



Fondo
CONACYT
CONAFOR



UJED
Universidad Juárez
del Estado de Durango



CONAFOR



CONACYT
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología



inifap
Instituto Nacional de Investigaciones
Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Mejores prácticas de manejo y ecuaciones alométricas de biomasa de *Dasyllirion* *leiophyllum* en el estado de Chihuahua



Comisión Nacional Forestal

Coordinación General de Producción y Productividad

Gerencia de Manejo Forestal Comunitario

Unidad de Educación y Desarrollo Tecnológico

Periférico Poniente 5360

Colonia San Juan de Ocotán Zapopan, Jalisco C.P. 45019

Tel: 01 (33) 3777 7000

Proyecto apoyado a través del Fondo Sectorial para la Investigación, el Desarrollo y la Innovación Tecnológica Forestal CONACYT-CONAFOR:

2017-4-292674

Mejores prácticas de manejo y generación de tablas de volumen y biomasa para las principales especies forestales no maderables de importancia económica en los ecosistemas áridos y semiáridos de México.

Autores: Dr. Pablito Marcelo López Serrano¹, M.C. Adrián Hernández Ramos², Dr. Jorge Méndez González³, Dr. Martin Martínez Salvador⁴, Dr. Oscar Aguirre Calderón⁵, Dr. Benedicto Vargas Larreta⁶ y Dr. José Javier Corral Rivas¹.

¹Universidad Juárez del Estado de Durango (UJED), ²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ³Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), ⁴Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH) y ⁵Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), ⁶Instituto Tecnológico de El Salto (ITES).

Impreso en México

Primera edición, 2021.

Forma de citar:

López-Serrano, P.M., Hernández-Ramos, A., Méndez-González, J., Martínez-Salvador, M., Aguirre-Calderón, O., Vargas-Larreta, B., Corral-Rivas J.J. 2021. Mejores prácticas de manejo y ecuaciones alométricas de biomasa de *Dasyliroia leiophyllum* en el estado de Chihuahua. Proyecto: 2017-4-292674. CONAFOR-CONACYT. México.

PRESENTACIÓN

En la última década se ha visto reflejada la importancia del estudio, manejo y aprovechamiento de especies provenientes de zonas áridas y semiáridas de México, en especial las que poseen interés comercial, por ser pioneras en el sustento de las familias que habitan en estas regiones y realizan su aprovechamiento como una de las fuentes para mejorar su ingreso familiar. En este documento se hace referencia a la especie *Dasyilirion leiophyllum* por poseer la principal fuente de abastecimiento para la producción de la bebida alcohol denominada sotol. Dicho producto forestal no maderable representa el principal interés económico para empresas comercializadoras.

Dependencias gubernamentales como la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), instituciones educativas y de investigación como la Universidad Juárez del Estado de Durango (UJED), la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH), la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) y el Instituto Tecnológico de El Salto (ITES), en su afán de contribuir a mejorar el manejo y aprovechamiento de los recursos forestales no maderables, han diseñado el presente documento denominado “Mejores prácticas de manejo y ecuaciones alométricas de biomasa de *Dasyilirion leiophyllum* en el estado de Chihuahua”, con el fin

de que se utilice como una herramienta técnica de apoyo para los técnicos y productores de zonas áridas, promoviendo su aprovechamiento con el mínimo impacto ambiental en zonas donde habita la especie. Al mismo tiempo se busca aprovechar el máximo potencial productivo (dadas las condiciones medioambientales), favoreciendo las condiciones de vida de los habitantes de las zonas áridas y semiáridas, aplicando criterios que logren la máxima productividad, prospere la regeneración y mantenga la conservación de dicha especie.

El interés colectivo para el desarrollo y generación de herramientas tecnológicas (como mejores prácticas de manejo y ecuaciones alométricas de biomasa) es un paso significativo para quienes trabajan activamente en el cuidado del medio ambiente y la conservación de los recursos aprovechando su máximo potencial productivo.

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	5
2.	LEGISLACIÓN PARA EL APROVECHAMIENTO FORESTAL DE LA ESPECIE.....	8
2.1.	Procedimientos legales para la autorización del aprovechamiento forestal no maderable de <i>Dasyllirion leiophyllum</i>	8
2.2.	Leyes y normas	10
3.	INVENTARIO FORESTAL CON FINES DE MANEJO	17
3.1.	Técnicas de muestreo para la evaluación de las poblaciones naturales de la especie	17
4.	MEJORES PRÁCTICAS DE MANEJO	22
4.1.	Mejoras en las técnicas de aprovechamiento de la especie	22
4.2.	Mejoras en las técnicas de extracción y beneficio del producto final	23
4.3.	Reforestación con fines de enriquecimiento de rodales	24
5.	ECUACIONES ALOMÉTRICAS DE BIOMASA	29
5.1.	Ecuaciones de biomasa para el estado	32
6.	MAPAS DE DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DE LA ESPECIE....	37
7.	CONCLUSIONES.....	40
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	41
9.	GLOSARIO	43
10.	SIGLAS Y ACRÓNIMOS.....	45

1. INTRODUCCIÓN

El sotol, *Dasyilirion spp.*, es una planta de media a robusta con un solo tallo o dos a tres ramas, hojas regulares y extendidas, glaucas de color gris pálido a verde pálido, de 80 a 100 cm de largo, y de 2 a 3.5 cm de ancho, asciende rectamente y deflexiona con la edad, plano encima, rotundamente quillado abajo, márgenes finamente denticulados, los dientes regularmente curvados hacia la punta, de 3 a 4 mm de largo, amarillo pálido a rojizo.

Las especies de este género han sido históricamente utilizadas para la producción de la bebida conocida como “sotol” por los pobladores. En los últimos años la demanda del sotol se ha incrementado considerablemente, por lo que las poblaciones naturales de esta especie se ven amenazadas, principalmente en los estados de Durango, Coahuila y Chihuahua.

Sierra (2004), reporta que existen 21 especies llamadas sotol en México, de las cuales las que tienen mayor distribución en el estado de Chihuahua son *Dasyilirion leiophyllum*, *Dasyilirion wheeleri*, *Dasyilirion sereque* y *Dasyilirion cedrosanum*. Con base en los recorridos de campo realizados en las zonas áridas y semiáridas del estado de Chihuahua, las poblaciones más abundantes de sotol son las de *Dasyilirion leiophyllum*.

Los sotoleros del estado de Chihuahua que elaboran la bebida en la zona del semidesierto, en ocasiones colectan más de una especie con las cuales realizan los procesos de destilación. Aunque generalmente la bebida si se elabora a nivel de especie,

pues las cargas de cabezas de sotol provienen del mismo predio, lo que representa que las plantas colectadas fueron seguramente de la misma población o especie. Este tipo de confusiones han sido un punto controversial para el etiquetado del producto, adicionalmente que, al tratarse de plantas dioicas, existen algunas sugerencias de algunos autores, quienes coinciden en que las especies de sotol se han cruzado y han generado hibridaciones, las cuales se han distribuido en algunas regiones donde confluyen dos o más especies del género *Dasyllirion*.

