



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**COLEGIO DE INGENIERÍA TOPOGRÁFICA Y GEODÉSICA**

**“ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA AÉREA EN ECOSISTEMAS FORESTALES DEL  
ESTADO DE PUEBLA EN 2020 MEDIANTE IMÁGENES DE RADAR DE  
APERTURA SINTÉTICA A LOS PALSAR2”**

**TESIS**

**Que para obtener el Grado de:**

**LICENCIATURA EN INGENIERÍA TOPOGRÁFICA Y GEODÉSICA**

**PRESENTA:**

**JORGE ALAN AMAYA PEREZ**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**Ing. Máximo Ávila Cruz**

**CO-ASESOR DE TESIS:**

**Dr. Irving Uriel Hernández Gómez**

**Puebla, Pue.**

**Septiembre 2025**



Oficio No. SAC/1366/2025

**C. Jorge Alan Amaya Pérez -201927830-  
Pasante de la carrera de ingeniería Topográfica y Geodésica  
Presente.**

En atención al Tema de Tesis que puso Usted a consideración de la Coordinación de Área y de esta Secretaría Académica en coordinación con la Dirección de ésta Facultad de Ingeniería, dentro del marco de Titulación por Examen Profesional, como medio de Titulación se dio revisión y se ha autorizado el tema denominado:

**“ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA AÉREA EN ECOSISTEMAS FORESTALES DEL ESTADO DE PUEBLA EN 2020  
MEDIANTE IMÁGENES DE RADAR DE APERTURA SINTÉTICA ALOS PALSAR2”**

Por lo anterior hacemos de su conocimiento que se asigna como director de tema al Mtro. Máximo Ávila Cruz.

Sin más por el momento, le envío la seguridad de mi consideración más distinguida.

**Atentamente**

**“Pensar bien, para vivir mejor”**

H. Puebla de Z. a 08 de septiembre de 2025

M. I. Angel Cecilio Guerrero Zamora  
Director



M'ACGZ/M'VGL/barv  
C.c.p. Interesado  
C.c.p. Archivo

**M. I. Angel Cecilio Guerrero Zamora**  
**Director de la Facultad de Ingeniería**  
**Benemérita Universidad Autónoma de Puebla**  
**P r e s e n t e.**

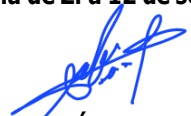
El que suscribe: Mtro. Máximo Ávila Cruz, director del tema de tesis:

**"ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA AÉREA EN ECOSISTEMAS FORESTALES DEL ESTADO DE PUEBLA EN 2020  
MEDIANTE IMÁGENES DE RADAR DE APERTURA SINTÉTICA ALOS PALSAR2"**

Presentada por el C. Jorge Alan Amaya Pérez -201927830-, pasante del Colegio de Ingeniería Topográfica y Geodésica, y en atención al Oficio No. SAC/1366/2025 con fecha de emisión 08 de septiembre de 2025, me permito informar a Usted que después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, metodología, redacción y ortografía de la tesis correspondiente, no tengo inconveniente en autorizar la impresión de la misma.

Sin otro particular, le reitero la seguridad de mi más atenta y distinguida consideración.

**A t e n t a m e n t e**  
**"Pensar bien, para vivir mejor"**  
**H. Puebla de Z. a 12 de septiembre de 2025**



**Mtro. Máximo Ávila Cruz**  
**Director de tema**

**M'MAC/BARV**  
**C.c.p. Interesado**  
**C.c.p. Archivo**

## Resumen

En la actualidad, el uso de nuevas tecnologías es necesarias para poder optimizar el desarrollo de actividades cotidianas y laborales, en este estudio se usan imágenes de radar para poder obtener información a gran escala, en este caso estas imágenes fueron de utilidad para la estimación de la biomasa aérea de los ecosistemas forestales del estado. Para realizar esta investigación se emplearon imágenes ALOS PALSAR 2, que se obtuvieron de forma libre gracias a la agencia japonesa JAXA, al igual que inventarios forestales del estado de Puebla, y herramientas informáticas como los softwares de QGIS y Rstudio, con el objetivo de generar un mapeo de la estimación de biomasa aérea de los ecosistemas forestales del estado de Puebla, así poder obtener estadísticas descriptivas de cada zona de estudios.

Los resultados obtenidos fueron validados con otros de estudios realizados por el gobierno federal abarcando todo el país, con la finalidad de tener resultados certeros, Los resultados aquí mostrados se mantienen en los rangos de la biomasa calculada de otros años, lo que da la pauta para que este proceso pueda ser factible y replicable en los modelados de la biomasa, sin embargo, se encontró que los modelos pueden tener posibles mejoras en el proceso para así obtener mejores resultados.

## Contenido

Introducción .....	1
Ecosistemas forestales.....	1
Importancia de los ecosistemas forestales .....	1
Amenazas a ecosistemas forestales .....	2
Biomasa aérea .....	3
Área de estudio .....	8
Objetivo.....	8
Planteamiento del problema .....	10
Relevancia ecológica de los ecosistemas.....	10
Pérdida de biomasa .....	12
Métodos de estimación de biomasa aérea en campo .....	13
Teledetección .....	14
Brechas de conocimiento puebla en la evaluación de ecosistemas forestales ...	15
Justificación del estudio en el estado .....	17
Impacto del estudio .....	18
Zona de estudio .....	20
Superficie y relieve.....	20
Climas.....	23
Uso de suelos.....	25
Edafología.....	27
Métodos.....	29
Imágenes de radar .....	30
Primer script .....	31
Segundo script .....	32
Tercer script.....	35
Cuarto script.....	37
Quinto script.....	40

Mapa final.....	43
Mapa de biomasa aérea en ecosistemas de selva.....	45
Mapa de biomasa aérea en ecosistemas de bosque .....	46
Post proceso .....	47
Selvas y bosques.....	47
Datos por ecosistema .....	48
Resultados .....	49
Resultados selvas y bosques.....	49
Resultados selva .....	49
Resultados de bosque.....	49
Resultados datos por ecosistemas.....	50
Discusión .....	52
Comparativa.....	53
Conclusiones.....	55
Bibliografía .....	57

# INTRODUCCIÓN

## ECOSISTEMAS FORESTALES

### IMPORTANCIA DE LOS ECOSISTEMAS FORESTALES

Los ecosistemas forestales son de suma importancia para la sociedad y el medio ambiente, esto debido a que tiene aportaciones en la regulación de la temperatura, captación de carbono y mitigación para el cambio climático. Son una fuente de recursos naturales, y al mismo tiempo le da refugio y se vuelve hábitat para 70 % de las especies terrestres del planeta (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2015). También brindan aportes económicos y sociales, ya que, en el año 2012, se estimaban 1.6 millones de personas habitando en zonas rurales, las cuales dependen directa o indirectamente de productos o sistemas forestales (FAO, 2020).

Otra aportación con la que los ecosistemas forestales contribuyen es con su participación en el ciclo hidrológico, ya que estos ayudan a la circulación del agua, que penetra en el ecosistema en forma de precipitación principalmente, y se libera en forma de evaporación, escorrentía o infiltración. Los ecosistemas también ayudan a prevenir la degradación del suelo, previenen posibles deslizamientos en zonas de riesgo por lo que se podría decir que contribuyen a la conservación del suelo (FAO, 2020).

Según la FAO (2020), los bosques del planeta almacenan alrededor de 296 gigatoneladas de carbono; este poder de almacenamiento de los bosques hace que sean considerados como sumideros de carbono. Pan en 2011 resalta, que esto surge por el ciclo del carbono, cual genera grandes beneficios, tales como que los ecosistemas forestales ayuden a la mitigación del cambio climático o la disminución del efecto invernadero, todo gracias al proceso de captura de CO<sub>2</sub> de la atmósfera y el cual se convierte en carbono almacenado en biomasa y a su vez esto disminuye estas mismas emisiones de carbono. Son todos estos procesos y beneficios los que hacen a los ecosistemas forestales como los mayores proveedores de servicios ambientales del planeta (Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), 2017).

## AMENAZAS A ECOSISTEMAS FORESTALES

Se sabe que los ecosistemas forestales son importantes y beneficiosos para la sociedad y el medio ambiente, con una gran cantidad de beneficios que les ofrecen a ambos. Desafortunadamente, eso no significa que no estén amenazados. Las dos amenazas más grandes son la deforestación y la degradación, como lo menciona Sánchez C Domínguez (2016) donde destacan que la deforestación es un problema que ha agudizado en todo el mundo, y México no es la excepción, son las selvas las áreas donde más se perjudicó.

Agregando a esto, la CONAFOR en su sitio web (<https://snmf.cnf.gob.mx/deforestacion/>) muestra datos sobre la deforestación en el país, y es que, en las últimas décadas, siendo más específicos entre los años 2001 a 2024, en promedio cada año se deforestaron 203,552 hectáreas forestales, resaltándose el año 2016 con 350,298, hectáreas deforestadas, siendo la tala ilegal, los incendios forestales, y la necesidad de talar por el crecimiento de zonas agrícolas, ganaderas y urbanas, las principales causas de este gran número de hectáreas deforestadas (CONAFOR, s.f.)

La degradación es la otra amenaza recurrente en los ecosistemas forestales, y es que esta pérdida o reducción de capacidades de los bosques para generar bienes naturales, tales como agua, madera, refugio o aire limpio, es un problema que está más presente que la propia deforestación, es por esto por lo que se debe tener en consideración este fenómeno natural (Hancock, 2019). Los actos que generan esta degradación son usualmente causados por el hombre, sea la tala no moderada de árboles, las malas técnicas de aprovechamiento de recursos, o en menores casos la introducción de especies ajenas al ecosistema (Thompson, 2011). Son principalmente estas dos amenazas las responsables de los malos funcionamientos en estos ecosistemas, de un mal ciclo del carbono, el cual haga que los ecosistemas no logren actuar de la forma esperada como sumideros de carbono y así no se logre mitigar el cambio climático (Pan et al., 2011).

No solo se debe de considerar las consecuencias ambientales, también resaltan posibles consecuencias sociales, ya que como se dijo anteriormente, una gran cantidad de poblaciones dependen de los bosques, por lo que las amenazas podrían hacer que la inseguridad alimentaria, la pérdida de servicios y movimientos migratorios forzados sean más frecuentes entre las poblaciones (WHO, 2025).

Es por todo lo anterior mencionado, que se remarca lo importante que son estos ecosistemas, buscando dar iniciativa a la concientización del cuidado y monitorio de estos, usando tecnologías como la teledetección.

## BIOMASA AÉREA

El elemento de estudio de este trabajo es la biomasa aérea (BA), la cual se define como el conjunto de materia orgánica de origen vegetal viva o muerta; y cuyas unidades se expresan en densidad de biomasa (Reyes-Palomeque et al., 2025). Escobar (2008) también destaca la relevancia de la biomasa aérea actuando como fuente de información, y es que la biomasa que se toma como muestra en ecosistemas o en zonas de estudio o interés, puede reflejar ciertos datos o características de estos, como puede ser la cantidad de materia orgánica, los nutrientes o la energía presente en estas zonas. Frecuentemente la biomasa es clasificada en dos partes, la primera es la biomasa aérea (BA), que toma toda la materia orgánica que se presenta arriba de la tierra, esto pudiendo ser plantas, hojas, tallos, troncos, flores y frutos; y la biomasa subterránea, la cual toma los elementos orgánicos que se presentan por debajo del suelo, un ejemplo de ella son raíces o tubérculos que vegetan en la tierra (Reyes-Palomeque et al., 2025).

Según la USDA, en el ciclo del carbono, la BA es una parte fundamental el funcionamiento de este. Pues a medida que los árboles en los bosques crecen, estos absorben dióxido de carbono del aire y convierten el CO<sub>2</sub> en materia vegetal o biomasa, esto mediante la fotosíntesis. Este proceso llamado secuestro (USDA s.f.). El secuestro

de CO<sub>2</sub> consiste en capturarlo de la atmósfera y retenerlo en forma de biomasa vegetal (Casiano-Domínguez, 2018).

La BA, es una fuente de información para conocer más sobre ciertas locaciones pues facilita parámetros para medir el estado de desarrollo o el potencial de rendimiento en volumen de plantaciones forestales. De igual forma la BA da información necesaria para complementar inventarios forestales ya que los métodos de percepción remota son más accesibles que métodos de campo como podría ser el muestreo, en el cual se debe contemplar las horas de trabajo, la mano de obra o la forma de interpretación de datos en grandes territorios (Tovar Blanco et al., 2020).

La biomasa aérea puede ser un parámetro para la toma de decisiones en proyectos con objetivos en la mitigación del cambio climático, se tiene como ejemplo el caso de REDD+ la cual busca la posibilidad de actuar de forma rápida y a bajo coste en la mitigación del cambio climático (Angelsen et al., 2012). Encargados de los proyectos mediante cambios en la biomasa aérea y una metodología adecuada logran definir datos donde se muestra la degradación en zonas forestales Saavedra-Mera (2024). Conocer el estado de los ecosistemas o estar en constante monitoreo se vuelve de suma importancia para la gestión de estos, para la gestión de los recursos naturales, esto con la medición y evaluación del crecimiento y generación de productos en la vegetación. Generando información de degradación, regeneración o cambio de suelos (Saavedra-Mera, 2024).

Estos procesos son de suma importancia el conocer su repercusión tanto en los beneficios como en lo negativo, esto para aprovechar o evitar las repercusiones, ya que los cambios y usos de suelos son los principales factores influyentes en el cambio climático (Pan et al., 2011). De igual forma, la estimación de BA en bosques controlados para el aprovechamiento de la madera es de suma importancia, para poder conocer tanto como la sustentabilidad del sistema, la vida restante del mismo, o que tan productivo puede lograr a ser, tanto el sistema como la zona forestal donde se trabaja (Chávez-Aguilar et al., 2023)

Un ejemplo de beneficios gracias al monitoreo de zonas forestales surge con el establecimiento de Sitios Permanentes de Monitoreo, de Investigación Silvícola (SPIS) y debido a que es el estudio de estos es una fuente de datos para la generación de inventarios forestales y el desarrollo de conocimiento científico (Martínez Salvador et al., 2019). En concreto el estudio de la BA puede tener beneficios, como lo demuestra Chávez-Aguilar et al. (2023) en donde en los bosques del estado de Hidalgo, México, se muestra que el control y monitoreo de la zona, logra generar más biomasa de forma más acelerada en comparación en zonas sin control en periodos de tiempo más corto. Esta producción de biomasa conlleva a una mitigación del cambio climático más acelerada como a una generación de recursos más productiva.

Es por esto, que el monitoreo forestal, además con el de la biomasa, toman importancia en la obtención de información, esto apoyado de tecnologías como la teledetección, se alcanza un mejor entendimiento de las zonas forestales, además de que se logran una mejor conservación de los bosques y los beneficios que conllevan.

## CÁLCULO DE BIOMASA A PARTIR DE ECUACIONES

Los cálculos de biomasa pueden variar en la forma de recolección de información, este es el principal paso para todos los estudios de este ámbito, la obtención de datos puede dividirse en los métodos tradicionales, métodos de campo y en métodos modernos, los cuales suelen ser con el uso de tecnologías con poca necesidad del trabajo de campo.

Los métodos tradicionales o métodos de campo son métodos de obtención de información directa, que suele proporcionar resultados de gran exactitud, ya que se pueden tomar las muestras necesarias para lograr los datos propuestos. Los métodos tradicional directos y destructivos consisten en tomar muestras para hacer mediciones de parámetros como el diámetro a la altura del pecho, altura total o diámetro de la copa, se derriban los árboles para la obtención del peso fresco, de los componentes como fuste, ramas, raíces y follaje, esto se hace en el trabajo de campo.

Posteriormente se hace este pesaje en laboratorio, con los componentes secos, y así obteniendo el peso seco, esto pudiéndose lograr con la fórmula de Brown (1997):

$$\text{❖ Peso seco} = \text{Peso fresco} \times (\text{Peso seco de la submuestra} / \text{Peso fresco de la submuestra})$$

Este peso seco significando la biomasa aérea total del árbol.

Un método tradicional indirecto puede lograrse midiendo el diámetro del tronco a la altura del pecho (DAP), la altura total (H) y otros parámetros como la densidad de la madera, con estos datos y la ecuación pan-tropical de Chave et al. (2014)

$$\text{❖ AGB} = 0.0673 \cdot (\rho \cdot D^2 \cdot H)^{0.97}$$

➤ Donde:

- $\rho$  es la densidad de la madera medida en  $\text{g/cm}^{-3}$
- D es el DAP en centímetros
- H es la altura total en metros

Como ejemplo de estos métodos tradicionales, aunque no destructivos, son el de doble muestreo utilizando índices (BEI) y estimación de peso directo a campo (BEP). Aunque dichos métodos logran tener una gran precisión, pueden alterar los ecosistemas debido a la toma de muestras (Fonseca, 2017).

