producción de *Agave potatorum* a los mercados de carbono.

Los mercados de carbono representan una oportunidad emergente para los productores de *Agave potatorum*, ofreciendo una fuente adicional de ingresos a través de la venta de créditos de carbono generados por prácticas sostenibles que capturan dióxido de carbono (CO₂). Los hallazgos de esta investigación destacan varias prácticas de manejo sostenible del agave que tienen un impacto positivo en la acumulación de carbono. Estas prácticas incluyen la planificación del territorio, la reforestación con agave, la implementación de sistemas agroforestales y la conservación del suelo y agua. A continuación, se detallan cómo estos resultados pueden ser utilizados para participar en los mercados de carbono:

Planeación del territorio y gestión sostenible: la planificación territorial identificó áreas específicas para la plantación y manejo de agave, optimizando su crecimiento y contribuyendo a la captura de carbono. La delimitación de áreas para cultivo y las prácticas de rotación aseguran un aprovechamiento sostenible y continuo, lo que es clave para cumplir con los requisitos de los mercados de carbono.

Producción y reforestación con agaves: los resultados sugieren que la reforestación con agaves y la producción en viveros son prácticas efectivas para aumentar la cobertura vegetal y la captura de CO₂ (Baraza et al., 2008). Estas prácticas pueden ser documentadas y certificadas para la generación de créditos de carbono, demostrando cómo las actividades relacionadas con agave contribuyen a la reducción de emisiones.

Sistemas agroforestales: la integración de agave en sistemas agroforestales con árboles nativos no solo mejora la conservación del suelo, sino que también potencia la captura de carbono. Esta estrategia puede ser destacada en los proyectos de carbono como una práctica innovadora que contribuye significativamente al balance de carbono.

Conservación de suelo y agua: las técnicas de conservación de suelo y agua mejoran la biodiversidad y la salud del ecosistema, lo que se traduce en una mayor capacidad de secuestro de carbono. La implementación y monitoreo de estas prácticas son aspectos esenciales para cumplir con los estándares de los mercados de carbono.

Establecimiento de redes y cooperación: promover la colaboración y creación de redes entre los productores e instituciones para maximizar los beneficios de los proyectos de carbono. Entre productores compartir recursos y conocimientos de cómo sus prácticas sostenibles pueden traducirse en créditos de carbono y cómo esto puede generar ingresos adicionales. Buscar apoyo de entidades gubernamentales y organizaciones no gubernamentales que puedan proporcionar financiamiento o incentivos para la participación en proyectos de carbono.

6 CONCLUSIONES

Los resultados de esta investigación revelan que el *Agave potatorum* tiene un potencial significativo para el almacenamiento de carbono, tanto en la biomasa aérea como en el suelo. Este hallazgo está en línea con los objetivos de estimar la cantidad de carbono almacenado en estas áreas y resalta el potencial del *Agave potatorum* para la CNP. La alta tasa de crecimiento del *Agave potatorum* y su capacidad para adaptarse a condiciones áridas (Smith et al., 2021) subrayan su rol crucial en la mitigación del cambio climático y en el desarrollo sostenible de comunidades mezcaleras de Tecali de Herrera, Puebla.

En cuanto a la percepción de los productores y maestros mezcaleros de La Magdalena Cuaxixtla, evidencia una preocupación creciente por la disminución de la disponibilidad de agave. Esta percepción coincide con estudios recientes en la región que confirman la escasez del recurso (González & Martínez, 2023). Las prácticas bioculturales de manejo del agave, brindan información valiosa para formular estrategias de manejo sostenible, que deberían incluir incentivos y subsidios, así como mecanismos de mercado que recompensen a los productores por su contribución a la preservación ecológica y la productividad económica (Pérez et al., 2022).

El análisis de los sistemas de producción en Tecali de Herrera, indica que las áreas con manejo, como el predio de Torija que emplea prácticas de fertilización y conservación de suelos y agua, muestran una mayor producción de biomasa y un incremento en el contenido de carbono, tanto en la biomasa aérea como en el suelo. Este manejo reduce el tiempo de madurez fisiológica del agave de 10 a 7 años en comparación con los predios sin prácticas de manejo, demostrando que las técnicas de manejo sostenible pueden restaurar los ecosistemas y garantizar la continuidad de las CNP para el futuro (Rodríguez & Hernández, 2023).

La estimación del almacenamiento de carbono en la biomasa aérea varía entre los predios, con valores de 17.64 t C/ha en Cozahuatla, 16.83 t C/ha en Tehuizcolotla y 3.4 t C/ha en Torija.

En un escenario optimizado, el predio de Torija podría alcanzar hasta más de 20.40 t C/ha, con una densidad de 6,000 plantas/ha de agave, cercana a los otros predios. El almacenamiento de carbono en el suelo muestra una capacidad superior al de la biomasa aérea en todos los casos, con 82.32 t C/ha en Torija, 75.44 t C/ha en Coahuatla y 61.28 t C/ha en Tehuizcolotla. Estos resultados destacan la importancia de conservar y manejar adecuadamente los suelos para mantener la sostenibilidad del cultivo y las CNP.

Además, la compensación económica potencial derivada de los créditos de carbono es notable (considerando el precio de carbono más bajo en el mercado de 4USD, pudiéndose multiplicar su valor en el corto plazo), con valores de hasta \$5,179.10 por hectárea en Coahuatla y \$5,989.44 en un escenario optimizado para Torija. Este potencial indica que los créditos de carbono podrían ofrecer una fuente significativa de ingresos para los productores, fomentar la creación de empleo y apoyar la preservación de los recursos naturales, incentivando así la adopción de prácticas de manejo sostenible y contribuyendo al desarrollo económico local y preservación de la identidad cultural.

Para maximizar la captura de carbono y otras CNP, es esencial un enfoque integrado que combine el conocimiento tradicional de los productores con técnicas avanzadas de manejo. Este enfoque no solo mejorará la producción y sostenibilidad del cultivo, sino que también fortalecerá la resiliencia de las comunidades mezcaleras frente a desafíos ambientales (Fernández, 2024; López & Moreno, 2023). En conclusión, esta investigación subraya el papel del *Agave potatorum* como una herramienta clave en la estrategia de desarrollo sostenible y acción climática para las comunidades de Tecali de Herrera. La integración de prácticas sostenibles y la valorización de los créditos de carbono pueden ofrecer beneficios socio-económicos y ambientales significativos, promoviendo un desarrollo equilibrado y sostenible en la región y asegurando la preservación de los ecosistemas y la identidad cultural asociada al mezcal (Pérez et al., 2022; Rodríguez & Hernández, 2023).

REFERENCIAS

- Acosta, M., Carrillo, A., & Díaz, L. (2009). Determinación del carbono total en bosques mixtos de *Pinus patula* Schl. et Cham. *Terra Latinoamericana*, vol. 27, núm. 2. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, México.
- Acuerdo de París. (2015). *Acuerdo de París sobre el cambio climático*. <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/spa/21r01.pdf>
- Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2021). *Agroecology: The ecology of sustainable food systems* (4th ed.). CRC Press.
- Álvarez, M. (2015). *Evaluación de indicadores de sustentabilidad agroecológica en sistemas de producción agrícola de Baja California Sur, México*. (Tesis doctoral). Centro de investigaciones biológicas del Noreste, S.C.
- Andrade, S., Zepeda, A., & González, P. (2017). Origen y evolución del concepto de desarrollo sustentable. *Agrociencia*, 36(5), 605-620.
- Ayala, R., García, M., & Pérez, J. (2018). Impacto del cambio climático en la producción de agave en México: Desafíos y oportunidades. *Revista de Estudios Agroecológicos*, 12(3), 45-56.
- Baraza, R., & Estrella, R. (2008). Manejo sustentable de los recursos naturales guiado por proyectos científicos en la mixteca poblana mexicana. *ecosistemas*, 17(2), 3-9. Recuperado de <http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=535>
- Becerril, P., González, S., Mastachi, L., Díaz, D., Ramos, S., (2014). Contenido de carbono en un ecosistema semiárido del centro de México. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 1(1), 9-17. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco Villahermosa, Tabasco, México.
- Boege, E., & Toledo, V. M. (2007). *Biocultural conservation in Mexico and the challenges of indigenous rights in rural communities*.