Por otra parte, en los últimos años, el consumo de la bebida conocida como sotol se ha introducido en los mercados nacional e internacional, por lo que los productores de sotol requieren cubrir mayores cantidades de producto, lo cual ha contribuido a un aprovechamiento más intensivo de las especies de sotol en el estado. En los últimos años este incremento en la demanda del producto ha generado que los productores que elaboraban sotol de manera tradicional hayan iniciado un proceso de incorporación de tecnología en sus fábricas, con la intención de intensificar los procesos de producción. Esta situación ha generado la necesidad de conocer a detalle la distribución potencial y real de las poblaciones de sotol, así como la estimación de las posibles existencias de la especie.

Por otra parte, es importante incorporar programas con prácticas de manejo y aprovechamiento sustentable de la especie, de tal manera que se evite continuar con la presión comercial sobre las poblaciones actuales de las plantas de sotol en los ecosistemas silvestres.

2. LEGISLACIÓN PARA EL APROVECHAMIENTO FORESTAL DE LA ESPECIE

2.1. Procedimientos legales para la autorización del aprovechamiento forestal no maderable de *Dasyllirion leiophyllum*.

De acuerdo con el artículo 85 de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (LGDFS, 2021), y el artículo 72 del Reglamento de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (RLGDFS, 2020), este recurso forestal no maderable requiere de una autorización de aprovechamiento, que se obtiene mediante solicitud que se presenta ante la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), mediante un formato que contenga el nombre, denominación o razón social y domicilio del propietario o poseedor del predio o conjunto de predios y, en su caso, número de oficio de la autorización en materia de impacto ambiental. El procedimiento y requisitos para la autorización del aprovechamiento de *Dasyllirion leiophyllum*, se muestran en la Figura 1.

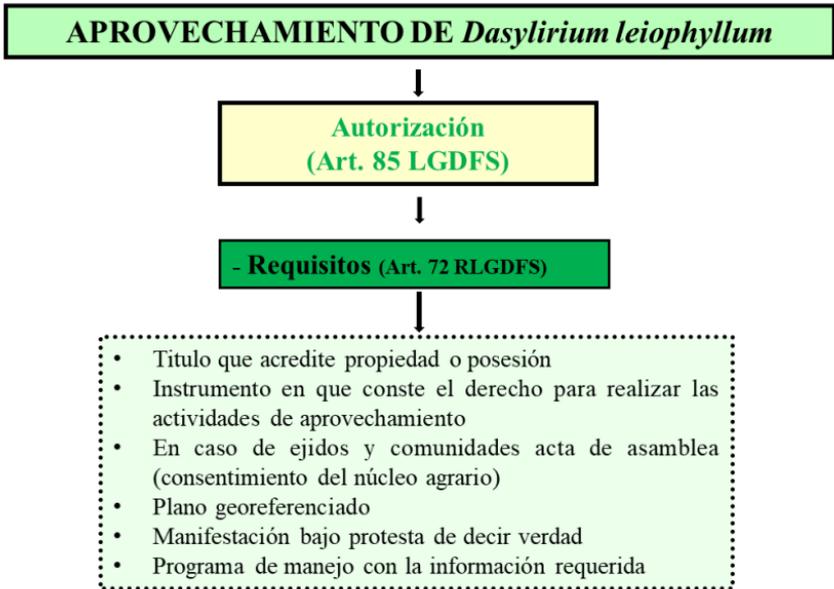


Figura 1. Requisitos que debe contener la autorización para el aprovechamiento de *Dasylium leiophyllum* en México.

2.2. Leyes y normas

Leyes vigentes

La legislación vigente que se describe a continuación, regula el aprovechamiento de *Dasyilirion leiophyllum*.

Leyes y Reglamentos	Artículos
<p>Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA)</p> <p>Esta Ley hace referencia a temas del aprovechamiento sustentable y la preservación de este recurso forestal no maderable.</p>	<p>1, 3, 15, 84, 87 y 100.</p>
<p>Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (LGDFS)</p> <p>Legisla el fomento a la silvicultura, el manejo y regulación del aprovechamiento sustentable de los recursos forestales maderables y no maderables. Así como los documentos que se considerarán para acreditar la posesión o derecho para realizar las actividades mencionadas. Además de la ejecución, desarrollo y cumplimiento de los programas de manejo forestal y los estudios técnicos.</p>	<p>1, 3, 5, 7, 10, 21, 31, 39, 50, 53, 54, 55, 56, 59, 70, 84, 85, 91 y 97.</p>
<p>Reglamento de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (Reglamento de la LGDFS)</p>	<p>1, 2, 4, 12, 14, 18, 27, 30, 32, 33,</p>

Leyes y Reglamentos	Artículos
<p>Menciona los procedimientos y requisitos para las autorizaciones y avisos de aprovechamientos no maderables ante la Secretaría, quien resolverá las solicitudes de conformidad con lo dispuesto en la LGDFS y el presente Reglamento.</p>	<p>34, 38, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 98, 141, 164, 165 y 166.</p>
<p>Ley General de Vida Silvestre (LGVS) Legisla el aprovechamiento sustentable y conservación por parte de los propietarios de un predio, de la vida silvestre que se desarrolla libremente en su hábitat, incluyendo sus poblaciones menores e individuos que se encuentran bajo el control del hombre, así como las especies domésticas que, al quedar fuera de control del hombre, se establecen en el hábitat natural.</p>	<p>1, 3, 18, 19, 56, 83, 84 y 97.</p>
<p>Ley Agraria Estos artículos hacen mención a la personalidad jurídica de los núcleos de población ejidales o ejidos. Así como su organización económica y social para el aprovechamiento de las tierras de uso común.</p>	<p>9, 10, 73, 116 y 119.</p>

Leyes y Reglamentos	Artículos
<p>Ley Federal de Procedimiento Administrativo (LFPA).</p> <p>Menciona los actos, procedimientos y resoluciones administrativas de orden e interés públicos ante una Administración Pública Federal centralizada, sin perjuicio de lo dispuesto en los Tratados Internacionales de los que México sea parte. La Administración Pública Federal no podrá exigir más formalidades que las expresamente previstas en la ley. Se menciona de los requisitos de las promociones que realice el interesado o su representante legal.</p>	<p>1, 15, 15-A, 17-A, 19 y 43.</p>

Normas vigentes.

Las Normas Oficiales Mexicanas vigentes que se describen a continuación regulan el aprovechamiento del *Dasyliirion leiophyllum*.

NOM-005-SEMARNAT-1997

Norma Oficial Mexicana **NOM-005-SEMARNAT-1997** que establece los procedimientos, criterios y especificaciones para realizar el aprovechamiento, transporte y almacenamiento de cortezas, tallos y plantas completas de vegetación forestal.