Los métodos modernos se caracterizan por el uso de nuevas tecnologías, tales como la teledetección, el uso de sensores remotos en satélites como Landsat, Sentinel o ALOS PALSAR y las imágenes satelitales que se generan de estos, han logrado abrir una posibilidad para trabajáoslas estimaciones de biomasa (Collado-Torres et al., 2015)

Collado Torres (2015), dice que la percepción remota, puede ser considerada como una herramienta eficaz y de gran importancia para el análisis de cambios en el paisaje en periodos cortos, medianos o largos de tiempo, y esto tomando información de sensores ubicados en satélites o aeronaves, todo sin estar en contacto directo con la zona de estudio. Por esto, la teledetección por medio de sensores remotos se considera una gran herramienta para poder detectar deforestación, degradación,

sequias o pérdidas de cultivos, y en general una gran herramienta para el monitoreo forestal y ambiental (Brown, 1997).

Se debe recalcar que existen estudios que han trabajado con datos obtenidos por medio de la teledetección y que obtienen estimar la BA (biomasa aérea) de una zona en concreto y específicamente existe una cantidad considerable de estudios donde las imágenes ALOS PALSAR son usadas para la generación de estimaciones, modelos o mapas relacionados con la biomasa aérea. Esta investigación se basa principalmente en el trabajo de Hernández-Stefanoni, et al. (2021), quienes generaron un mapeo de BA de la zona de Felipe Carrillo Puerto en el estado de Quintana Roo, siendo un ejemplo del manual para generar este tipo de mapeos. Otro caso es el de Quijano, A. C Morales, Y. (2016), Ellos generaron un mapa de biomasa a partir de imágenes ALOS PALSAR en combinación de datos de parcelas permanentes en el Parque Natural Bataclán, Cali, Colombia, donde demuestran que es acertado establecer la relación entre los sistemas radar de banda L con los parámetros biofísicos de los bosques de la región.

También, Hernández-Stefanoni et al. (2020) en su artículo científico donde trabaja mapas de BA, y a su vez los complementa con datos LiDAR, datos climáticos y datos de campo, dando como resultado la reducción de errores que se generaban por árboles pequeños y por datos tomados en diferentes momentos, concluyendo que la precisión de los mapas de BA mejora significativamente con dichas integraciones. Otro ejemplo de esto es el de Hernández Gómez y Ellis (2023), en su trabajo “*Selective logging and shifting agriculture may help maintain forest biomass on the Yucatán península*”, trabajan con datos del INFyS y ecuaciones alométricas e imágenes SAR ALOS PALSAR/PALSAR 2, logran obtener resultados de biomasa de distintos años y el cambio en la BA respecto a zonas agrícolas y de áreas de manejo forestal.

Esto demuestra que cuando se tienen los recursos necesarios, la combinación del trabajo de campo en con nuevas tecnologías logra generar mejores resultados. Aun así, si no se tiene la posibilidad de trabajar en campo, el uso de las nuevas tecnologías para la generación de proyectos es válido y logra tener gran precisión.

## ÁREA DE ESTUDIO

Este análisis se realizó tomando como escala de trabajo al estado de Puebla, que se ubica en el centro del país y ocupa una superficie de 3,429,000 HA. Para las ciencias de la tierra es una zona de interés, ya que en el estado se ubican cuatro grandes provincias biogeográficas: la Sierra Madre Oriental, la Llanura Costera del Golfo Norte, el Eje Neovolcánico y la Sierra Madre del Sur. También 19 tipos vegetación ocupan una superficie de 1 739 331 hectáreas. Y de los diferentes tipos de vegetación del estado podemos encontrar ecosistemas forestales como bosques templados, selvas altas y bajas caducifolias (Suárez et al., 2015; CONABIO, 2011).

Por lo anterior, se hace necesaria la implementación de nuevas tecnologías como los sistemas de información geográfica (SIG) y métodos para el monitoreo de los ecosistemas forestales, ya que es primordial para mejorar la biodiversidad del estado, trabajos como el de Suárez (2015) revela que, los resultados de un proceso de análisis de la cartografía digital en el programa “ArcGIS”, sugiere que para disminuir la problemática de especies ausentes o subrepresentados, sin embargo, menciona que es necesario focalizar los esfuerzos de creación de nuevas áreas naturales protegidas, lo que ayudaría con el problema de especies ausentes o subrepresentados.

Otro ejemplo en el estado de Puebla es el presentado por Rojas-García y Villers-Ruíz (2020), donde con 32 fotografías aéreas y el uso de SIG, se logró estimar la biomasa arbórea del Parque Nacional Malinche, esto para lograr una mejora en las acciones tomadas por las comunidades cercanas en búsqueda de mejoría del aprovechamiento de los recursos naturales.

## OBJETIVO

Estimar la biomasa aérea en los ecosistemas forestales del estado de Puebla, basado en imágenes de radar del sensor ALOS PALSAR 2, datos del del Inventario Nacional

Forestal y de Suelos (INFyS) y técnicas de procesamiento de datos en los softwares RStudio y QGIS.

Objetivos específicos

1. Calcular la biomasa aérea de los ecosistemas forestales del estado de Puebla mediante imágenes satelitales de tipo Radar, datos del inventario nacional forestal y RStudio
2. Comparar los resultados y estadísticas obtenidas de la estimación de biomasa aérea del estado con los datos del gobierno mexicano, esto con el fin de identificar las diferencias y similitudes entre ambas mediciones.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### RELEVANCIA ECOLÓGICA DE LOS ECOSISTEMAS

Los ecosistemas han sido de estudio relevante para la sociedad desde hace décadas, y es que se ha comentado lo fundamentales que son para la ecología, pero la pérdida o degradación de estos genera cambios en los procesos fisicoquímico-biológicos que operan como parte de una unidad espaciotemporal en el ecosistema (Linden 1942). Siendo esta pérdida de los procesos, lo que genera que se pierda la funcionalidad de los ecosistemas, y así perdiendo una parte fundamental para la ecología.

Anteriormente se menciona la importancia de los ecosistemas, pues con la pérdida de la funcionalidad de ecosistemas, surgen grandes impactos negativos para la sociedad y para el ambiente, Oberhuber et al. (2010) señala cuatro categorías en los beneficios que los ecosistemas generan, los cuales se dividirían en 4 tipos de servicios.

Estos servicios son: servicios de aprovisionamiento, como madera para leña o bienes para fármacos, según la OMS (2025) más de la mitad de los medicamentos modernos se derivan de fuentes naturales como hongos o analgésicos naturales; Servicios reguladores, ya que se ha demostrado la capacidad de los ecosistemas forestales en actuar como sumideros de carbono, además de que los ecosistemas funcionan controlando las precipitaciones, o protegiendo ante desastres como tormentas o deslizamientos de tierras; Servicios culturales, aquí dando valor para la sociedad, como podría ser turístico o espiritual; Servicios de apoyo, estos con un valor fundamental en los ecosistemas, lo que podría ser la formación de suelos o crecimiento de vegetación.

Por lo que la pérdida de estos servicios significaría una baja de recursos madereros al igual que para la generación de fármacos; también conllevaría un empeoramiento en el proceso de mitigación de cambio climático al igual que aumentándose la posibilidad de desastres naturales como inundaciones en pueblos o ciudades, afectando a las sociedades también se presentaría una baja económica por la pérdida de turismo o

zonas de recreación, finalmente sin los servicios de apoyo, sin la portación de nutrientes para la vegetación en suelos, se perdería la estabilidad ecológica a largo plazo.

Demostrando lo caótico que sería para muchas poblaciones la pérdida de los ecosistemas forestales, FAO (2012) señala, que los bosques cubren casi un tercio de la superficie terrestre de la tierra donde 1,600 millones de personas dependen directa o indirectamente de ecosistemas forestales, y es además entre 60 y 350 millones de personas son indígenas, donde en México es un alrededor de 13300000 personas, por lo que las alteraciones o pérdidas a los ecosistemas significaría migraciones de poblaciones incluyendo grupos en situaciones vulnerables.

Los ecosistemas forestales han revalorizado su valor en las últimas décadas es en el ámbito de los servicios reguladores, y como se ha mencionado antes, su capacidad de controlar las emisiones de dióxido de carbono mitigando el cambio climático, esto ya que los bosques contienen 662 000 millones de toneladas de carbono, logrando que se conviertan en una parte fundamental para el cambio climático (Zhao C Zhou, 2004). Pero esta capacidad de control se ve en riesgo cuando la biomasa se pierde, el carbono se libera y esto siendo directamente una amenaza para regulación del clima.

La FAO, en la versión de 2020 de la Evaluación de los recursos forestales mundiales, indica que en el período entre 1990 y 2020 se destruyeron aproximadamente 420 millones de hectáreas de bosques en todo el mundo, con incendios forestales extensos y eventos de recambio de usos de suelo. Es el cambio de suelos generado principalmente por la necesidad de generar actividades como la agricultura. Esta necesidad de bienes puede no llegar al grado de la deforestación, pero si a la degradación del ecosistema, donde se disminuye la capacidad de cumplir con las categorías de beneficios anteriormente escritas, esto de igual forma podría ocurrir debido a incendios forestales, plagas, o explotación de recursos forestales (FAO, 2022).

Las amenazas o problemas que enfrentan los ecosistemas forestales son posibles de combatir en contra de ellas, y es que actualmente existen varios programas que buscan la mejoría forestal, una de ellas es REDD+ de la ONU, la cual proporciona apoyo financiero para la protección de los bosques en países en desarrollo, esto basado en inventarios forestales con datos de referencia (FAO, s.f.).

De igual forma la pérdida de ecosistemas forestales significa una pérdida en datos para inventarios forestales, los cuales se generan a partir del monitoreo estos, mediante el uso de técnicas como la teledetección y el análisis de datos, se convierten en una herramienta esencial para darse cuenta los cambios o mejorías que surgen en zonas donde se han implementado técnicas de conservación, por lo que la falta de información de ciertas zonas donde se ha perdido o degradado el ecosistema perjudica posibles tomas de decisiones de gobiernos o proyectos en respecto a programas ambientales (FAO, 2022). Algunos ejemplos de estas decisiones son acciones como la agricultura incompatible con la conservación, prácticas ganaderas, crecimiento urbano, generación de desechos sólidos, desarrollo de carreteras, o la presencia de plagas, son parte de la lista que amenaza los ecosistemas forestales del estado de Puebla (CONABIO, 2011).

## PÉRDIDA DE BIOMASA

La biomasa aérea (BA) se convierte en un indicador importante en los monitoreos o inventarios forestales, ya con este indicador se puede identificar características del ecosistema forestal, tal como la salud o productividad de este (Tovar-Blanco et al, 2020). Según la FAO *“los niveles del volumen de madera y de la biomasa leñosa son indicadores importantes del potencial que tienen los bosques para proporcionar madera y capturar carbono”* (FAO, 2001, sección 'Introducción'). Para cualquier proyecto en donde se trate el cambio climático, se es de suma importancia tener esto en cuenta, si la biomasa aérea aumenta o disminuye significa que el carbono retenido en la zona forestal también varía, esto significando información crucial para cualquier

proyecto (Fonseca, 2017). Es por esto por lo que la pérdida de biomasa se debe de considerar como una gran amenaza ante el ambiente, reduciendo la capacidad de los bosques a capturar carbono y de igual forma la pérdida de datos de biomasa limita la posibilidad de contar con otro indicador para la toma de decisiones, manejo de ecosistemas forestales, prevención de desastres naturales y el seguimiento de programas en torno a la conservación al ambiente.

## MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE BIOMASA AÉREA EN CAMPO

Para el estudio y estimación de la biomasa se suelen usar dos métodos, los métodos tradicionales o insitu, los cuales constan de mediciones directamente en el campo de estudio, principalmente empleándose el método directo, un método destructivo el cual toma muestras directas de árboles talándolos y recolectando información de estos estando frescos y secos. (Picard et al., 2012). El método es utilizado para la construcción de ecuaciones alométricas y factores de expansión de la biomasa, consiste en cortar uno y varios árboles, para tomar el peso del fuste, ramas y hojas, y usando ecuaciones se logra interpretar las características buscadas para la zona de interés (Picard et al., 2012). Aunque el método es de gran precisión, este tiene la gran inconveniencia de alterar el ecosistema al tener la necesidad de talar los árboles, al igual que se necesitan más recursos al tener que estar en campo, estos métodos demandan más tiempo, personal capacitado, acceso a las zonas de estudio que suelen estar en zonas alejadas de la urbanidad, impidiendo monitoreos frecuentes.

Al tener estas limitaciones, o consideraciones al respecto de los métodos tradicionales, surge la posibilidad del uso de métodos indirectos. Como dice la revista de ciencias ambientales: *“Las estimaciones de biomasa aérea requieren de un muestreo destructivo o del uso de métodos indirectos, el segundo caso es el más práctico y menos costoso”* (Fonseca, 2017, p. 95). Los métodos indirectos trabajan principalmente con ecuaciones o modelos matemáticos calculados por medio de análisis de regresión entre variables de los árboles, estas variables usualmente

tomadas en campo o de inventarios forestales, las cuales pueden ser el diámetro de pecho, área basa, altura total, altura comercial, entre otros, esto logrando hacer estimaciones no destructivas de la biomasa (Fonseca, 2017). Aunque estos métodos son efectivos, también tienen inconvenientes, el hecho de no tener suficientes datos o los más recientes es uno de estos, donde se deberá trabajar con lo que se presenta, es por esto por lo que la metodología de los métodos indirectos puede ser complementada o hasta mejorado, esto con la implementación de tecnologías más modernas, como la percepción remota usando sensores satelitales, LiDAR, etc. (FAO, 2010).

## TELEDETECCIÓN

La teledetección es una herramienta que ha sido un crucial y un hito desde hace años, ya que la información global y grandes áreas, e incluso en áreas remotas en donde no tendrán nunca acceso o a las que no alcanzarán con métodos tradicionales (FAO, 2010). Sin embargo, la estimación mediante teledetección es factible con datos de campo, señalando:

*“La teledetección no sustituye la necesidad de obtener sólidos datos de campo, pero con la combinación de ambos métodos se consiguen mejores resultados que los que pueden obtenerse utilizando cada uno de los métodos por separado”* (FAO, 2010, p. 243), esto dando a entender la importancia de los datos de campo.

Al poder disponer constantemente de las imágenes satelitales como podrían ser las conocidas Landsat o imágenes de radar tales como las ALOS PALSAR, (Saavedra-Mera, 2024) de igual forma permite evaluar zonas de forma más cómoda y el mismo autor Saavedra-Mera, (2024, p. 3) señala que la teledetección *“permite la evaluación de áreas extensas con una inversión de tiempo y recursos relativamente menor en comparación con los métodos tradicionales de campo”*.

A pesar de estas ventajas, la estimación mediante teledetección tiene aún desafíos por afrontar. Uno de ellos es el poder tener resultados bien estandarizados, por esto el uso de los datos de campo es esencial, Padrón y Navarro-Cerrillo (2007, p. 44.) señalan esto: “la importancia del trabajo de campo en estudios de teledetección radica en la necesidad de proveer una validación a los valores de reflectividad incluidos en los datos de los sensores remotos”. Esta falta de resultados estandarizados, los resultados pueden ser no del todo precisos, esto generando dudas en momentos de decisión sobre manejo forestal.

Otro desafío que se presenta son las limitaciones de resolución en la teledetección, las cámaras deben de tener un balance de resolución espacial, la altura, los pixeles, los cuales se deben de considerar ya que en una imagen de cierto tamaño y ciertos pixeles puede implicar una potencial presencia de múltiples coberturas y por ende una respuesta espectral mezclada. De igual forma, la manera en que se procesan las imágenes puede ser un problema para la resolución debido a que, si el sensor que proporciona las imágenes este compuesto de menos bandas, esta imagen tendrá el beneficio de ser menos pesada para procesar, pero la resolución también será menor, esto impidiendo ser la imagen más clara o precisa perdiendo detalles posibles a analizar (Foody 2002).

Aun con estos desafíos, la teledetección tiene la capacidad de poder trabajar con ellos o llegar a sobrepasarlos trabajando en condiciones óptimas, esto hace que esta herramienta se vuelva tanto confiable como crucial para nuevas estimaciones de biomasa.

## BRECHAS DE CONOCIMIENTO EN PUEBLA EN LA EVALUACIÓN DE ECOSISTEMAS FORESTALES

Aunque Puebla al tener una topografía tan variada que genera una gran diversidad de especies vegetales y diferentes ecosistemas hay, además de diversidad biológica, aportando un 15% de la biodiversidad mexicana y es un estado donde los estudios

académicos resaltan por la cantidad de universidades que se encuentran en el estado (CONABIO, 2011). Sin embargo, existen brechas de conocimiento en la evaluación de ecosistemas forestales.