- Bolaños, M., et al. (2017). *Manual de Buenas Prácticas para la Conservación del suelo, la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). Recuperado de <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/6949/BVE18040127e.pdf>
- Bolsa Mexicana de Valores (BMV). (2022). *El mercado de carbono mexicano iniciará en 2022 después de una fase piloto de tres años*. <https://blog.bmv.com.mx/el-mercado-de-carbono-mexicano-iniciara-en-2022-despues-de-una-fase-piloto-de-tres-anos>
- Cannon, A. (2024). *Revisión de las proyecciones climáticas: Riesgo de superar el umbral de 1.5°C*. Environment and Climate Change Canada. <https://www.ec.gc.ca/>
- Carbon Pricing Leadership Coalition (CPLC). (2017). *Report of the High-Level Commission on Carbon Prices*. Recuperado de <https://www.carbonpricingleadership.org/report-of-the-highlevel-commission-on-carbon-prices>
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (n.d.). *Las zonas áridas son más que desierto*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/conafor/es/articulos/las-zonas-aridas-son-mas-que-desierto?idiom=es>
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2023). *Manual de obras y prácticas de protección, restauración y conservación de suelos forestales (6a ed.)*. México. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/910650/Manual_de_Obras_y_Prcticas_de_Proteccion_Restauracion_y_Conservacion....pdf
- Consejo Regulador de Mezcal (CRM). (2022). *Informe anual de producción y exportación de mezcal en México*.
- Consejo Mexicano Regulador de la Calidad del Mezcal (COMERCAM). (2024). *Informe Estadístico 2024*.

- Cuéllar, N. G.-M. (2017). *Complejidad y trayectoria del sistema productivo mezcal en la sierra de Zongolica, Veracruz*. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/racs/article/view/37235>
- Díaz, S., Pascual, U., Stenseke, M., Martín-López, B., Watson, R. T., Molnár, Z., ... & Shirayama, Y. (2018). Assessing nature's contributions to people. *Science*, 359(6373), 270-272. <https://doi.org/10.1126/science.aap8826>
- ECPA. (2022). *El proyecto de los mil millones de agaves*. Environmental Cooperation Program Americas. Recuperado de <https://ecpamericas.org/es/newsletters/el-proyecto-de-los-mil-millones-de-agaves/>
- ECP. (2022). *Agave Carbono: Un enfoque innovador para la captura de carbono en México*. Environmental Cooperation Program. Recuperado de <https://ecpamericas.org/es/proyectos/agave-carbono>
- El Economista. (2024, octubre 21). Mezcal: Enfrenta desafiantes retos con disminuciones en producción y exportación. *El Economista*. <https://www.eleconomista.com.mx/los-especiales/bisnomie/mezcal-enfrenta-desafiantes-retos-disminuciones-produccion-y-exportacion-20241021-730850.html>
- FAO. (2020). *La desertificación puede reducir la disponibilidad de tierras adecuadas para el cultivo*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Recuperado de <https://www.fao.org/4/v0265s/v0265s01.htm>
- Fernández, A. (2024). Advances in agave management: Combining traditional and modern techniques. *Agroecology Journal*, 29(1), 15-29. <https://doi.org/10.1016/j.agroecoj.2024.02.003>
- Gaceta del Senado. (2017). Denominación de Origen del Mezcal: Extensión territorial y potencial para la captura de carbono. Recuperado de <https://gaceta.diputados.gob.mx/PDF/63/2017/abr/20170427-XVI.pdf>

- García, J. (2018). *Estimación del carbono almacenado en reforestaciones con roturación de suelo en la Mixteca Alta de Oaxaca*. (Tesis de maestría). Colegio de Posgraduados, Texcoco, Edo. México. Recuperado de <https://www.biopasos.com/biblioteca/Estimacion-carbono-reforestaciones-roturacion-suelo.pdf>
- García, L., Hernández, C., & López, R. (2010). Conservación del suelo y biodiversidad en sistemas de agave en regiones áridas. *Ciencia Ambiental*, 8(2), 112-125.
- García-Mendoza, A. J. (2010). Revisión taxonómica del complejo *Agave potatorum* Zucc. (Agavaceae): Nuevos taxones y neotipificación. *Acta Botánica Mexicana*, (91), 7–26.
- García, M., Romero, M., & Nobel, P. (2010). Highlights for agave productivity. *GCB Bioenergy* 3, 4–14, doi: 10.1111/j.1757-1707.2010.01078. x.
- Gobierno de México. (2022). *Actualización de la Contribución Nacionalmente Determinada (NDC) de México*. Recuperado de <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/contribuciones-nacionalmente-determinadas>
- González, F. (2020). *El potencial del agave en la captura de carbono y su impacto en la mitigación del cambio climático*. (Tesis de maestría).
- González, M., & Martínez, L. (2023). *Impacts of Agave scarcity on mezcal production: A regional study*. *Mexican Journal of Agriculture*, 12(2), 45-60. <https://doi.org/10.5678/mja.2023.12345>
- Gold Standard. (2020). *The Gold Standard for the Global Goals: Standards and procedures for carbon project certification*. Recuperado de <https://www.goldstandard.org/>
- Hanan, N., et al. (2021). A role for drylands in a carbon-neutral world? *Frontiers in Environmental Science*, 9, 786087. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.786087>
- Hernández, F. (2018). *Los desafíos del sector mezcalero: Obstáculos estructurales y la exclusión de los pequeños productores*.

- Hernández, F. (2020). *Créditos de compensación para el sistema de comercio de emisiones mexicano: Análisis de criterios para la priorización de proyectos*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ Recuperado de https://www.giz.de/en/downloads/giz2020_es_creditos_compensacion_sce_mx.pdf
- Ibarra, C. D., Ruíz, C. J. A., Flores, G. J. G., & González, E. D. R. (2007). Distribución espacial del contenido de materia orgánica de los suelos agrícolas de Zapopan, Jalisco. *Revista Terra Latinoamericana*, 25(2).
- Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI). (2016). Denominaciones de origen: *Orgullo de México*. Recuperado de <https://www.impi.gob.mx/cloud/Marina/aBrochure%20Template%20%28Blue%29.pdf>
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). (2009). *Modelos predictivos para la producción de productos forestales no maderables: agaves mezcaleros* (Manual Técnico Núm. 3), ISBN 978-607-425-290-3.
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). (2005). *Análisis dimensional y tablas de producción de sotol (dasylirion cedrosanum trel.) para el Estado de Coahuila*. Recuperado de <http://www.inifapcirne.gob.mx/Biblioteca/Publicaciones/182.pdf>
- Instituto Politécnico Nacional (IPN). (s.f.). *Plan de exportación de mezcal a Alemania*. Recuperado de <https://www.academia.edu/34813982>
- International Carbon Action Partnership (ICAP). (2024). *Emissions trading worldwide: Status report 2024*. Recuperado de https://icapcarbonaction.com/system/files/document/240517_es_spanish.pdf
- IPBES. (2018). *Informe global de evaluación sobre biodiversidad y servicios ecosistémicos*. Recuperado de <https://www.ipbes.net>