Apartado	Especificaciones
Aprovechamiento	<p>Para realizar el aprovechamiento de corteza, tallos y plantas completas de vegetación forestal, el dueño o poseedor del predio correspondiente, deberá presentar una notificación por escrito ante la Delegación Federal o Secretaría en la entidad federativa correspondiente, misma que podrá ser anual o por un periodo máximo de 5 años.</p>
	<p>El aprovechamiento de cogollos quedará sujeto a los siguientes criterios y especificaciones técnicas:</p> <ol style="list-style-type: none"> I. Sólo se podrán aprovechar plantas en la etapa de madurez de cosecha.

Apartado	Especificaciones
	<p>II. Deberá dejarse distribuido uniformemente, en el área de aprovechamiento sin intervenir, como mínimo el 20% de las plantas en etapa de madurez de cosecha, para propiciar la regeneración por semillas;</p> <p>Cuando se aprovechen plantas completas de otras especies diferentes a las mencionadas en la presente Norma, el responsable técnico establecerá los criterios y especificaciones técnicas en la notificación respectiva.</p>
Del almacenamiento	<p>Los responsables de los centros de almacenamiento deberán:</p> <p>I. Solicitar la inscripción de los mismos en el Registro Forestal Nacional, acreditando su personalidad.</p> <p>II. Informar trimestralmente dentro de los primeros 10 días hábiles de los meses de abril, julio, octubre y enero de cada año, a la Delegación Federal de la Secretaría en la entidad federativa correspondiente, sobre las entradas y salidas del producto</p>

Apartado	Especificaciones
	durante el trimestre inmediato anterior.
Transporte	El transporte de corteza, tallos y plantas completas, desde el predio bajo aprovechamiento, hacia los centros de almacenamiento o de transformación, se realizará al amparo de remisión o factura comercial, expedida por el dueño o poseedor del recurso, o el responsable del centro de almacenamiento, siempre y cuando dicho producto se transporte en cualquier vehículo automotor.

NOM-152-SEMARNAT-2006

Norma Oficial Mexicana **NOM-152-SEMARNAT-2006**, que establece los lineamientos, criterios y especificaciones de los contenidos de los programas de manejo forestal para el aprovechamiento de recursos forestales maderables en bosques, selvas y vegetación de zonas áridas.

En el apartado 5 de la Norma, se describen los criterios y especificaciones de los contenidos de los programas de manejo, así como en el apartado 6, se hace mención de la estructura para la presentación del programa de manejo.

Apartado	Especificaciones
Aprovechamiento no maderable	<p>Cuando se pretenda solicitar una autorización de aprovechamiento de Recursos Forestales No Maderables, para los recursos indicados en el artículo 85 de la Ley (LGDFS). De acuerdo con el artículo 72 del Reglamento (RLGDFS), las solicitudes se presentarán ante la Secretaría y contendrán el nombre o denominación o razón social y domicilio del interesado. En su caso, se señalará el número de oficio y fecha de la autorización en materia de impacto ambiental. Asimismo, con la solicitud a que se refiere el presente artículo deberá presentarse un programa de manejo forestal (Artículo 72, fracción VI), con los requisitos que se establecen en el artículo 73 del Reglamento (RLGDFS).</p>

3. INVENTARIO FORESTAL CON FINES DE MANEJO

La planificación para el manejo de cualquier recurso requiere en primer lugar un conocimiento del mismo, de las restricciones posibles para su utilización y de los medios disponibles. Con ello se pueden evaluar, en pasos sucesivos, alternativas de manejo que conduzcan al logro de los objetivos planteados. La planificación forestal se inicia, por tanto, con una toma de datos a través de un inventario (Madrigal, 1994). Para hacer extensivo el aprovechamiento de las especies no maderables de zonas áridas y semiáridas de manera sustentable, es indispensable el desarrollo de un inventario que proporcione datos confiables de ubicación, existencias reales y magnitud del recurso, así como la estimación y monitoreo de la tasa de crecimiento anual, biomasa y la productividad (López, 2005).

3.1. Técnicas de muestreo para la evaluación de las poblaciones naturales de la especie

Los programas de manejo para el aprovechamiento forestal de esta especie no maderable requieren del uso de técnicas de muestreo que permitan la estimación de la estructura poblacional y existencias reales de acuerdo con las especificaciones que se mencionan en la NOM-152-SEMARNAT-2006.

Para el inventario de *Dasyllirion leiophyllum* se debe de entrar al contexto de las técnicas de muestreo para la evaluación de las poblaciones naturales de la especie, es necesario enfatizar primero los conceptos de catastro y división dasocrática. Donde

en el primer concepto se busca recabar toda la información necesaria acerca de un área o superficie de estudio conjuntando la documentación legal y planos geográficos para ubicarla en un espacio municipal, regional, estatal y nacional. Este procedimiento conlleva al análisis espacial de los vértices, linderos, superficies con apoyo de un Sistema de Información Geográfica (SIG), con reconocimiento en campo, si es necesario, para finalmente elaborar la cartografía temática del área de estudio. Por otra parte, el término de división dasocrática hace referencia a una unidad mínima de manejo que bien puede ser un rodal o un subrodal, entendiéndose a éstos como el área definida por características permanentes como el suelo, pendiente, parteaguas y arroyos. El rodal es la unidad básica de manejo y sobre todo de seguimiento a las variables forestales a través del tiempo y como tal, debe ser permanente a través de los ciclos de corta sucesivos, aun cuando haya cambios en la vegetación, tal como se establece en la NOM-152-SEMARNAT-2006.

Por múltiples circunstancias, las técnicas de muestreo de *Dasyllirion leiophyllum*, generalmente se usa el muestreo sistemático con una malla de puntos equidistantes a nivel predial o de unidad mínima de manejo y el muestreo con cuadrantes del punto central (Berlanga *et al.*, 1992a).

Por la forma de crecimiento de los individuos y la aplicabilidad que representa el muestreo sistemático en la evaluación de especies de zonas áridas y semiáridas, al representar menor costo y ser el de menor grado de dificultad comparado con el resto de técnicas de muestreo, en este manual se recomienda

utilizar la siguiente metodología de muestreo para *Dasyllirion leiophyllum*:

- 1. Diseño de muestreo.** Un muestreo sistemático con base en cuadrículas o grillas (a nivel predial o de unidad mínima de manejo). El procedimiento que generalmente se emplea es el siguiente: 1) en la cartografía elaborada para el área de estudio y con apoyo de sistemas de información geográfica, se genera una malla de puntos regulares (cuadrículas o grillas) distribuidos a una distancia prefijada por el responsable de la planeación del muestreo considerando las características fisiográficas y topográficas del terreno.
- 2. Número total de sitios a muestrear.** Dado que se tienen los puntos de muestreo definidos en el apartado anterior, el responsable de realizar el muestreo definirá el número de sitios a muestrear que servirá como un pre-muestreo para obtener los parámetros y estimadores que nos permitan determinar el tamaño de muestra en la fórmula o ecuación, tomando en cuenta que la normatividad requiere una confiabilidad mínima del 95% y un error de muestreo máximo de 10%.
- 3. Forma de los sitios.** La forma de los sitios recomendada es circular por tener ésta figura geométrica la conjunción de dos criterios básicos de muestreo: por un lado, la relación perímetro-superficie del sitio es mínima; de este modo, se consigue reducir los problemas que se presentan en los bordes de las parcelas para determinar si una planta debe ser incluido

o no; por otro lado, el número de puntos de referencia (centro o esquinas) del sitio debe reducirse siempre y cuando esto no suponga un inconveniente para su replanteo (Gadow y Hui, 1999).