Una de estas es la cantidad de estudios en relación con la cantidad de zonas forestales o de zonas de interés, existen muy pocos estudios estimando la BA en Puebla, uno de los pocos es el gran trabajo realizado por Rojas-García y Villers-Ruíz (2020) donde se estima la biomasa forestal del parque nacional la Malinche. Además de este existen algunos más ejemplos, pero si tomamos el estudio de estado “La biodiversidad en Puebla” (2021), una de las publicaciones más amplias y con mayor cantidad de información al respecto del patrimonio natural de Puebla, se detecta que hay apenas menciones de la biomasa, más no hay relación con la salud de los bosques o de lo que representa la biomasa aérea tanto para el ambiente. Sin trabajos y estudios generadores de datos de biomasa aérea se niega la información del estado de los bosques del estado, y el estado de Puebla se limita a sí mismo para la creación de programas de conservación, no se piensan en nuevas políticas para la mitigación de cambio climático, así como no se puede tener monitoreos para la posteridad.

Este estudio demuestra otra brecha de posible mejora en el estado de Puebla pues existe una posible falta de cobertura a las zonas forestales, no precisamente sobre la biomasa, pero los datos ya conocidos vienen de inventarios forestales, tal como el de la CONAFOR, proporcionando datos forestales de todo el país y por ciclos de 5 años, más no hay más estudios donde se profundicen las características de los ecosistemas forestales.

La implementación de las nuevas tecnologías es también un área de oportunidad para el conocimiento en el estado de Puebla, dado que las técnicas de teledetección usualmente han sido usuales en trabajos relacionados con el cambio de uso de suelo en zonas específicas del estado de Puebla, estos de gran valor informativo, pero no relacionados del todo con las zonas forestales.

De los pocos estudios de este tipo es el que presenta Cruz González (2021) *La teledetección en la estimación de daños causados por el salivazo Ocoaxo cardonai Castro a bosques de pino y su distribución geográfica potencial*, donde con el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) estima los daños generados por plagas. El programa Nacional Forestal-Protección Forestal señala que: *el Centro Estatal de Prevención y Combate de Incendios Forestales , estará integrado por un Sistema Estatal de Radiocomunicación y un Sistema de Teledetección y Monitoreo de Incendios Forestales integrado por cámaras de video en tiempo real, ubicadas en zonas estratégicas forestales del Estado con el Fin de detectar oportunamente y determinar la ubicación exacta del incendio y proceder a la atención oportuna para minimizar los daños a los ecosistemas* (Gobierno del Estado de Puebla, 2018, p. 33).

Esto deja ver que la teledetección está en algunos proyectos forestales, sirviendo como detectores de incendios, sin embargo, aún con mucho potencial de crecimiento para el uso y generación de nuevos productos. Y es el no aprovechar este gran potencial lo que hace que no existan más herramientas para poder monitorear de forma constante y precisa los ecosistemas forestales del estado.

## JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO EN EL ESTADO

Al tener una región tan extensa y rica de recursos, de diferentes ecosistemas y con zonas forestales de gran interés, es pertinente que un trabajo de estimación de BA pueda ser útil para otros trabajos como un monitoreo forestal. Sumándole a estas características del estado, la CONABIO (2011), indica que existen cuatro provincias fisiográficas: Sierra Madre Oriental, Llanura Costera del Golfo Norte, Eje Neovolcánico y Sierra Madre del Sur. Otra información de la CONABIO indica que 9.4% del territorio poblano está cubierto por bosques, 7% por zonas áridas y 4% por zonas boscosas, lo que convierte al estado en una rica fuente de datos para estudios y proyectos de investigación como el nuestro.

Estas zonas son de vital importancia para la ecología del estado, siendo generadores de servicios. Estas zonas se encuentran en un peligro constante, donde el monitoreo y cuidado de estos son de suma importancia para poder evitar los problemas que se han presentado, pues el estado perdió 66 mil 300 hectáreas de cobertura forestal entre los años 2002 y 2022 (Sánchez, 2023), a causa de que los incendios forestales se hacen más comunes en el estado, en el año 2023 Puebla tuvo 348 siniestros que afectaron casi 9 700 ha (Díaz, 2024)

Por su importancia ecológica y para poder enfrentar los riesgos que se le presentan a los ecosistemas forestales, se deberían de presentar proyectos y estudios para la preservación de estos, la toma de decisiones o la obtención de conocimiento ecológico, la estimación de carbono siendo clave para lograr esto. Estas acciones se podrían lograr con datos o inventarios de biomasa, sin embargo, aún no se realizado ninguno, lo que deja un vacío informativo. Lo que el presente trabajo estaría aportando en este vacío, con la estimación de BA del estado de Puebla, producen generar datos de las zonas forestales, y esto logrando ser de valor para la toma de decisiones en el manejo de estos.

## IMPACTO DEL ESTUDIO

Este estudio, que incluye el mapa de biomasa creado, proporciona datos clave para la gestión forestal de la región; Urbazaev (2018) indica que la información sobre la estructura de los bosques es esencial para evaluar las reservas y las emisiones de carbono. Esto enfatiza lo importantes que son los resultados para la gestión forestal. Esto está relacionado con la relevancia de los bosques como captadores de carbono, ya que su identificación es crucial para abordar el cambio climático; al enfocarse en ellos y desarrollar proyectos de conservación, se consigue mitigar el impacto del cambio climático.

Así como se identifican las áreas con mayor biomasa, se podrán localizar también zonas con posible riesgo de pérdida, donde se podrán implementar acciones para preservar y mejorar la ecología del sitio, o identificar lugares donde se debe evitar la intervención humana o el cambio en el uso del suelo.

## ZONA DE ESTUDIO

### SUPERFICIE Y RELIEVE

El área considerada en el proyecto es el estado de Puebla, situado en el centro del país, y limita con Tlaxcala, Hidalgo, Veracruz, Oaxaca, Guerrero, Morelos y el Estado de México. Las coordenadas geográficas más extremas del estado son: al norte 20° 50'; al sur 17° 52'; al este 96° 43' y al oeste 99° 04' (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2021). La CONABIO (2011) indica que el estado de Puebla abarca una superficie de 34,290 km<sup>2</sup>, y que en este territorio se encuentran cuatro provincias fisiográficas, las cuales se observan en el Mapa 1. Cada una posee peculiaridades distintas, y estas provincias son: Sierra Madre Oriental, Llanura Costera del Golfo Norte, Eje Neovolcánico y Sierra Madre del Sur.

Eje Neovolcánico: representa la provincia más extensa, constituyendo el 38.26% del área del estado, y alberga algunas de las elevaciones más significativas, tanto a nivel estatal como nacional, el Citlaltépetl a 5,610 msnm., Popocatepetl a 5,419 msnm, Iztaccíhuatl a 5,220 msnm, y la Malinche a 4,420 msnm. La zona se localiza entre los paralelos 19° y 20° de latitud norte (INEGI, 2021; Rzedowski, 2006).

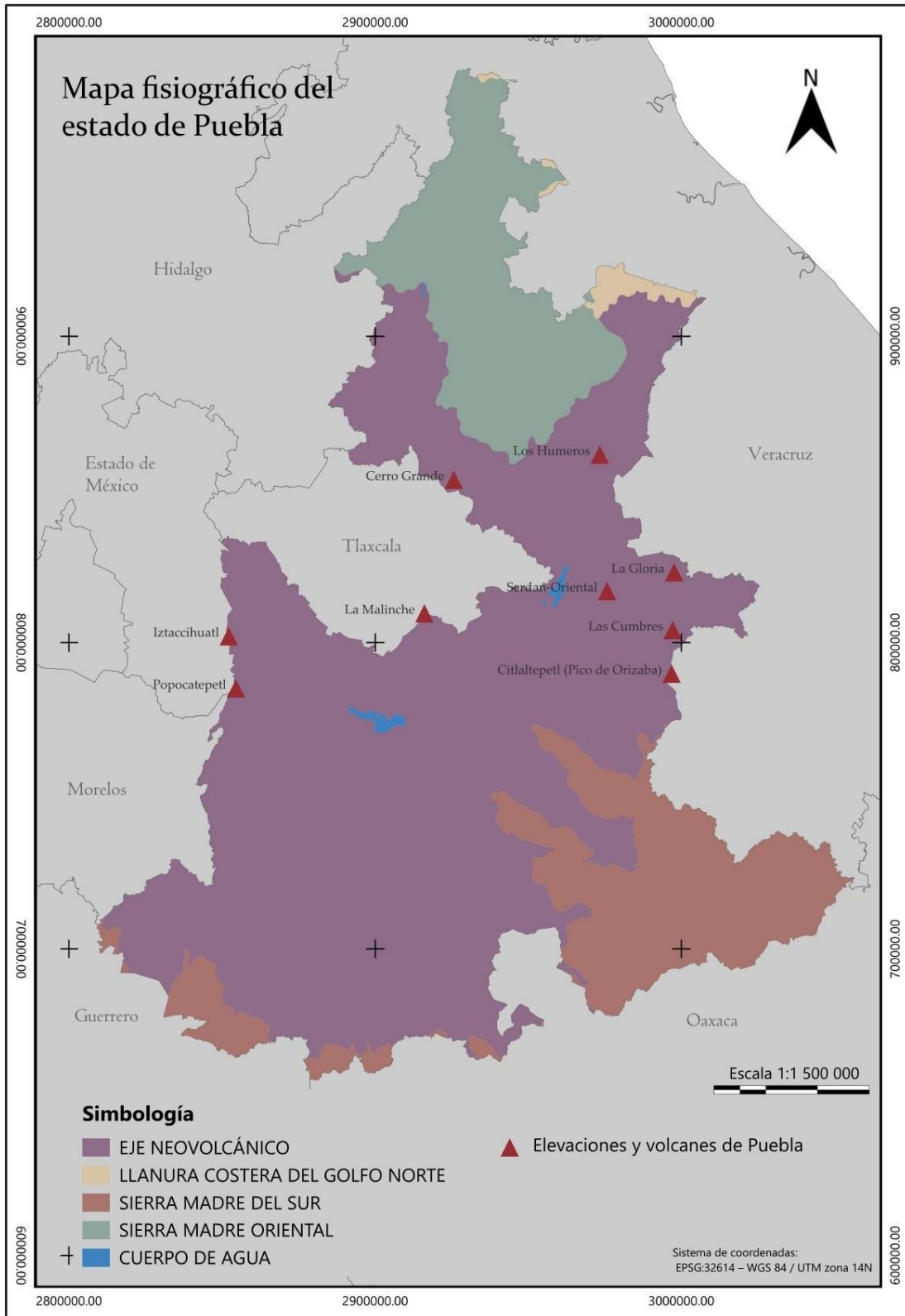
Sierra Madre Oriental: Se encuentra al norte del estado, es frecuente hallar mesetas, valles y sierras de gran elevación en dirección perpendicular al Golfo de México, con altitudes que varían entre 2 mil y 3 mil msnm. La provincia representa el 13.61% del territorio del estado de Puebla. (CONABIO, 2011; García et al., 2009).

La Sierra madre del Sur: Con una superficie del 13.11% del área estatal, también se puede denominar Sierra Mixteca de Puebla, también es cierto que la formación del relieve se desarrolla por la actividad de la placa de cocos, formando sierras y lomeríos (García et al., 2009; CONABIO 2011).

La llanura costera del golfo: Siendo esta la provincia menos extensa, ocupa el 4.74% de la superficie estatal, alcanzando una altitud de 500 m. Esta región la encontramos en el norte del estado, y colinda con el estado de Veracruz, al estar relativamente cerca

de la costa del golfo, se crea una costa de materiales sedimentarios del mar (García et al., 2009; CONABIO 2011).

También mencionamos a las zonas forestales del estado, las cuales podemos encontrar en las zonas montañosas del estado, la sierra norte, sierra nevada o en la sierra del sur, en las cuales se encuentran 1,698,722 hectáreas de las que representan los recursos forestales del estado (CONAFOR 2021, INFyS)

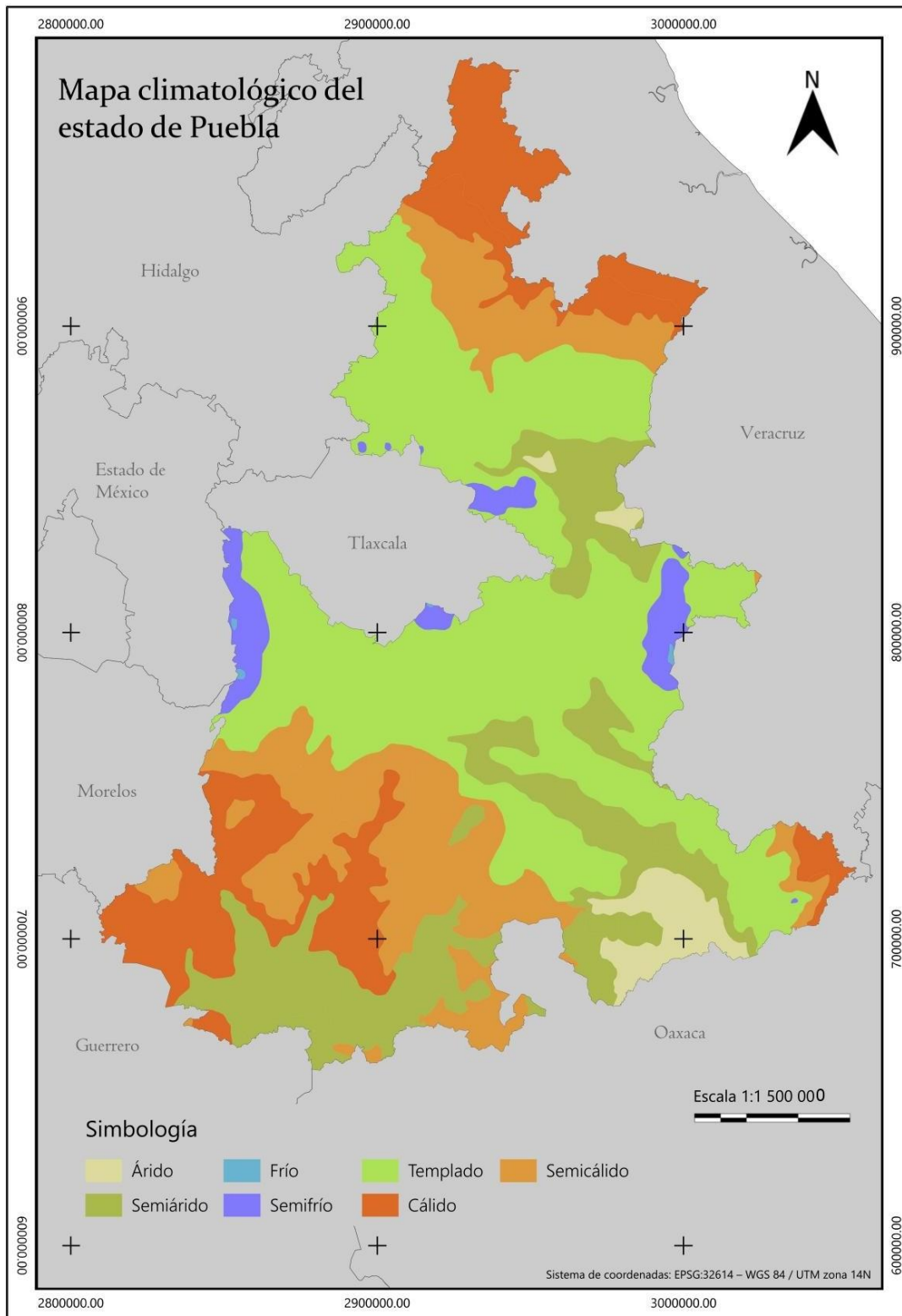


Fuente: Elaboración propia con base en datos del INEGI (2021). Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267575>

Mapa 1

## CLIMAS

Los climas del estado, que se muestran en el Mapa 2, son diversos debido a la variedad de relieves topográficos; destacando el clima templado, principalmente en la zona centro del estado. En el norte del estado, lo que más se presenta es el clima cálido, y se recalca que en el norte del estado se encuentran las selvas del estado; en las laderas occidentales se encuentran los bosques del estado, con climas templados y húmedos (Rzedowski, 2006). Y al sur del estado, donde de igual forma se presentan selvas, los climas cálidos y húmedos (NEGI, 2004; CONABIO 2011).