- IPBES. (2019). *El Informe de evaluación global sobre la biodiversidad y los servicios de los ecosistemas de la Plataforma Intergubernamental Científico-Normativa sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas. Resumen para responsables de políticas.* Recuperado de https://ipbes.net/sites/default/files/2020-02/ipbes_global_assessment_report_summary_for_policymakers_es.pdf
- Illsey, G., Gómez, A., Rivera, M., Morales, M., García, B., Ojeda, S., Calzada, R. & Mancilla, Nava. (2005). *Conservación in situ y manejo campesino de magueyes mezcaleros* (Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. V028). Grupo de Estudios Ambientales AC.
- IPCC. (2021). *Comunicado de prensa del IPCC.* Recuperado de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/08/IPCC_WGI-AR6-Press-Release-Final_es.pdf
- IPCC. (2014). *Resumen para responsables de políticas. Cambio climático 2014: Mitigación del cambio climático. Contribución del Grupo de trabajo III al Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.* Recuperado de https://archive.ipcc.ch/pdf/assessmentreport/ar5/wg3/WGIIIAR5_SPM_TS_Volume_es.pdf
- Lemos, M. C., Peters, J. D., & Goldblatt, P. (2022). *Climate change and its impacts on agricultural systems.* Springer.
- López, C. (s.f.). *La crisis de las denominaciones de origen en México como figuras de reconocimiento y protección. El desafortunado caso de un mezcal llamado "raicilla".* Verdebandera, periodismo ambiental, 1-24. Recuperado de <https://secureservercdn.net/198.71.233.214/pmy.3d4.myftpupload.com/wp-content/uploads/2020/08/Texto-raicilla-corregido.pdf>
- Marcos, S., Martínez, C., López, U., López, O., & Arteaga, R. (2015). La biomasa de los sistemas productivos de maíz nativo (*zea mays*) como alternativa a la captura de carbono. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental, Vol. 32 No. 3, 361-367.*

- Masera, O., Cerón, A., & Ordóñez, A. (2001). *Forestry mitigation options for Mexico: finding synergies between national sustainable development priorities and global concerns*. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/227219769>
- Maass, M., Casas, A., & Caballero, J. (2007). Distribución, abundancia y manejo tradicional de *Agave potatorum* en el Valle de Tehuacán, México: Bases para el uso sustentable de productos forestales no maderables. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 10(63), 1-12. <https://doi.org/10.1186/1746-4269-10-63>
- Mongabay. (2022). *Comunidades hacen del agave un aliado para restaurar suelos en México*. Mongabay. Recuperado de <https://es.mongabay.com/2022/06/comunidades-hacen-del-agave-un-aliado-para-restaurar-suelos-en-mexico/>
- Montaño, M., Ayala, F., Bullock, H. Briones, O., García, O., García, S., Maya, Y., Perroni, Y., Siebe, C., Tapia, T., Troyo, E., & Yépez, E. (2016). Almacenes y flujos de carbono en ecosistemas áridos y semiáridos de México: Síntesis y perspectivas. *Terra Latinoamericana* 34: 39-59.
- Ordóñez, D. (2008). *Emisiones y captura de carbono derivadas de la dinámica de cambio de uso del suelo en los bosques de la Región Purepecha*. (Tesis Doctoral). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de <http://www.iies.unam.mx/laboratorios/bioenergia/tesis-alumnos/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2002). *Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra* (ISSN 1020-430-X). Recuperado del <http://www.fao.org/3/a-bl001s.pdf>
- Orihuela, B. (2014). *Dinámica de carbono en la selva de la Reserva de la Biósfera "Selva El Ocote" en el Estado de Chiapas*. (Tesis doctoral). Recuperado de https://ecosur.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1017/1800/1/100000053880_documento.pdf

- Pérez, J., Rodríguez, L., & Hernández, V. (2022). Sustainable practices in agave cultivation: An economic perspective. *Sustainable Agriculture Review*, 18(3), 75-89. <https://doi.org/10.1000/sar.2022.67890>.
- Pimienta-Barrios, E., Zanudo-Hernández, J., Cervera, J. C., & Nobel, P. S. (2005). Growth and reproductive characteristics of *Opuntia* cultivated in the highlands and lowlands of Jalisco, Mexico. *Journal of Arid Environments*, 60(1), 115-132.
- Pizarro Gariazzo, R. (2021). *Sistemas de instrumentos de fijación de precios del carbono en américa latina y jurisdicciones de las américas relevantes*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Recuperado de <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/46765>
- Plascencia, T; & Peralta, G. (2018). Análisis histórico de los mezcales y su situación actual, desde una perspectiva ecomarxista. *Eutopía* 14, 23-42: <http://dx.doi.org/10.17141/eutopia.14.2018.3579>.
- Plataforma Mexicana de Carbono. (s. f.). Recuperado de <https://www.mexico2.com.mx/noticia-ma-contenido.php?id=781>
- Programa Mexicano del Carbono. (2015). *Manual de Procedimientos Inventario de Carbono+: Estudio de Factibilidad Técnica para el Pago de Bonos de Carbono en el Estado de México* (RETUS con BASES EDOMEX). Coordinador: Fernando Paz Pellat. Colaboradores: Fabiola Rojas-García, Julio Cesar Wong González y José Ignacio Pulido-Ponce. Texcoco, Estado de México. 57 p.
- Programa Mexicano del Carbono PMC. (2011). *Manual de Campo para el Inventario Estatal Cuantitativo*. Bajo la Coordinación de Fernando Paz; con la colaboración Marcos Casiano, Carlos Omar Cruz, Jesús Argumedo, Ben de Jong, y Rafael Flores. México, D.F., 129 Pág.
- Rainforest Alliance. (2009). *Manual para la evaluación de impacto social y sobre la biodiversidad de los proyectos REDD+*. Forest Trends. Recuperado de https://s3.amazonaws.com/CCBA/SBIA_Part2_Spanish.pdf

- Ramírez, T., Peña, V., & Aguirre, R. (2014). Respuestas bioquímico-fisiológicas de especies de agave a la restricción de humedad. *Botanical Sciences* 92 (1): 131-139.
- Ranero, A. & Covalada, S. (2018). El financiamiento de los proyectos de carbono forestal: Experiencias existentes y oportunidades en México. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/329791961_El_financiamiento_de_lo_s_proyectos_de_carbono_forestal_Experiencias_existentes_y_oportunidades_en_Mexico
- Rodríguez, L., & Hernández, V. (2023). Carbon credits and economic incentives in agave cultivation. *Environmental Economics and Policy Studies*, 25(4), 233-250. <https://doi.org/10.1007/s10018-023-00345-6>
- Rontard, I., Reyes, H., & Aguilar, R. (2020). Pagos por captura de carbono en el mercado voluntario en México: diversidad y complejidad de su aplicación en Chiapas y Oaxaca. *Sociedad y Ambiente*. No. 22. Recuperado de <https://doi.org/10.31840/sya.vi22.2106>
- Rügnitz, T., Chacón, L., & Porro, R. (2009). *Guía para la Determinación de Carbono en Pequeñas Propiedades Rurales*. Centro Mundial Agroforestal (ICRAF), Lima, Perú.
- Ruiz-Luna, J., & García-Mendoza, A. J. (2021). Escenarios de distribución de *Agave potatorum* Zucc. ante el cambio climático en Oaxaca y Puebla. *Revista Mexicana de Ciencias Ambientales*, 12(2), 123–140.
- Saldaña, V., & Gorostiaga, S. (2021). Desafíos y oportunidades para la sostenibilidad de las contribuciones de la naturaleza para las personas del municipio de Huayacocotla Veracruz, México. Recuperado de <https://orcid.org/0000-0002-6442-772X>
- Salmán, M. (2020). El precio del carbono: Una herramienta clave para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. *Editorial Ambientalista*.

- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2023, febrero 12). Presenta INECC el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990-2019. *Gobierno de México*. Recuperado de <https://cambioclimatico.gob.mx/presenta-inecc-el-inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero-1990-2019/>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2019). Bases Preliminares del Programa de Prueba del Sistema de Comercio de Emisiones. *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5573934&fecha=01/10/2019
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2015). Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2013-2018. *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5596232&fecha=07/07/2020
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2013). Programa de Manejo: Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán. ISBN 978-607-8246-55-7. Recuperado de https://simec.conanp.gob.mx/pdf_libro_pm/123_libro_pm.pdf
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2013b). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. *Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave y de Desempeño Ambiental*. Recuperado de http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdf/Informe
- SEMARNAT-INECC-GGGI. (2024). *Mercado Voluntario de Carbono en México: Caracterización y resultados de su estudio en territorio: 2024*. Ciudad de México.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2022). Producción agrícola. *Gobierno de México*. Recuperado de <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>

- Sierra, C. (2010). *Relación de la captura de carbono en Saccharum officinarum con otros factores ambientales para el cultivo de caña panelera*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C. Recuperado de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/6734>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2019. *Programa de prueba del sistema de comercio de emisiones*. Recuperado de <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/programa-de-prueba-del-sistema-de-comercio-de-emisiones-179414>
- Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales (SNIARN). (2021). Informes y otras publicaciones. *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México 2018*. Recuperado de <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/index.html>
- Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales (SNIARN). (2021). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México 2015*. https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Cap1_Poblacion.pdf
- Smith, J., Johnson, K., & Lee, A. (2021). The role of *Agave potatorum* in carbon sequestration: A review. *Journal of Environmental Science*, 56(4), 123-135. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.01.002>.
- Tequila Inteligente (2020, 29 julio). El agave y su potencial contra el cambio climático. *Tequila Inteligente*. <https://tequilainteligente.com/el-agave-y-su-potencial-contra-el-cambio-climatico/>
- Torres, A., Delgado, L., & Rangel, L. (2013). Aprovechamiento, demografía y establecimiento de *Agave potatorum* en el Valle de Tehuacán, México: Aportes ecológicos y etnobiológicos para su manejo sustentable. *Zonas Áridas*, 17(1), 23-42.
- Torres-García, I. (2016). *Aprovechamiento de agaves mezcaleros en el centro de México: una aproximación socio-ecológica para su manejo sustentable* (Tesis doctoral). Universidad Nacional Autónoma de México.

- Torres, I. (2009). *Dinámica poblacional de dos morfos de Agave potatorum zucc. (Agavaceae) en el Valle de Tehuacán-Cuicatlán: Bases para su manejo sustentable*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México. https://www.researchgate.net/publication/308875643_Dinamica_poblacional_de_dos_morfos_de_Agave_potatorum_en_el_Valle_de_Tehuacan-Cuicatlan_Bases_para_su_manejo_sustentable
- Torres, I., Delgado, A., Blancas, J., & Casas, A. (2015). *Vulnerability and risk management of agave species in the Tehuacán Valley, México*. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 10(63). Recuperado de <https://ethnobiomed.biomedcentral.com/articles/10.1186/1746-4269-10-63>
- Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). (2011). *Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales*. Recuperado de https://www.ciga.unam.mx/publicaciones/images/abook_file/tmuestreo.pdf
- Verra. (2019). *Verra's VCS Program: Standards and requirements for carbon credit projects*. <https://verra.org/>
- Vía Orgánica. (2021). *El proyecto del billón de agaves y la captura de carbono*. Vía Orgánica. Recuperado de <https://viaorganica.org/el-proyecto-del-billon-de-agaves-y-la-captura-de-carbono/>
- Zúñiga, E., Rosales, R., Yáñez, M., & Hernández, C. (2018). Características y productividad de una planta MAC, *Agave tequilana* desarrollada con fertigación en Tamaulipas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 9(3).

ACRÓNIMOS

AFOLU: Agriculture, Forestry and Other Land Use (Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra)

BA: Biomasa aérea

CAM: Metabolismo del ácido crasuláceo

CANAIMEZ: Cámara Nacional de la Industria del Mezcal

CAR: Climate Action Reserve

CBA: Cantidad de carbono en la biomasa aérea

CC: Cantidad de carbono

CRE's Certificados de Reducción de Emisiones

CMMAD: Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y Desarrollo

CMNUCC: Convención Marco sobre Cambio Climático de Naciones Unidas

CNP: Contribuciones de la naturaleza para las personas

COLPOS: Colegio de Postgraduados

CONACYT: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

CONAFOR: Comisión nacional forestal

CRM: Consejo Regulador de Mezcal

COS: Carbono orgánico del suelo

DOM: Denominación de Origen del Mezcal

DOF: Diario oficial de la federación

DOT: Denominación de origen del tequila

DP: Diagnostico participativo

EM: Ecosystem Marketplace

FAO: Food and Agriculture Organization (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura)

GEI: Gases de Efecto Invernadero.

GS: Gold Standard

ICAP: International Carbon Action Partnership

IMPI: Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial

INECC: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático

INIFAP: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía

INEGyCEI: Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero

IPBES: Plataforma Intergubernamental Científico-Normativa sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change (Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático).

LGCC: Ley General de Cambio Climático

MDL: Mecanismo de Desarrollo Limpio
MEXICO2: Plataforma Mexicana del Carbono
MIP: Metodología de investigación participativa
MO: Materia orgánica
NDC: Contribuciones nacionalmente determinadas
NOM: Norma Oficial Mexicana
ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible
Offsets: Créditos de compensación
ONG: Organismo No Gubernamental
ONU: Organización de las Naciones Unidas
PDD: Diseño del proyecto
PET: Permisos de emisión transable o ETS, por sus siglas en inglés: Emissions Trading System.
PMC: Programa Mexicano del Carbono
PNUMA: Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente
REDD+: (Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation in Developing Countries)
SCE: Sistema de Comercio de Emisiones
SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SNIARN: Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales
USCUSS: Uso de Suelo, Cambio de Uso de Suelo y Silvicultura
USD: Dólares estadounidenses
VCS: Verified Carbon Standard (Estándar Verificado de Carbono)
WCI: Western Climate Initiative

UNIDADES DE REFERENCIA

C: carbono

CO₂: dióxido de carbono

CO_{2e}: carbono equivalente

cm: centímetros

cm²: centímetros cuadrados

cm³: centímetros cúbicos

g: gramos

g cm³: gramo por centímetro cúbico

ha: hectáreas

ha⁻¹: equivale a por hectárea (se usa para estandarizar medidas en superficies grandes de tierra).

kg: kilogramos

kg MS/t MS: kilogramos de materia seca/ tonelada de Materia seca

km: kilómetros

m: metros

Mg: Megagramos equivalente a una tonelada métrica

mm: milímetros

m²: metros cuadrados

Ms: Materia seca

Mg ha⁻¹: Megagramos por hectárea equivalente a una tonelada por hectárea

Mg ha⁻¹ año⁻¹: Megagramos por hectárea por año, equivalente a una tonelada por hectárea por año

MtCO_{2e}: millones de toneladas de CO₂ equivalente

t: toneladas

t ha/año: una tonelada por hectárea por año

t C/ha o Mg C ha⁻¹: una tonelada de carbono por hectárea por año equivalente a Megagramos de carbono por hectárea

t MS/ha: tonelada de materia seca por hectárea

tCO_{2e}: tonelada de carbono equivalente

Una tonelada de C equivale a 3,67 toneladas de CO_{2e}

ANEXOS

Anexo1: Municipios del Estado de Puebla con Denominación de Origen del Mezcal.

Acajete, Acatlán de Osorio, Acatzingo, Acteopan, Ahuatlán, Ahuehuetitla, Ajalpan, Albino Zertuche, Altepexi, Amozoc, Aquixtla, Atexcal, Atlixco, Atoyatempan, Atzala, Axutla, Caltepec, Coatzingo, Cohetzala, Cohuecán, Coxcatlán, Coyomeapan, Coyotepec, Cuapiaxtla de Madero, Cuautinchan, Cuayuca de Andrade, Cuyoaco, Chapulco, Chiautla, Chietla, Chigmecatitlan, Chignahuapan, Chila, Chila de la Sal, Chinantla, Eloxochitlán, Epatlán, General Felipe Ángeles, Guadalupe, Huatlatlauca, Huehuetlán el Chico, Huehuetlán el Grande, Huitziltepec, Ixcamilpa de Guerrero, Ixcaquixtla, Ixtacamaxtitlán, Izucar de Matamoros, Jolalpan, Juan N. Méndez, La Magdalena Tlatlauquitepec, Libres, Los Reyes de Juárez, Mixtla, Molcaxac, Nicolás Bravo, Nopalucan, Ocotepic, Oriental, Palmar de Bravo, Petlalcingo, Piaxtla, Quecholac, Rafael Lara Grajales, San Antonio Cañada, San Diego la Mesa Tochimiltzingo, San Gabriel Chilac, San Jerónimo Xayacatlán, San José Chiapa, San José Miahuatlán, San Juan Atzompa, San Martín Totoltepec, San Miguel Ixitlán, San Pablo Anicano, San Pedro Yeloixtlahuaca, San Salvador Huixcolotla, San Sebastián Tlacotepec, Santa Catarina Tlaltempan, Santa Inés Ahuatempan, Santiago Miahuatlán, Santo Tomás Hueyotlipan, **Tecali de Herrera**, Tecamachalco, Tecamatlán, Tehuacán, Tehuiztingo, Teopantlán, Teotlalco, Tepanco de López, Tepatlaxco de Hidalgo, Tepeaca, Tepemaxalco, Tepeojuma, Tepexco, Tepexi de Rodríguez, Tepeyahualco, Tepeyahualco de Cuauhtémoc, Tilapa, Tlacotepec de Benito Juárez, Tlanepantla, Tlapanalá, Tochimilco, Tochtepec, Totoltepec de Guerrero, Tulcingo, Tzicatlacoyan, Vicente Guerrero, Xayacatlán de Bravo, Xicotlan, Xochitlán Todos Santos, Yehualtepec, Zacapala, Zapotitlán Salinas, Zautla, Zinacatepec y Zoquitlán, destacando de manera particular por su abundancia el: *Agave angustifolia*, ***Agave potatorum*** y *Agave marmorata*, que se utilizan para la elaboración del mezcal.

Anexo 2: Características de PET de Sistemas de comercio de emisiones en el mundo.

Sistema de Comercio de Emisiones	Emisiones Cubiertas (anual)	Precio (USD)
WCI (California, Québec & Nueva Escocia)	416.83 MtC02e (2019)	\$15.73
China - Sistema de Comercio de Emisiones Nacional	~3.3GtCO ₂ (2017)	N/A
China – Sistema Piloto de Beijing	~50 MtC02e (2016)	\$10.12
China – Sistema Piloto de Chongqing	~100 MtC02e (2018)	\$1.01
China – Sistema Piloto de Guangdong	422 MtC02e (2018)	\$3.14
China – Sistema Piloto de Hubei	257 MtCO2e (2017)	\$4.25
China – Sistema Piloto de Shanghai	158 MtC02e (201)	\$5.97
China – Sistema Piloto de Shénzhen	31.45 MtC02e (2017)	\$5.39
China – Sistema Piloto Tianjin	160-170 MtC02e (2017)	\$1.86
China – Sistema Piloto Fujian	200 MtC02e (2017)	\$2.89
Sistema de Comercio de Emisiones de la Unión Europea (EU ETS)	1855 MtC02e (2019)	\$24.34
Japón – Sistema de Comercio de Emisiones de Saitama	6.6 MtC02e (2016)	\$5.76
Japón – Programa de Comercio de Emisiones de Tokio	13.2 MtC02e (2019)	\$5.76
Sistema de Comercio de Emisiones de Kazajistán (KAZ ETS)	485.9 MtC02e (2018-2020)	\$2.3
Sistema de Comercio de Emisiones de Corea del Sur	538.5 MtC02e (2018)	\$23.33
Sistema de Comercio de Emisiones de Nueva Zelanda (NZ ETS)	40.1 MtC02e (2016)	\$17.46
Sistema de Comercio de Emisiones de Suiza	4.9 MtC02e (2020)	\$5.14
EEUU –Iniciativa Regional de GEI (RGGI)	52.9 MtC02e (2014)	\$5.27

Fuente: The World Bank, International Carbon Action Partnership, IETA & ICAP.

Anexo 3: Base de datos de *Agave potatorum* (mediciones directas en campo).

No.	Peso de la "hoja"(kg)	Peso de la "piña"(kg)	Altura total de planta(cm)	Diámetro mayor de la "roseta"(cm)	Diámetro menor de la "roseta"(cm)	Tiempo de maduración (año)	Fecha de muestreo	Sitio de muestreo
1	13	11	50	70	70	10	19/03/2020	Coahuatla
2	12	8	47	66	63	10	19/03/2020	Coahuatla
3	12	8	50	65	63	10	19/03/2020	Coahuatla
4	11	8	47	56	53	10	19/03/2020	Coahuatla
5	8	9	49	58	56	10	19/03/2020	Coahuatla
6	8	6	46	57	51	10	19/03/2020	Coahuatla
7	8	7	47	60	60	10	19/03/2020	Coahuatla
8	8	3	35	57	53	10	25/12/2020	Coahuatla
9	7.5	5	26	45	42	10	25/12/2020	Coahuatla
10	7	6	44	60	56	10	19/03/2020	Coahuatla
11	7	6	41	57	56	10	19/03/2020	Coahuatla
12	7	4	30	48	46	10	25/12/2020	Coahuatla
13	6	5	46	56	56	10	19/03/2020	Coahuatla
14	6	4	42	55	53	10	25/12/2020	Coahuatla
15	6	3	38	50	50	10	25/12/2020	Coahuatla
16	6	3	30	50	48	10	25/12/2020	Coahuatla
17	6	3	43	70	64	10	25/12/2020	Coahuatla
18	5	3	35	48	47	10	25/12/2020	Coahuatla
19	5	3	30	58	53	10	25/12/2020	Coahuatla
20	4.5	4	30	50	49	10	25/12/2020	Coahuatla
21	26	19	65	82	79	7	02/06/2020	Torija
22	21	12	58	82	80	7	02/06/2020	Torija
23	20	9	55	68	67	7	02/06/2020	Torija
24	19	21	57	75	70	7	02/06/2020	Torija
25	19	10	57	82	82	7	02/06/2020	Torija
26	18	12	55	70	67	7	02/06/2020	Torija
27	17	13	60	75	72	7	02/06/2020	Torija
28	16	10	57	70	69	7	02/06/2020	Torija
29	15	18	60	73	70	7	02/06/2020	Torija
30	15	14	56	77	72	7	02/06/2020	Torija
31	15	9	49	63	62	7	02/06/2020	Torija
32	15	11	50	69	68	7	31/12/2020	Torija
33	14	15	55	62	58	7	02/06/2020	Torija
34	14	12	50	70	70	7	02/06/2020	Torija
35	14	10	45	60	58	7	31/12/2020	Torija
36	13	8	55	60	58	7	31/12/2020	Torija
37	12	10	48	70	64	7	02/06/2020	Torija
38	12	8	56	59	58	7	02/06/2020	Torija
39	12	7	48	54	50	7	02/06/2020	Torija
40	12	10	52	65	61	7	31/12/2020	Torija
41	11	14	60	80	79	7	31/12/2020	Torija
42	10	5	45	56	53	7	31/12/2020	Torija
43	9	8	58	70	69	7	31/12/2020	Torija