- 4. Tamaño de los sitios expresados en metros cuadrados.** Las dimensiones de los sitios circulares recomendadas son 500 m^2 (radio = 12.6157 m) o de 1000 m^2 (radio = 17.8412 m). Entre más pequeño sea un sitio, más fácil y precisa será su delimitación.
- 5. Intensidad de muestreo en porcentaje.** La intensidad o fracción de muestreo es la relación porcentual de la superficie de la muestra con respecto a la superficie total. Normalmente, en inventarios forestales se han utilizado intensidades de muestreo del orden de 1%, 0.5% y 0.1%, dependiendo de varios factores; superficie por inventariar, factores económicos, precisión requerida, etcétera. Por ello, podemos definir la intensidad de muestreo de acuerdo a la precisión con la que deseamos medir las características de la población de estudio y el costo que esto conlleva, recomendándose en base a la experiencia de los autores una intensidad de muestreo mayor de 1% y hasta el 3%.
- 6. Información a medir.** En cada uno de los sitios se medirán las siguientes variables: Diámetro de cobertura Norte-Sur (D_{NS} , cm) y Diámetro de cobertura Este-Oeste (D_{EO} cm) y Altura total (H , cm). En gabinete se obtendrá el diámetro promedio de cada una de las plantas evaluadas. Empleando la ecuación alométrica

generada en el presente documento, se sustituye el valor de las variables indicadas y se obtiene el volumen o biomasa por individuo, por sitio o hectárea. Para ello, en el caso de estimaciones de biomasa o volumen promedio por sitio, se realiza la sumatoria de la biomasa o volumen total de cada sitio y se divide entre el número de ellos. Para estimaciones de biomasa o volumen promedio por hectárea ($\text{Ha}^{-1} = 10,000 \text{ m}^2$), el volumen o biomasa promedio por sitio se multiplica por un factor de superficie que depende del tamaño del sitio y se obtiene el correspondiente a una hectárea (Berlanga *et al.*, 1992).

4. MEJORES PRÁCTICAS DE MANEJO

Las siguientes mejores prácticas se realizaron con base en el diagnóstico de cómo se aprovecha actualmente la especie de *Dasyilirion leiophyllum* en el estado de Chihuahua, dentro del proyecto “Mejores prácticas de manejo y generación de tablas de volumen y biomasa para las principales especies forestales no maderables de importancia económica en los ecosistemas áridos y semiáridos de México” y estas son propuestas por un grupo de investigadores de la Universidad Juárez del Estado de Durango (UJED), la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH), la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) y el Instituto Tecnológico de El Salto (ITES).

4.1. Mejoras en las técnicas de aprovechamiento de la especie

Las principales prácticas necesarias para el mejor aprovechamiento del *Dasyilirion leiophyllum* en el estado de Chihuahua son las siguientes:

- Incorporar los predios con presencia de las especies de sotol a programas de manejo forestal siguiendo la reglamentación vigente.
- Conocer a detalle la estructura de las comunidades arbustivas, procurando no alterar las proporciones de

las diferentes especies que se encuentran en el ecosistema silvestre en el que crece el sotol.

- Durante los periodos de cosecha poner especial atención y cosechar principalmente las plantas macho, y protegiendo hasta donde sea posible las plantas hembra.
- Fomentar la corta de cabezas de 10 a 30 kg de peso ya que cabezas mayores a 40 kg contienen menos grados brix, y se promovería la reproducción sexual de la especie y diseminación por semilla.
- Reforestar el doble de plantas extraídas exactamente en el lugar de corta de cada cabeza, ya que esos lugares cuentan con las características idóneas para el desarrollo de la planta.
- Utilizar solo individuos en etapa fenológica óptima para la producción, y determinar época o épocas óptimas de cosecha donde la planta tenga más contenidos de azúcares. Esta etapa se encuentra fuera del periodo de lluvia. Esto es, en los meses de diciembre a julio.
- Evitar la acumulación de material combustible en las áreas de distribución del sotol y proteger los rodales sotoleros de la presencia del fuego

4.2. Mejoras en las técnicas de extracción y beneficio del producto final

El procedimiento de extracción de las plantas de sotol en campo se realiza con una herramienta llamada “*coa*” afilada y

encorvada, la cual permite al recolector extraer de una manera fácil y sencilla las cabezas de sotol.

Una recomendación importante es que la cosecha de sotol se realice en la temporada de sequía y frío, esto es en los meses de diciembre a julio. Durante el proceso de extracción es muy importante poner especial atención en el sexo de las plantas, por lo que se recomienda extraer principalmente plantas macho, y cuidar una buena proporción de plantas hembra, ya que estas serán capaces de producir las semillas necesarias para la regeneración de la especie. También es recomendable realizar obras de protección del suelo y la cosecha de agua para promover la germinación de las semillas en el ecosistema natural. Finalmente, es importante no modificar la estructura y composición de las comunidades arbustivas, lo cual permitirá lograr una composición adecuada para tener suficientes plantas que puedan nodrizar a las semillas recién germinadas de sotol. Se recomienda que, en estos casos de procesos de cocimiento, fermentación, destilación y envasado del producto, se respete estrictamente la regulación nacional e internacional para el correcto cumplimiento de estos procesos.