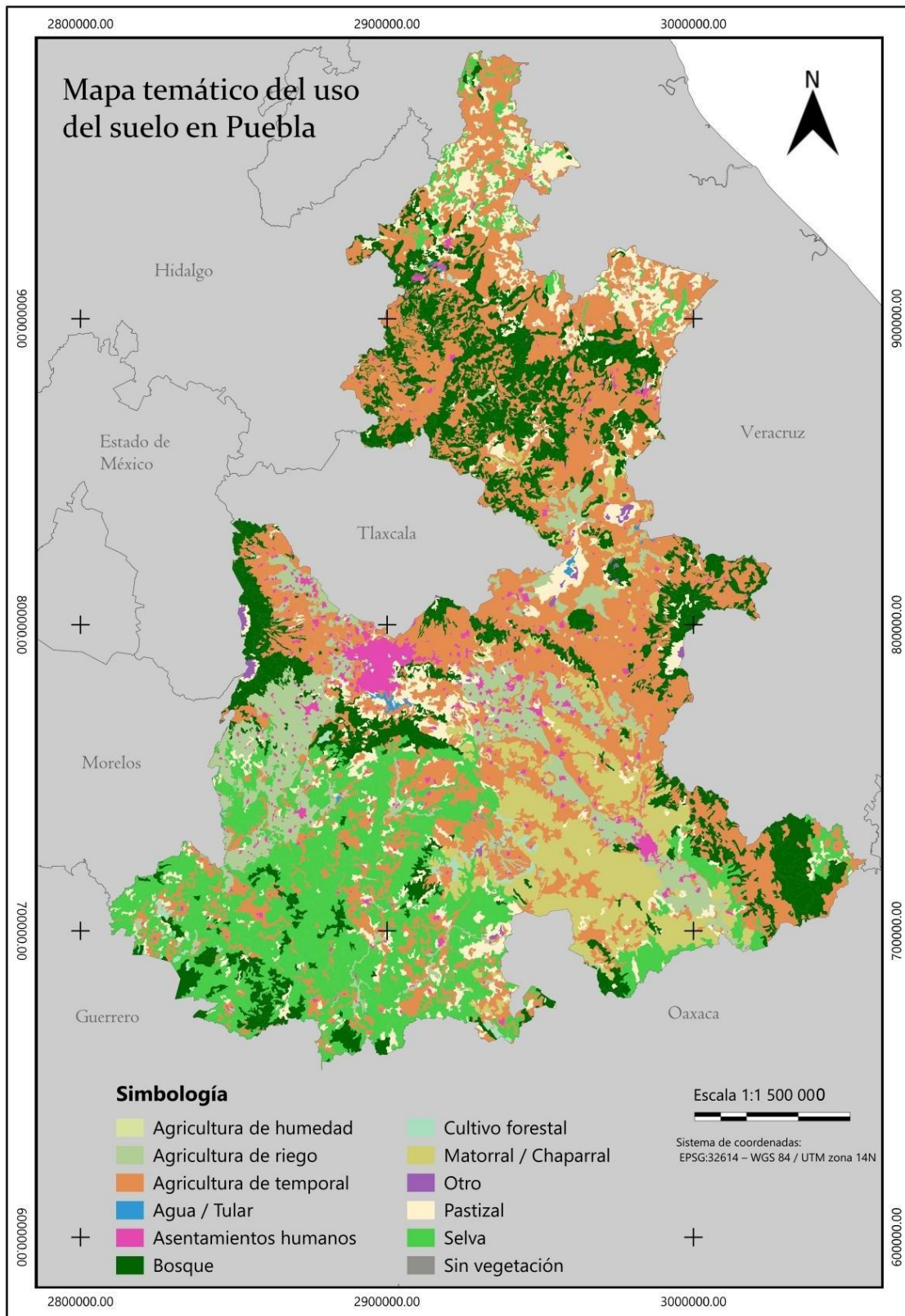


Fuente: Elaboración propia con base en datos de García & CONABIO (1998). Disponible en: [http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis\\_root/clima/climas/clima1mgw](http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/clima/climas/clima1mgw)

Mapa 2

## USO DE SUELOS

El estado de Puebla está conformado por una gran variedad de uso de suelos, principalmente en el norte del estado se presenta una cobertura forestal, en el centro del estado se la agricultura y pastizales predominan. Y es que de acuerdo con datos tomados por CONAFOR, (2021), 1,900,000 HA son áreas no forestales, y 1,600,000 HA son áreas forestales, esto representando el 54.1% y 45.9% de la superficie del estado. Los distintos usos de suelo en el estado de Puebla significan recursos fundamentales para la población de este. Esto principalmente debido al uso agrícola, el cual ocupa el 28% de la superficie del estado, donde va desde agricultura de temporal, agricultura nómada y de riego (CONABIO, 2011). El uso ganadero del suelo principalmente se debe a sistemas de pastoreo bovino, estos de alto costo ecológico, reduciendo la vegetación de los ecosistemas. Los sistemas agrosilvopastoriles también están presentes en los distintos usos de suelo del estado, en donde se hace uso de vegetación como árboles, arbustos y palmas con cultivos agrícolas y o animales, esto proporcionando recursos naturales como madera, o en el caso de Zihuateutla, Puebla, se presenta un sistema de café-bracatinga, donde los árboles se complementan con la mata de café para ser rentable y generar recursos. La representación de los usos de suelos en el estado podemos verlo en el Mapa 3.



Fuente: Elaboración propia con base en datos de INEGI (2021). Disponible en: [http://www.conabio.gob.mx/informacion/sic/?unc=nic\\_ront/usc/inari/usc/250e7nw](http://www.conabio.gob.mx/informacion/sic/?unc=nic_ront/usc/inari/usc/250e7nw)

Mapa 3

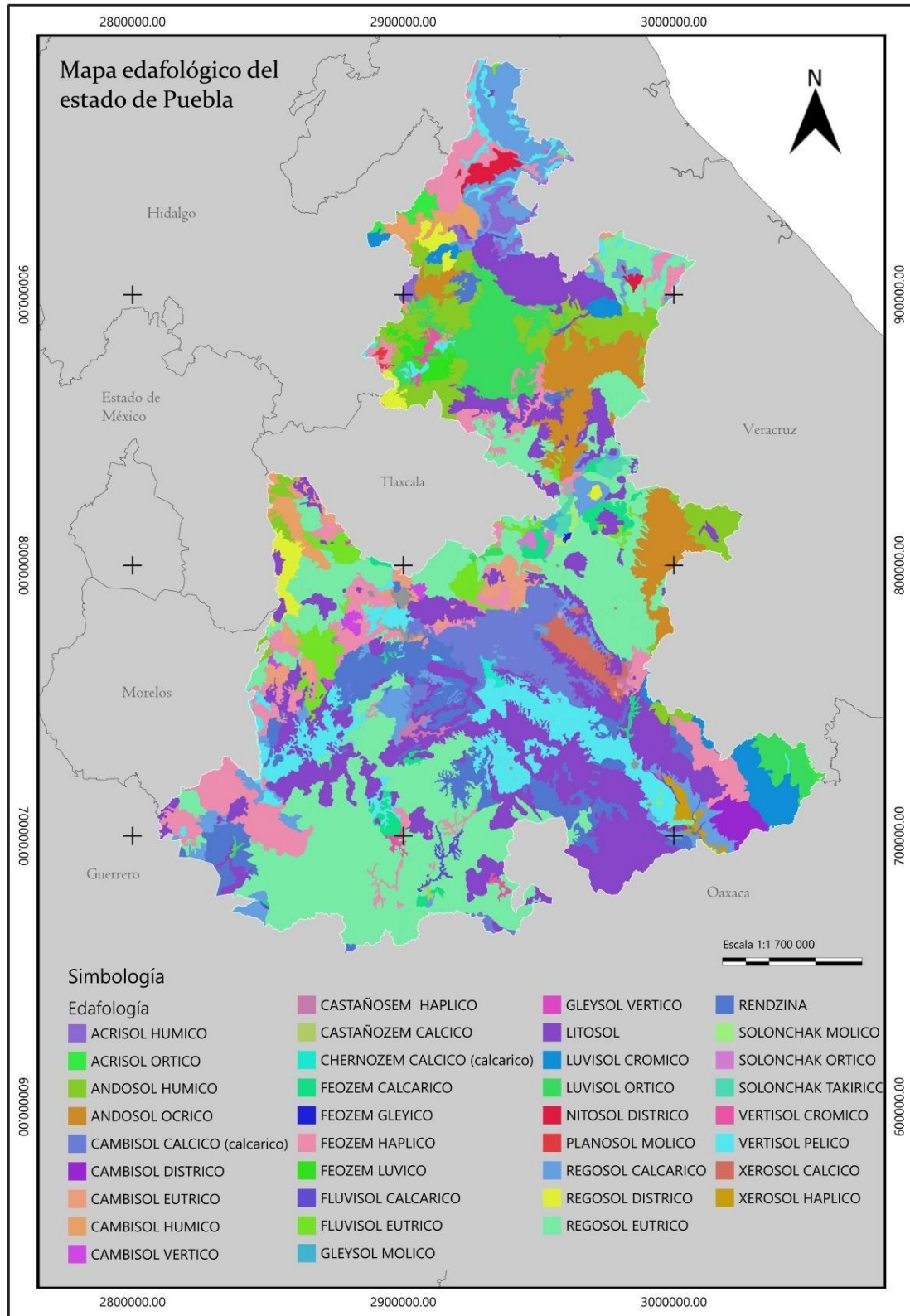
## EDAFOLOGÍA

Las características del estado, los relieves, las altitudes, climas, las zonas volcánicas, al igual que factores andrógénos, hacen que el estado tenga una variedad en los tipos de suelos. De igual forma los procesos geológicos como la meteorización o la oxidoreducción también hace que cada suelo sea distinto de otro.

Con datos de INEGI, (2021), se señala que el estado las principales presencias son:

- Regosoles, es el tipo de suelo que más presencia tiene en el estado, con un 29.67% de superficie en este, y principalmente localizado en las regiones del Eje Neovolcánico y Sierra madre del sur, algunos de las zonas donde se presentan siendo de uso agrónomo, y en otras se presentan zonas forestales con pinos y selva baja caducifolia.
- Litosoles, o leptosoles este suelo comprende un 19.95% de la superficie del estado, ubicándose en las regiones de la sierra madre oriental, sierra madre del sur. Al ser suelos delgados, no se suele practicar actividades de agricultura en ellos y suelen contar con vegetación como matorrales o pastizales.
- Andosoles, ubicados cerca de los grandes volcanes Enel eje Neovolcánico, en las faldas del Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Citlaltépetl y La Malinche, abarcando un 10.96% de la superficie del estado. En ciertas zonas sirviendo para agricultura temporal o en otras zonas sustentan bosques de pino.
- De igual forma en el estado se presenta una gran variedad de tipos de suelo en el estado, como umbrisol, vertisol, nitisol, cambisol, entre otros.

Toda la edafología podemos verlos en el mapa 4, donde se puede observar de mejor forma la gran cantidad de tipos de suelo del estado.



Fuente: Elaboración propia con base en datos de INIFAP & CONABIO (1995). Disponible en: [http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vms=gis\\_root/edafo/tsuelo/eda251mgw](http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vms=gis_root/edafo/tsuelo/eda251mgw)

Mapa 4

## MÉTODOS

El proyecto se desarrolla en torno a la generación de un mapa de biomasa de una gran parte del estado de Puebla, este mapeo se logra a partir del manual “Mapeo de la biomasa aérea de los bosques mediante datos de sensores remotos y R.” de Hernández-Stefanoni, Castillo Santiago, Mauricio, Mas, Tun Dzul y Dupuy Rada (2021). Este manual orienta en el proceso, y recomienda varios detalles.

Se inicia el mapeo desde la instalación de softwares, en este caso R y RStudio, los cuales fueron descargados en su página oficial (<https://posit.co/download/rstudio-desktop/>), siguiendo las instrucciones presentadas en la misma, se instala sin complicación el software de R y RStudio. En este último se logra el proceso total del mapeo.

Como elementos fundamentales del proceso de mapeo, se establece la base de datos de los elementos a mapear, esto obtenido desde Inventario Nacional Forestal y de Suelos (<https://snmf.cnf.gob.mx/datos-del-inventario/>). Donde se obtiene la información por estado y año, aquí en el presente proyecto se toman los datos del estado de Puebla del ciclo 2015 - 2020. Esta base de datos se va a filtrar y modificar para lograr tener un formato específico, en donde se presentará la base de datos en el siguiente formato:

| Conglomerado | cgl\_sit\_arb | Anio | Estado | Municipio | Formato | Cve\_veg\_SV |  
Tipo\_veg\_SV | Veg\_prim\_levantada | Veg\_sec\_levantada | Sitio | Registro | Arbol |  
NumeroTallos | FormaFuste | TipoTocon | Familia\_APG | NombreCientifico\_APG |  
Condicion | NomComun | X | Y | Altitud | Vigor | VigEtapa | PosicionCopa |  
porc\_CopaViva | ExposicionLuz | DensidadCopa | TransparenciaCopa | MuerteRegresiva  
| DiametroBasal | Azimut | distancia | Edad | GrosorCorteza | Long10Anillos |  
NumAnillos25 | Troza1 | Troza2 | Troza3 | Troza4 | Troza5 | Troza6 | Troza7 | Troza8  
| AlturaFusteLimpio | AlturaComercial | Forma\_Biologica\_1 | Altura\_total |  
Diametro\_normal |

Cada columna presenta su respectivo nombre y contiene la información específica según el estado o zona de estudio.

## Imágenes

El siguiente paso es obtener las imágenes que se usaran para el trabajo; se trabaja con las imágenes radar que la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA) proporciona en su software, estas de libre acceso, y muestran un mosaico global de imágenes ALOS PALSAR/PALSAR-2, con imágenes en una gran resolución, y libres de nubes. Las imágenes se presentan en polarizaciones HH y HV y además de estas, se presentan las imágenes Forest / Non forest las cuales en un formato ráster representan información forestal en mapa. Todo dato mencionado se puede encontrar en [Global PALSAR-2/PALSAR/JERS-1 Mosaic and Forest / Non-forest Map](#).

En el mapeo se trabaja con imágenes del año 2020, ya que son las que están disponibles de años más recientes, y las imágenes que se seleccionan abarcan la mayoría del estado de Puebla, el nombre que da JAXA a estas son:

N19W098\_20\_C, N19W099\_20\_C, N20W098\_20\_C, N20W099\_20\_C, N21W098\_20\_C, N21W099\_20\_C.

Para el trabajo, además de las imágenes, necesitamos una forma que delimita la zona de estudio. Esto se hace con un shapefile (.shp o shape); en el software de QGIS se genera el shape con el mismo sistema de referencia que las imágenes, que están en EPSG:4326 - WGS 84

Con las imágenes, el shapefile y las bases de datos, el proceso de modelaje puede ser iniciado, el cual se realiza a través de RStudio, con cinco documentos de códigos o Scripts, los cuales son cinco, que representan cinco pasos. Para esto, se debe de tener un portafolio con los archivos. En cada script se deben de instalar algunos paquetes, y con este proceso se puede lograr el mismo programa de RStudio.

### Primer script:

En este Script se genera una nueva base de datos a partir de los datos que ya se tiene, esto para tener un formato que sea de fácil manejo para el sistema. Se selecciona el archivo con los datos que se tiene, el cual debe de estar ubicado en un directorio que se seleccionará durante el proceso. Se generarán algunas listas en la consola, mostrando datos, también se creará una lista de conglomerados. Y de esta se identificarán los que contengan 4 parcelas, y filtrando datos se genera el dataframe. Se visualizará una lista de valores, donde se verán los encabezados finales, en el cual estará "Conglomerado", "Año", "Tipo\_veg\_SV", "Veg\_prim\_levantada", "Sitio", "Arbol", "NombreCientifico\_APG", "X", "Y", "Forma\_Biologica\_1", "Altura\_total", "Diametro\_normal", "GÉNERO", "ESPECIE".

A continuación, se hacen correcciones taxonómicas, donde los nombres de especies son corregidos y así se trabajan y agregan al dataframe. Se extraen valores de densidad usando valores de datos globales y locales, para esto se usa una lista con la densidad de la madera de árboles, esta lista fue proporcionada por Unidad de Recursos Naturales del Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY) pero si no se contara con estos se usa la función `getWoodDensity` la cual es una función del paquete `BIOMASS`, la cual contiene la densidad de la madera de especies de forma global. Y se agregan estas densidades al dataframe. Se calcula la biomasa aérea para individuos, se logran con ecuaciones locales. Se calcula también la biomasa por conglomerado al igual que otras variables, tales como el área basal, o promedios de la madera por conglomerado. Los resultados obtenidos se agregan al dataframe y se genera un nuevo archivo CSV como producto final de este script 1, el cual será esencial para los siguientes scripts.

## Segundo Script:

En este segundo Script ya se trabaja con las imágenes descargadas desde la plataforma de JAXA. Se descomprimen las imágenes, de igual forma se selecciona el archivo de trabajo donde se encuentran las imágenes correspondientes, ya que se encuentran en carpetas comprimidas, se descomprimen y se enlistan, al igual que se genera un nuevo folder donde se almacenarán las imágenes. Se crean objetos rasters y se unen en un mosaico el cual se recorta y se si es necesario se cambia la proyección del mosaico para una adecuada para el proyecto. Se previsualiza el mapa y la zona de estudio, buscando que se genere imagen HH\_crop que es la figura 1, la imagen HV es la figura 2, y la imagen FNF representada en la figura 3.

Se crea el mosaico de y posteriormente se hace un recorte de la zona de estudio. Se convierten valores de números digitales a retrodispersión en las polarizaciones HH y HV, esto se logra mediante la ecuación (Shimida y Ohtaki, 2010):  $\gamma^\circ (\text{dB}) = 10\text{Log}_{10} (\text{DN}^2) - 83.0(1)$  DN es el número digital expresado como entero corto sin signo y  $\gamma^\circ$  es el coeficiente de retrodispersión expresado en decibeles y aquí se generan dos imágenes la HH y la HV mostradas en la figura 4 y 5 respectivamente. Se aplica un filtro para estas imágenes y de nueva forma se crea un directorio llamado "LeeFl", donde se almacenan los archivos HH y HV con un filtro Lee aplicado. Se proyectan las coordenadas procesadas a la proyección # México ITRF2008/LCC EPSG: 6372. Se guardan las capas HH y HV, y se crea el directorio final con los archivos finales, llamado IMG.

*HH\_crop de zona de estudio*

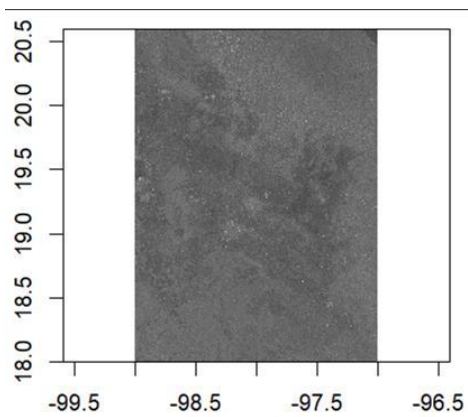


Figura 1.

*HV de zona de estudio*

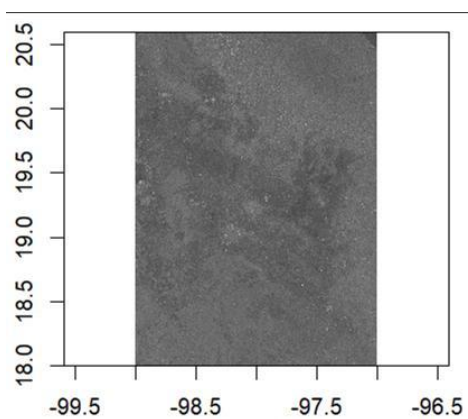


Figura 2.

*FNF de zona de estudio*

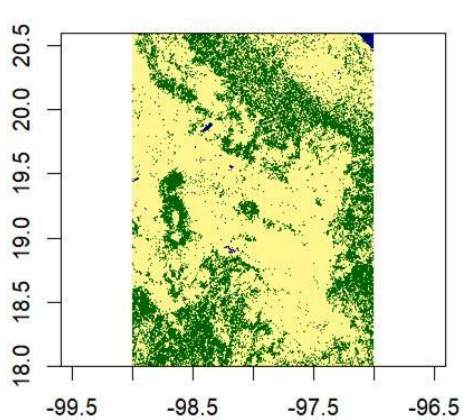


Figura 3.

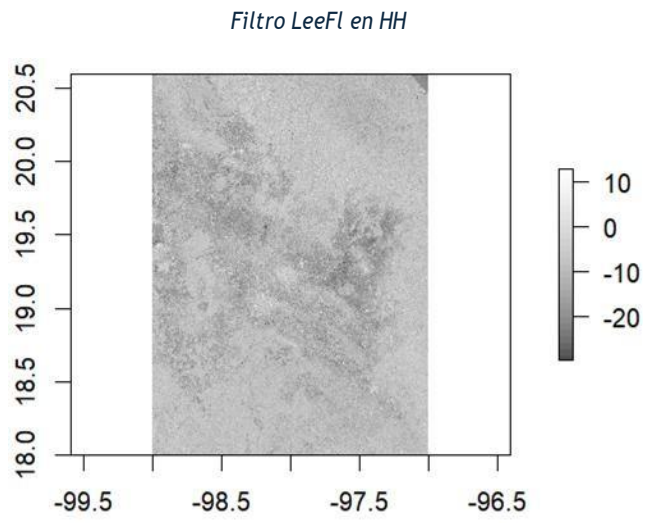


Figura 4.

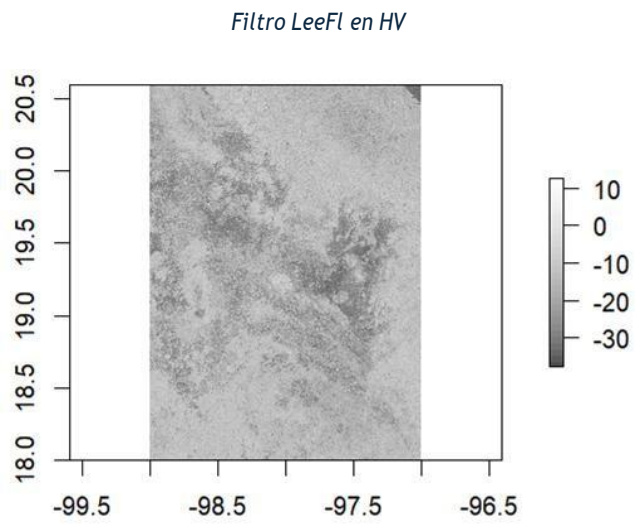


Figura 5.

### Tercer script:

En este script se trabajará de forma directa con las imágenes ALOS PALSAR, se calculó el NDBI que se obtuvo a partir de los procesos hechos a partir de las imágenes HH y HV. De igual forma que en scripts anteriores, se selecciona el directorio correcto, que en esta ocasión será con el cual concluimos en el script pasado, “IMG”, y se seleccionará el shapefile con el área de estudio. Se cargan las imágenes HH y HV, para verificar la proyección de estas, verificar estadísticas, así como se genera un histograma de estas como se muestra en las figuras 6 y 7.

Se normalizan las bandas HH y HV al rango 0-1, esto para mejorar el procesamiento de datos. Y con estas bandas normalizadas se genera el cálculo del NDBI, con la fórmula:  $NDBI = (HH\_normalizado - HV\_normalizado) / (HH\_normalizado + HV\_normalizado)$ . Y se muestra un resultado de este proceso, el cual debe de ser un mapa con información, ya que si se genera un resultado de color negro, algo habrá fallado; si se logra, en la figura 8 se muestra plasmado este paso, se guarda el NDBI y se continua con el cálculo de las medidas de textura en HH, HV y NDBI, las cuales pueden cuantificar la variación de los píxeles para identificar diferencias en la estructura del bosque. Este es un proceso tardado, y se generan 8 texturas, las cuales se guardan en un nuevo directorio “IMG\_TEXTURAS”.

*Histograma de HV*

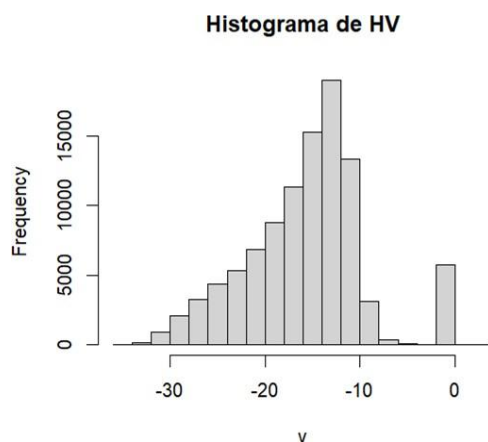


Figura 6.

*Histograma de HH*

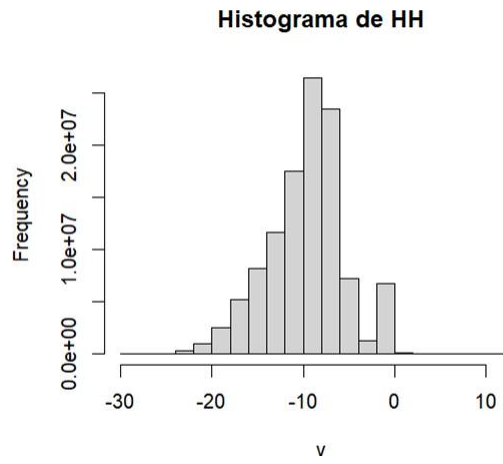


Figura 7.

*NDBI Calculado*

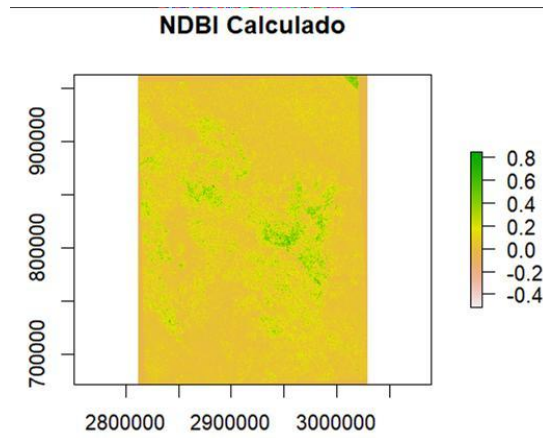


Figura 8.

#### Cuarto script:

En el cuarto Script se prepara la base de datos, de igual forma se selecciona el directorio de trabajo, al igual que se selecciona el documento con coordenadas y datos que se generó en el primer script. Siguiendo se corrige la proyección y se selecciona un directorio donde se tienen las texturas generadas en el script anterior, el cual se nombró IMG\_texturas.

En este script se tratan principalmente con estas texturas, se verifican los nombres de estas texturas, al igual que deben de coincidir con los nombres de columnas del documento generado en el primer script. Se grafica la capa HH\_proj\_cont y los puntos generando la figura 9 y 10. Se extraen los valores por punto central. Después de esto se extraen datos de las polarizaciones, se carga el directorio IMG, se filtran los archivos, se verifican las capas, se plasman los puntos de diferentes capas, como se muestran en la figura 11, al igual que se genera la figura 12 donde muestra la primera capa con puntos proyectados. Se verifica que la columna 7 tenga valores válidos, esto se proyecta para verificarlo. Los datos filtrados se convierten en dataframe y se genera un archivo CSV llamado "DATOS".

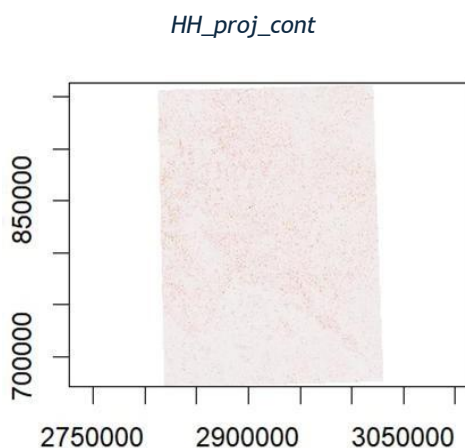


Figura 9.

Puntos de HH\_proj\_cont

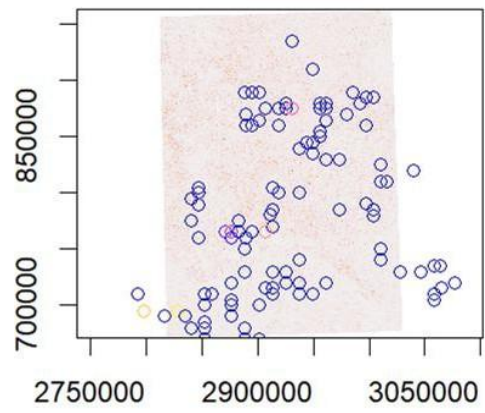


Figura 10.

Puntos en capas

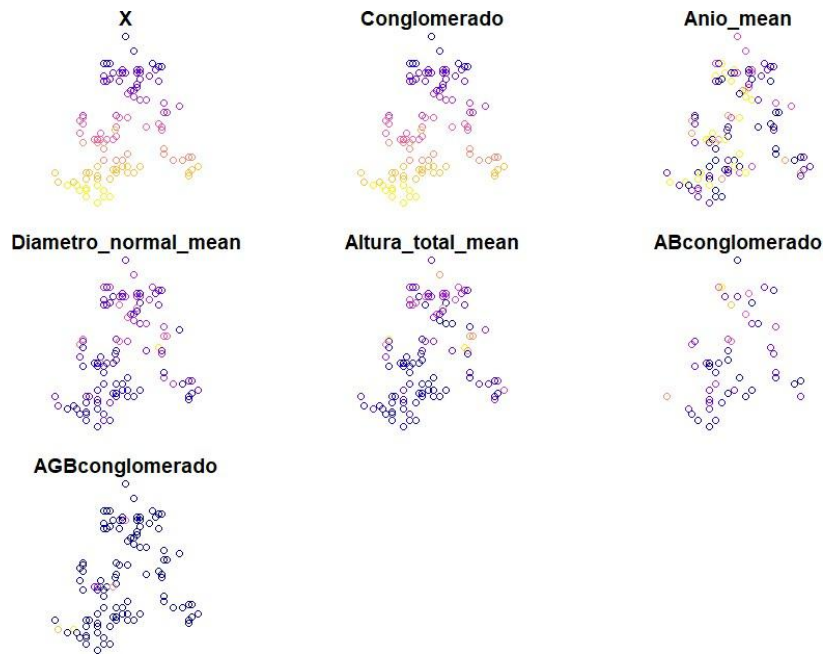


Figura 11.

*Primera capa de resultados*

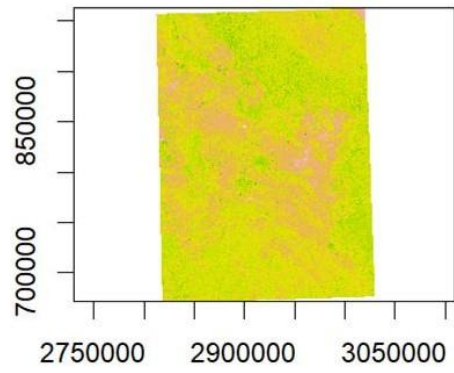


Figura 12.

*Primera capa de resultados con puntos*

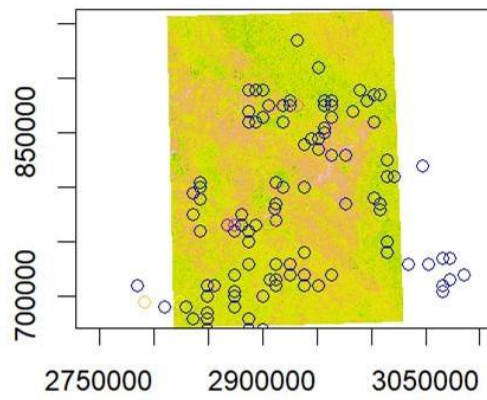


Figura 13.

### Quinto script:

Este quinto y último script inicia seleccionando el directorio de trabajo llamado RF, se definen archivos, se definen parámetros del modelo, y se construye el modelo usando Random Forest (RF), un paquete de RStudio. Se busca validar el modelo para estimar la biomasa, esto usando un conjunto de datos independientes se plasmará una gráfica mostrando esto como en la figura 14. Se hace una predicción de la biomasa, aquí se selecciona de nuevo un directorio de trabajo, el directorio IMG al igual con IMG\_texturas, se crea un dataframe con las imágenes de ambos directorios y se unen estos dataframes. Se crea un directorio de salida y se genera el mapa predicho con la biomasa plasmándose en la consola la figura 15.

Después de esto se crea una máscara con áreas de bosque y áreas de no bosque, con el archivo ráster que se generó con el nombre FNF, en este paso se genera la figura 16. A continuación se define la paleta de colores y se genera el mapa de incertidumbre al igual que se representa el AGB conglomerado como se muestra en la figura 17, con la creación de estas capas se genera el mapa final, el "Mapa de Biomasa Normalizado" presentado en la figura 18.

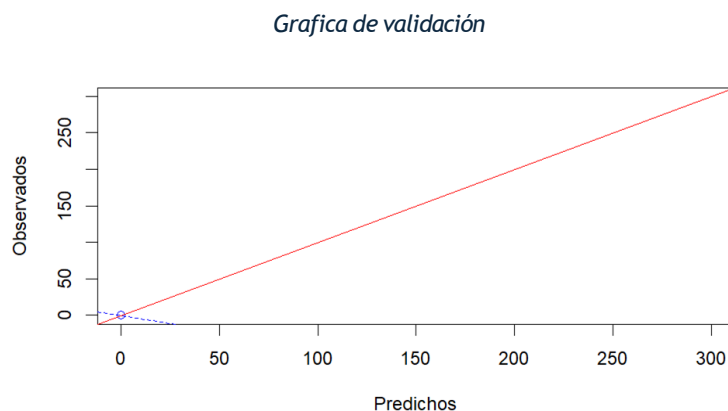


Figura 14.

*Predicción de biomasa*

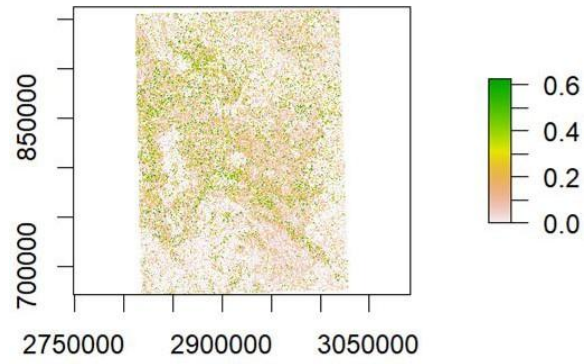


Figura 15.

*Máscara de FNF*

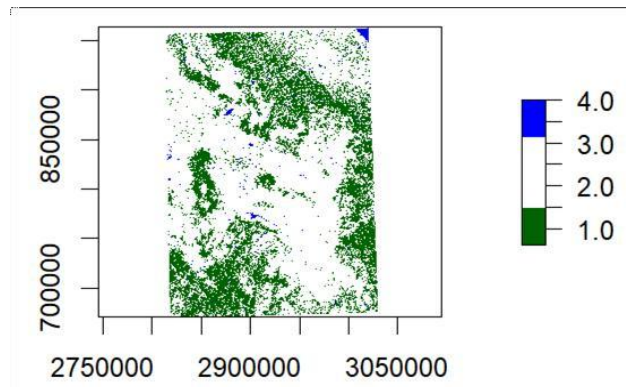


Figura 16.

*AGB conglomerado*

### **AGBconglomerado**

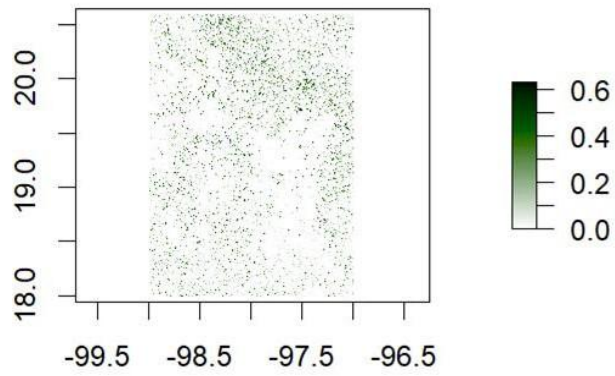


Figura 17.

*Mapa de biomasa normalizado*

### **Mapa de Biomasa Normalizado**

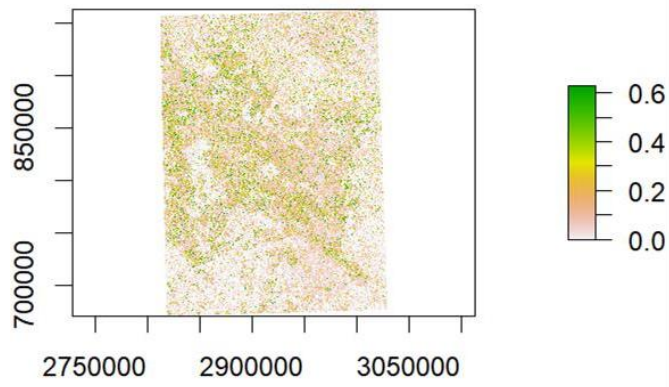


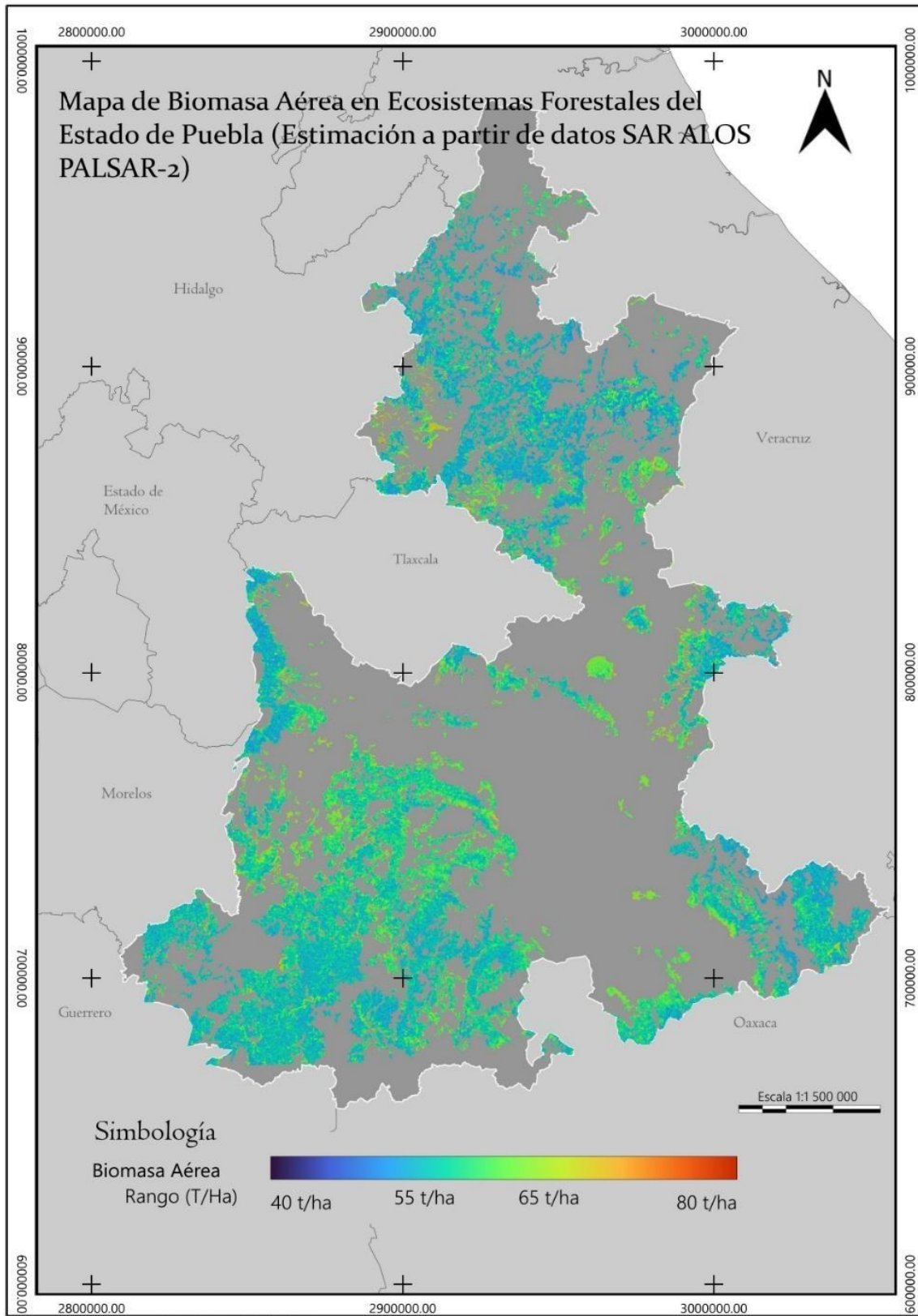
Figura 18.

## MAPA FINAL:

Este mapa es el resultado del proceso generado en RStudio, y después procesado en QGIS para darle el formato de mapa. Donde los valores se representan de la siguiente forma:

- Azul oscuro a cian: biomasa baja (45 - 60 t/ha)
- Verde a amarillo: biomasa media (60 - 70 t/ha)
- Naranja a rojo intenso: biomasa alta (70 - 85 t/ha)

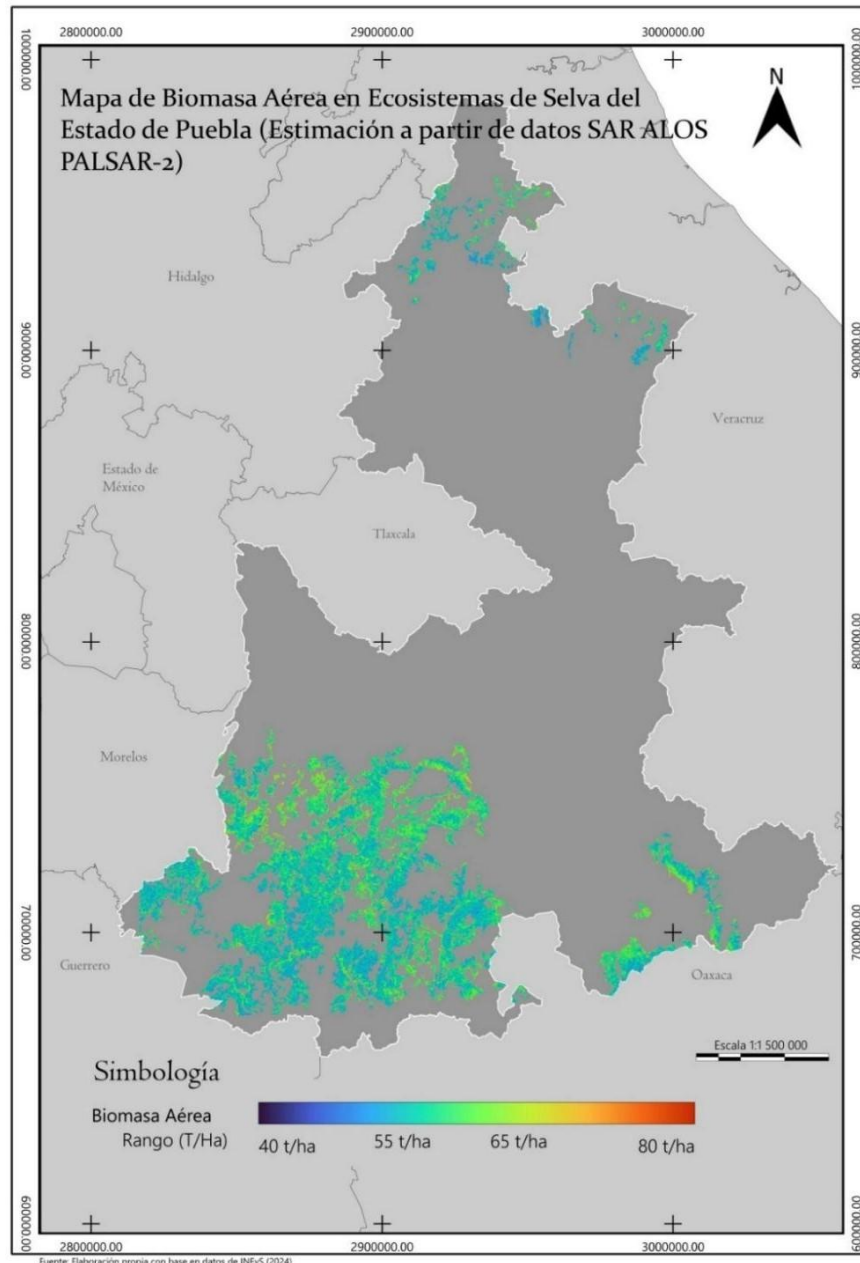
El mapa 5 muestra el resultado final separado los ecosistemas forestales de los demás ecosistemas, demostrando una medición de BA más alta en la zona central del estado, al igual que de la zona colindante con el norte del estado de Tlaxcala.



Mapa 5

## Mapa de Biomasa Aérea en Ecosistemas de Selva del Estado de Puebla (Estimación a partir de datos SAR ALOS PAISAR-2)

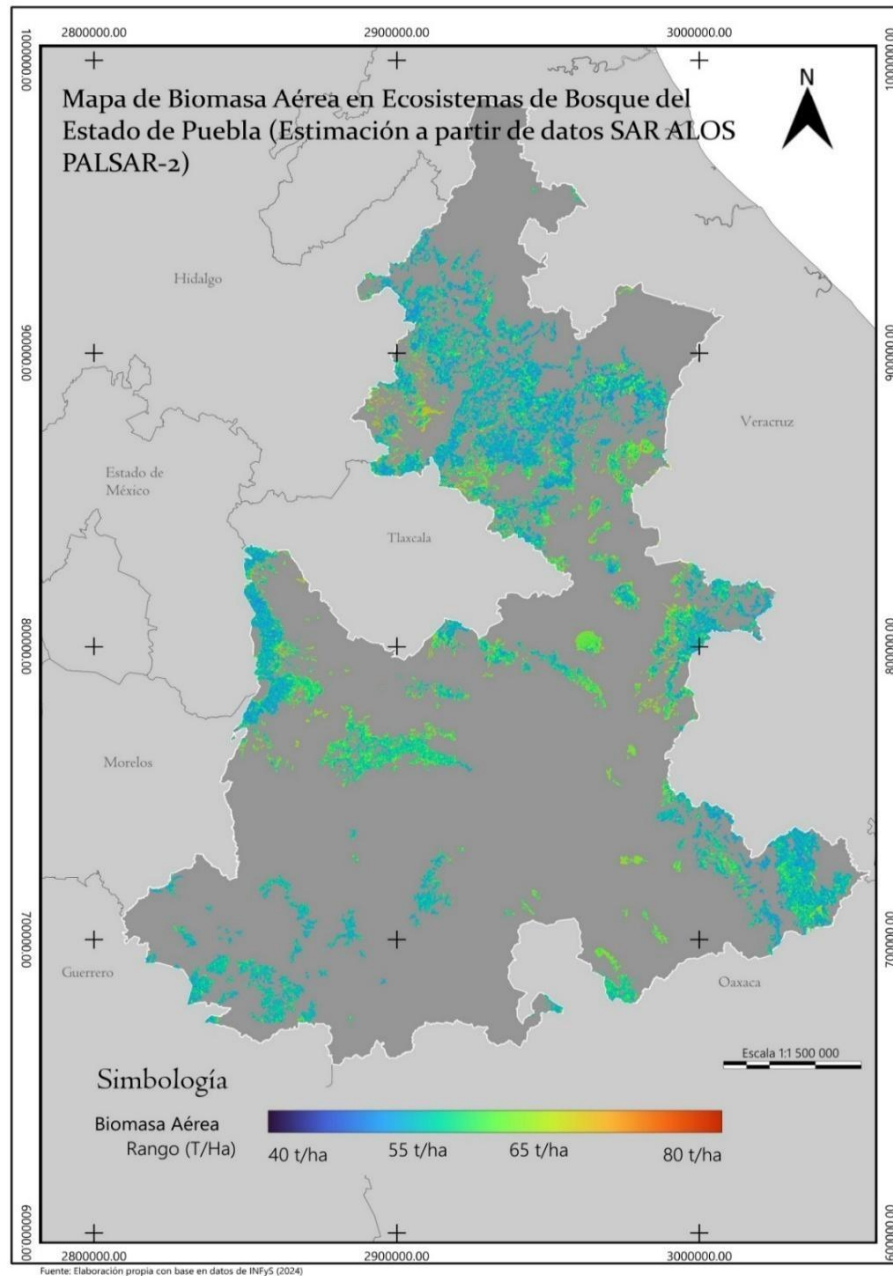
El siguiente mapa (Mapa 6) es el resultado del mapeo, enfocado en los ecosistemas de selva del estado, mostrando puntos de BA más elevados en el centro del estado, de igual forma, al norte del estado se muestra BA presente



Mapa c

## Mapa de Biomasa Aérea en Ecosistemas de Bosque del Estado de Puebla (Estimación a partir de datos SAR ALOS PAISAR-2)

El siguiente mapa muestra la BA específicamente de los ecosistemas de bosque del estado, con una presencia principalmente en el norte del estado, pero se puede notar la presencia del ecosistema en zonas más diversas del estado



Mapa 7

## Post Proceso

### Selvas y Bosques

Una vez generado el mapa de BA mediante el proceso establecido en el manual del CICY (2021), se lleva al software libre QGIS, aquí para poder analizar y poder ver de mejor forma el resultado del mapa, al ser un archivo ráster, se puede visualizar la información y datos de biomasa aérea (en toneladas por hectárea, t/ha) del mapeo de forma sencilla con ayuda de las herramientas del software.

Para tener un mayor conocimiento y estimaciones representativas, en el software QGIS, con el mapa plasmado, se agregan archivos shape de los bosques y selvas del estado (ecosistemas forestales), donde se agregan aleatoriamente 100 puntos en cada ecosistema, y en cada uno se obtiene su valor de BA correspondiente del mapa generado para así poder obtener estadísticas por píxeles.

*Representación de puntos aleatorios en ecosistemas forestales*

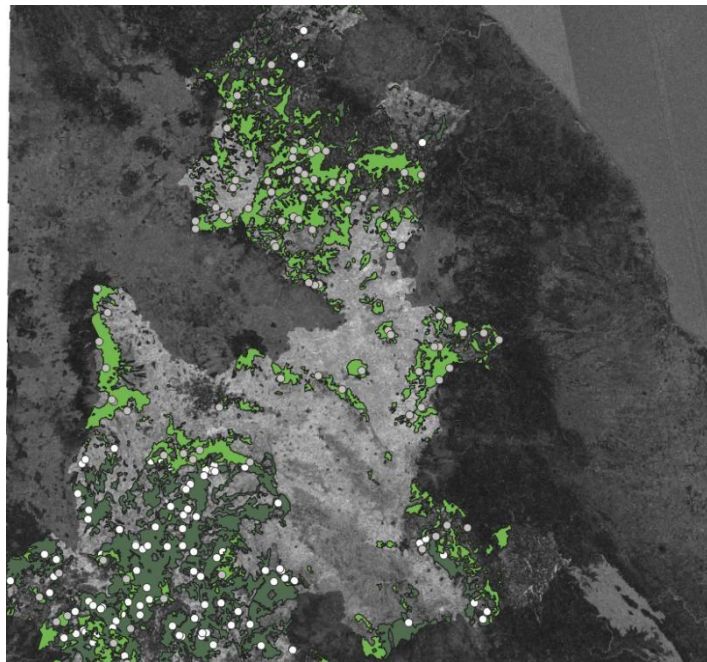


Figura 19.

## Datos por ecosistema

Así que una vez más, para conocer mejor los resultados que obtuvimos se buscó conseguir estadísticas descriptivas de los ecosistemas forestales del estado (selvas bosques), y a estos los clasificamos por diferentes clases; para las selvas en Selvas bajas, Selvas altas y medias, Vegetación secundaria de selvas bajas y Vegetación secundaria de selvas altas y medias; y para los bosques en Bosque de oyamel, pino-encino, pino y encino, Bosque mesófilo de montaña, Bosque de táscate, Vegetación secundaria de bosque de oyamel, pino-encino, pino y encino, Vegetación secundaria de bosque mesófilo de montaña, Vegetación secundaria de bosque de táscate, Bosque de mezquite y Bosque cultivado.

Ahora bien, ya clasificados los ecosistemas forestales se busca conseguir las estadísticas zonales de cada uno; este proceso se hace en el software de QGIS, donde con los datos “Uso del suelo y vegetación, escala 1:250 000, serie VII (continuo nacional)” de (INEGI 2021), se utiliza un shapefile con la división de los usos de suelo; de este modo se separan los ecosistemas del modo en el que los clasificamos y obtener las estadísticas zonales de cada uno de ellos.

Las estadísticas para cada clasificación son:

- **Clasificación:** Nombre o tipo de cobertura o clase (ej. tipo de selva)
- **Píxeles:** Número total de píxeles dentro de la zona
- **Suma:** Suma de los valores del raster en la zona
- **Promedio:** Promedio de los valores del raster en la zona
- **Mediana:** Valor mediano de los datos dentro de la zona
- **Desv. Est.:** Desviación estándar de los valores en la zona
- **Mínimo:** Valor mínimo en la zona
- **Máximo:** Valor máximo en la zona
- **Rango:** Diferencia entre el máximo y el mínimo
- **Variedad:** Cantidad de valores únicos presentes en la zona
- **Varianza:** Varianza de los valores en la zona

## RESULTADOS

### Resultados selvas y bosques

#### Resultados Selva

Las estadísticas descriptivas de los puntos aleatorios en los bosques presentaron una media de 54.88 t/ha y una mediana de 54.53 t/ha. También mostraron una desviación estándar de 2.72 t/ha, esto por tener valores muy similares, siendo el valor más alto de 61.88 t/ha y un mínimo de 49.79 t/ha, un rango de 12.08 unidades.

Estos resultados muestran datos equilibrados, pero con puntos de mayor BA, aún mayores que en el ecosistema de bosques.

#### Resultados de bosque

En la estimación de los bosques, a partir de los 100 puntos registrados se obtiene la media, mediana, varianza, desviación estándar, rango y coef. de variación (%). Como primer resultado, se presenta una media de aproximadamente 54.20 t/ha, una mediana de 53.85 t/ha. Una desviación estándar de 3.23 t/ha, mostrando una baja variabilidad en los resultados. El rango es de 18.60 con un valor máximo de 68.06 t/ha y uno mínimo de 49.46 t/ha, estos datos indican una relación equilibrada en la BA los bosques (Tabla 1).

#### *Comparativa de estadísticas descriptivas de puntos aleatorios en ecosistemas forestales*

Parámetro	Bosque	Selva
Media	54.20	54.88
Mediana	53.85	54.53
Varianza	10.41	7.40
Desviación estándar	3.23	2.72
Rango	18.60	12.08
Coeficiente de variación (%)	5.95	4.96
Valor máximo	68.06	61.88
Valor mínimo	49.46	49.79

*Tabla 1*

## Resultados datos por ecosistemas

Tras la obtención de las estadísticas zonales de cada ecosistema, se obtuvieron los resultados representados en las tablas 2 y 3, la tabla 2 representando resultados de los bosques del estado, en donde podemos ver

Los resultados indican que los bosques de oyamel, pino-encino y encino, son los que mayor representación tienen en el mapa, esto por abarcar más píxeles, por lo que también representan más suma de valores respecto a la biomasa.

En el bosque de mesquite podemos observar que los valores promedios de BA son los más elevados, con 61.09 t/ha, y después de este le sigue la vegetación secundaria de bosque de táscate con 58.10 t/ha, al ver los resultados también observamos que los valores promedios de BA más bajos son los del bosque mesófilo de montaña y su vegetación secundaria, con 53.69 y 53.57 t/ha respectivamente.

De igual forma, en la Vegetación secundaria de bosque de oyamel, pino-encino, pino y encino, es donde se presenta el valor máximo de BA en todo el mapa, con 80.85 t/ha, al igual que tiene el valor mínimo 46.03 t/ha, se presenta una gran variedad de valores, esto por la cantidad de valores presentes siendo la segunda mayor clasificación en el mapa.

Hablando ahora de los resultados de selvas, presentados en la tabla 3, podemos ver que la Vegetación secundaria de selvas bajas, es la clasificación que más presencia tienen en el mapa, de igual forma las clasificaciones con más presencia son las que tienen el mayor valor, aquí siendo 97.30 t/ha, e igual se presenta el valor mínimo del estado, 42.56 t/ha, generando una varianza alta, sin embargo, se presenta el mayor promedio de BA entre las clasificaciones, con 55.82 t/ha.

Las selvas altas y la vegetación secundaria de selvas altas son las que menos píxeles presentan en el mapa, de igual forma, son las que presentan menor promedio de BA en el mapa, siendo 52.49 t/ha y 52.49 t/ha.

Tabla de estadísticas zonales de bosques del estado de Puebla y Tabla de estadísticas zonales de selvas del estado de Puebla

Tabla 2

Clasificación	Píxeles	Suma	Promedio	Mediana	Desv. Est.	Mínimo	Máximo	Rango	Variedad	Varianza
Bosque de oyamel, pino-encino, pino y encino	4320692	235359545.2	54.4726505	53.628901	3.62966244	46.92878	77.15024	30.2214622	1837387	13.174449
Bosque mesófilo de montaña	349020	18738684.37	53.6894286	53.13905	2.90655789	47.22387	73.00694	25.7830696	311672	8.4480787
Bosque de táscate	89510	5151450.278	57.5516733	57.3923	3.88149735	48.52694	75.51718	26.990242	87815	15.066022
Vegetación secundaria de bosque de oyamel, pino-encino, p	4204788	235478569.5	56.0024832	55.188984	4.06007425	46.02689	80.85032	34.8234291	1990009	16.484203
Vegetación secundaria de bosque mesófilo de montaña	1078711	57786283.42	53.5697545	53.072948	2.76335233	46.93559	74.0558	27.1202087	772044	7.6361161
Vegetación secundaria de bosque de táscate	279565	16243570.21	58.1030179	58.129768	3.47236488	48.46056	75.26456	26.8040047	261730	12.057318
Bosque de mezquite	51323	3135516.918	61.0937965	60.949898	2.64681166	51.49314	72.91376	21.4206123	50473	7.005612
Bosque cultivado	16415	919685.9333	56.0271662	55.824066	2.94805362	48.91282	68.16635	19.2535362	16340	8.6910202
Total de bosques	11158603	614417272.9	55.0622038	54.19627	3.83423708	43.26639	80.85032	37.5839272	2612775	14.701374

Tabla 3

Clasificación	Píxeles	Suma	Promedio	Mediana	Desv. Est.	Mínimo	Máximo	Rango	Variedad	Varianza
Selvas altas y medias	19974	1048363.28	52.49	51.93	2.99	46.94	69.55	22.61	19827	8.96
Selvas bajas	2018405	110160186.95	54.58	54.16	2.69	47.30	74.24	26.94	1148015	7.23
Vegetación secundaria de selvas bajas	7890186	440420981.13	55.82	55.21	3.43	42.56	97.30	54.75	2227760	11.78
Vegetación secundaria de selvas altas	761912	41488811.34	54.45	53.91	3.14	47.21	83.30	36.08	619503	9.87
Total de selvas	10690476	593118288.71	55.48	54.90	3.33	42.56	97.30	54.75	2357852	11.11

## DISCUSIÓN

Al ver los resultados del mapeo generado en el proceso, se observa que el promedio de BA de la vegetación secundaria usualmente es mayor a los promedios de las selvas o bosques primarios, esto puede ocurrir por diversas situaciones, una puede ser la cantidad de valores, como en el caso de las selvas altas y medias y de los bosques cultivados y bosques de mezquite, los cuales son los terrenos más pequeños de las clasificaciones, por lo que el promedio total de la zona se puede ver afectado drásticamente si existe alguna zona sin presencia o con poca presencia de BA.

Aunque no sea común las vegetaciones secundarias pueden superar en BA a las vegetaciones primarias, y es que Ibrahim et al. (2013), midió el carbono en biomasa de distintos bosques de Centroamérica, y resultó que los bosques secundarios de Costa Rica y Nicaragua fueron los que presentaron mayor C en comparación a bosques y selvas primarios.

Este sobrepaso en biomasa puede darse por la forma tan acelerada de crecimiento en bosques, un ejemplo de esto se presenta el trabajo hecho por García-Domínguez et al. (2025), donde compara la BA en bosques tropicales de edad menor de 20 años, y estos logran superar la cantidad de BA de bosques con 30 años de abandono. Y esto es debido a que los árboles en crecimiento tienen una capacidad mayor de captura de CO<sub>2</sub>, y una menor liberación de este, esto por la respiración y al crecimiento de los árboles (Casiano-Domínguez, 2018).

También se considera la restricción de la clasificación remota y errores en teledetección, y es que como Foody (2002) indica que se presentan posibles errores de clasificación o posibles limitaciones de resoluciones espaciales en los sensores, también aporta en cuanto a errores entre bosques primarios y secundarios como de los más comunes en mapeos por teledetección.

## Comparativa

Para saber más de cómo se comportan los resultados se trataron de buscar datos de BA sobre bosques y selvas de México, esto es para compararse con los resultados que obtiene el mapeo; los datos son aportados por la CONAFOR (2021), la cual, realiza una división de las selvas en dos, altas y medias, obtienen de estos un promedio de BA de 71.3 t/ha y las selvas bajas presentan un promedio de 28.8 t/ha, con estos promedios al juntar ambos se obtiene un promedio de 50.05 t/ha, que no se aleja del que obtuvimos en el mapeo que es de 52.49 t/ha; pero al momento de obtener los resultados por separado obtenemos del mapeo diferencias más grandes que los datos ofrecidos por la CONAFOR, ya que para las selvas llamadas bajas se tiene un promedio de 54.58 t/ha, comparándolos con los 28.8 t/ha; y para las selvas altas y medias un promedio de 52.49 t/ha en diferencia de los 71/.3 t/ha.

Por otro lado los bosques que estudió CONAFOR fueron los siguientes bosques de coníferas, coníferas y latifoliadas, latifoliadas y bosque mesófilo de montaña, en los cuales se observan BA en t/ha de 66.4, 58.9, 42.6, 83.7 respectivamente. Al hacer un promedio de las 4 distintas biomásas, se obtiene 62.9 t/ha, que al ser comparado con el promedio de las biomásas de los bosques que clasificamos (sin tomar vegetaciones secundarias), el cual es 56.57 t/ha, se observa que son resultados relativamente similares, con 6 unidades de diferencia.

Los resultados del mapeo generado demuestran mucha similitud entre selvas y bosques, sin embargo, varían en respecto a los datos de la CONAFOR, con un aproximado de 5 y 7 t/ha en selvas y bosques respectivamente, esto representado en La Figura 20.

Comparativa del promedio de biomasa aérea de ecosistemas forestales obtenida por la CONAFOR y por el presente mapeo

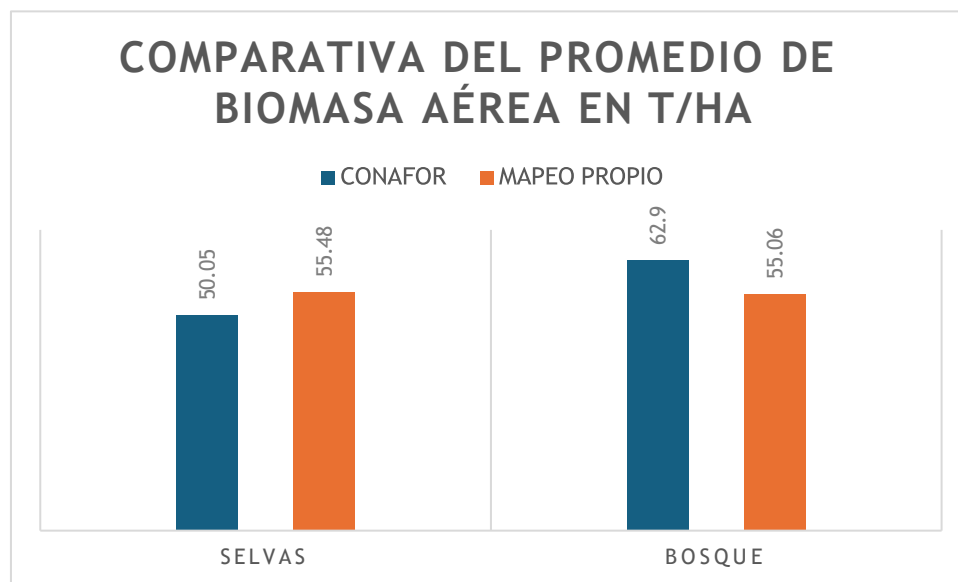


Figura 20.

## CONCLUSIONES

Tras la finalización del proceso planteado, donde con las imágenes ALOS PALSAR-2, datos del inventario nacional forestal proporcionado por INFyS, los scripts proporcionados por el manual del Hernández-Stefanoni et al, (2021), y los softwares libres “RStudio” y “QGIS”, se logró completar la elaboración de un mapa de BA para el estado de Puebla y a partir de este se llevó la obtención de estadísticas descriptivas de los ecosistemas forestales de la entidad.

Los resultados fueron comparados con estudios de biomasa en selvas y bosques de México realizados por la CONAFOR en el año 2021, donde se analizó las similitudes entre selvas y bosques. Los resultados en estas comparaciones fueron similares, con diferencias no significativas teniendo resultados en bosques de 55.06 comparado con el promedio de 50.05 y en las selvas siendo el resultado de 55.06 comparado al 62.9 de la CONAFOR, todo en unidades t/ha.

La comparativa entre resultados da a entender que los datos del mapeo tienen concordancia, esto significando un proceso acertado y adecuado para poder reforzar nuevos proyectos, donde la estimación de biomasa aérea está presente, como monitoreos de bosques, manejos forestales, o seguimiento de riesgos.

Tomando los resultados obtenidos del mapeo, podríamos concluir que los ecosistemas forestales de Puebla se encuentran en situación de degradación o se puede considerar en mal estado al no poder almacenar grandes cantidades de carbono como las que se mostraron en el estado de Nuevo, con resultados promedios de 74.16 y 73 t/ha, donde comparado con el promedio de bosques obtenido el cual fue de 55.06 t/ha, confirmamos que es un resultado bajo.

De la misma forma los resultados obtenidos al respecto de las selvas del estado se muestra muy inferiores a comparación de otras selvas, donde con un promedio de 55.48 t/ha se ve alejado a los datos registrados de bosques tropicales en el centro de México que van de 94 a 124 t/ha. Se debe tomar en cuenta que la mayoría de las

estadísticas tomadas fueron en vegetación secundaria de selvas, y muy poca extensión de selvas altas y medias, aun así, los resultados demuestran una baja BA en las selvas del estado, posiblemente por un estado regular o bajo de estas, pudiendo verse afectadas por alteraciones antropogénicas.

Se debe recalcar que, a pesar de tener resultados positivos para el proyecto, hay áreas de oportunidad para este, donde es posible el uso de alternativas a las imágenes ALOS PALSAR 2, con opciones con mejor resolución o presencia de bandas con análisis de vegetación. La metodología podría tener mejoras con la implementación de datos de campo esto evitando ciertas incertidumbres en el proyecto.

De igual forma, este análisis demuestra que existen oportunidades que se presentan gracias a datos abiertos en la red, ejemplo de estos siendo las imágenes satelitales ALOS PALSAR-2 presentadas en la plataforma de JAXA, o las bases de datos como las del inventario nacional forestal al igual que los softwares libres que complementan trabajos de sistemas de información geográfica como QGIS o RStudio.

## Bibliografía

- Angelsen, A., Brockhaus, M., Sunderlin, W. D., C Verchot, L. (Eds.). (2012). *Análisis de REDD+: Retos y opciones*. Centro para la Investigación Forestal Internacional (CIFOR). Recuperado de [https://books.google.es/books?id=\\_ggiAgAAQBAJ](https://books.google.es/books?id=_ggiAgAAQBAJ)
- Brown, S. (1997). *Estimating biomass and biomass change of tropical forests: A primer* (FAO Forestry Papers No. 134). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/3/w4095e/w4095e00.htm>
- Casiano-Domínguez, M., Paz-Pellat, F., Rojo-Martínez, M., Covalada-Ocon, S., C Aryal, D. R. (2018). El carbono de la biomasa aérea medido en cronosecuencias: Primera estimación en México. *Madera y Bosques*, 24(spe), e2401894. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401894>
- Chao, S. (2012). Forest peoples: Numbers across the world. Forest Peoples Programme. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21192.14088>
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B. C., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P. M., Goodman, R. C., Henry, M., Martínez-Yrizar, A., Mugasha, W. A., Muller-Landau, H. C., Mencuccini, M., Nelson, B. W., Ngomanda, A., Nogueira, E. M., Ortiz-Malavassi, E., Pélissier, R., Ploton, P., Ryan, C. M., Saldarriaga, J. G., C Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground

biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20(10), 3177-3190.

<https://doi.org/10.1111/gcb.12629>

Chávez-Aguilar, G., Pérez-Suárez, M., Gayosso-Barragán, O., López-López, M. Á., C Ángeles-Pérez, G. (2023). Forest management accelerates aboveground biomass accumulation in a temperate forest of Central Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 25(1), 15-33.

<https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2022.03.014>

Collado Torres, R. A., Gama Campillo, L. M., C Díaz López, H. M. (2015). Percepción remota: Elementos básicos. *Kuxulkab'*, 21(40).

<https://doi.org/10.19136/kuxulkab.a21n40.1001>

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2017). *Bosques y cambio climático*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/conafor/documentos/bosques-y-cambio-climatico-23762>

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2021). *Informe de resultados del INFyS 2015-2020*. Coordinación General de Planeación e Información.

<https://snmf.cnf.gob.mx/principaleindicadoresforestalesciclo-2015-2020/>

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (s. f.). *Deforestación – Sistema Nacional de Monitoreo Forestal*. Recuperado el 17 de julio de 2025, de

<https://snmf.cnf.gob.mx/deforestacion/>

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2011). *La biodiversidad en Puebla: Estudio de estado*. Comisión Nacional para el Conocimiento

y Uso de la Biodiversidad, Gobierno del Estado de Puebla y Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

[https://smadsot.puebla.gob.mx/images/Biodiversidad\\_en\\_Puebla2.pdf](https://smadsot.puebla.gob.mx/images/Biodiversidad_en_Puebla2.pdf)

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2021).

*Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (SNIB) - Registros de ejemplares, versión 2021-03* [PDF]. <https://www.snib.mx/ejemplares/docs/CONABIO-SNIB-Version-202103.pdf>

Cruz González, L. Á. (2021). *La teledetección en la estimación de daños causados por el salivazo Ocoaxo cardonai Castro a bosques de pino y su distribución geográfica potencial* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma Chapingo]. Repositorio Institucional UACH <https://repositorio.chapingo.edu.mx/items/b3853450-ae27-447e-8ae9-3532f2764d5c>

Díaz, A. (2024, enero 8). Puebla y Tlaxcala registraron 514 incendios forestales en 2023, reporta Conafor. *Urbano Puebla*.

<https://www.urbanopuebla.com.mx/gobierno/puebla-y-tlaxcala-registraron-514-incendios-forestales-en-2023-reporta-conafor/>

Escobar, E., Maass, M., Alcocer, J., Azpra, E., Falcón, L. I., Gallegos, A., García, F. J., García-Oliva, F., Jaramillo, V., Lecuanda, R., Magaña, V., Martínez-Yrizar, A., Muhlia, A., Rodríguez, R., C Zavala-Hidalgo, J. (2008). Diversidad de procesos funcionales en los ecosistemas. En R. Dirzo, R. González, C J. March (Coords.), *Capital natural de México, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad* (pp. 161-189). Comisión

Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).

[http://www2.biodiversidad.gob.mx/pais/pdf/CapNatMex/Vol%20I/I06\\_Diversidadproc.pdf](http://www2.biodiversidad.gob.mx/pais/pdf/CapNatMex/Vol%20I/I06_Diversidadproc.pdf)

Fonseca, W. (2017). Revisión de métodos para el monitoreo de biomasa y carbono vegetal en ecosistemas forestales tropicales. *Revista de Ciencias Ambientales*, 51(2), 91-109.

<https://doi.org/10.15359/rca.51-2.5>

Foody, G. M. (2002). Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, 80(1), 185-201. [https://doi.org/10.1016/S0034-](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00295-4)

[4257\(01\)00295-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00295-4)

García, U., Canseco-Márquez, L., Gutiérrez-Mayén, G., C Ortega, M. (2009). Actualización del conocimiento de la fauna herpetológica en el estado de Puebla. *Boletín de la Sociedad Herpetológica Mexicana*, 17, 12-36.

[https://www.researchgate.net/publication/286335431\\_Actualizacion\\_del\\_conocimiento\\_de\\_la\\_fauna\\_herpetologia\\_en\\_estado\\_de\\_Puebla](https://www.researchgate.net/publication/286335431_Actualizacion_del_conocimiento_de_la_fauna_herpetologia_en_estado_de_Puebla)

García-Domínguez, A., Cámara-Cabrales, L. C., van der Wal, J. C., C Martínez-Zurimendi, P.

(2018). Biomasa en acahuales de tres unidades ecogeográficas del estado de Tabasco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(48), 69-91.

<https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i48.132>

Gobierno del Estado de Puebla, Secretaría de Planeación y Evaluación. (2018). *Protección forestal: Evaluación del programa presupuestario (Evaluación Programa*

*Presupuestario E128)* [PDF]. <http://evaluacion.puebla.gob.mx/pdf/Pp2018/E128.pdf>

Graciano-Ávila, G., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, O. A., González-Tagle, M. A., Treviño-Garza, E. J., Mora-Olivo, A., C Buendía-Rodríguez, E. (2019). Estimación de volumen, biomasa y contenido de carbono en un bosque de clima templado-frío de Durango, México [PDF]. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 42(2), 121-128.

<https://revistafitotecniamexicana.org/documentos/42-2/4a.pdf>

Hancock, L. (2019, 11 de junio). La degradación de los bosques: ¿Por qué afecta a las personas y la vida silvestre? *World Wildlife Fund*.

<https://www.worldwildlife.org/descubre-wwf/historias/la-degradacion-de-los-bosques-por-que-afecta-a-las-personas-y-la-vida-silvestre>

Hernández Gómez, I. U., C Ellis, E. A. (2023). Selective logging and shifting agriculture may help maintain forest biomass on the Yucatán Peninsula. *Land Degradation & Development*, 34(14), 4456-4471. <https://doi.org/10.1002/ldr.4789>

Hernández-Stefanoni, J. L., Castillo-Santiago, M. Á., Mas, J. F., López-Martínez, R., Dupuy, J. M., Yépez, E. A., C Reyes-Palomeque, G. (2020). Improving aboveground biomass maps of tropical dry forests by integrating LiDAR, ALOS PALSAR, climate and field data. *Carbon Balance and Management*, 15(1), 15. <https://doi.org/10.1186/s13021-020-00151-6>

Hernández-Stefanoni, J. L., Castillo-Santiago, M. Á., Mauricio, J. A., Mas, J. F., Tun-Dzul, F., C Dupuy-Rada, J. M. (2021). *Mapeo de la biomasa aérea de los bosques mediante datos de sensores remotos y R* (Manual técnico; ISBN 978-607-7823-44-5). Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.

[https://www.cicy.mx/Documentos/CICY/Ligas\\_Interes/2021/Portada\\_extendida\\_MAN\\_UAL\\_BIOMASA\\_ISBN\\_CICY.pdf](https://www.cicy.mx/Documentos/CICY/Ligas_Interes/2021/Portada_extendida_MAN_UAL_BIOMASA_ISBN_CICY.pdf)

Ibrahim, M. A., Chacón, M., Cuartas, C., Naranjo, J., Ponce, G., Vega, P., Casasola, F., C Rojas, J. (2013). *Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arbórea en sistemas de usos de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua* (Avances de investigación No. 452). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).

[https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/7934/Almacenamiento\\_de\\_carbono\\_en\\_el\\_suelo.pdf](https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/7934/Almacenamiento_de_carbono_en_el_suelo.pdf)

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2021). *Resumen por entidad federativa 2021* [PDF].

[https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/areasgeograficas/resumen/resumen\\_21.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/areasgeograficas/resumen/resumen_21.pdf)

Jaramillo, V. J., Kauffman, J. B., Rentería-Rodríguez, L., Cummings, D. L., C Ellingson, L. J.

(2003). Biomass, carbon, and nitrogen pools in Mexican tropical dry forest landscapes. *Ecosystems*, c(6), 609-629. <https://doi.org/10.1007/s10021-002-0195-4>

Martínez Salvador, M., Sosa Pérez, G., Chacón Sotelo, J. M., Pinedo Álvarez, A., Villarreal

Guerrero, F., C Prieto Amparan, J. A. (2019). El monitoreo forestal por medio de Sitios Permanentes de Investigación Silvícola en Chihuahua, México. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*, 10(55). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i55.511>

Oberhuber, T., Lomas, P. L., Duch, G., C González Reyes, M. (2010). *El papel de la biodiversidad* (N. del Viso, Coord.). Centro de Investigación para la Paz, CIP-Ecosocial.

[https://www.fuhem.es/media/cdv/file/biblioteca/Dossier/Dossier\\_El\\_papel\\_de\\_la\\_biodiversidad.pdf](https://www.fuhem.es/media/cdv/file/biblioteca/Dossier/Dossier_El_papel_de_la_biodiversidad.pdf)

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2001).

Capítulo 2: Volumen de madera y biomasa leñosa. En *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2000 (FRA 2000)*. <https://www.fao.org/4/y1997s/y1997s08.htm>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2010).

*Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010* [PDF]. FAO.

<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/db68611f-6afe-43b1-ab71-5a40bdaa454f/content>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2015).

*Evaluación de los recursos forestales mundiales 2015: ¿Cómo están cambiando los bosques del mundo?* (2.9 ed.).

<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/14b817a5-4b34-432c-abab-86942b11adec/content>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2020). *El*

*estado de los bosques del mundo 2020: Los bosques, la biodiversidad y las personas*.

FAO. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/386cc341-e052-4064-b23b-253b044d765c/content>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2022). *El estado de los bosques del mundo 2022*.

<https://www.fao.org/3/cb9360es/online/src/html/deforestation-land-degradation.html>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (s. f.).

*Reducción de la degradación forestal. Conjunto de Herramientas para la Gestión Forestal Sostenible*. Recuperado de <https://www.fao.org/sustainable-forest-management/toolbox/modules-alternative/reducing-forest-degradation/basic-knowledge/es/>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (s. f.).

*Assessment and monitoring of forests*. Recuperado de <https://www.fao.org/forestry/our-focus/assessment-monitoring/en>

Padrón, E., C Navarro-Cerrillo, R. M. (2007). Aboveground biomass in *Prosopis pallida* (Humb. and Bonpl. ex Willd.) H. B. K. ecosystems using Landsat 7 ETM+ images. *Revista Chilena de Historia Natural*, 80(1), 43-53. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2007000100004>

Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., Phillips, O. L., Shvidenko, A., Lewis, S. L., Canadell, J. G., *et al.* (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333(6045), 988-993. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>

Picard, N., Saint André, L., C Henry, M. (2012). *Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles: Del trabajo de campo a la predicción* [Manual técnico]. FAO/CIRAD.

<https://www.fao.org/4/i3058s/i3058s.pdf>

Quijano Angarita, A. C., y Morales Gaitán, Y. L. (2017). Modelo regresivo para la estimación de biomasa aérea forestal a partir de datos de parcelas permanentes y datos Radar SAR ALOS PALSAR en el Parque Natural Bataclán, Cali. *UD y la Geomática*, (11), 66-72.  
<https://doi.org/10.14483/23448407.12377>

Reyes-Palomeque, G., Andrés-Mauricio, J., C Hernández-Stefanoni, J. L. (2025). Fuentes de error más comunes en la estimación y mapeo de la biomasa aérea de los bosques al usar datos de campo y de sensores remotos: Consideraciones en la Península de Yucatán. *Desde el Herbario CICY*, 17, 18-24. Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. Recuperado de [http://www.cicy.mx/sitios/desde\\_herbario/](http://www.cicy.mx/sitios/desde_herbario/)

Rojas-García, F., C Villers-Ruiz, L. (2020). Estimación de la biomasa forestal del Parque Nacional Malinche: Tlaxcala - Puebla. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 33(104), 59-86. Recuperado de <https://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/735>

Rzedowski, J. (2006). Bosque de coníferas (Cap. 17). En *Vegetación de México* (pp. [coloca las páginas si las sabes]). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).

f

Saavedra-Mera, K. A. (2024). Perspectivas sobre el uso de tecnología de teledetección para el monitoreo de la deforestación y degradación forestal. *Multidisciplinary Collaborative Journal*, 2(3), 1-12. <https://doi.org/10.70881/mcj/v2/n3/37>

Sánchez Aguilar, R. L., C Rebollar Domínguez, S. (2016). Deforestación en la Península de Yucatán, los retos que enfrentar. *Madera Y Bosques*, 5(2), 3-17. <https://doi.org/10.21829/myb.1999.521344>

Sánchez, J. (2023, julio 13). Deforestación en Puebla se acelera por tala ilegal, incendios y demanda inmobiliaria. *El Sol de Puebla*. <https://oem.com.mx/elsoldepuebla/local/deforestacion-en-puebla-se-acelera-por-tala-ilegal-incendios-y-demanda-inmobiliaria-19473232>

Thompson, I. (2011). Biodiversidad, umbrales ecosistémicos, resiliencia y degradación forestal. *Unasylva*, c2(238), 25-30. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). <https://www.fao.org/4/i2560s/i2560s05.pdf>

Tovar Blanco, A. L., Lizarazo Salcedo, I. A., C Rodríguez Eraso, N. (2020). Estimación de biomasa aérea de *Eucalyptus grandis* y *Pinus spp.* usando imágenes Sentinel-1A y Sentinel-2A en Colombia. *Colombia Forestal*, 23(1), 79-93. <https://doi.org/10.14483/2256201X.14854>

United States Department of Agriculture (USDA). (s. f.). *Bosques: Una cuenta corriente del ciclo del carbono*. Climate Hubs. Recuperado de

<https://www.climatehubs.usda.gov/hubs/northeast/bosques-una-cuenta-corriente-del-ciclo-del-carbono>

Urbazaev, M., Cremer, F., Migliavacca, M., Reichstein, M., Schmillius, C., C Thiel, C. (2018).

Potential of multi-temporal ALOS-2 PALSAR-2 ScanSAR data for vegetation height estimation in tropical forests of Mexico. *Remote Sensing*, 10(8), 1277.

<https://doi.org/10.3390/rs10081277>

World Health Organization (WHO). (2025, February 18). *Biodiversity*.

<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/biodiversity>

Zhao, M., C Zhou, G. (2006). Carbon storage of forest vegetation in China and its relationship with climatic factors. *Climatic Change*, 74(1-2), 175-189.

<https://doi.org/10.1007/s10584-006-6775-0>