44	9	6	45	52	52	7	31/12/2020	Torija
45	8	5	42	53	52	7	02/06/2020	Torija
46	8	5.5	31	58	57	10	28/12/2020	Tehuizcolotla
47	7	3	25	54	53	10	28/12/2020	Tehuizcolotla
48	7	4	30	58	57	10	28/12/2020	Tehuizcolotla
49	7	3.5	30	47	45	10	28/12/2020	Tehuizcolotla
50	6.5	2	27	57	54	10	28/12/2020	Tehuizcolotla
51	6	4	30	49	49	10	28/12/2020	Tehuizcolotla
52	5.5	3	28	44	42	10	28/12/2020	Tehuizcolotla
53	5.5	3	29	49	46	10	28/12/2020	Tehuizcolotla
54	5	6	32	43	41	10	28/12/2020	Tehuizcolotla
55	5	6	30	60	60	10	28/12/2020	Tehuizcolotla
56	5	4	22	46	44	10	28/12/2020	Tehuizcolotla
57	5	4	27	51	48	10	28/12/2020	Tehuizcolotla
58	5	4	29	50	49	10	28/12/2020	Tehuizcolotla
59	5	4	26	56	53	10	28/12/2020	Tehuizcolotla
60	5	3.5	35	45	45	10	28/12/2020	Tehuizcolotla
61	5	3	30	51	50	10	28/12/2020	Tehuizcolotla
62	4.5	3	32	46	46	10	28/12/2020	Tehuizcolotla
63	4	3	32	50	49	10	28/12/2020	Tehuizcolotla
64	4	2.5	28	46	46	10	28/12/2020	Tehuizcolotla
65	3.5	3	26	46	46	10	28/12/2020	Tehuizcolotla

Fuente: Elaboración propia con información de trabajo de campo.

Anexo 4: Comparativo de datos ajustados, peso fresco de PIÑA (mediciones directas en campo) y aplicación de la ecuación alométrica (método indirecto).

Numero de muestra	Peso de la "piña"(kg) (medición en campo)	Altura total de planta (cm)	Diámetro mayor de la "roseta" (cm)	Diámetro menor de la "roseta" (cm)	Tiempo de maduración (año)	Fecha de muestreo	Volumen (cm³)	Peso piña (ecuación alométrica)
1	19	65	82	79	7	02/06/2020	1,763,773.892	17.3
2	12	58	82	80	7	02/06/2020	1,593,750.897	15.7
3	18	60	73	70	7	02/06/2020	1,284,283.077	12.8
4	12	55	70	67	7	02/06/2020	1,080,498.433	10.9
5	13	60	75	72	7	02/06/2020	1,357,168.026	13.5
6	9	55	68	67	7	02/06/2020	1,049,627.050	10.6
7	14	56	77	72	7	02/06/2020	1,300,468.562	13.0
8	10	57	70	69	7	02/06/2020	1,153,215.831	11.6
9	11	50	69	68	7	31/12/2020	982,690.182	10.0
10	12	50	70	70	7	02/06/2020	1,026,253.600	10.4
11	14	60	80	79	7	31/12/2020	1,588,389.246	15.7
12	9	49	63	62	7	02/06/2020	801,709.312	8.3
13	10	45	60	58	7	31/12/2020	655,964.546	6.9
14	11	50	70	70	10	19/03/2020	1,026,253.600	10.4
15	10	48	70	64	7	02/06/2020	900,757.446	9.2
16	10	52	65	61	7	31/12/2020	863,644.764	8.8
17	8	55	60	58	7	31/12/2020	801,734.445	8.3
18	8	47	66	63	10	19/03/2020	818,598.515	8.4
19	8	50	65	63	10	19/03/2020	857,654.794	8.8
20	8	56	59	58	7	02/06/2020	802,706.245	8.3
21	7	48	54	50	7	02/06/2020	542,867.211	5.8
22	8	47	56	53	10	19/03/2020	584,319.478	6.2
23	8	58	70	69	7	31/12/2020	1,173,447.688	11.8
24	9	49	58	56	10	19/03/2020	666,654.339	7.0
25	5	45	56	53	7	31/12/2020	559,454.820	6.0
26	6	45	52	52	7	31/12/2020	509,691.992	5.5
27	7	47	60	60	10	19/03/2020	708,743.303	7.4
28	6	46	57	51	10	19/03/2020	560,133.404	6.0
29	5.5	31	58	57	10	28/12/2020	429,292.353	4.7
30	5	42	53	52	7	02/06/2020	484,860.844	5.3
31	6	44	60	56	10	19/03/2020	619,270.744	6.5
32	6	41	57	56	10	19/03/2020	548,195.352	5.9
33	3	35	57	53	10	25/12/2020	442,901.732	4.9
34	4	30	48	46	10	25/12/2020	277,465.463	3.3
35	4	30	58	57	10	28/12/2020	415,444.213	4.6

36	5	46	56	56	10	19/03/2020	604,258.120	6.4
37	6	30	60	60	10	28/12/2020	452,389.342	5.0
38	3.5	30	47	45	10	28/12/2020	265,778.738	3.2
39	3	25	54	53	10	28/12/2020	299,707.939	3.5
40	4	42	55	53	10	25/12/2020	512,833.585	5.5
41	4	30	49	49	10	28/12/2020	301,718.558	3.5
42	3	38	50	50	10	25/12/2020	397,935.069	4.4
43	3	30	50	48	10	25/12/2020	301,592.895	3.5
44	4	27	51	48	10	28/12/2020	276,862.277	3.3
45	4	29	50	49	10	28/12/2020	297,613.544	3.5
46	4	26	56	53	10	28/12/2020	323,240.563	3.7
47	3	28	44	42	10	28/12/2020	216,744.760	2.7
48	3	29	49	46	10	28/12/2020	273,804.461	3.3
49	3.5	35	45	45	10	28/12/2020	296,880.506	3.5
50	4	30	50	49	10	25/12/2020	307,876.080	3.6
51	3	35	48	47	10	25/12/2020	330,746.875	3.8
52	3	30	58	53	10	25/12/2020	386,290.233	4.3
53	3	30	51	50	10	28/12/2020	320,442.451	3.7
54	3	32	46	46	10	28/12/2020	283,631.362	3.4
55	3	32	50	49	10	28/12/2020	328,401.152	3.8
56	2.5	28	46	46	10	28/12/2020	248,177.442	3.0
57	3	26	46	46	10	28/12/2020	230,450.482	2.9

TOTAL 393.00

393.00

Fuente: Elaboración propia con información de trabajo de campo y procesamiento de la información.

Anexo 5: Comparativo de datos ajustados, peso fresco de HOJA (mediciones directas en campo) y aplicación de la ecuación alométrica (método indirecto).

Numero de muestra	Peso de la "hoja"(kg) (medición en campo)	Altura total de planta(cm)	Diámetro mayor de la "roseta"(cm)	Diámetro menor de la "roseta"(cm)	Tiempo de maduración (año)	Fecha de muestreo	Volumen (cm ³)	Peso hoja (ecuación alométrica)
1	19	57	75	70	7	02/06/2020	1,253,495.469	17.0
2	21	58	82	80	7	02/06/2020	1,593,750.897	21.2
3	15	60	73	70	7	02/06/2020	1,284,283.077	17.4
4	18	55	70	67	7	02/06/2020	1,080,498.433	15.0
5	17	60	75	72	7	02/06/2020	1,357,168.026	18.3
6	20	55	68	67	7	02/06/2020	1,049,627.050	14.6
7	19	57	82	82	7	02/06/2020	1,605,429.244	21.3
8	15	56	77	72	7	02/06/2020	1,300,468.562	17.6
9	14	55	62	58	7	02/06/2020	828,458.927	11.9
10	16	57	70	69	7	02/06/2020	1,153,215.831	15.8
11	15	50	69	68	7	31/12/2020	982,690.182	13.8
12	14	50	70	70	7	02/06/2020	1,026,253.600	14.3
13	15	49	63	62	7	02/06/2020	801,709.312	11.6
14	14	45	60	58	7	31/12/2020	655,964.546	9.8
15	13	50	70	70	10	19/03/2020	1,026,253.600	14.3
16	12	48	70	64	7	02/06/2020	900,757.446	12.8
17	12	52	65	61	7	31/12/2020	863,644.764	12.3
18	13	55	60	58	7	31/12/2020	801,734.445	11.6
19	12	47	66	63	10	19/03/2020	818,598.515	11.8
20	12	50	65	63	10	19/03/2020	857,654.794	12.3
21	12	56	59	58	7	02/06/2020	802,706.245	11.6
22	12	48	54	50	7	02/06/2020	542,867.211	8.5
23	11	47	56	53	10	19/03/2020	584,319.478	9.0
24	8	49	58	56	10	19/03/2020	666,654.339	10.0
25	10	45	56	53	7	31/12/2020	559,454.820	8.7
26	9	45	52	52	7	31/12/2020	509,691.992	8.1
27	8	47	60	60	10	19/03/2020	708,743.303	10.5
28	8	46	57	51	10	19/03/2020	560,133.404	8.7
29	8	31	58	57	10	28/12/2020	429,292.353	7.1
30	8	42	53	52	7	02/06/2020	484,860.844	7.8