4.3. Reforestación con fines de enriquecimiento de rodales

En las áreas con aprovechamiento del sotol se ha observado la regeneración natural del recurso, sin embargo, este es un proceso lento por naturaleza y dado que estas áreas no cuentan con un programa de ordenamiento del territorio, dichas superficies se encuentran abiertas al pastoreo, lo que dificulta

aún más el éxito de la regeneración natural del sotol. Así mismo, existe poca información en cuanto a la regeneración, propagación y uso del sotol como materia prima para reforestaciones ya sea con fines económicos, culturales o ecológicos, siendo que la propagación *in vitro* de esta especie a partir de tejidos y uso de técnicas biotecnológicas, es el único avance en esta materia. Para el establecimiento de reforestaciones con fines de enriquecimiento de rodales de *Dasyilirion leiophyllum* se ha realizado una serie de recomendaciones prácticas que aseguran un mejor resultado de las mismas y que pueden ser aplicadas en cualquier condición favorable de la especie (Castillo *et al.*, 2005; Castillo *et al.*, 2012), por lo que, se recomienda su uso, seguimiento y aplicación de acuerdo con los mapas de distribución potencial mostrados en el presente documento, que indican los lugares con mayor idoneidad climática para el desarrollo de la especie. Estos lugares poseen suelos regularmente poco profundos, lomeríos pedregosos con pendientes suaves o bien suelos planos ligeramente pedregosos con buenas condiciones de drenaje y libres de salinidad. Los pasos a seguir para la reforestación con fines de enriquecimiento de rodales de *Dasyilirion leiophyllum*, se describen a continuación:

- 1. Selección de material para la reforestación:** para lograr que la planta sobreviva en campo, se recomienda extraer las semillas de los individuos con buenas características fenotípicas del área de aprovechamiento, asegurando así la resistencia en de la misma. El sotol es una planta perenne, de reproducción por semilla de

origen sexual. Desde la germinación hasta la primera floración, al contrario de lo que ocurre con el agave, las plantas de sotol continúan vivas después de la floración, lo que permite que ocurra un número indeterminado de veces durante su ciclo de vida. Su función reproductiva requiere la presencia de plantas pistiladas y estaminadas, lo cual hace que la reproducción cruzada sea obligada (Figura 2).

2. **Preparación del terreno:** Esta actividad asegura una gran parte del éxito esperado en el establecimiento de la reforestación por lo que se recomienda: sí el lugar de establecimiento fuera inclinado o presentara pendientes ligeras, realizar la reforestación en línea a una zanja bordo con terraza individual, realizar cajete o media luna opuesta a la pendiente con el fin de asegurar la captación de agua. Si el lugar de establecimiento fuera casi plano se recomienda realizar obras de subsuelo como el barbecho, rastreo y surcos a nivel, ubicando la planta aguas arriba del surco. Realizar un barbecho y rastreo en el terreno, favorece el crecimiento y desarrollo de la planta; dichas acciones contribuyen a elevar la producción de fibra y reducir el turno técnico (Castillo *et al.*, 2005; Berlanga *et al.*, 1992).
3. **Densidad de reforestación:** en este punto es importante optimizar el espacio de producción para que las plantas crezcan a su máximo potencial, y para que ocupen el sitio de manera óptima, la distancia de la reforestación recomendada será de 1.5 metros entre

plantas, buscando al menos una densidad de reforestación de 4500 plantas por hectárea.

4. **Establecimiento de la reforestación:** Antes de establecer la planta en campo, se sugiere elaborar terrazas individuales a cada planta para la colecta de humedad, así como el procedimiento de cepa común. Se extrae la planta de la bolsa, cortando la bolsa con un cutter o navaja filosa, y colocando la planta con mucho cuidado en la cepa. Posteriormente aplicar un riego. O realizar la reforestación durante la temporada de lluvias.
5. **Labores culturales (Riegos, fertilización y deshierbe).** La fertilización es recomendable hacerla aplicando nitrógeno y fosforo para mantener sana a la planta. La dosis de fertilización es recomendable consultarla posterior a un análisis de fertilidad de suelos. Si es posible realizar riegos, estos deben realizarse durante la época de sequía entre los meses de febrero y julio. Al menos dos riegos por año.
6. **Control de plagas y enfermedades.** Es importante estar en constante monitoreo de las plantas de sotol, para evitar que pudieran enfermarse o generar umbrales riesgosos de plagas. En caso de la presencia de alguna plaga o enfermedad será muy importante atenderla, consultado a técnicos especializados en el control de plagas y enfermedades agrícolas.

- 7. Mantenimiento de la reforestación.** En los primeros años, será importante realizar reposición de planta, y durante el crecimiento de la misma es importante, continuar con las labores culturales para que la reforestación se mantenga sana.

5. ECUACIONES ALOMÉTRICAS DE BIOMASA

Los modelos de predicción presentados en este documento son ecuaciones alométricas que proporcionan estimaciones fiables de biomasa de *Dasyllirion leiophyllum*. Representan una herramienta útil para la gestión forestal, ya que permiten la estimación de la biomasa total en kilogramos o por fracciones (componentes), con variables fáciles de medir en campo, como la altura y cobertura de la planta. El uso y aplicación de estas ecuaciones permiten estimar el valor de cada componente de manera indirecta antes del aprovechamiento de la planta, y dado que se trata de un método de cuantificación no destructivo, su impacto ecológico es prácticamente nulo.

El muestreo utilizado para el desarrollo de las ecuaciones alométricas de biomasa consistió en seleccionar aleatoriamente 150 individuos en el estado, los cuales fueron muestreados considerando sus dimensiones estructurales (altura de la planta y diámetros de cobertura) siguiendo una distribución uniforme; es decir tratando que fuera la misma cantidad de individuos en todas las categorías de diámetro de cobertura y altura. Para cada individuo se midieron en pie la altura total (H, cm) y el diámetro de la cobertura (DC, cm). Una vez derribados, se separaron las siguientes fracciones de biomasa: piña, pencas verdes y pencas secas. Cada fracción se pesó en verde utilizando una báscula con una precisión de ± 1 g (ver Figuras 2). Para el desarrollo de las ecuaciones se probaron diferentes combinaciones de variables predictivas o independientes (diámetro de cobertura (DC) y altura (H)). Se ajustaron

diferentes modelos lineales y no lineales por el método mínimos cuadrados empleando el procedimiento MODEL del programa SAS/STAT® (SAS Institute Inc., 2009); y el método iterativo de Gauss-Newton. Posteriormente, se seleccionaron los mejores modelos por componente en peso verde de la pña y se ajustaron simultáneamente para garantizar la aditividad, característica que se recomienda en las ecuaciones desarrolladas para la estimación de biomasa de los distintos componentes, y que implica que la suma de las estimaciones de los diferentes componentes sea igual a la estimación de biomasa total del propio sistema.

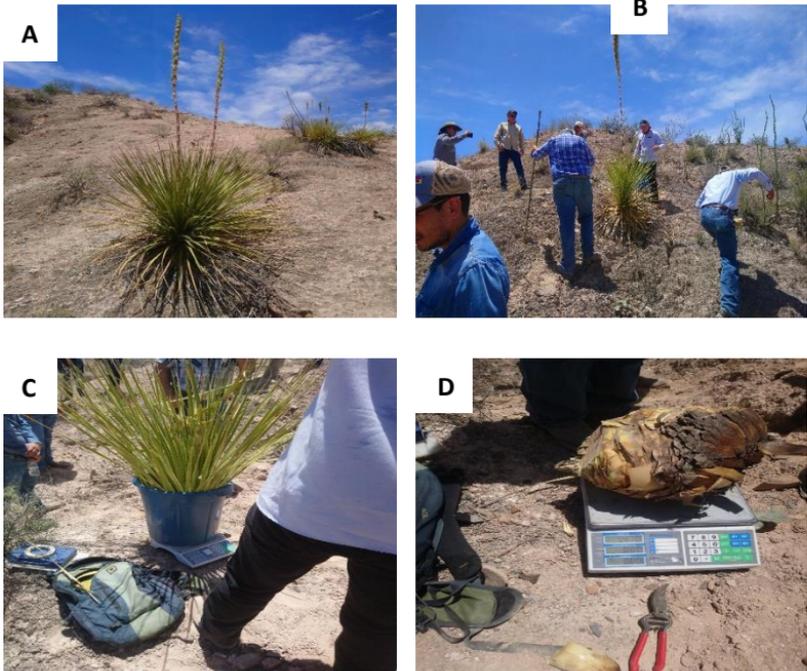


Figura 2. Muestreo realizado en el estado de Chihuahua. A) Planta completa muestreada, B) Ubicación de la planta, C) Peso de las pencas verdes, D) Peso de la piña verde.

5.1. Ecuaciones de biomasa para el estado

En el Cuadro 1 se muestran las estadísticas descriptivas de la piña verde de los individuos muestreados para desarrollar las ecuaciones alométricas para la estimación de la biomasa por componente y/o total de la planta en el estado de Chihuahua. En la Figura 3, se muestra la distribución de las dimensiones de la cobertura y la altura de las plantas muestreadas.

Cuadro 1. Resumen descriptivo de la muestra de *Dasyllirion leiophyllum* colectada en el estado de Chihuahua.

Variable	No. Obs	Media	Std	Min.	Max.
<i>DC (cm)</i>	150	157.62	30.19	61.00	242.00
<i>H (cm)</i>	150	131.02	24.36	64.00	220.00
<i>Piña verde (kg)</i>	150	7.31	5.64	0.60	38.20

Dónde: No. Obs= número de observaciones; Std= desviación estándar; Min= valor mínimo; Max= valor máximo.

Las expresiones matemáticas, la estimación de los parámetros y los estadísticos de ajuste de las ecuaciones alométricas aditivas desarrolladas para estimación de peso verde por componente y total de *Dasyllirion leiophyllum* en el estado de Chihuahua se muestra en los Cuadros 2 y 3.

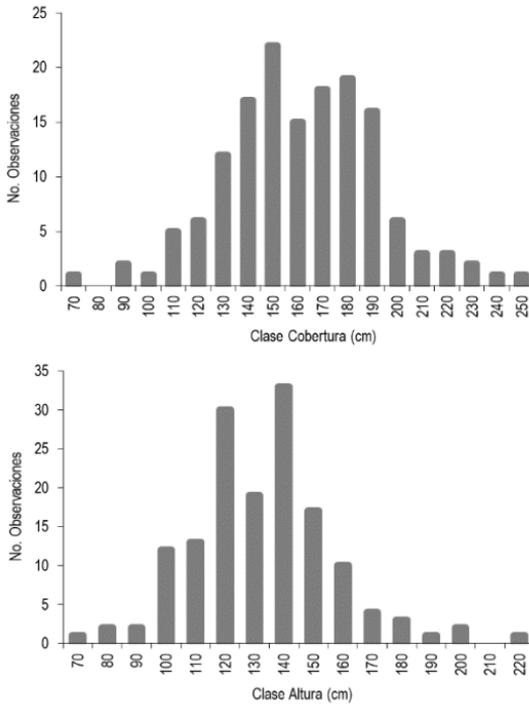


Figura 3. Distribución de la cobertura y altura de las plantas muestra en el estado de Chihuahua.

Cuadro 2. Ecuaciones alométricas desarrolladas para la estimación del peso verde por componente de la piña del *Dasyllirion leiophyllum* en el estado de Chihuahua.

Componente	Modelo	No.
Piña verde	$W_C = b_0 + b_1 DC$	(1)

Dónde: W_i = peso verde de los componentes o total (kg), b_j =parámetro j para la estimación de los pesos, DC =diámetro de cobertura de cada planta (cm).

Cuadro 3. Estimación de los parámetros, contrastes de significación aproximados, y estadísticos de bondad de ajuste para las ecuaciones alométricas desarrolladas para la estimación de peso verde por componente de *Dasyliroia leiophyllum* en el estado de Chihuahua.

Componente	Parámetro	Estimación	Error	Prob.	Aprox	R ²	REMC (kg)
			estándar	t			
Piña verde	b ₀	-19.7889	2.1563	-9.2	<.0001	0.60	3.37
	b ₁	0.171393	0.0135	12.7	<.0001		

t = estadístico de t de Student; R² = Coeficiente de determinación; REMC = Raíz del Error Medio Cuadrático.

Ejemplo práctico de la aplicación de las ecuaciones alométricas:

Para estimar la biomasa de la piña del sotol en el estado de Chihuahua, sería como se explica a continuación:

Supongamos que un sotol tiene una altura total (H) de 150 cm y una cobertura (DC) de 120 cm; y si quisiéramos saber la biomasa de la piña, se aplicaría la ecuación para la piña verde, como se muestra de la siguiente manera:

Información dasométrica: $H=150\text{ cm}; DC= 120\text{ cm}$

Ecuación para estimar la biomasa verde la piña:

$W_C = b_0 + b_1DC$ se sustituyen las variables con los valores del Cuadro 3;

$$W_C = (-19.7889+(0.171393(120)))$$

W_C ; **0.8427** kg de biomasa de la piña verde dadas esas condiciones de la planta.

En el Cuadro 4 se muestra los predios del estado de Chihuahua en donde se llevó a cabo el muestreo.

Cuadro 4. Municipios y predios en donde se llevó a cabo el muestreo en el estado de Chihuahua.

Estado	Municipio	Predio	
Chihuahua	Aldama	Rancho el Consuelo	
		Chorreras	
		N.C.P.E. Potrero del Llano	
		Los Cuervos	
		El Morreon	
		La Esperanza	
	Camargo	El Álamo	
	Chihuahua		Encinillas y Colonia Ceres
			Lote 7 El Tásate
	Coyame		San Pedro
			Tanquecitos
			El rincón
			Lote 7 El Tásate
			Cañón de la barrera
			San Pedro
Jiménez		Canon de La Barrera	
		El Rincón	
		Cerros Colorados	
Ojinaga		Peguis	
Zaragoza		Ejido Valle de Zaragoza	
		Rancho la Tijera	