31	7	44	60	56	10	19/03/2020	619,270.744	9.4
32	7	41	57	56	10	19/03/2020	548,195.352	8.5
33	8	35	57	53	10	25/12/2020	442,901.732	7.3
34	7	30	48	46	10	25/12/2020	277,465.463	5.3
35	7	30	58	57	10	28/12/2020	415,444.213	6.9
36	6	46	56	56	10	19/03/2020	604,258.120	9.2
37	5	32	43	41	10	28/12/2020	236,314.788	4.8
38	5	30	60	60	10	28/12/2020	452,389.342	7.4
39	7	30	47	45	10	28/12/2020	265,778.738	5.1
40	7	25	54	53	10	28/12/2020	299,707.939	5.5
41	6	42	55	53	10	25/12/2020	512,833.585	8.1
42	6	30	49	49	10	28/12/2020	301,718.558	5.6
43	6	38	50	50	10	25/12/2020	397,935.069	6.7
44	6	30	50	48	10	25/12/2020	301,592.895	5.6
45	5	27	51	48	10	28/12/2020	276,862.277	5.3
46	5	29	50	49	10	28/12/2020	297,613.544	5.5
47	5	26	56	53	10	28/12/2020	323,240.563	5.8
48	6.5	27	57	54	10	28/12/2020	348,113.599	6.1
49	5.5	28	44	42	10	28/12/2020	216,744.760	4.5
50	5.5	29	49	46	10	28/12/2020	273,804.461	5.2
51	5	35	45	45	10	28/12/2020	296,880.506	5.5
52	4.5	30	50	49	10	25/12/2020	307,876.080	5.6
53	5	35	48	47	10	25/12/2020	330,746.875	5.9
54	5	30	58	53	10	25/12/2020	386,290.233	6.6
55	5	30	51	50	10	28/12/2020	320,442.451	5.8
56	4.5	32	46	46	10	28/12/2020	283,631.362	5.4
57	4	32	50	49	10	28/12/2020	328,401.152	5.9
58	4	28	46	46	10	28/12/2020	248,177.442	4.9
59	3.5	26	46	46	10	28/12/2020	230,450.482	4.7

TOTAL 563.00

563.00

Fuente: Elaboración propia con información de trabajo de campo y procesamiento de la información.

Anexo 6: Instrucciones realizadas en el programa R, interfaz gráfica R-Comander para generar el modelo de regresión lineal simple del *Agave potatorum*.

Estadísticos/ Resúmenes /Matriz de correlaciones

En la Figura 1 (a y b), se observa la correlación de tipo Pearson entre dos variables que resulta positiva y bastante elevada:

Figura 1. Correlación de peso de piña y hoja (a y b).

a) Correlación Peso de piña y Volumen (cm³)

```
> cor(Dataset[,c("Peso.de.la..piña..kg.", "Volumen..cm³.")] , use="complete")
              Peso.de.la..piña..kg.  Volumen..cm³.
Peso.de.la..piña..kg.             1.0000000      0.9333853
Volumen..cm³.                    0.9333853      1.0000000
```

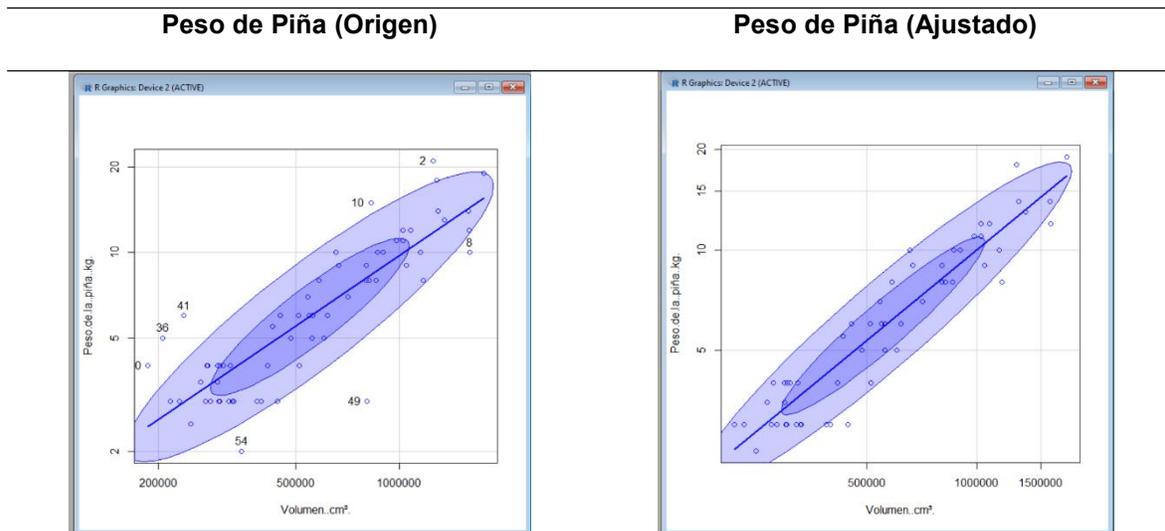
b) Correlación Peso de hoja y Volumen (cm³)

```
> cor(Dataset[,c("Peso.de.la..hoja..kg.", "Volumen..cm³.")] , use="complete")
              Peso.de.la..hoja..kg.  Volumen..cm³.
Peso.de.la..hoja..kg.             1.0000000      0.9274356
Volumen..cm³.                    0.9274356      1.0000000
```

Fuente: Elaboración propia con datos procesados en R Comander.

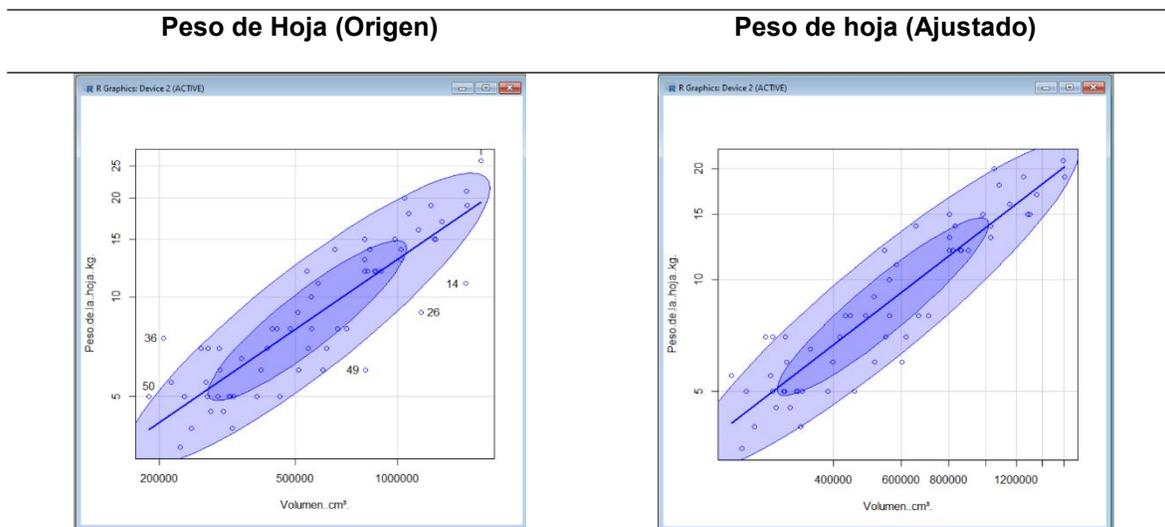
Visualmente, la correlación entre dos variables se puede comprobar mediante un diagrama de dispersión de las variables X e Y, el gráfico resultante (Figura 2 y 3), las diferencias verticales entre cada observación y la recta estimada son los residuos. Cuanto más reducidos sean estos, mejor será el ajuste de la estimación del modelo, para ello se excluyeron 8 datos de origen de peso de piña y de 6 datos para peso de hoja de un total de 65 datos.

Figura 2. Grafica de diagrama de dispersión (Piña).



Fuente: Elaboración propia con datos procesados en R Comander.

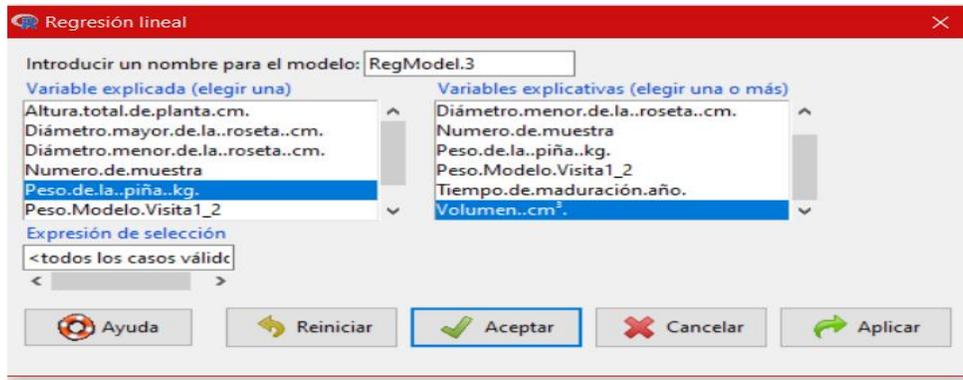
Figura 3. Grafica de diagrama de dispersión (Hoja).



Fuente: Elaboración propia con datos procesados en R Comander.

Para la estimación del modelo de regresión (Figura 4), se calcula los coeficientes del modelo y su coeficiente de determinación (R²):

Figura 4 Regresión lineal.



Fuente: Elaboración propia con datos procesados en R Comander.

Se comparó cada variable independiente para determinar el coeficiente de correlación más elevado para disminuir el error en la predicción de la variable dependiente del peso de piña en el cuadro 1 y en el cuadro 2 los rangos resultantes ajustados por cada variable independiente.

Cuadro 1. Variables independientes para la generación del modelo de regresión de peso de piña.

Variables	Peso de Piña (Origen)		Peso de Piña (Ajustado)	
	r	r ²	r	r ²
Altura de planta (cm)	0.6948	0.6995	0.7534	0.7578
Diámetro de cobertura (cm)	0.6401	0.6456	0.8105	0.8139
Relación Altura/Cobertura	0.7271	0.7355	0.8528	0.8580
Volumen (cm ³)	0.7399	0.7440	0.8689	0.8712

Fuente: Elaboración propia con datos procesados en R Comander.

Cuadro 2. Rangos de variación de las variables independientes ajustados del peso de piña.

Variable	Valor mínimo	Valor máximo
Altura de planta (Cm)	25	65
Diámetro de cobertura (Cm)	43	81
Peso de piña (kg)	2.5	19

Fuente: Elaboración propia con datos de trabajo de campo.

Procedimiento similar para el peso de la hoja en el cuadro 3 y cuadro 4

Cuadro 3. Variables independientes para la generación del modelo de regresión de peso de hoja.

Variables	Peso de Hoja (Origen)		Peso de Hoja (Ajustado)	
	r	r²	r	r²
Altura de planta (cm)	0.7030	0.7030	0.7637	0.7678
Diámetro de cobertura (cm)	0.6829	0.6829	0.7688	0.7728
Relación Altura/Cobertura	0.7526	0.7526	0.8488	0.8540
Volumen (cm ³)	0.7708	0.7708	0.8577	0.8601

Fuente: Elaboración propia con datos procesados en R Comander.

Cuadro 4. Rangos de variación de las variables independientes con datos ajustados del peso de la hoja.

Variable	Valor mínimo	Valor máximo
Altura de planta (Cm)	25	60
Diámetro de cobertura (Cm)	42	82
Peso de hoja (kg)	3.5	21

Fuente: Elaboración propia con datos de trabajo de campo.

Estadísticos/ Ajustes de modelos/ Regresión lineal

Peso de piña

Figura 5. Resultado Regresión lineal del modelo ajustado (Piña).

```
Salida
Call:
lm(formula = Peso.de.la..piña..kg. ~ Volumen..cm³., data = Dataset)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-3.7671 -0.7085  0.0141  0.7448  5.1858

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  0.6811447615 0.3744715818   1.819  0.0744 .
Volumen..cm³. 0.0000094474 0.0000004898  19.288 <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 1.442 on 55 degrees of freedom
(3 observations deleted due to missingness)
Multiple R-squared:  0.8712, Adjusted R-squared:  0.8689
F-statistic: 372 on 1 and 55 DF, p-value: < 2.2e-16
```

Fuente: Elaboración propia con datos procesados en R Comander.

Peso de hoja

Figura 6. Resultado Regresión lineal del modelo ajustado (Hoja).

```
Salida
Call:
lm(formula = Peso.de.la..hoja..kg. ~ Volumen..cm³., data = Dataset)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-3.2186 -1.1776 -0.2705  0.9382  5.4107

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  1.9317543909 0.4692772355   4.116 0.000125 ***
Volumen..cm³. 0.0000120591 0.0000006441  18.723 < 2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 1.801 on 57 degrees of freedom
(3 observations deleted due to missingness)
Multiple R-squared:  0.8601, Adjusted R-squared:  0.8577
F-statistic: 350.5 on 1 and 57 DF, p-value: < 2.2e-16
```

Fuente: Elaboración propia con datos procesados en R Comander.

El resultado es un amplio resumen de la regresión.

Modelos/ Intervalos de confianza

La manera alternativa de estudiar la significación individual de los parámetros estimados es el cálculo de intervalos de confianza (Figura 7 y 8); tomado un nivel confianza del 95% (es decir, una significación del 5%).

Figura 7. Procedimiento Intervalo de confianza.



Fuente: Elaboración propia con datos procesados en R Comander.

Peso piña

Figura 8. Intervalo de confianza al 95% peso de piña.

```
> Confint(RegModel.4, level=0.95)
              Estimate      2.5 %      97.5 %
(Intercept)  0.6811447615 0.6811447615 0.6811447615
Volumen..cm³. 0.0000094474 0.0000094474 0.0000094474
```

Fuente: Elaboración propia con datos procesados en R Comander.

Peso hoja

Figura 9. Intervalo de confianza al 95% peso de hoja.

```
> Confint(RegModel.2, level=0.95)
              Estimate      2.5 %      97.5 %
(Intercept)  1.93175439088 0.99204293593 2.87146584584
Volumen..cm³. 0.00001205911 0.00001076934 0.00001334887
```

Fuente: Elaboración propia con datos procesados en R Comander.