6. MAPAS DE DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DE LA ESPECIE

Los modelos de distribución potencial de las especies son de gran relevancia en la actualidad ya que emplean información característica del sitio y registros de su presencia. El principio de máxima entropía trata de encontrar aquellas zonas del terreno en las cuales se encuentran las condiciones óptimas para que las especies sobrevivan, mostrando una aproximación de su distribución que es útil en áreas de la conservación como la biología y la biogeografía (Phillips *et al.*, 2006). La importancia de los modelos de nicho ecológico, así como los mapas de distribución y su proyección al espacio geográfico son importantes en ecología, puesto que por medio de estas herramientas es posible conocer los requerimientos ecológicos de las especies (Leal-Nares *et al.*, 2012), y otras zonas con condiciones climáticas similares que puedan favorecer su establecimiento. Lo anterior puede ser aplicado tanto a especies de zonas boscosas, tropicales o zonas áridas, en especial especies endémicas o en algún grado de riesgo. Sin embargo, la aplicación de los modelos de distribución en el manejo de especies de importancia económica es de gran relevancia, por ubicar áreas o regiones con diferentes grados de potencial productivo, en este caso las áreas de mayor potencial son las más atractivas para el establecimiento de áreas de conservación y plantaciones forestales o programas de reforestación de *Dasyllirion leiophyllum*. A pesar de que los modelos de distribución pueden ser muy robustos en la ubicación de sitios potenciales, se recomienda considerar terrenos con condiciones

de suelo y relieve similares a zonas donde la especie se desarrolla de manera natural.

La Figura 4 muestra el mapa del área de distribución potencial de *Dasyilirion leiophyllum*, el cual fue construido por los autores de este documento utilizando variables bioclimáticas como predictores, lo que resulta en áreas que son climáticamente adecuadas para el desarrollo la especie. El mapa cuenta con una escala de idoneidad que va desde 0 a 1 (cero es inexistencia de condiciones adecuadas para la especie y 1 es presencia de condiciones óptimas). Posteriormente, se reclasificaron estos valores mediante el procedimiento estadístico de Método de Cuantiles Relativos (INEGI, 2010), para obtener las regiones de clases de idoneidad ambiental de potencial Bajo, Media y Alta. Entendiéndose por “Alta” aquellas áreas donde existen las mejores condiciones climáticas para la especie.

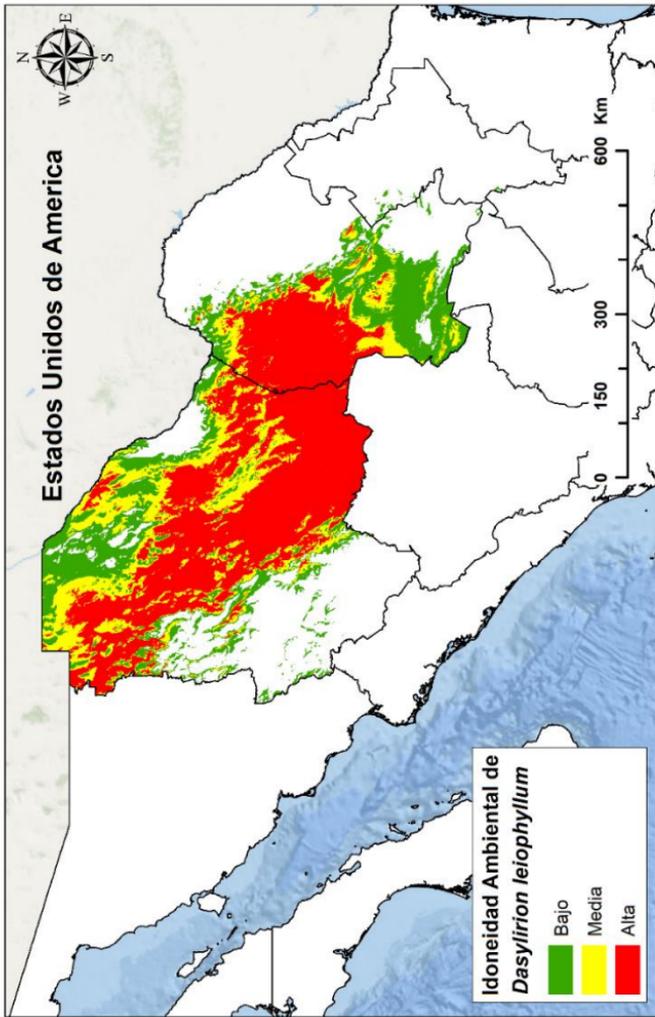


Figura 4. Clases de idoneidad ambiental para *Dasyliiron leiophyllum* generadas a partir de modelos de distribución potencial.

7. CONCLUSIONES

La producción de sotol ha ido en gradual aumento. Con el paulatino incremento en el consumo de productos naturales y orgánicos, la comercialización del sotol ha aumentado en los últimos diez años. Sin embargo, el éxito en la comercialización del sotol en los mercados internacionales dependerá de la disponibilidad de materia prima, por lo que las reforestaciones con fines de enriquecimiento de rodales del género *Dasyilirion* son una necesidad que todos los productores de sotol tienen en común. Adicionalmente las formas de mercado, economías de escala, asociaciones empresariales y comercializadoras, tienen un arduo trabajo por delante. La denominación de origen es un gran aliciente para el desarrollo del mercado y su futuro posicionamiento dentro del mercado internacional de los alcoholes y licores. Es importante proteger las poblaciones y las comunidades arbustivas en las que se desarrolla el sotol en el estado de Chihuahua. Las ecuaciones alométricas de biomasa de *Dasyilirion leiophyllum*, generadas para el estado, constituyen una herramienta útil para estimar con precisión la biomasa verde de la especie en los programas de manejo, asegurando un menor sesgo en las estimaciones totales. El mapa de distribución potencial del *Dasyilirion leiophyllum*, presentado en este documento representa un esquema gráfico de áreas o regiones con diferente grado de potencial productivo, para el establecimiento de áreas de conservación y programas de reforestación de la especie.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Anchondo N.J. A., Olivas G., J. M., C. Luján A., Vázquez C.H., Flores R. R., Ramírez G. M. C., Medrano B. P.G., 2018. Plantaciones Cultivadas de Sotol (*Dasyliirion spp*) en el Desierto Chihuahuense., Libro Temas Selectos de Flora Silvestre de Zonas Áridas del Norte de México.
- Berlanga R., C. A., L. A. González L. y H. Franco L. 1992a. Metodología para la evaluación y manejo de lechuguilla en condiciones naturales. Campo Experimental "La Sauceda". CIRNE. INIFAP. Folleto Técnico Núm. 1. Saltillo, Coahuila, México. 22 p.
- Bogler, D. J. 1994. Taxonomy and phylogeny of *Dasyliirion* (Nolinaceae). Dissertation. The University of Texas at Austin. 583 p.
- Bogler, D. J. 1995. Systematics of *Dasyliirion*: Taxonomy and molecular phylogeny. Bol. Soc. Bot. Méx. 56: 69-76.
- Cano P., A, C. A. Berlanga R, D. Castillo Q. y O. U. Martínez B. 2005. Análisis dimensional y tablas de producción de sotol (*Dasyliirion cedrosanum* Trel.) para el estado de Coahuila. INIFAP-CIRNE. Campo Experimental Saltillo. Folleto Técnico Núm. 18. Coahuila, México. 24 p.
- Gadow, K. and Hui, G. 1999. Modelling forest development (Vol. 57). Springer Science & Business Media.
- Gómez, L. F. 2011. Aprovechamiento, Manejo y Valoración de Plantas de Importancia Económica en Zonas Áridas y Semiáridas de México. Tesis de Doctorado en Ciencias (Biología). Universidad Nacional Autónoma de México.
- INEGI, 2010. Instituto Nacional de Estadística y Geografía; Nota técnica univariada. 17 p.
- Leal-Nares, O., M. E. Mendoza, D. Pérez, D. Geneletti, E. López y E. Carranza. 2012. Distribución potencial del *Pinus martinezii*: un modelo espacial basado en conocimiento ecológico y análisis multicriterio. Revista Mexicana de Biodiversidad, 83: 1152-1170.
- LGDFS. 2021. Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable. Diario Oficial de la Federación. Última reforma publicada 26-04-2021.
- López B. L. A. 2005. El sotol en Coahuila, potencialidades y limitaciones. Capítulo 3. In: Contreras D., C. e I. Ortega R. 2005. Bebidas y Regiones: Historia e impacto de la cultura etílica en México. Plaza y Valdés, S.A de C.V. 200p.

- Ludwig, J.A., J.F. Reynolds and P.D. Whitson. 1975. Size-biomass relationships of several Chihuahuan Desert Shrubs. *The American Midland Naturalist*. 94 (2): 451-461.
- Madrigal Collazo, A. 1994. Ordenación de montes arbolados.
- Melgoza C., A, J. S Sierra T., Vega C. J., Caracterización del Crecimiento de dos especies de Sotol (*Dasyllirion leiophyllum* Engem.ex Trelease y *D. sereke* Bogler) Fertilizadas con Nitrógeno y Fosforo (2006). *Revista Ciencia Forestal en Mexico* Vol. 31 Num 99
- Olivas G., J. M., J. A. Anchondo N., C. Luján A. y J. Hernández S. 2013. Tablas de producción de sotol (*Dasyllirion* spp.) y manual técnico de uso para el estado de Chihuahua. Manual Técnico. Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales, Universidad Autónoma de Chihuahua. Delicias, Chih., 12 p.
- Phillips, S. J., R. P. Anderson y R. E. Schapired. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190: 231-259.
- RLGDFS. 2020 reglamento de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable. Diario Oficial de la Federación. Última reforma publicada 09-12-2020.
- SAS Institute. 2009. SAS Proprietary Software Version 9.3. SAS Institute, Cary, NC.
- Sierra, T. J.S., Royo M. M. A., Melgoza, C. A., Morales N. C.R., Carrillo R. R.L., Pinedo A. C., Pinedo A.A., Lara M.C., 2004. Taxonomía Ordenación y Analisis de la Distribución Espacial del Sotol (*Dasyllirion* spp) en el Estado de Chihuahua. Campo Experimental La Campana
- Villavicencio G., E. E.; A. Cano P. y A. Juárez S. 2007. Guía para la micro propagación y producción in vitro de plantas de sotol (*Dasyllirion cedrosanum* Trel.). INIFAP-CIRNE. Campo Experimental Saltillo. Folleto Técnico Núm 37 Coahuila, México. 29 p.

9. GLOSARIO

Dioecia. Fenómeno que presentan las plantas con flores unisexuales en las que las femeninas y las masculinas se encuentran dispuestas sobre distintos individuos o pies de planta.

Ecuación alométrica. Fórmula matemática que representa la relación entre la biomasa y el diámetro o la altura de la planta y permite realizar predicciones con bajos requerimientos de datos.

Especie. Unidad básica de clasificación de los organismos; incluye a todos los individuos que se parecen entre sí más que a otros y que producen descendencia fértil.

Flores pistiladas. Dícese de las flores femeninas o flores hembras. Son las que tienen un pistilo funcional capaz de producir semillas, pero o no tiene estambres o tienen estambres con anteras que son incapaces de producir polen.

Flores estaminadas. Dícese de las flores masculinas o flores macho. Son flores que tienen estambres funcionales, capaces de producir polen, pero no tienen ovario, o tienen un ovario que no es fértil.

Grados Brix. El Brix es una medida de la cantidad de sólidos disueltos que hay en un líquido, que se obtiene a través de la gravedad específica y se usa sobre todo para medir la azúcar disuelta. Un grado Brix es un gramo de sacarosa en 100 gramos de solución.

Manejo forestal sustentable. Es el proceso que comprende el conjunto de acciones y procedimientos que tienen por objeto la ordenación, el cultivo, la protección, la conservación, la restauración y el aprovechamiento de los recursos y servicios ambientales de un ecosistema forestal, considerando los principios ecológicos, respetando la integralidad funcional e

interdependencia de recursos y sin que disminuya o ponga en riesgo la capacidad productiva de los ecosistemas y recursos existentes en la misma.

Norma Oficial Mexicana. La regulación técnica de observancia obligatoria expedida por las dependencias competentes, que establece reglas, especificaciones, atributos, directrices, características o prescripciones aplicables a un producto, proceso, instalación, sistema, actividad, servicio o método de producción u operación, así como aquellas relativas a terminología, simbología, embalaje, marcado o etiquetado y las que se refieran a su cumplimiento o aplicación.

Regeneración. Capacidad natural del bosque para reproducirse o capacidad de un organismo vivo para recuperar por sí mismo sus partes pérdidas o dañadas.

Rodalización. Proceso que consiste básicamente en definir los rodales que tiene en un área, entendiendo como rodal el espacio continuo en el que la disposición de la vegetación dominante responde a unas mismas características en cuanto a su grado de cubierta, composición específica, regularidad, tamaño de los individuos, densidad y patrón de distribución de estos caracteres.

10. SIGLAS Y ACRÓNIMOS

CONABIO	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
CONACYT	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
CONAFOR	Comisión Nacional Forestal.
INIFAP	Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
ITES	Instituto Tecnológico de El Salto.
LFPA	Ley Federal de Procedimiento Administrativo.
LGDFS	Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable.
LGEEPA	Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente.
LGVS	Ley General de Vida Silvestre.
NOMs 	Normas.
RLGDFS	Reglamento de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable.
SEMARNAT	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
UAAAN	Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
UACH	Universidad Autónoma de Chihuahua.
UANL	Universidad Autónoma de Nuevo León.
UJED	Universidad Juárez del Estado de Durango.



Fondo
CONACYT
CONAFOR

**Fondo Sectorial para la
Investigación, el Desarrollo y la
Innovación Tecnológica Forestal**



CONAFOR
COMISIÓN NACIONAL FORESTAL



CONACYT
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología