



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

**Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales
Programa Institucional de Doctorado en Ciencias Biológicas**

**“Evaluación de la declinación forestal en bosques
templados relacionada al cambio climático mediante
drones (VANTs)”**

TESIS

Que para obtener el grado de

Doctor en Ciencias Biológicas

Opción: Ciencias Agropecuarias, Forestales y Ambientales

PRESENTA

José Luis Gallardo Salazar

Director:

Dr. Cuauhtémoc Sáenz Romero

Comité Tutorial

Dr. Roberto Lindig Cisneros (Codirector). IIES-UNAM

Dr. José Arnulfo Blanco García. Facultad de Biología-UMSNH

Dr. Leonel López Toledo. INIRENA-UMSNH

Dr. Ángel Rolando Endara Agramont. ICAR-UAEM



Morelia, Michoacán, marzo 2025

DEDICATORIA

A mis padres,

por su amor incondicional, su mano dura y su ejemplo de perseverancia. Gracias por enseñarme que el conocimiento es la mejor herramienta para enfrentar los desafíos. Sin ustedes, este logro no sería posible.

A mi esposa,

compañera de vida, de sueños y de batallas. Gracias por tu amor incondicional, por tu paciencia infinita y por ser mi refugio en los momentos difíciles. Tu apoyo, aliento y confianza en mí han sido fundamentales para recorrer este camino, incluso cuando las dudas y el cansancio parecían abrumarme.

A mis hermanos,

por ser mi inspiración y mis compañeros de vida. Su apoyo y confianza me han impulsado a seguir adelante y alcanzar mis metas con determinación.

A mis sobrinos,

con la esperanza de que la curiosidad y la pasión por la ciencia los motiven a descubrir el mundo con nuevos ojos y a construir un futuro mejor.

A todos aquellos que, de una u otra manera, han sido parte de este proceso,

gracias por su apoyo, su confianza y sus palabras de aliento. Este logro es también de ustedes.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada (815176), cuyo apoyo fue esencial para la realización de mis estudios de doctorado. A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por ser un pilar fundamental en mi formación académica y profesional. Al Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, por brindarme la oportunidad de ser parte del Programa Institucional de Doctorado en Ciencias Biológicas.

Al Dr. Cuauhtémoc Sáenz Romero y al Dr. Roberto Lindig Cisneros por su excepcional dirección, por compartir su vasto conocimiento y por brindarme su apoyo incondicional a lo largo de este proceso. Más allá de la relación académica, se ha forjado una amistad basada en el respeto, la confianza y el aprendizaje.

Al Dr. José Arnulfo Blanco García, Dr. Leonel López Toledo y Dr. Ángel Rolando Endara Agramont por sus valiosas observaciones y aportes a lo largo de este proyecto de investigación. Sus conocimientos, sugerencias y análisis críticos fueron fundamentales para enriquecer este trabajo.

Gracias a mis compañeros del Laboratorio de Genética Forestal, Vero, Lupita, Gaby y Paulina por su apoyo en este proceso.

Por apoyo de financiamiento al proyecto a: Instituto de Ciencia Tecnología e Innovación (ICTI) del Estado de Michoacan (ICTI-PICIR23-116); Programa PAPIT-UNAM (IG 374 200221); Monarch Butterfly Fund; Fondo de Conservación del Eje Neovolcánico; Dirección de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, y a la Coordinación de la Investigación Científica, UMSNH.

ÍNDICE

RESUMEN GENERAL	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN GENERAL	3
PLANTEAMIENTO DE HIPÓTESIS	6
General	6
Específicas	6
OBJETIVOS	7
General	7
Específicos	7
RESULTADOS	8
Capítulo I. Análisis del vigor de <i>Pinus hartwegii</i> Lindl. a través de un gradiente altitudinal mediante imágenes multiespectrales VANT, una evidencia de declinación forestal posiblemente asociada al cambio climático	8
Capítulo II. Dinámica de la desvitalización de <i>Abies religiosa</i> en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca mediante VANTs y su relación con el cambio climático	30
DISCUSIÓN GENERAL	54
CONCLUSIONES GENERALES	58
BIBLIOGRAFÍA	59

RESUMEN GENERAL

El cambio climático está acelerando la declinación forestal en ecosistemas templados, afectando la vitalidad de especies clave y comprometiendo los bienes y servicios ambientales que nos brindan estos sistemas. En este contexto, el uso de sensores remotos y vehículos aéreos no tripulados (VANTs; comúnmente llamados drones) son una herramienta eficaz y con alta precisión para el monitoreo y diagnóstico del estado del arbolado en grandes extensiones. Esta tesis doctoral evalúa la aplicación de VANTs para el estudio de la declinación forestal inducida por el cambio climático en diferentes escenarios y escalas, abordando la investigación en tres capítulos interconectados.

En el primer capítulo se analiza la relación entre la altitud y el vigor de *Pinus hartwegii* en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca, utilizando imágenes multiespectrales para detectar patrones de estrés y vulnerabilidad climática. En el segundo capítulo se estudia la desvitalización de *Abies religiosa* en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca mediante el uso de sensores LiDAR y multiespectrales, revelando una fuerte relación entre el índice de aridez mensual y la pérdida de vitalidad del arbolado.

Los resultados obtenidos confirman que los VANTs proporcionan datos de alta resolución espacial y temporal, lo que permite optimizar la toma de decisiones en la gestión forestal, detectar con mayor precisión los síntomas de declinación y anticipar estrategias de manejo adaptativo. A pesar de sus ventajas, se identifican retos en la implementación de estas tecnologías, como la integración de inteligencia artificial para automatizar el análisis de datos y la necesidad de desarrollar metodologías estandarizadas para la detección de cambios en la desvitalización de los árboles. La presente tesis demuestra que el uso de VANTs en el monitoreo forestal es una herramienta clave para enfrentar los desafíos del cambio climático y contribuir a la conservación de los bosques templados del Eje Volcánico Transmexicano.

Palabras clave: Declinación forestal, cambio climático, sensores remotos, vehículos aéreos no tripulados, VANTs, LiDAR, multiespectral.

ABSTRACT

Climate change is accelerating forest decline in temperate ecosystems, affecting the vitality of key species and compromising the environmental goods and services these systems provide. In this context, remote sensing technologies and unmanned aerial vehicles (UAVs; commonly known as drones) have become highly precise and effective tools for large-scale forest monitoring and tree health assessment. This doctoral thesis evaluates the application of UAVs in studying climate change-induced forest decline across different scenarios and spatial scales, structuring the research into four interconnected chapters.

The first chapter examines the relationship between altitude and the vigor of *Pinus hartwegii* in the Nevado de Toluca Flora and Fauna Protection Area, using multispectral imagery to detect stress patterns and climatic vulnerability. The second chapter focuses on the devitalization of *Abies religiosa* in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, integrating LiDAR and multispectral sensors to reveal a strong correlation between the monthly aridity index and the loss of tree vitality. The results confirm that UAVs provide high-resolution spatial and temporal data, optimizing decision-making in forest management, improving the detection of decline symptoms, and facilitating adaptive management strategies. Despite their advantages, challenges remain in implementing these technologies, such as integrating artificial intelligence to automate data analysis and developing standardized methodologies for detecting tree devitalization. This thesis demonstrates that UAV-based forest monitoring is a crucial tool for addressing climate change challenges and contributing to the conservation of temperate forests in the Trans-Mexican Volcanic Belt.

Keywords: Forest decline, climate change, remote sensing, unmanned aerial vehicles, UAVs, LiDAR, multispectral.

INTRODUCCIÓN GENERAL

El cambio climático global se ha convertido en uno de los mayores desafíos ambientales en la actualidad (Abbass et al., 2022), con serias implicaciones para la persistencia de los ecosistemas forestales (Allen et al., 2010). De manera particular, los bosques templados están experimentando una declinación significativa atribuible a la combinación de sequías más intensas y prolongadas, aumento de temperaturas y otros factores como la volatilidad hidroclimática (Hammond et al., 2022; Sáenz-Romero, 2024; Swain et al., 2025). Estos fenómenos comprometen su función como reservorios de biodiversidad, así como los servicios ecosistémicos que proporcionan, entre ellos la captación de carbono, la regulación hídrica y la conservación de suelos (McDowell et al., 2020). En este sentido, es imperativo desarrollar y aplicar metodologías innovadoras que permitan evaluar y monitorear los síntomas de declinación forestal de manera eficiente, precisa, a escalas adecuadas y a un costo financiero aceptable (Ewane et al., 2023).

La declinación forestal se refiere a una disminución progresiva en la salud, el vigor y la productividad de los ecosistemas forestales, frecuentemente atribuible a factores bióticos y abióticos que interactúan de manera compleja, como el cambio climático, las plagas y enfermedades, y la actividad humana (del-Val & Sáenz-Romero, 2017). Este fenómeno implica no sólo la muerte de los árboles individuales, sino también una reducción en la resiliencia y los servicios ecosistémicos de los bosques, incluyendo su capacidad para capturar carbono y regular el clima (Felton et al., 2024). En este sentido, la desvitalización de los árboles se define como el deterioro gradual de su estado fisiológico, caracterizado por síntomas como la pérdida de vigor, disminución en la densidad foliar y aumento de la susceptibilidad a factores de estrés (Randolph & Thompson, 2010). La desvitalización es frecuentemente una etapa previa a la muerte de los árboles y, por tanto, su monitoreo constante puede ser un indicador clave para tomar decisiones de manejo forestal mejor informadas.

Para abordar esta problemática de manera efectiva, es fundamental contar con tecnologías de vanguardia que permitan un monitoreo detallado, altamente preciso, reproducible y escalable. Un ejemplo notable es el uso de vehículos aéreos no tripulados (VANTs), también denominados sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS, por sus siglas en inglés) o comúnmente llamados drones (Gallardo-Salazar et al., 2020). Estos dispositivos han cobrado gran relevancia debido a su versatilidad y precisión y la posibilidad de equiparse con diversos tipos de sensores para capturar datos de alta resolución con miras a integrar una silvicultura de precisión (Gallardo-

Salazar et al., 2020). Aunado a ello, estudios recientes resaltan la capacidad de estas aeronaves para monitorear la salud de los bosques (Ecke et al., 2022).

Entre los sensores más utilizados en el estudio de la declinación forestal destacan los sensores multiespectrales, hiperespectrales, térmicos y LiDAR (Ecke et al., 2022). Los sensores multiespectrales e hiperespectrales permiten captar información detallada sobre la vegetación por medio de índices de vegetación, que reflejan el vigor y el estado fisiológico de los árboles (Gallardo-Salazar et al., 2021). Por ejemplo, en un estudio realizado por Dash et al. (2017), lograron identificar patrones de desvitalización de árboles en bosques templados mediante análisis multiespectral, lo que refuerza su utilidad en situaciones críticas provocadas por plagas y enfermedades. Los sensores térmicos, aunque menos comunes en aplicaciones forestales, pueden medir la temperatura de la superficie de la copa de los árboles y detectar anomalías relacionadas con el estrés hídrico, plagas y enfermedades (Sagan et al., 2019). Finalmente, la tecnología LiDAR proporciona datos tridimensionales de alta precisión, útiles para caracterizar la estructura del dosel forestal (Meng et al., 2022) y combinado con información multiespectral se ha logrado detectar cambios asociados a la desvitalización de los árboles .

La presente tesis doctoral aborda el desafío de monitorear la declinación forestal mediante la integración de tecnologías de sensores remotos, con énfasis en el uso de VANTs. Los resultados de la investigación se estructuran en dos capítulos claves para la comprensión y evaluación de la declinación forestal en bosques templados del Eje Volcánico Transmexicano (EVTM). Aunque los capítulos son independientes en su análisis y metodología, comparten un hilo conductor: la evaluación de los impactos del cambio climático en bosques templados y el desarrollo de herramientas metodológicas innovadoras con el uso de VANTs para su monitoreo.

En el primer capítulo se desarrolla una metodología para evaluar síntomas de declinación forestal en un gradiente altitudinal del Área Natural Protegida Nevado de Toluca. Ello mediante el uso de imágenes multiespectrales capturadas con VANTs. Este estudio incluyó vuelos en una franja altitudinal y el procesamiento de imágenes utilizando software especializado en fotogrametría y SIG para generar índices de vegetación como NDVI. Los resultados mostraron que la pérdida de vigor de *Pinus hartwegii* fue más pronunciada en altitudes bajas, coincidiendo con el concepto de mayor vulnerabilidad del límite xérico de las especies, ya que en esa franja los efectos del cambio

climático son más pronunciados. Este capítulo aporta datos relevantes para comprender las interacciones entre gradientes altitudinales y cambio climático en bosques templados.

El segundo capítulo aborda la dinámica de la desvitalización del *Abies religiosa* en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, utilizando VANTs equipados con sensores LiDAR y cámaras multiespectrales. A través de monitoreos entre abril y octubre de 2023, se identificaron patrones de deterioro fisiológico vinculados a variables climáticas como el índice de aridez mensual y anomalías de temperatura. Los resultados destacan un incremento de árboles desvitalizados durante condiciones de aridez extrema, mientras que los meses con lluvias relevantes mostraron cierta estabilización en la vitalidad. Este análisis subraya la importancia de integrar tecnologías de alta resolución para monitorear los impactos del cambio climático en los ecosistemas forestales y sugiere estrategias de monitoreo de los árboles categorizados como desvitalizados, los cuales pudieran ser más susceptibles a ataques de plagas y/o enfermedades.

En conjunto, los dos capítulos aportan un marco integral que combina teoría, metodología y aplicaciones prácticas para abordar los desafíos de la declinación forestal en un contexto de cambio climático. Esta tesis no sólo contribuye al avance científico en el uso de sensores remotos y VANTs, sino que también busca ser una herramienta útil para la toma de decisiones a la hora de planear el monitoreo de la declinación forestal por medio de VANTs y contribuir en la gestión y conservación de los ecosistemas forestales.

PLANTEAMIENTO DE HIPÓTESIS

General

El uso de metodologías basadas en sensores remotos y vehículos aéreos no tripulados (VANTs) permitirá evaluar con alta precisión la declinación forestal inducida por el cambio climático en bosques templados del Eje Volcánico Transmexicano (EVTM), proporcionando información de alta resolución que mejorará la toma de decisiones para su gestión sostenible.

Específicas

- i. El vigor de *Pinus hartwegii* disminuirá en su límite de distribución altitudinal inferior (límite xérico) dentro del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca, debido al incremento de sequías y altas temperaturas atribuible al cambio climático.
- ii. La integración de sensores LiDAR y multiespectrales montados en VANTs permitirá evaluar la proporción de árboles desvitalizados de *Abies religiosa* en la RBMM, la cual será mayor en los meses con mayor índice de aridez.

OBJETIVOS

General

Desarrollar y aplicar metodologías basadas en sensores remotos y vehículos aéreos no tripulados (VANTs) para evaluar la declinación forestal inducida por el cambio climático, con el fin de generar información de alta resolución que contribuya a tomar decisiones para la gestión sostenible de los bosques templados del Eje Volcánico Transmexicano (EVTM).

Específicos

- i. Analizar el vigor de *Pinus hartwegii* y su relación con el cambio climático a través de un gradiente altitudinal dentro del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca mediante el uso de imágenes multiespectrales capturadas con VANTs.
- ii. Evaluar la evolución temporal de la desvitalización de *Abies religiosa* en la RBMM y su relación con el cambio climático mediante la integración de sensores LiDAR y multiespectrales montados en VANTs para desarrollar estrategias de monitoreo que permitan anticipar riesgos de mortalidad a causa de plagas y enfermedades forestales.

RESULTADOS

Capítulo I. Análisis del vigor de *Pinus hartwegii* Lindl. a través de un gradiente altitudinal mediante imágenes multiespectrales VANT, una evidencia de declinación forestal posiblemente asociada al cambio climático

Análisis del vigor de *Pinus hartwegii* Lindl. a través de un gradiente altitudinal mediante imágenes multiespectrales VANT, una evidencia de declinación forestal posiblemente asociada al cambio climático

Resumen

Los ecosistemas de alta montaña son especialmente vulnerables al cambio climático debido a su sensibilidad a variaciones en temperatura y precipitación, lo que afecta la distribución y el vigor de las especies arbóreas que los conforman. En el presente estudio se analizó el vigor de *Pinus hartwegii* a lo largo de un gradiente altitudinal en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca, utilizando vehículos aéreos no tripulados (VANTs) equipados con sensores multiespectrales. Se estimaron los índices de vegetación NDVI y LCI en un rango altitudinal de 3300 a 4040 m, observándose que los árboles en altitudes más bajas presentan mayores niveles de estrés, con valores reducidos de estos índices, mientras que aquellos en altitudes intermedias mostraron mayor vigor. El análisis climático indicó un incremento de temperatura de +1.4°C (en el límite xérico) en la última década y una intensificación de las sequías, lo que sugiere que el límite inferior de distribución de la especie enfrenta condiciones de mayor aridez. Estos resultados refuerzan la hipótesis de que el cambio climático está afectando diferencialmente la vitalidad del bosque en función de la altitud, destacando la necesidad de estrategias de manejo adaptativo y monitoreo continuo con VANTs para mitigar la declinación forestal en ecosistemas de alta montaña en México. En este sentido, la migración asistida de especies adaptadas a condiciones más cálidas y secas podría ser una estrategia viable para mantener la funcionalidad ecológica del ecosistema y favorecer la resiliencia de los bosques del Nevado de Toluca frente al cambio climático.

Palabras clave: sequías; NDVI; LCI; límite xérico; vehículos aéreos no tripulados.

Introducción

Pinus hartwegii Lindl. comúnmente conocido como “pino de las alturas”, es reconocido por constituir uno de los límites altitudinales de vegetación arbórea a mayor elevación en el mundo. Se desarrolla en un gradiente altitudinal que va de los 3,000 a los 4,000 m en diversas zonas montañosas de México y Centro América. Una de las particularidades de esta especie es su tolerancia a las bajas temperaturas propias de ecosistemas de alta montaña (Viveros-Viveros et al., 2007). En consecuencia, su distribución altitudinal extrema la hace una especie altamente vulnerable al cambio climático (Iglesias et al., 2012) al no tener disponibilidad de áreas a mayor altitud a la cual migrar, por estar sus poblaciones de mayor altitud frecuentemente cerca de las cumbres montañosas. Los bosques de *P. hartwegii* al igual que los bosques del resto del mundo han sido modelados, en gran medida, por las condiciones climáticas (Alfaro-Ramírez et al., 2020). En la actualidad el clima se ha vuelto más cálido y cambiará aún más y a un ritmo sin precedentes (Ripple et al., 2020). Se vislumbra que las especies vegetales de los ecosistemas montañosos sufrirán cambios en su distribución, abundancia y dinámica poblacional (Sáenz-Romero et al., 2020), comprometiéndose su alta biodiversidad y servicios ambientales que provén.

Los escenarios de cambio climático sugieren que la combinación de aumento de la temperatura y disminución de la precipitación producirá un clima más árido en México (Sáenz-Romero et al., 2010). Los impactos relacionados con el cambio climático son globales y parecen estar aumentando en intensidad y frecuencia (Hammond et al., 2022). Prueba de ello, son los síntomas de estrés que presentan el 23% de los bosques en el mundo, lo que compromete su resiliencia ante el cambio climático (Forzieri et al., 2022). Por ejemplo, en los bosques del suroeste de USA se ha documentado la muerte de más de 100 millones de árboles, cifras nunca vistas (Jay et al., 2018). Así mismo, Allen et al. (2010) mencionan que los eventos de sequía y calor en el suroeste de USA han provocado extensos brotes de insectos y mortalidad en muchos tipos de bosques en el suroeste de USA, afectando 20 millones de hectáreas. En conjunto entre California y Texas se contabiliza una mortalidad de 500 millones de árboles desde 2010 a causa de este fenómeno (Hammond et al., 2022). Se proyecta que dichas amenazas sean más críticas en los límites inferiores de la distribución de las especies, i.e. en los límites xéricos, debido a que estas zonas se asocian a mayores temperaturas y condiciones aridez (Stojanović et al., 2013).

Dado lo masivo de los eventos de declinación forestal que están ocurriendo (Sáenz-Romero et al., 2020) y el elevado costo que representaría su evaluación mediante inspecciones en el terreno, ha sido necesario apoyarse con información capturada por sensores remotos. Desde hace más de tres décadas se ha estudiado la declinación forestal asociada al cambio climático mediante plataformas satelitales (Gallardo-Salazar et al., 2023). Sin embargo, la información capturada con satélites resulta limitada a estudios de carácter regional o global, debido a su baja resolución, y a la interferencia de factores atmosféricos (como es la nubosidad) que disminuyen su calidad (Paneque-Gálvez et al., 2014). Por ello, la incorporación de nuevas tecnologías como los vehículos aéreos no tripulados (VANT), conocidos comúnmente como “drones”, abren nuevas oportunidades para capturar información con alta resolución espacial, espectral y temporal en ecosistemas forestales, incluso con capacidad de análisis a nivel de árbol (Gallardo-Salazar et al., 2021). Esto hace posible reconocer los parámetros ecológicos para la detección temprana de problemas fitosanitarios, determinación de las condiciones de fenología foliar, así como síntomas de declinación y mortalidad forestal atribuibles al cambio climático (Torresan et al., 2017).

Específicamente el uso de cámaras multispectrales montadas en VANT hacen posible estimar índices de vegetación, mismos que son utilizados para el monitoreo de las variaciones de la actividad fotosintéticas en poblaciones forestales (Kopačková-Strnadová et al., 2021). Estas variaciones son clave para identificar, por ejemplo, signos de estrés y defoliación en la copa, uno de los primeros síntomas de estrés en los árboles (Ecke et al., 2022). Los índices espectrales logran analizar cambios fisiológicos como clorosis, efecto que suele preceder procesos de mortalidad forestal. Por lo que son considerados para identificar procesos de declinación forestal en etapas tempranas (Zarco-Tejada et al., 2018). Uno de los índices de vegetación más utilizado es el Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), el cual identifica las condiciones de actividad fotosintética a partir de la banda Near Infrared. Así mismo, con la banda Red Edge, se ha desarrollado el Leaf Chlorophyll Index (LCI), utilizado como proxy del contenido de clorofila (Datt, 1999) y para evaluar el estrés, las enfermedades y el declive en coníferas (Eitel et al., 2011).

Así mismo, los cambios de vigor en la vegetación pueden asociarse a parámetros espaciales como las características topográficas (Gallardo-Cruz et al., 2009). En ecosistemas montañosos, el efecto de los factores topográficos (i.e. altitud, pendiente y exposición) suele observarse de manera más clara en la vegetación ya que las condiciones de heterogeneidad altitudinal resultan en una gran

diversidad de condiciones climáticas (Kobler et al., 2019), por lo que son determinantes en las características de las comunidades vegetales. El estudio de las condiciones de vigor de la vegetación, por medio de índices de vegetación, a través de un gradiente altitudinal, tomando en cuenta la pendiente y la exposición (a escala microtopográfica), podría proporcionar información relevante que ayude a comprender la dinámica de los procesos de declinación forestal asociados al cambio climático.

En México, en un análisis reciente de Sáenz-Romero et al. (2020) proporcionan evidencia de síntomas de declinación forestal atribuibles al cambio climático en el Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM) y noroeste del país. Sin embargo, los autores apuntan que en la comunidad mexicana de manejo forestal, no existe un consenso que atribuya los síntomas de declinación forestal masiva al cambio climático. Debido a la falta de métodos validados en México, el impacto del cambio climático debe cuantificarse urgentemente para mejorar la comprensión de cómo los bosques responderán a este fenómeno (Malhi et al., 2020). Aunado a ello, se cree conveniente incluir en estas evaluaciones factores como el gradiente altitudinal, la pendiente y la exposición, con especial atención en el límite xérico (Stojanović et al., 2013).

El Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca (APFFNT) constituye una de las principales reservas de recursos forestales en la zona central de México (Mejía Canales et al., 2018). En esta área natural protegida, existen poblaciones de *P. hartwegii*, especie de alto valor comercial, adaptada al duro entorno alpino de las montañas de gran altitud (Chávez-Aguilar et al., 2022). Esta especie proporciona una amplia gama de servicios ecosistémicos a la sociedad, sin embargo, actualmente está amenazada debido al calentamiento global, con los modelos que predicen que sus poblaciones tendrían que migrar a mayores altitudes para mantener condiciones de crecimiento adecuadas (Pérez-Suárez et al., 2022). La migración tendría que ser del orden de 400 m de diferencia altitudinal hacia arriba, para acoplarse al clima proyectado para la década centrada en el año 2060; sin embargo, las cumbres de las montañas más altas de México tienen un límite en altitud y en superficie que en muchos casos no hacen posible tal migración, aún sin considerar que los mecanismos de migración natural son demasiado lentos (Gómez-Pineda et al., 2020). Por lo tanto, la adaptación de esta especie a condiciones ambientales tan particulares la hace altamente vulnerable frente al cambio climático (Loya-Rebollar et al., 2013).

A la fecha, no nos fue posible encontrar estudios donde se hayan usado índices de vegetación calculados con VANT a través de un gradiente altitudinal, para detectar los niveles de estrés en ecosistemas de alta montaña de México (Gallardo-Salazar et al., 2020). Por lo anterior, esta investigación busca aportar evidencias de posibles síntomas de declinación forestal en las poblaciones de *P. hartwegii* presentes en el APFFNT. Para ello, el objetivo del presente trabajo fue detectar diferencias en el vigor de esta especie mediante el cálculo de NDVI y LCI en un gradiente altitudinal dentro del APFFNT. Asimismo, analizar la relación de variables topográficas (altitud, pendiente y exposición) con las condiciones de vigor de *P. hartwegii* en términos de NDVI y LCI calculado con VANT, mediante GAM. La hipótesis fue que *P. hartwegii* presenta diferentes niveles de vigor a través del gradiente altitudinal y que ésta variabilidad puede ser explicada por los factores topográficos como altitud, pendiente y exposición, en donde la mayor declinación forestal podría darse en el límite xérico. De esta manera, se pretende establecer un precedente para mejorar la comprensión de los impactos del cambio climático que ayude a desarrollar alternativas de manejo forestal y prácticas de conservación focalizadas para aumentar la resiliencia y la adaptación en los bosques templados del país.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El sitio de estudio se encuentra en la ladera con exposición Este en torno al cráter del APFFNT. Específicamente en un transecto a través del gradiente altitudinal donde se distribuye *P. hartwegii*. Los bosques analizados pertenecen al municipio de Calimaya, Estado de México. La superficie del APFFNT abarca aproximadamente 54,000 hectáreas (CONANP, 2017) y se localiza entre los paralelos 19° 3' 36'' y 19° 16' 55'' de latitud norte y los 99° 40' 37'' y 99° 53' 56'' de longitud oeste (Figura 1). Está delimitada por la cota de los 3,000 msnm hasta la cima del volcán Xinantécatl (conocido como “Nevado de Toluca”) a 4,680 msnm, el cual ocupa el cuarto lugar entre las cumbres más altas de México (Tapia-Vázquez et al., 2020). Los suelos dominantes son andosoles (INEGI, 2000) y el clima de la región es frío y semifrío subhúmedo con precipitaciones promedio anuales de 1050 mm, y temperatura promedio anual entre -2 y 7 °C (CONANP, 2017).

Asimismo, en un contexto regional el APFFNT es parte del CVTM. Esta región es un área con alta biodiversidad, variabilidad climática y geológica (Carlón Allende et al., 2021) que la hacen una fuente importante de servicios ecosistémicos (e.g., agua, biodiversidad y recursos forestales)

(Bravo-Espinosa et al., 2009) y estratégica para estudios de conservación enfocados a estudiar los efectos del cambio climático (Villers-Ruiz & Castañeda-Aguado, 2013).

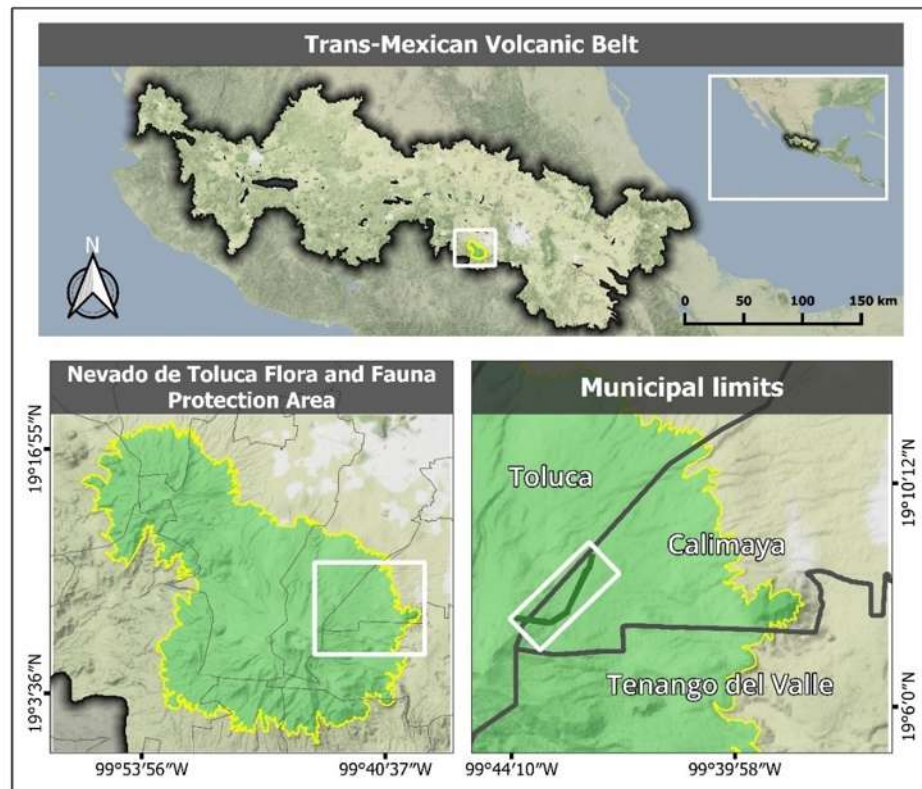


Figura 1. Área de estudio (transecto con exposición Este), en bosques de *Pinus hartwegii* pertenecientes al municipio Calimaya, estado de México, dentro Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.

Plataforma VANT equipada con cámara multiespectral

El VANT utilizado fue un cuadricóptero de la marca Dà-Jiāng Innovations (DJI), modelo Phantom 4 Multispectral (P4M) (Figura 2). La cámara del P4M tiene un total de seis sensores: cinco multiespectrales (i.e., azul, verde, rojo, borde rojo e infrarrojo cercano) y uno en el espectro de luz visible (RGB), todos con un obturador global de 2 MP. La distancia focal de la cámara del P4M es de 5.74 mm, el tamaño de la imagen es de 1600×1300 píxeles y el tamaño del sensor es de 4.87×3.96 mm. El P4M ha demostrado buena precisión, rendimiento y generación de datos consistentes comparado con otros modelos de cámaras multiespectrales (Lu et al., 2020).



Figura 2. DJI Phantom 4 Multispectral utilizado para la adquisición de las imágenes, junto al control remoto y dispositivo móvil (iPad) para visualizar la App de vuelo Ground Station Pro.

El P4M opera bajo el principio de georreferenciación directa a bordo. En otras palabras, está equipado con un receptor de satélites de posicionamiento global, que geoetiqueta con coordenadas cada imagen capturada. Esto indica que las imágenes adquiridas fueron georreferenciadas directamente durante la misión de vuelo (Syetiawan et al., 2020). No fue necesario utilizar el sistema cinemático en tiempo real (RTK) debido a que el P4M tiene un sistema de georreferenciación con una precisión de ubicación vertical y horizontal de ± 0.1 y ± 0.3 m, respectivamente.

Planificación y ejecución de vuelos a través del gradiente altitudinal

Las misiones de vuelo se ejecutaron el 07 y 08 de abril de 2022, lo que coincide con el mes más seco y caliente del año en esta región del país. De modo que aunado con la exposición Este, se presentan condiciones propicias para evaluar posibles síntomas de declinación forestal. El plan de vuelo para la adquisición automática de imágenes se programó con la aplicación DJI Ground Station Pro. Para cubrir el área de distribución de *P. hartwegii* en el sitio de estudio, se establecieron cuatro vuelos conectados de manera consecutiva a lo largo del gradiente altitudinal i.e., desde 3,300 msnm (límite inferior de la distribución dominante de *P. hartwegii*) a 4040 msnm (límite superior de su distribución dominante). Cada vuelo está conformado por una cuadrícula de aproximadamente 200 metros de ancho con longitudes de 1,110, 928, 1,680 y 625 m respectivamente (Figura 3). Los parámetros de vuelo fueron: traslape frontal y entre líneas de 70%,

la altura de vuelo fue de 70 m sobre el nivel del suelo (AGL) con un ángulo de cámara de 90°. Los vuelos se realizaron en condiciones de sol y cielo despejado (sin nubes), lo más cerca posible del mediodía para evitar la interferencia de sombras, con velocidades del viento inferiores a 5 km/h.

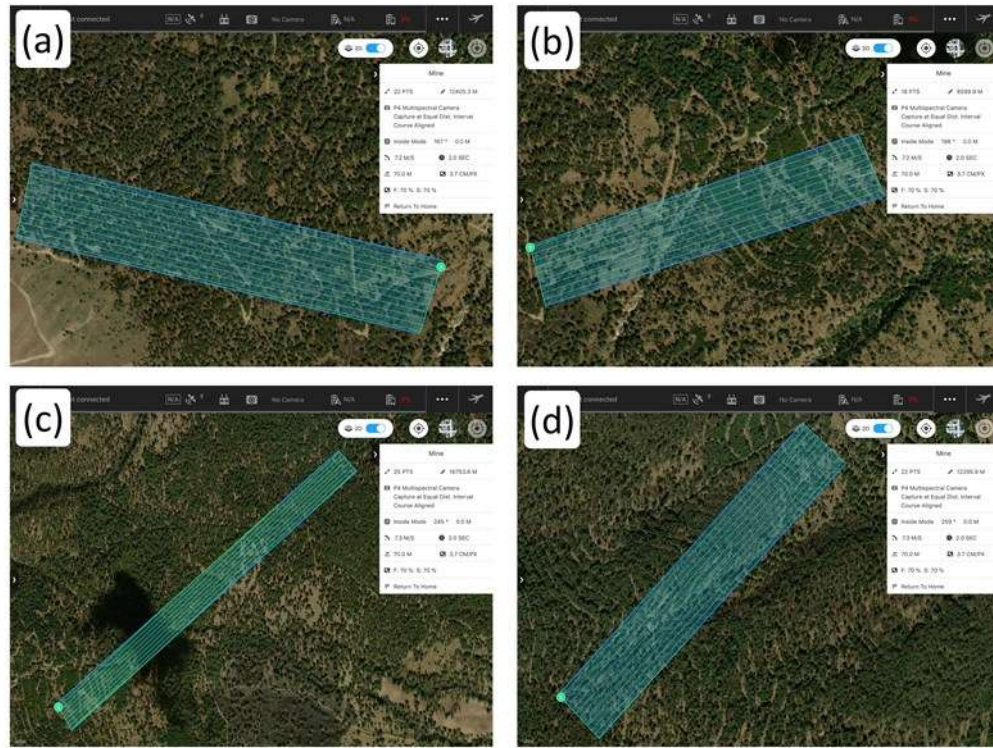


Figura 3. Misiones de vuelo programadas con DJI Ground Station Pro, a través del gradiente altitudinal donde se distribuye *Pinus hartwegii*. (a) vuelo de 4,040 a 3,700 msnm; (b) vuelo de 3,700 a 3,560 msnm; (c) vuelo de 3,560 a 3,400 msnm; (d) vuelo de 3,400 a 3,300 msnm.

Procesamiento fotogramétrico de imágenes VANT

A partir de las imágenes RGB y multispectrales capturadas con el P4M, se aplicaron procedimientos fotogramétricos y de visión por computadora utilizando el software libre y de código abierto OpenDroneMap (ODM). Los resultados de ODM y las opciones comerciales son equiparables. Sin embargo, este software ofrece múltiples opciones de personalización, disminución del tiempo de procesamiento y documentación disponible, lo que hacen de ODM una opción importante.

Este software implementa los algoritmos modernos *Structure from Motion* (SfM) y *Multi-View Stereo* (MVS), para estimar modelos 3D a partir de secuencias de imágenes 2D con un alto porcentaje de traslape. De manera inicial se produce una nube de puntos dispersa con el algoritmo SfM y posteriormente una nube de puntos densificada con el algoritmo MVS. La nube de puntos densa con información espectral derivada de las imágenes de entrada, representa el resultado principal del flujo de trabajo de fotogrametría con VANT. Finalmente, la nube de puntos densa se clasifica, filtra e interpola para generar un digital surface model (DSM) y un digital terrain model (DTM), que a su vez, se utilizan para ortorrectificar cada imagen y construir un ortomosaico. Este proceso generó los ortomosaicos multiespectrales, DSM y DTM del sitio de estudio. Adicionalmente a partir del DTM de alta resolución fue posible derivar la pendiente y exposición del terreno (a escala de microtopográfica) con los algoritmos de análisis de terreno incluidos en el software libre y de código abierto orientado a los sistemas de información geográfica QGIS.

Cálculo de índices de vegetación

A partir del ortomosaico multiespectral generado con las fotografías capturadas con el P4M, se calcularon el NDVI y el LCI, ello mediante la calculadora ráster de QGIS. Estos índices de vegetación han demostrado ser sensibles a cambios en la respuesta espectral de los árboles que presentan síntomas de declinación forestal. El NDVI es uno de los índices más utilizados e implementados, calculado a partir de información multiespectral como relación normalizada entre las bandas roja e infrarroja cercana. Matemáticamente, el NDVI se expresa de la siguiente manera:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

Dónde *NDVI* es el índice de vegetación de diferencia normalizado. *RED* es la respuesta espectral registrada con el P4M en la región roja (visible) y *NIR* en la infrarroja. Los valores de NDVI varían de -1 a 1, independientemente del uso de radiancia, reflectancia o DN como entrada. En general, sus valores son negativos para cuerpos de agua, cercanos a cero para rocas, arenas o superficies de concreto, y positivos para vegetación, incluidos cultivos, arbustos, pastos y bosques. En otras palabras, valores de NDVI cercanos al 1 implican vegetación más vigorosa y con mayor actividad fotosintética.

Por su parte, el LCI es un índice sensible para monitorear el contenido de clorofila en plantas. Se ha empleado para evaluar el crecimiento y la productividad de la vegetación. Asimismo, se ha demostrado que es un indicador para evaluar el estrés, las enfermedades, y el declive en coníferas. Matemáticamente, el LCI se expresa de la siguiente manera:

$$LCI = \frac{NIR - RedEdge}{NIR + RED} \quad (2)$$

Dónde *LCI* es el índice de contenido de clorofila. *RED*, es la respuesta espectral registrada con el P4M en la región roja (visible), *NIR* y *RedEdge* en la infrarroja cercana y borde de rojo, respectivamente. Al igual que el NDVI, los valores de LCI varían de -1 a 1, donde valores más altos indican mayores contenidos de clorofila que a su vez está relacionado con suficiencia de nitrógeno en las hojas.

Detección y extracción de información a nivel de árbol individual

Existen numerosos métodos para la detección de árboles individuales en diferentes escenarios forestales. Por su alta eficiencia y flexibilidad operativa, en el presente estudio se utilizó *Tree Density Calculator*. El cual es un complemento de QGIS desarrollado en C++ y PyQGIS, diseñado para detectar las copas de los árboles en función del brillo de las imágenes, utilizando el método *local maximum of a sliding window*. Este método ha sido probado de manera exitosa en diversas investigaciones forestales.

La premisa con la que opera la *Tree Density Calculator* es que, en las imágenes obtenidas por sensores remotos, la copa de los árboles es la parte más brillante de estos. La herramienta utiliza una ventana deslizante para moverse sobre la imagen; para cada posición de la ventana se verifica si el píxel central es el más brillante de la ventana; si es así, el píxel se marca como un máximo local (i.e., copa del árbol). En su forma más básica, la *Tree Density Calculator* tiene sólo un parámetro de entrada: el tamaño de la ventana deslizante. El cual depende de la resolución de las imágenes y el tamaño de las copas de los árboles. En el presente estudio se utilizó un tamaño de ventana de 15x15 píxeles. Este método es recomendado en bosques de coníferas por la forma de sus copas y las características de imágenes de alta resolución, lo cual es el caso de las provistas por los VANT.

Posteriormente a la detección de los árboles de *P. hartwegii*, se procedió a extraer la información respectiva de los índices de vegetación calculados (i.e., NDVI y LCI). Para cada árbol detectado se generó una zona de influencia simple (BUFFER) de 4 metros de diámetro, correspondiente al tamaño mínimo de copa para árboles dominantes de esta especie de conífera. Asimismo, por medio de estadística zonal, se extrajeron los valores promedio de los índices de vegetación a nivel de árbol individual, ello mediante el software QGIS. Este algoritmo calculó el valor medio de los valores de los píxeles de los índices de vegetación para las entidades presentes en la capa de polígonos superpuesta (i.e., BUFFER que representa la copa de los árboles).

Los criterios para identificar árboles con signos de desvitalización fueron, para NDVI árboles con valores iguales o menores a 0.4. Por su parte, para el LCI se utilizó el criterio de contabilizar como árboles estresados aquellos con valores iguales o inferiores a 0.09. La función genera los datos resultantes en forma tabular o como un archivo de capa vectorial. Este mismo proceso se utilizó para extraer la altitud, pendiente y exposición en la que se ubica cada uno de los árboles detectados, utilizando las capas del MDT, pendiente y exposición; generadas en el proceso fotogramétrico y con QGIS.

Análisis estadístico

Para detectar posibles diferencias de vigor de las copas de los árboles de *P. hartwegii* en términos de los índices de vegetación (NDVI y LCI) a lo largo del gradiente altitudinal, se realizó un análisis de varianza de una vía (ANOVA) por medio del software estadístico R. Posteriormente se realizó un análisis post-hoc para conocer las diferencias significativas entre cada rango altitudinal (i.e., 3,300, 3,400, 3,500, 3,600, 3,700, 3,800, 3,900 y 4,000). Las medias se compararon utilizando la prueba de Tukey con un valor de $p \leq 0.05$.

Resultados

Se capturaron un total de 16,734 imágenes con los sensores del P4M (i.e., azul, verde, rojo, borde rojo e infrarrojo cercano). La Figura 4 muestra el ortomosaico multiespectral, modelo digital de elevación, pendiente y exposición derivados del proceso fotogramétrico con ODM y QGIS. En conjunto con las cuatro misiones de vuelo, se logró cubrir una distancia horizontal de 4,343 m, a través del gradiente altitudinal donde se distribuye *P. hartwegii*, iniciando desde los 3,300 a los

4,040 msnm. En consecuencia, el área de cobertura sobrevolada fue de 90 ha con una resolución espacial o distancia de muestreo de terreno (GSD) de 10 cm.

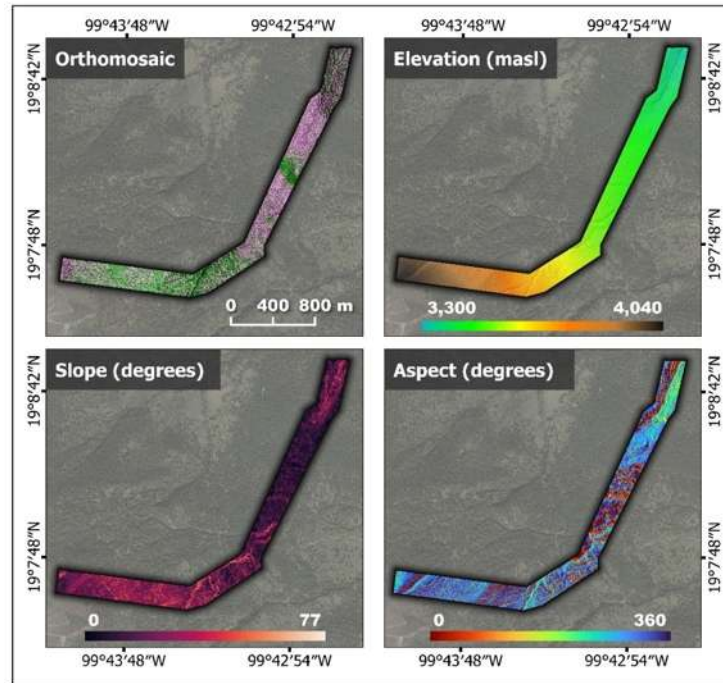


Figura 4. Ortomosaico multispectral, modelo digital de terreno (DTM), pendiente y exposiciones derivadas del vuelo del VANT.

Por medio de la *Tree Density Calculator* desarrollada como un complemento de QGIS, se detectaron 4,861 árboles de *P. hartwegii*. La Figura 5 muestra una vista general de todos los árboles detectados (puntos amarillos) a través del gradiente altitudinal. Es importante destacar que por medio de interpretación visual se excluyeron áreas con aparente cambio de uso de suelo y donde *P. hartwegii* se encuentra en bajas densidades y coexiste con otras especies, a fin de enfocar el análisis a bosques dominados por esta especie arbórea. Asimismo, se observa un ejemplo de tres zonas a través del gradiente altitudinal (Figuras 5a, 5b, 5c). Los árboles detectados son adultos (estrato superior), con formación fenotípica variable y dosel abierto, lo que permitió la detección eficiente de árboles para los propósitos de este estudio.

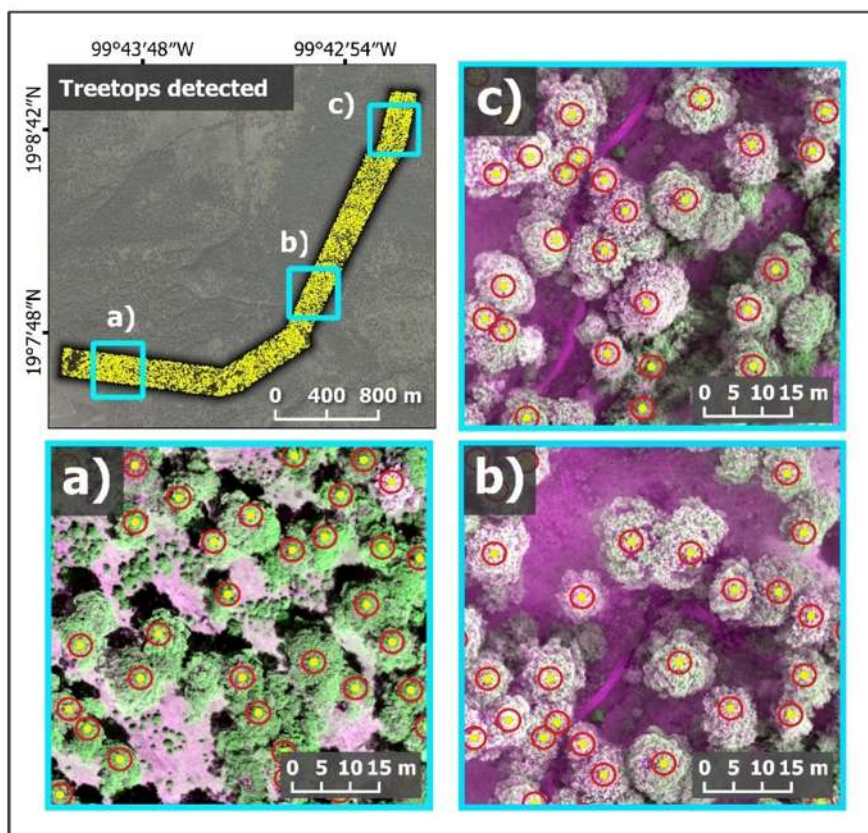


Figura 5. Detección y zona de influencia (Buffer) de copa de árboles individuales a partir de *Tree Density Calculator*. A), B) y C) corresponden a acercamientos a diferentes altitudes dentro del gradiente donde se distribuye *Pinus hartwegii*.

Respecto a las estimaciones de los índices de vegetación, la Figura 6 muestra el mapa de NDVI y LCI a través del gradiente altitudinal donde se distribuye *P. hartwegii*. Los valores de los índices de vegetación referentes a las copas de los árboles de *P. hartwegii* fueron visualmente reconocibles en las zonas con valores tendientes a 1 (i.e., tonos verdes para NDVI; y tonos amarillos para LCI; Figura 6). La diferencia fue evidente entre las copas de los árboles y las superficies correspondientes a suelo desnudo o vegetación arbustiva y herbácea con valores que tienden a -1 (i.e., tonos rojos para NDVI y violetas para LCI). Sin embargo, se logra reconocer la diferencia en los valores de ambos índices en las copas de los árboles de *P. hartwegii* a través del gradiente altitudinal, atribuibles a diferentes niveles de estrés. En consecuencia, cada índice presentó una forma de histograma diferente (Figura 6). La forma divergente de los histogramas implica la diferente sensibilidad de los índices para separar categorías de perturbación y/o productividad forestal.

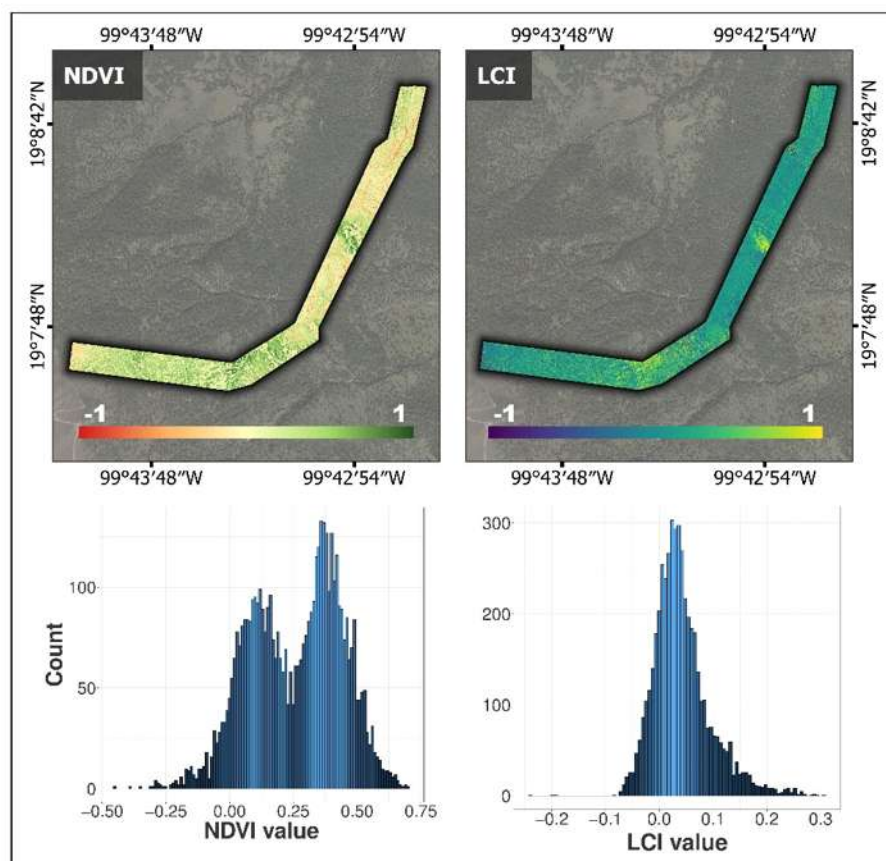


Figura 6. Mapas del índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI) e índice de contenido de clorofila (LCI) a través del gradiente altitudinal e histograma de frecuencia referentes a las copas de los árboles detectados de *Pinus hartwegii*.

Asimismo, el cuadro 1 muestra las estadísticas descriptivas de los valores de estos índices referentes a las copas de los árboles detectados de *P. hartwegii*. En cuanto a la distribución de los valores de los índices de vegetación, el NDVI mostró un promedio de 0.25. Asimismo, el 25% de los árboles se encuentran entre 0.7 y 0.4. Por otro lado, los valores de LCI se distribuyen en un rango más bajo que el NDVI; el valor máximo de este índice fue de 0.31 y el mínimo de -0.24, con un promedio de 0.04, lo que pudiera atribuirse a altos niveles de estrés de los árboles de *P. hartwegii*. De manera visual, la Figura 6 resalta la actividad fotosintética y vigor diferencial de la vegetación a lo largo del gradiente altitudinal.

Cuadro 1. Estadísticas descriptivas de índices de vegetación de las copas de los árboles detectados de *Pinus hartwegii*.

Medida descriptiva	NDVI	LCI
Mínimo	-0.45	-0.24
Primer cuartil	0.11	0.01

Mediana	0.28	0.03
Media	0.26	0.04
Tercer cuartil	0.40	0.07
Máximo	0.70	0.31
Desviación estándar	0.18	0.05

NDVI, índice de vegetación de diferencia normalizada; LCI, índice de contenido de clorofila.

Por medio de lo anterior, se logró conformar una base de datos que hizo posible graficar el comportamiento del NDVI y el LCI a través del gradiente altitudinal de los 4,861 árboles de *P. hartwegii* detectados (Figura 7). Las poblaciones de menor altitud (i.e., 3,300 msnm) exhibieron mayores condiciones de estrés representada con valores más bajos de NDVI (media $\pm$ SE: 0.048 ± 0.0054) y LCI (media $\pm$ SE: 0.01 ± 0.001). Estos valores aumentaron entre nueve y diez veces en las poblaciones de altitud intermedia (i.e., 3,600 msnm), lo que indica mayor vigor de los árboles detectados en términos de NDVI (media $\pm$ SE: 0.44 ± 0.0050) y LCI (media $\pm$ SE: 0.10 ± 0.003).

Posteriormente, se realizó un ANOVA de una vía para analizar el efecto de la altitud en el vigor de los árboles de *P. hartwegii* en términos de los índices de vegetación NDVI y LCI. El ANOVA reveló que existe una diferencia estadísticamente significativa en los valores medios de NDVI y LCI entre al menos dos rangos altitudinales ($F = 741.8$; d.f.: 7, 4853; $p < 0.0001$) y ($F = 396.4$, d.f.: 7, 4853; $p < 0.0001$) respectivamente. Se realizó una prueba HSD de Tukey para comparaciones múltiples (i.e., 28 combinaciones posibles) de las medias de los índices de vegetación para cada rango altitudinal (Figura 7). Se encontró que los valores medios de los índices de vegetación NDVI y LCI fue significativamente diferente en 27 y 24 combinaciones respectivamente. El NDVI no fue diferente en la comparación de los rangos altitudinales 3,700 vs 3,800. Por su parte el LCI no presentó diferencias en las comparaciones 3,300 vs 3,400; 3,500 vs 3,900; 3,300 vs 4,000, y 3,400 vs 4,000. Los valores de NDVI mostraron mayor diferencia entre los 3,300 y los 3,600 m, seguido por 3,300 a 3,700. Mientras que los rangos altitudinales con más diferencias en valores de LCI fueron: 3,300 vs 3,600 y 3,400 vs 3,600.

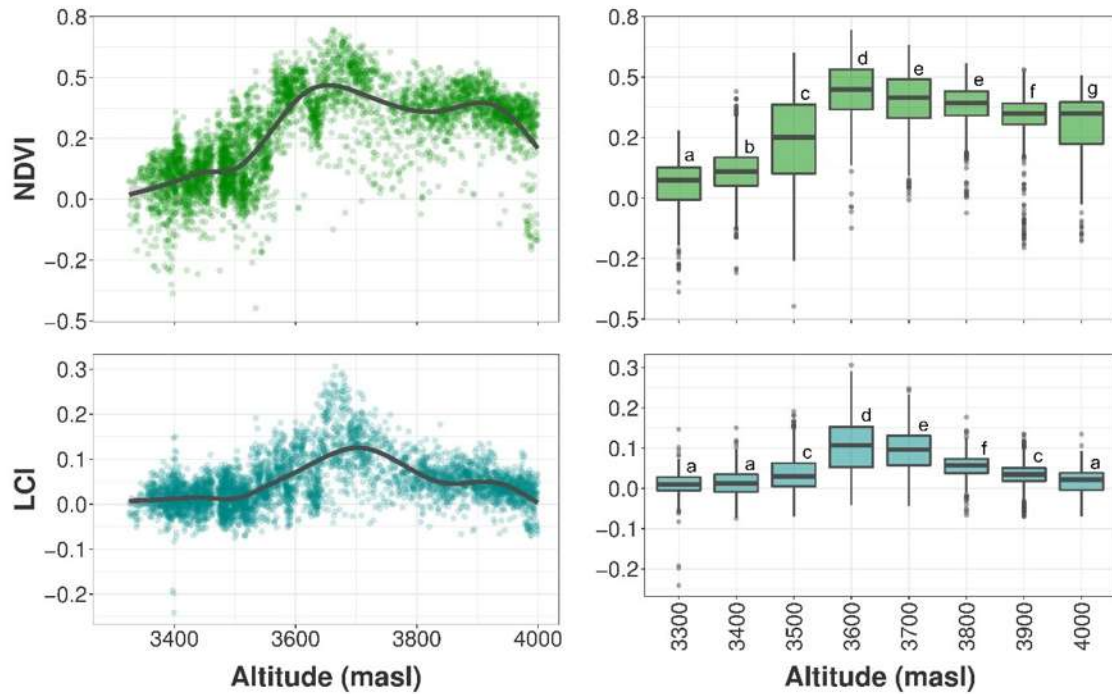


Figura 7. Comportamiento de los índices de vegetación de las copas de los árboles de *Pinus hartwegii* a través del gradiente altitudinal (trend lines were smoothed using the ‘stat_smooth’ function of the ggplot2 package; method Z ‘gam’ in R) y boxplot que resumen los valores de LCI y NDVI en cada uno de los 8 rangos altitudinales. La línea que cruza la caja corresponde a la mediana y el rectángulo corresponde al rango intercuartílico. Las cajas con la misma letra no son significativamente diferentes (comparaciones múltiples de medias prueba poshoc de Tukey, $p \leq 0.05$).

Se observaron árboles significativamente desvitalizados en todos los gradientes altitudinales. Sin embargo, la mayor proporción de árboles estresados se localizaron en el límite xérico (de 3,300 a 3,400 m) de *P. hartwegii* (99% de árboles desvitalizados; Figura 8). Para NDVI se consideraron como árboles estresados aquellos con valores iguales o menores a 0.4. Por su parte, para el LCI se utilizó el criterio de contabilizar como árboles estresados aquellos con valores iguales o inferiores a 0.09. Es importante destacar que a pesar de considerar distintos criterios de NDVI y LCI para definir árboles desvitalizados, la forma de las curvas en la Figura 8 presentan alto grado de similitud para ambos índices de vegetación.

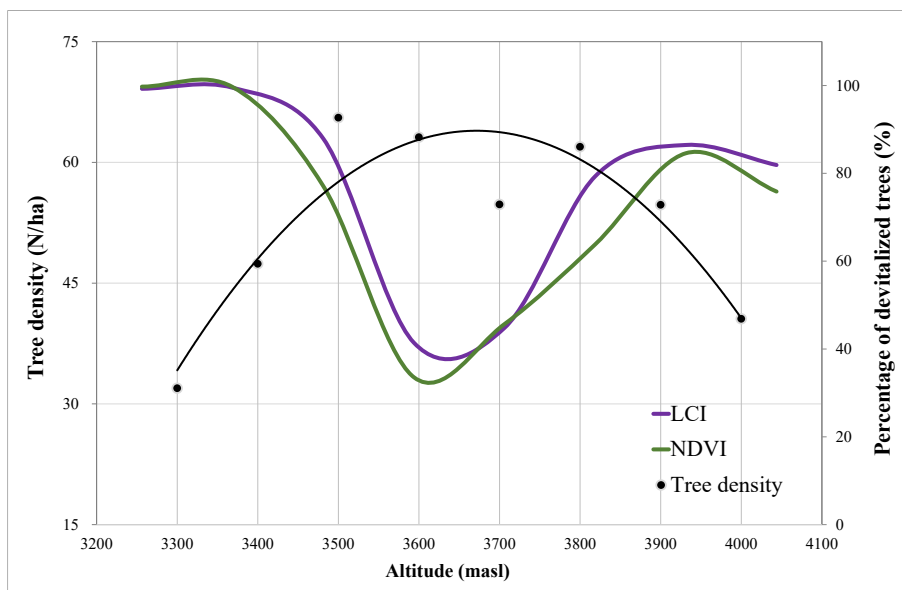


Figura 8. Densidad y porcentaje de árboles de *Pinus hartwegii* significativamente desvitalizados ($\text{NDVI} \leq 0.4$; $\text{LCI} \leq 0.09$) a través del gradiente altitudinal.

Discusión

La metodología utilizada permitió la detección, estimación y análisis de dos índices multiespectrales (NDVI y LCI) de las copas de árboles de *P. hartwegii* a nivel de individuo. Lo más notable de la presente investigación fue detectar que en el límite inferior de distribución altitudinal de *P. hartwegii* se presentan mayores niveles de estrés, representado por valores de NDVI y LCI más bajos (Figura 7). Asimismo, la mayor proporción de individuos desvitalizados ($> 90\%$) se observó entre los 3,300 y los 3,400 m (Figura 8). Si bien, las condiciones de estrés son características de los límites de distribución de cada especie, resalta la diferencia entre la respuesta de la especie en el límite inferior con respecto al límite superior. Máytas et al. (2018) mencionan que las comunidades forestales más amenazadas son aquellas que se encuentran en los límites con menor disponibilidad de humedad y mayor incremento de temperaturas, es decir el límite altitudinal inferior o límite xérico. El término límite xérico se ha introducido para enfatizar el papel del clima que cambia rápidamente en la configuración de los límites altitudinalmente inferiores de distribución de las especies (Mátyás et al. 2010). Si bien, el análisis de este fenómeno suele ser complejo en áreas con moderada pendiente y distribución de especies en forma de parches (Mátyás et al., 2018), los bosques de *P. hartwegii* del APFFNT fueron idóneos para el análisis de este fenómeno, debido a su distribución continua a lo largo de un gradiente altitudinal de más de 700 m (3,300 a 4,040 m).

Nuestros resultados son congruentes con lo reportado en las últimas décadas respecto a la disminución de las tasas de crecimiento y pérdida de vigor de especies arbóreas de bosques templados, especialmente en su límite xérico. Por ejemplo, Riker et al. (2007) desarrollaron modelos que predicen la disminución de crecimiento relativo de *P. hartwegii* en un 10.6% como consecuencia del aumento de temperatura de 0.6 °C. Carrillo-Arizmendi et al. (2022), analizaron series dendrocronológicas de *P. hartwegii* y concluyeron que el calentamiento global parece ser el principal impulsor de la variación en el crecimiento radial de esta especie arbórea, observándose señales de alerta en el extremo inferior de su gradiente de distribución. Los valores bajos de NDVI y LCI en las altitudes inferiores, sugieren un proceso de desvitalización forestal expresada en disminución en actividad fotosintética. Las sequías cada vez más intensas y calientes, asociadas al límite xérico (Hammond et al., 2022) están provocando debilidad fisiológica en los árboles promoviendo daños por plagas y enfermedades y la eventual aparición de fenómenos de declinación forestal (Choat et al., 2018).

En este sentido, Gómez-Pineda et al., (2022) reportaron que el 54% de los brotes de escarabajo descortezador que atacan a *Pinus pseudostrobus* se encontraron en el límite xérico de esta importante especie de conífera presente en el CVTM. En una descripción del reciente patrón de distribución altitudinal de *Dendroctonus adjunctus* (especie fuertemente asociada a *P. hartwegii*) en bosques del centro de México, se observó que la zona con mayor abundancia de este insecto se encuentra entre los 3,400 y 3,500 m de altitud, con una importante disminución hacia el límite intermedio de distribución de *P. hartwegii*. Así mismo, se observó que la abundancia de *Dendroctonus* spp. es variable y está relacionada a eventos de sequía extrema.

Los patrones de distribución de árboles desvitalizados encontrado en la presente investigación también puede estar relacionado con la declinación de desempeño reproductivo de esta especie respecto a un gradiente altitudinal. Por ejemplo, Tejeda-Landero et al., (2019) evaluaron la viabilidad de semillas de *P. hartwegii* en cuatro altitudes (3400, 3600, 3800 y 4000 msnm) dentro del Parque Nacional Cofre de Perote, Veracruz, México. Los principales resultados remarcan que los valores más altos de viabilidad de las semillas se presentaron en los límites superiores en contraste con el sitio de menor altitud. Sin embargo, se han encontrado variaciones de este tipo de indicadores entre diferentes montañas. Alba-Landa et al. (2003), compararon el potencial y la eficiencia de las semillas de poblaciones de *P. hartwegii* del Parque Nacional la Malinche y del

Parque Nacional Cofre de Perote en México, encontraron mayores porcentajes de eficiencia para la Malinche (75%) respecto al Cofre de Perote (68%), detectando problemas de desarrollo para este último sitio. Lo anterior sugiere que la dinámica de declinación forestal posee características particulares para cada sistema montañoso, por lo que en próximas investigaciones se sugiere realizar más vuelos en transectos altitudinales y en diferentes orientaciones en varios ecosistemas de alta montaña a lo largo país.

En contraste, los valores mayores de NDVI y la menor proporción de árboles desvitalizados en el límite superior de distribución de *P. hartwegii* con respecto al límite xérico sugieren que los individuos se encuentran en condiciones de menor estrés. Esto coincide con Astudillo-Sanchez et al., (2019), quienes reportaron que en las zonas superiores de distribución altitudinal, el incremento de temperatura en condiciones de sombra y humedad pueden estar incrementando la cantidad de individuos de *P. hartwegii*. Si bien *P. hartwegii* es una especie vulnerable por su distribución altitudinal extrema, los individuos presentes en el límite inferior se encuentran sufriendo mayores alteraciones aparentemente a causa del cambio climático.

Los resultados del presente trabajo sugieren que las poblaciones de *P. hartwegii* estudiadas ya están resintiendo los estragos del cambio climático. Castellanos-Acuña et al., (2018) advierten que, para la década de 2050, se incrementará + 1.7 °C la temperatura media del mes más frío (variable relacionada con la adaptación genética de las especies de árboles) y se prevé un cambio hacia condiciones generales más secas en todo México. En consonancia, Manzanilla-Quñones et al. (2019), reportan un aumento en la temperatura promedio anual entre 0.7 °C y 2.1 °C y reducciones entre 11.7% y 26.9% en el nicho subalpino de *P. hartwegii*, siendo el Nevado de Toluca y el Pico de Orizaba los sitios más susceptibles al cambio climático. Un claro ejemplo de este proceso es la pérdida de hábitat climático propicio para las coníferas de la Sierra Nevada en California, que ha causado una mortalidad masiva de árboles, seguido de incendios catastróficos, debido al aumento de 1.2 °C de temperatura media anual a partir de la década de 1930 (Hill et al., 2023).

Los rangos en los que se distribuye el NDVI y el LCI de *P. hartwegii* reportados en el presente estudio son coincidentes con otras investigaciones. En cuanto a estudios referentes al NDVI, Dash et al. (2017) simularon un brote de enfermedad y trataron árboles seleccionados de una plantación de *Pinus radiata* con herbicida. El NDVI demostró ser el índice de vegetación más sensible a los cambios fisiológicos en los pigmentos de las hojas, incluso durante las primeras etapas del estrés

de los árboles. Lo que coincide con nuestros resultados, dado a que el NDVI resultó ser más sensible que el LCI para detectar diferencias entre los niveles de estrés de los árboles de *P. hartwegii* (Figura 7). Asimismo, cada índice presentó una forma de histograma diferente (Figura 6), lo que según Minařík y Langhammer (2016), implica la diferente sensibilidad de los índices para separar categorías de perturbación y/o productividad forestal, destacando al NDVI como el que tiene la mejor capacidad. Ello bajo el supuesto de que los valores altos de NDVI en el follaje sano están asociados con la actividad fotosintética (Gamon et al., 2015), debido al contraste de la baja reflectancia de la hoja en la banda roja que ocurre con una mayor absorción de clorofila y una alta reflexión infrarroja dentro de la capa de mesófilo esponjoso (Rullan-Silva et al., 2013). Los valores de NDVI disminuyen con la senescencia del follaje, lo que se asocia con una mayor reflectancia en la banda roja (Chavana-Bryant et al., 2017). Por otra parte, Datt, (1999) demostró que el LCI posee una mayor sensibilidad al contenido de clorofila. Concluyendo que fue el índice de vegetación que mejor se desempeñó y se propuso como un nuevo índice para la estimación remota del contenido de clorofila en los árboles del género *Eucalyptus*. Asimismo, Eitel et al. (2011) documentan que la información del borde rojo mejora la detección temprana del estrés (cambios en los contenidos de clorofila) en un bosque de pinos piñoneros y enebros en el centro de Nuevo México. Los autores concluyen que la información de borde rojo tiene el potencial de mejorar considerablemente el monitoreo del estrés forestal, lo que justifica el desarrollo investigación con esta tecnología en ecosistemas boscosos con síntomas de declinación forestal posiblemente asociados al cambio climático (Ecke et al., 2022).

Conclusiones

Se detectaron síntomas de declinación forestal en las poblaciones de *Pinus hartwegii*, en términos de valores bajos del Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) y del Leaf Chlorophyll Index (LCI). Asimismo, los factores topográficos (altitud, exposición y pendiente) lograron explicar el grado de vigor de los individuos de *Pinus hartwegii*, destacando al NDVI como el índice de vegetación con mayor sensibilidad ante las características topográficas. Por lo tanto, la hipótesis de la investigación fue confirmada: los datos de NDVI y LCI mostraron comportamiento heterogéneo a lo largo del gradiente altitudinal, con una mayor proporción de individuos desvitalizados en el límite xérico (rango de distribución altitudinal inferior). Los individuos ubicados en la parte media de la distribución altitudinal mostraron características espectrales

asociadas a condiciones de mayor vigor vegetal, lo que es consistente con lo reportado en la literatura para ésta y otras especies de coníferas.

El estudio realizado a lo largo del gradiente altitudinal permitió demostrar que los VANT son capaces de proporcionar información de alta calidad, con resolución espacial y espectral adecuada para analizar las condiciones de estrés/vigor de las poblaciones de *Pinus hartwegii* distribuidas dentro del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca, con una resolución a nivel de árboles individuales. Ello contribuye al conocimiento para comprender cómo la especie está respondiendo al calentamiento global y refleja una clara amenaza para la persistencia de estos bosques y los servicios ecosistémicos que brindan. Los resultados del presente estudio ayudan a comprender mejor los factores que influyen en el vigor de las poblaciones de *Pinus hartwegii* y se espera proporcionen una base teórica para la toma de decisiones que contribuyan a desarrollar alternativas de manejo forestal y prácticas de conservación focalizadas para aumentar la resiliencia y la adaptación en los ecosistemas de alta montaña del país.

**Capítulo II. Dinámica de la desvitalización de *Abies religiosa* en la Reserva de la Biosfera
Mariposa Monarca mediante VANTs y su relación con el cambio climático**

Dinámica de la desvitalización de *Abies religiosa* en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca mediante VANTs y su relación con el cambio climático

Resumen

El cambio climático representa una amenaza creciente para los ecosistemas forestales, intensificando el estrés hídrico y alterando las condiciones climáticas que regulan la distribución y el vigor de las especies arbóreas. En particular, *Abies religiosa*, una especie clave en la RBMM, se enfrenta a un incremento en la frecuencia e intensidad de sequías, lo que acelera su desvitalización y aumenta su vulnerabilidad a plagas y enfermedades. En el presente estudio se analizó la dinámica de la desvitalización de *A. religiosa* en la RBMM y su relación con el cambio climático mediante el uso de drones especializados. Se realizaron monitoreos entre abril y octubre de 2023 en un área núcleo de 25 ha, integrando sensores LiDAR y multiespectrales para la detección y geolocalización de árboles individuales, clasificándolos en diferentes categorías de vitalidad con base en el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Paralelamente, se registraron datos de temperatura, precipitación y el Índice de Aridez Mensual (IAM) para evaluar su influencia en la fisiología del arbolado. Los resultados mostraron una disminución significativa del NDVI en junio de 2023, coincidiendo con un aumento del IAM y una anomalía de temperatura de +2.71°C, lo que sugiere un evento de sequía extrema. Se observó una transición en la vitalidad del arbolado, con una reducción de árboles sanos del 41% al 18% y un incremento en individuos desvitalizados y muertos. Modelos de regresión demostraron que el IAM explica fuertemente la variabilidad en la proporción de árboles altamente desvitalizados y muertos ($R^2 > 0.95$), resaltando la vulnerabilidad de la especie a condiciones áridas y la necesidad urgente de estrategias de conservación para mitigar los impactos del cambio climático en los ecosistemas forestales.

Introducción

El cambio climático representa uno de los mayores retos globales del siglo XXI, con grandes impactos en los ecosistemas terrestres (Seidl et al., 2017). Entre los ecosistemas más vulnerables se encuentran los bosques montañosos, cuya estabilidad está fuertemente ligada a las condiciones climáticas y la disponibilidad hídrica (Fettig et al., 2013). Los cambios en los patrones de precipitación, caracterizados por lluvias más intensas en periodos cortos y temporadas prolongadas de sequía acompañadas de temperaturas elevadas, han alterado significativamente el

almacenamiento de agua en el suelo, afectando la disponibilidad de humedad durante el año (Feldman et al., 2024).

Asimismo, está emergiendo un patrón de eventos meteorológicos extremos que se suceden secuencialmente, generando situaciones inéditas, como lo es una estación de lluvias extraordinariamente intensa, seguida de una con muy baja precipitación, lo anterior acoplado a olas de calor, lo que ha causado incendios catastróficos en el sur de California en enero del 2025. A esto se le ha llamado “volatilidad hidroclimática” (Swain et al., 2025). Estos fenómenos, particularmente sequías más cálidas, tienen repercusiones directas en la vitalidad y la supervivencia de las especies forestales a escala global (Hammond et al., 2022), especialmente aquellas muy dependientes de estabilidad interanual en términos de la humedad, un ejemplo de estas es *Abies religiosa* (Sáenz-Romero et al., 2012).

Abies religiosa, comúnmente conocido como oyamel, es una especie emblemática de los bosques de alta montaña en la Faja Volcánica Transmexicana (FVT), donde forma comunidades monoespecíficas. Estos bosques albergan una notable biodiversidad con más de 500 especies de flora (Sánchez González et al., 2012) y cumplen funciones ecológicas críticas, incluyendo el refugio invernal de la mariposa monarca (*Danaus plexippus*), una especie que realiza una de las migraciones a mayor distancia del reino animal (más de 4,000 km) (Zepeda Gómez et al., 2023). La supervivencia de la mariposa monarca depende en gran medida de la protección térmica que los bosques de oyamel les proveen (Brower et al., 2011). Sin embargo, el estrés hídrico asociado al cambio climático desvitaliza estos árboles, haciéndolos más susceptibles a plagas y enfermedades, encontrándose entre los fenómenos más críticos los brotes epidémicos de insectos descortezadores (Gómez-Pineda et al., 2022).

La desvitalización de los árboles se define como la pérdida progresiva del vigor de los individuos que puede estar influenciada por diversos factores, especialmente en condiciones de sequía (Şimonca et al., 2017). La desvitalización puede manifestarse mediante cambios en la coloración de la copa, defoliación, muerte de ramas, alteraciones metabólicas, disminución de la fotosíntesis y en ocasiones llegar hasta la muerte (Randolph & Thompson, 2010). Uno de los mecanismos implicados en la muerte de los árboles es la llamada “inanición de carbono”, donde la reducción de la fotosíntesis limita la producción de carbohidratos esenciales para el metabolismo y crecimiento del árbol. Este estrés se refleja en un escaso incremento del diámetro del tronco,

indicando una disminución en la actividad cambial (McDowell et al., 2022). Por otra parte, la falla hidráulica, resultante de la formación de embolias en el xilema debido a la cavitación, interrumpe el transporte de agua y nutrientes, agravando la desvitalización y conduciendo a la muerte de los árboles (Rowland et al., 2015).

Actualmente, una de las preguntas clave en la ecología forestal es cómo responderán estos ecosistemas al cambio climático y qué herramientas pueden emplearse para monitorear y cuantificar de manera más eficiente las afectaciones (Millar & Stephenson, 2015; Sáenz-Romero et al., 2012). Los avances en sensores remotos han transformado el análisis de los recursos forestales, permitiendo evaluar características estructurales y biofísicas a escalas espaciales y temporales específicas. En particular, el uso de vehículos aéreos no tripulados (VANTs), comúnmente conocidos como drones (Gallardo-Salazar et al., 2020), han emergido como herramientas esenciales en la investigación forestal, permitiendo la obtención de datos precisos y actualizados sobre la estructura y salud de los bosques (Gallardo-Salazar et al., 2020). En particular, los drones equipados con cámaras multispectrales y sensores LiDAR ofrecen capacidades complementarias que enriquecen el análisis forestal (Bright et al., 2012). Las cámaras multispectrales capturan información en diversas bandas del espectro electromagnético, facilitando la evaluación de la salud vegetal, la detección de estrés hídrico y la identificación de plagas o enfermedades en la vegetación (Ecke et al., 2022). Por su parte, los sensores LiDAR emiten pulsos láser que detallan el dosel forestal, generando modelos tridimensionales de la estructura del bosque, lo cual es fundamental para estimar variables como la altura, delimitar la copa de los árboles, estimar el volumen y biomasa aérea (Mohan et al., 2021). La integración de estas tecnologías ha demostrado ser altamente efectiva en estudios de monitoreo y gestión forestal, proporcionando datos de alta resolución que superan las limitaciones de los métodos tradicionales (Balestra et al., 2024).

Asimismo, la combinación de información obtenida mediante VANTs con datos climáticos recolectados en campo representa una metodología prometedora para comprender los impactos del cambio climático en los bosques de montaña. Hoffrén & García (2023) emplearon VANTs equipados con sensores térmicos y LiDAR junto con sistemas de registro climático para identificar refugios microclimáticos en bosques de *Pinus uncinata* en el sur de Europa. Por su parte, Buras et al. (2018) estudiaron mediante VANTs multispectrales, la desvitalización de los árboles (mediante el índice de vegetación de diferencia normalizada; NDVI) en función de la distancia al borde del

bosque de *Pinus sylvestris* en Franconia, Alemania. Encontraron que la vitalidad aumentó significativamente hacia el interior del bosque. Bright et al. (2012) evaluaron métodos para cuantificar las afectaciones por brotes del escarabajo del pino en Idaho, combinando datos de campo, LiDAR e imágenes multiespectrales. Destacaron el potencial de integrar imágenes multiespectrales y tecnología LiDAR para analizar impactos a escala paisajística. No obstante, hasta donde sabemos, no existen estudios en México que aborden la dinámica de la desvitalización de los individuos de *Abies religiosa* desde estos enfoques.

Por otra parte, una de las variables más robustas y utilizadas para el análisis de vegetación en relación con aspectos climáticos, es el índice de aridez anual (IAA), que relaciona la precipitación promedio con los grados días, los cuales son días con temperatura disponible para el crecimiento vegetal ($>5\text{ }^{\circ}\text{C}$). Este índice permite evaluar cómo las condiciones climáticas influyen en el vigor de la vegetación (Rehfeldt et al., 2009). A pesar de su potencial, en México aún faltan métodos validados que integren el IAA y el uso de VANTs con sensores multiespectrales para calcular índices como el NDVI y monitorear, entre otros, a los bosques de *Abies religiosa*. Estas herramientas podrían adaptarse a su alta heterogeneidad climática y altitudinal, permitiendo evaluar biodiversidad, servicios ecosistémicos y respuestas fisiológicas frente al cambio climático con alta precisión (Peng et al., 2020).

La presente investigación abordó esta necesidad al analizar la dinámica de la proporción de individuos de *Abies religiosa* desvitalizados a través del tiempo y su relación con datos climáticos de campo. El estudio se llevó a cabo durante los meses de abril a octubre 2023 dentro de la zona núcleo de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (RBMM), mediante información multiespectral y LiDAR capturada con VANT's. Para lo cual, se establecieron las siguientes preguntas: ¿La tecnología LiDAR y multiespectral usando VANTs permite detectar y geolocalizar árboles individuales, y asignarles un valor de vitalidad/desvitalización y detectar el cambio de tales valores a lo largo del tiempo? ¿La información de los distintos niveles de vitalidad/desvitalización de *Abies religiosa* a lo largo de los meses estudiados guarda alguna relación con datos climáticos de campo (temperatura, precipitación e índice de aridez) en el aérea de estudio?

Metodología

Área de estudio

El área de estudio, llamado localmente Llano de las Catarinas, abarca 25 hectáreas (ha) de propiedad federal ubicadas dentro del área núcleo de la RBMM (CONANP, 2001). Se encuentra aproximadamente a 1.5 km de la entrada al Santuario de la Mariposa Monarca Sierra Chincua y a 5 km de la cabecera municipal municipio de Angangueo, Michoacán, México (Figura 1). Se eligió esta área a sugerencia de la Dirección de la RBMM, por ser de los rodales de *Abies religiosa* mejor conservados, a donde llegan colonias de mariposa monarca, y en donde prácticamente no ha habido cortas fitosanitarias recientes, lo que permitió monitorear el estado de salud de los árboles con mínima perturbación de actividades humanas. En el área se registran temperaturas medias anuales de 8 a 22°C y precipitaciones medias anuales desde 700 hasta 1,250 mm (Sáenz-Romero et al., 2012). El tipo de vegetación es bosque de coníferas, con dominancia de árboles de oyamel (*Abies religiosa*) que en lo general van de los 20 hasta los 40 m de altura total (Cornejo-Tenorio & Ibarra-Manriquez, 2017).

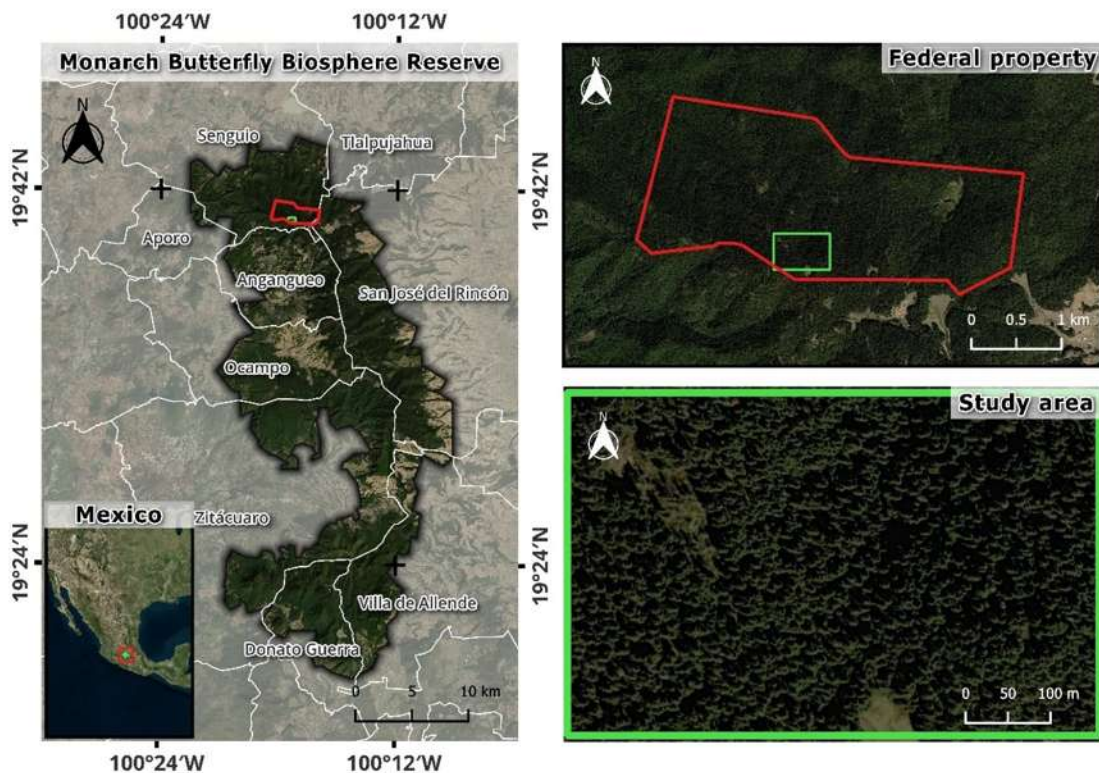


Figura 1. Ubicación del área de estudio dentro de la propiedad federal de la zona núcleo de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca.

Datos de campo del vigor de los árboles

Se recopilaron datos de campo en 15 parcelas circulares de 0.1 ha, seleccionadas de forma aleatoria dentro de las 25 ha del área de estudio. En el centro de cada parcela, se llevó a cabo una evaluación para determinar el vigor de los árboles dominantes. Los árboles seleccionados se clasificaron en cuatro categorías de vitalidad, tomando como referencia el esquema propuesto por Campbell et al. (2020): (1) árboles sanos (copa aparentemente sana, follaje verde oscuro); (2) árboles desvitalizados (presencia moderada de defoliación y ramas secas; follaje ligeramente amarillento); (3) árboles muy desvitalizados (presencia abundante de defoliación y ramas secas; follaje amarillento a café), y (4) árboles muertos (follaje café o copa defoliada, sin signos de que el árbol pudiera recuperarse). En cada parcela, se registraron tanto la categoría de vitalidad como la ubicación de los árboles seleccionados en los formatos diseñados para el trabajo de campo. Ello facilitó la posterior asignación de información recopilada con los VANTs que le correspondía a cada árbol seleccionado.

Datos de campo de variables climáticas, índice de aridez mensual (IAM) y anomalías de temperatura

Se registraron datos climáticos en el área de estudio para el periodo abril a octubre de 2023. Se utilizaron dos data loggers HOBO modelo MX2301A (Onset Computer Corp., Pocasset, MA), configurados para medir y registrar la temperatura ambiente de manera diaria. Adicionalmente, se instalaron dos trampas de lluvia en puntos estratégicos del área de estudio, las cuales permitieron recopilar información sobre la precipitación acumulada mensual (Manrique et al., 2020). Los datos obtenidos fueron posteriormente analizados para identificar patrones climáticos y su posible relación con las categorías de vitalidad de los individuos de *Abies religiosa* presentes en el área de estudio y las variables capturadas con los VANTs.

Se calculó el índice de aridez mensual (IAM), adaptando la metodología descrita por Rehfeldt et al. (2009), quienes definen el índice de aridez anual (IAA) como el cociente de la precipitación promedio con los grados días i.e., días ($>5^{\circ}\text{C}$), que es la cantidad de calor disponible para el crecimiento vegetal. Este índice permite evaluar el balance entre calor y humedad disponible para las plantas, lo que influye en el vigor de la vegetación. La ecuación utilizada para dicho propósito fue (notar se modificó la fórmula para un índice mensual; en la versión de Rehfeldt et al. (2009), el índice es anual o para la estación de crecimiento):

$$IAM = \frac{\sqrt{DD5}}{PMM} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde *IAM* representa el índice de aridez mensual, *DD5* grados días >5 °C acumulados mensuales y *PMM* precipitación media mensual.

Las anomalías de temperatura del área de estudio se construyeron utilizando como línea base los datos climáticos normales correspondientes al periodo 1961-1990, obtenidos del modelo climático spline desarrollado por Sáenz-Romero et al. (2010) y disponibles en: <https://charcoal2.cnre.vt.edu/climate/>. Las anomalías se calcularon como la diferencia entre las temperaturas mensuales promedio actuales (capturados con los data loggers HOBO) y los valores de referencia de la línea base (promedio 1961-1990), expresándose en grados centígrado (°C). Posteriormente, se representaron las anomalías mensuales promedio para el periodo abril a octubre 2023, destacando los valores pico y la tendencia general. Este análisis permitió identificar las variaciones de temperatura con respecto al clima histórico (promedio 1961-1990), proporcionando una herramienta clave para interpretar el impacto del cambio climático en los individuos de *Abies religiosa* presentes en el área de estudio.

Adquisición de datos con LiDAR aerotransportado

Para lograr una detección y geolocalización confiable de los individuos de *Abies religiosa* se recolectaron datos con un VANT DJI Matrice 350 RTK equipado con el sensor LiDAR Zenmuse L2. Este equipo es una herramienta de última generación capaz de captar hasta 1.2 millones de puntos por segundo y realizar hasta cinco retornos por pulso, optimizando la detección de la superficie del terreno bajo cobertura vegetal. Este sistema se complementó con un receptor GNSS DJI D-RTK 2 del mismo fabricante. Los datos recolectados se procesaron utilizando DJI Terra para la corrección inicial y para la generación del archivo en formato LAS.

El vuelo LiDAR se llevó a cabo el 20 de abril de 2023 (al inicio de la investigación). La planificación de los vuelos se realizó con el software DJI Pilot 2, diseñando rutas que aseguraran un solapamiento frontal del 70% y lateral del 40%, garantizando una cobertura completa del área. Las trayectorias del dron fueron optimizadas para alcanzar una altitud de vuelo de 100 metros sobre el dosel forestal y una velocidad constante de 8 m/s, parámetros que maximizan la densidad de puntos y la calidad de los datos recolectados. Previo a los vuelos, se calibró la Unidad de Medición Inercial (IMU) del sensor Zenmuse L2, y se verificaron las correcciones RTK en tiempo real a través del sistema GNSS integrado. Durante las operaciones, el dron ejecutó múltiples líneas de

vuelo siguiendo las rutas predefinidas. La capacidad de múltiples retornos del sensor permitió capturar datos precisos tanto de la superficie del terreno como de las capas superiores de vegetación.

Adquisición de imágenes multiespectrales VANT

Para la detección de posibles diferencias entre las cuatro categorías de desvitalización de los árboles dentro del periodo de estudio (abril a octubre de 2023), se llevaron a cabo siete vuelos con VANT equipado con un sensor multiespectral. No fue posible volar los meses de noviembre a marzo, por la presencia de mariposas monarca migratorias, razón por la que no se nos autorizaron vuelos en ese período. El Cuadro 1 muestra la descripción general y condiciones de las misiones de vuelo ejecutadas (notar que las horas de vuelo se procuraron hacer alrededor del mediodía, para que la variación de las sombras tuviera el menor efecto posible). Se utilizó un cuadricóptero DJI Mavic 3 Multiespectral (Dajiang Innovation Technology Co., Shenzhen, China) equipado con una cámara digital RGB (20 megapíxeles) y un conjunto de cuatro cámaras multiespectrales que cubren las bandas verde ($560 \text{ nm} \pm 16 \text{ nm}$), rojo ($650 \text{ nm} \pm 16 \text{ nm}$), borde rojo ($730 \text{ nm} \pm 16 \text{ nm}$) e infrarrojo cercano ($860 \text{ nm} \pm 26 \text{ nm}$), las cuatro con 5 megapíxeles. Los parámetros de vuelo para el Mavic 3 Multiespectral fueron altura de 70 metros respecto al terreno, con un traslape frontal de 80% y lateral de 70%. Se utilizó la aplicación de vuelo DJI Pilot 2 para ejecutar los vuelos de forma automatizada y segura.

Cuadro 1. Misiones de vuelo ejecutadas para adquirir el conjunto de datos multiespectrales.

No. Vuelo	Fecha de vuelo Día/mes/año	Hora	Velocidad de viento (km/h)
1	20/04/2023	12:07 hrs	1.5
2	23/05/2020	12:49 hrs	1.6
3	24/06/2020	13:06 hrs	4.1
4	22/07/2020	12:42 hrs	4.6
5	25/08/2020	12:12 hrs	3.9
6	22/09/2020	12:57 hrs	4.9
7	21/10/2020	11:13 hrs	1.0

Procesamiento de datos LIDARi y multiespectrales

Los datos LiDAR recolectados fueron procesados en DJI Terra, donde se aplican correcciones de las trayectorias y se elimina el ruido de los datos. Posteriormente, el conjunto de datos en formato *LAS* fue importado a CloudCompare para la clasificación de puntos. Mediante este software se

derivaron los siguientes productos: (1) Modelo Digital de Terreno (MDT); (2) Modelo Digital de Superficie (MDS); y (3) Modelo de Altura de Dosel (MAD). El MDT fue generado mediante la interpolación de los retornos más bajos del LiDAR para representar la topografía del terreno desnudo. El MDS se creó a partir de los retornos más altos, representando la altura de las copas de los árboles escaneados. El MAD se obtuvo calculando la diferencia entre el MDS y el MDT (Silva et al., 2022).

*Detección de individuos de *Abies religiosa**

La detección de árboles individuales se llevó a cabo utilizando el algoritmo de máximos locales aplicado al MAD. Silva et al. (2022) describen que dicho método identifica las cúspides de altura en el MAD como posiciones probables de las copas de los árboles. El software *treetop*, un paquete de R de código abierto, facilitó la implementación de estas técnicas, así como la detección y geolocalización de los individuos de *Abies religiosa* presentes en el área de estudio.

Las imágenes multiespectrales capturadas con VANT se procesaron con el software DJI Terra versión 4.0.1 (Dajiang Innovation Technology Co., Shenzhen, China, <https://enterprise.dji.com/dji-terra>, consultado el 01 de abril de 2024), mismo que genera el ortomosaico RGB (espectro de luz visible) y calcula de manera automatizada diferentes índices de vegetación.

Cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

El NDVI fue desarrollado para conocer la condición de la vegetación, estrés fisiológico y la actividad fotosintética (Ec. 1); utiliza las bandas infrarrojo cercano (NIR) y la banda de la porción rojo (RED).

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad (Ec. 2)$$

Esta operación fue realizada de manera automatizada en el software DJI Terra.

Relación de datos en campo con los datos generados con VANT

Una vez detectadas las cúspides de las copas de los árboles individuales, se realizó un buffer circular de 1 metro de radio para tomar muestras de los píxeles de NDVI que describieran el estado de vitalidad de las copas de los individuos de *Abies religiosa* por medio del software QGIS versión 3.28.15. Los buffers circulares de las copas para cada árbol permitieron extraer directamente la información de NDVI. Para este procedimiento se utilizó la herramienta “Estadísticas de zona” del software QGIS versión 3.28.15. Con lo anterior y con la información de la categorización de

vitalidad de los árboles registrada en campo, se logró asociar el NDVI de cada individuo de *Abies religiosa* analizado.

Análisis estadístico

Se agruparon los valores de NDVI mensuales por categoría de vitalidad, representando la mediana, los rangos intercuartiles y los valores extremos mediante el software Rstudio. Posteriormente se calculó el porcentaje de árboles en cada categoría de vitalidad para cada mes y se visualizó la proporción relativa de cada grupo. Con ellos se reflejó la dinámica temporal del NDVI y la distribución de los árboles por estado de vitalidad, proporcionando información clave sobre su respuesta a las condiciones climáticas del periodo de estudio.

Para explorar las relaciones entre las variables climáticas y la vitalidad de los árboles de *Abies religiosa*, se llevó a cabo un análisis descriptivo de los datos para evaluar su distribución y detectar posibles valores atípicos. Posteriormente, las diferencias entre los valores promedio de NDVI de las copas de los árboles de cada categoría de vitalidad (sanos, desvitalizados, muy desvitalizados y muertos) se evaluaron mediante análisis de varianza (ANOVA) unidireccional, seguido de pruebas post hoc de Tukey para comparaciones múltiples. Ello para cada mes de estudio de abril a octubre de 2023.

Se generaron modelos de regresión cuadrática y lineal para evaluar la relación entre el IAM y el número de árboles en cada categoría de vitalidad (sanos, desvitalizados, muy desvitalizados y muertos). Los coeficientes de determinación (R^2) se calcularon para evaluar la calidad del ajuste. Estos análisis permitieron identificar patrones claros de cómo la aridez afecta la transición entre estados de vitalidad en los árboles de *Abies religiosa*. El ANOVA y los análisis de regresión se realizaron con el software Rstudio.

Resultados

Se generaron siete ortomosaicos RGB (uno por cada mes monitoreado) como el que se muestra en el panel principal de la Figura 2 y siete ortomosaicos multispectrales (Figura 3) de alta resolución que permitieron identificar y categorizar los individuos de *Abies religiosa* en el área de estudio, según su condición de vitalidad: sanos, desvitalizados, muy desvitalizados y muertos (Figura 2). Aparentemente no se muestra una concentración significativa de árboles muertos o muy desvitalizados en alguna zona específica, e.g. en zonas más expuestas o con mayor pendiente. La validación en campo ayudó a corroborar las cuatro categorías de vitalidad del arbolado, para

posteriormente calcular el valor promedio de NDVI de las copas de cada individuo en el periodo de abril a octubre 2023.

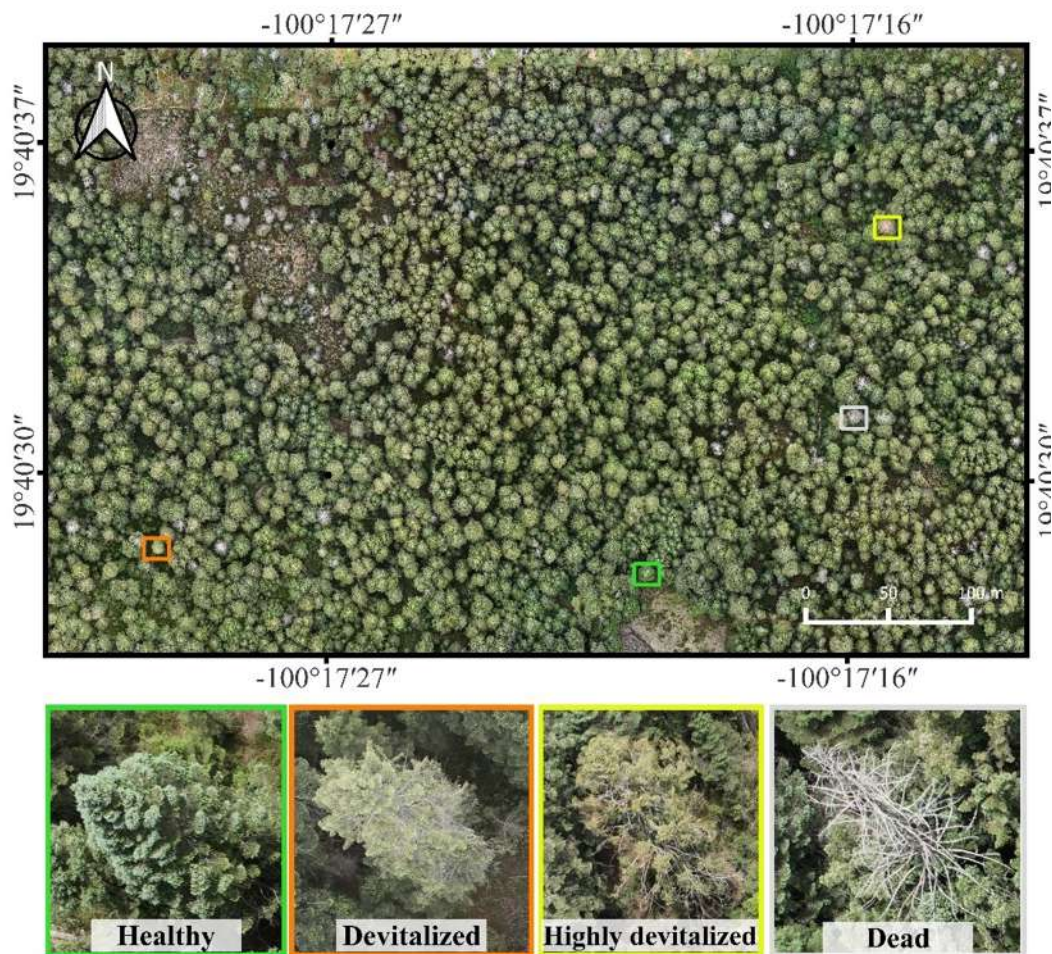


Figura 2. Ortomosaico de alta resolución RGB (luz visible) del área de estudio. La imagen principal muestra la distribución espacial de los árboles categorizados y corroborados en campo como sanos (recuadro verde); desvitalizados (recuadro naranja); muy desvitalizados (recuadro amarillo), y muertos (recuadro gris). En la parte inferior, se presentan ampliaciones de cada categoría con ejemplos representativos.

La Figura 3 integra los siete ortomosaicos de NDVI que muestran la variación en la vitalidad de las copas de individuos de *Abies religiosa* entre abril y octubre 2023. Junio presentó de manera generalizada una disminución en los valores de NDVI (colores amarillos y naranjas), mientras que de julio a septiembre, mostraron cierta estabilización (recuperación de la vitalidad del arbolado), posiblemente debido a la reacción de las copas frente a precipitaciones intermitentes. Sin embargo, en esos meses es posible detectar que continúa la presencia de copas de árboles con valores bajos de NDVI, los cuales representan árboles muertos en pie o muy desvitalizados. De manetar general,

en la figura Figura 3 se puede comprobar la sensibilidad de las imágenes multispectrales y del NDVI para detectar disminuciones o aumentos de vitalidad de las copas de los individuos de *Abies religiosa* a lo largo del periodo estudiado.

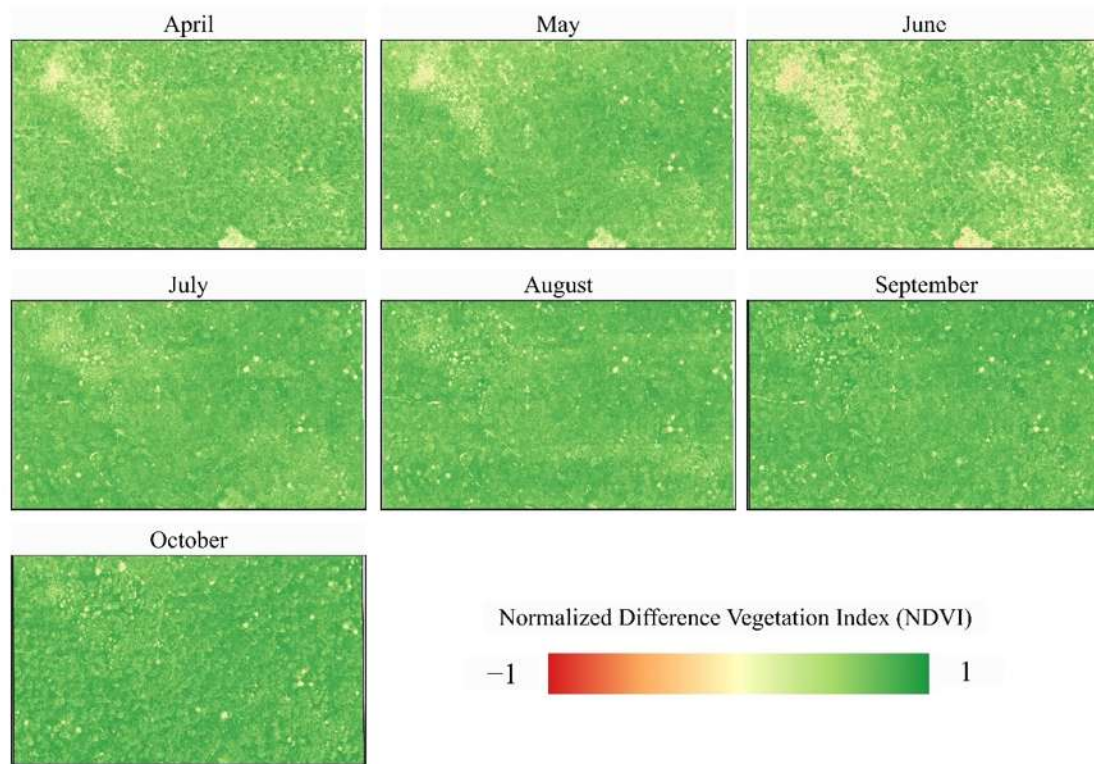


Figura 3. Variación temporal del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) del área de estudio en el periodo abril a octubre 2023. Cada panel representa el NDVI mensual. La escala de colores a la derecha ilustra el rango de valores del NDVI, de -1 (ausencia de vegetación o suelo desnudo) a 1 (árboles saludables).

Por otra parte, la captura y procesamiento de datos LiDAR permitió obtener una nube de puntos densa (Figura 4a). Con ello se generaron productos clave para la caracterización y análisis individual de los árboles de *Abies religiosa* en el área de estudio i.e., modelo Digital de Superficie (MDS) que integra todos elementos capturados en la nube de puntos LiDAR; Modelo Digital de Terreno (MDT) (Figura 4b) que evidenció una topografía heterogénea, con altitudes que oscilan entre 3200 y 3400 metros; Modelo de Altura del Dosel (MAD) (Figura 4c), que es el resultado de la diferencia de los modelos anteriores. Con el MAD se logró conocer la altura específica de la vegetación. Este modelo mostró una variabilidad en las alturas, con valores que alcanzaron hasta los 42 metros. Finalmente, mediante la aplicación del algoritmo de máximos locales se detectaron y geolocalizaron 2664 individuos de *Abies religiosa* (Figura 4d). La precisión centimétrica del

sensor LiDAR y VANT con cámara multispectral combinando tecnología GNSS permitió asignar de manera precisa los valores promedio de NDVI a cada individuo detectado, proporcionando una herramienta robusta para el monitoreo y la evaluación de la vitalidad de los árboles a nivel individual. Este proceso se replicó para cada mes estudiado dentro del periodo abril a octubre 2023.

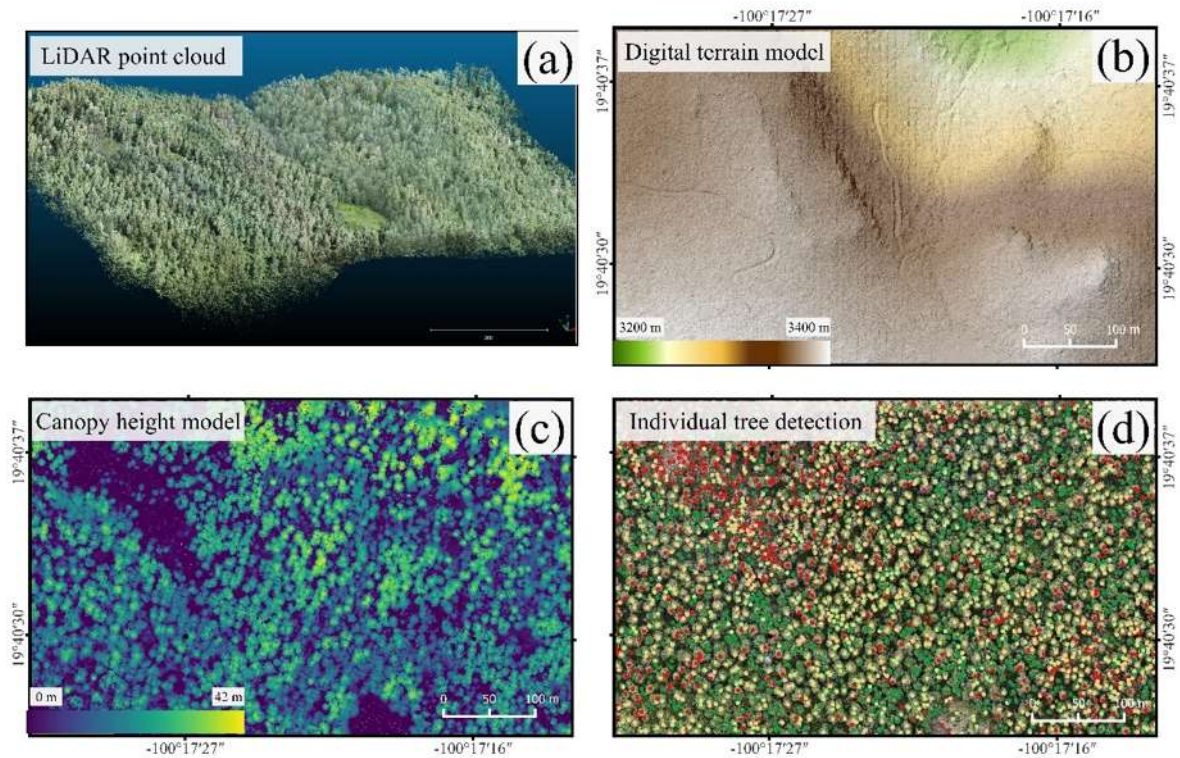


Figura 4. Principales productos y etapas del procesamiento de datos LiDAR para la detección y geolocalización de los individuos de *Abies religiosa* presentes en el área de estudio. (a) Nube de puntos LiDAR tridimensional que captura la estructura del bosque; (b) Modelo digital del terreno que detalla la topografía del área de estudio; (c) Modelo de altura del dosel (MAD) que asigna la altura a cada individuo de *Abies religiosa*; (d) Detección individual de árboles, resaltando las copas identificadas para su posterior asignación de valores promedio de NDVI.

El análisis de los datos de campo de variables climáticas (temperatura, precipitación e IAM) y del comportamiento del vigor/desvitalización de *Abies religiosa* (NDVI promedio de copas) permitió identificar patrones significativos de la dinámica de estos durante el periodo de abril a octubre de 2023. En la Figura 5a, se observa una dinámica marcada por un aumento gradual de la temperatura promedio diaria desde abril, alcanzando un máximo de 16.7 °C en julio, seguido de un descenso hacia octubre. La precipitación acumulada mensual, en cambio, muestra un máximo de 168 mm en julio, y una disminución progresiva en los meses siguientes.

Por su parte, la Figura 5b relaciona el IAM y el promedio del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) de las copas de los 2446 árboles detectados. El IAM alcanza sus valores más altos en junio, indicando condiciones de mayor aridez, mientras que en los meses de junio a octubre disminuye drásticamente, coincidiendo con el aumento de las precipitaciones. En contraste, el NDVI presenta un comportamiento menos extremo, con un ligero aumento entre mayo y julio, asociado con la disponibilidad hídrica durante las lluvias esporádicas, y un descenso gradual hacia octubre, reflejando la posible disminución en la actividad fotosintética de los individuos al final del ciclo vegetativo. Estos resultados destacan la importancia de las variables climáticas en la regulación de la salud y el vigor de los árboles, evidenciando la capacidad del NDVI para monitorear respuestas fisiológicas individuales frente a las fluctuaciones ambientales.

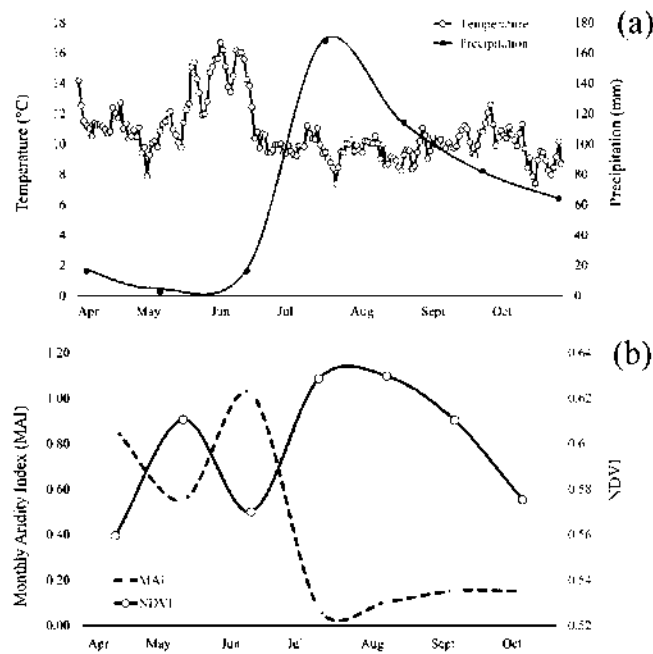


Figura 5. Comportamiento mensual (periodo de abril a octubre 2023) entre: (a) temperatura promedio diaria (°C) y la precipitación mensual acumulada (mm); y (b) el índice de aridez mensual (IAM; valores mayores indican mayor aridez) y el promedio del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) de las copas de todos los individuos de *Abies religiosa* detectados en el área de estudio.

La Figura 6 presenta las anomalías de temperatura mensuales registradas entre abril y octubre de 2023 en el área de estudio, calculadas como desviaciones del promedio histórico de referencia (1961-1990). Los resultados destacan una variación significativa a lo largo del periodo, con anomalías positivas en todos los meses analizados. En abril y mayo, las anomalías fueron moderadas, con valores de +0.94 °C y +0.66 °C, respectivamente. Sin embargo, en junio se observó

un incremento abrupto, alcanzando un máximo de $+2.71\text{ }^{\circ}\text{C}$, que representa la anomalía más alta del periodo. A partir de julio, las anomalías mostraron una tendencia decreciente, con valores de $+0.59\text{ }^{\circ}\text{C}$ en julio, $+0.44\text{ }^{\circ}\text{C}$ en agosto, y una reducción progresiva hasta alcanzar $+0.16\text{ }^{\circ}\text{C}$ en octubre.

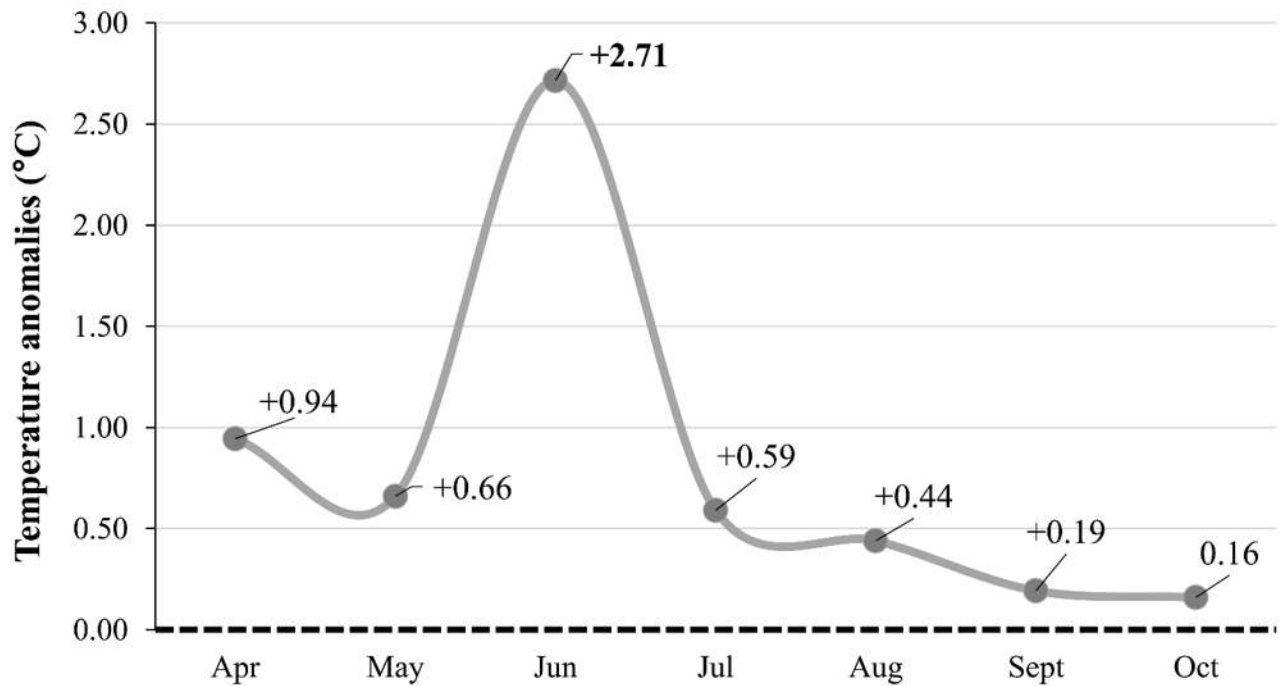


Figura 6. Anomalías de temperatura mensuales desde abril hasta octubre 2023 obtenidas promediando dos data loggers en el sitio de estudio. Los valores anotados sobre cada punto representan la magnitud de la anomalía, destacando un máximo de $+2.71\text{ }^{\circ}\text{C}$ en junio. Las anomalías son desviaciones de la línea de base (línea negra discontinua) del promedio histórico mensual de 1961-1990.

La Figura 7 muestra la distribución mensual del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) de las copas de *Abies religiosa*, categorizadas según su condición de vitalidad: árboles sanos, desvitalizados, altamente desvitalizados y muertos. Los diagramas de caja reflejan la variabilidad en el NDVI para cada grupo, con diferencias significativas entre las cuatro categorías en todos los meses analizados (prueba post hoc de Tukey, $p \leq 0.05$). Los árboles sanos presentaron los valores de NDVI más altos en todos los meses, con medianas que oscilaron entre 0.75 y 0.85, reflejando una alta actividad fotosintética. En contraste, los árboles desvitalizados y altamente desvitalizados mostraron medianas de NDVI más bajas, con valores que disminuyen

progresivamente de abril a octubre, resultando el mes de junio los valores más bajos (reflejando la pérdida de vitalidad de los árboles por la ola de calor que ocurrió en junio; ver Figura 6). Los árboles muertos registraron consistentemente los valores más bajos de NDVI (0.2 a 0.5), confirmando la prácticamente ausencia de actividad fotosintética en este grupo.

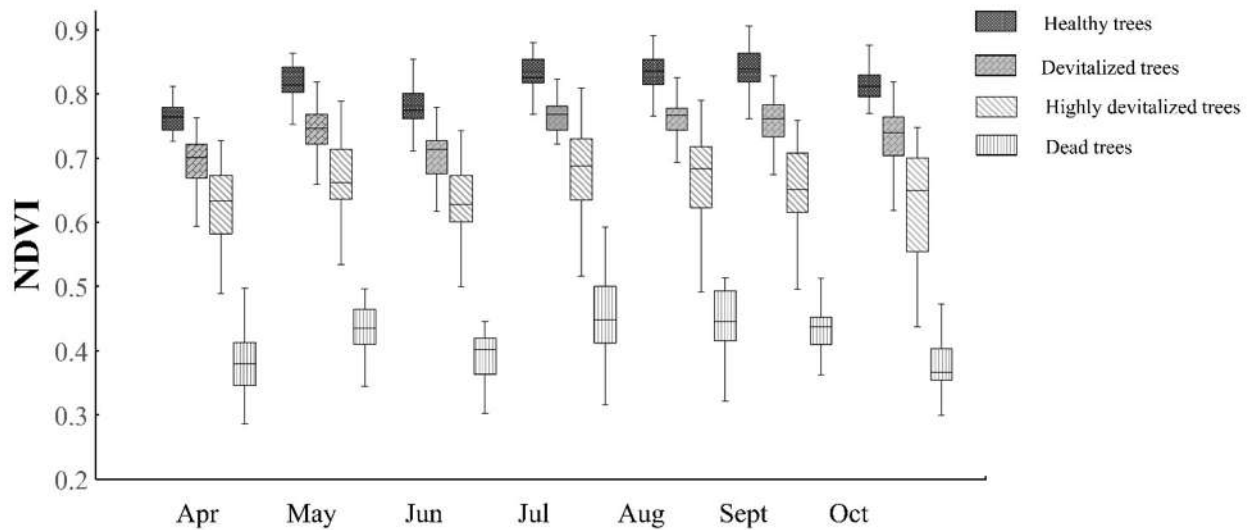


Figura 7. Boxplot del normalized difference vegetation index (NDVI) de las copas de *Abies religiosa* según su condición de vitalidad. La línea que cruza el cuadro corresponde a la mediana y el rectángulo corresponde al rango intercuartil. Todas las condiciones de vitalidad mostraron diferencias significativas para cada mes (comparaciones múltiples de medias prueba post hoc de Tukey, $p \leq 0,05$).

La Figura 8 presenta la proporción mensual de individuos de *A. religiosa* clasificados según su condición de vitalidad (sanos, desvitalizados, altamente desvitalizados y muertos) durante el periodo de abril a octubre de 2023. En abril, el porcentaje de árboles categorizados como sanos representó el 41% del total, mientras que los grupos de árboles desvitalizados y muy desvitalizados sumaron alrededor del 55%, por lo tanto, los árboles muertos constituyeron el 4%. A partir de mayo y junio, se detectó una disminución en el porcentaje de árboles sanos, coincidiendo con los meses con mayor IAM (Figura 5b). Esto sugiere un progresivo deterioro en la vitalidad de los árboles, posiblemente atribuible a factores climáticos. En general, los resultados reflejan una transición en la condición de vitalidad de la población de *A. religiosa*, destacando la importancia del monitoreo continuo para evaluar el impacto de estos cambios en la dinámica forestal y su relación con los factores ambientales.

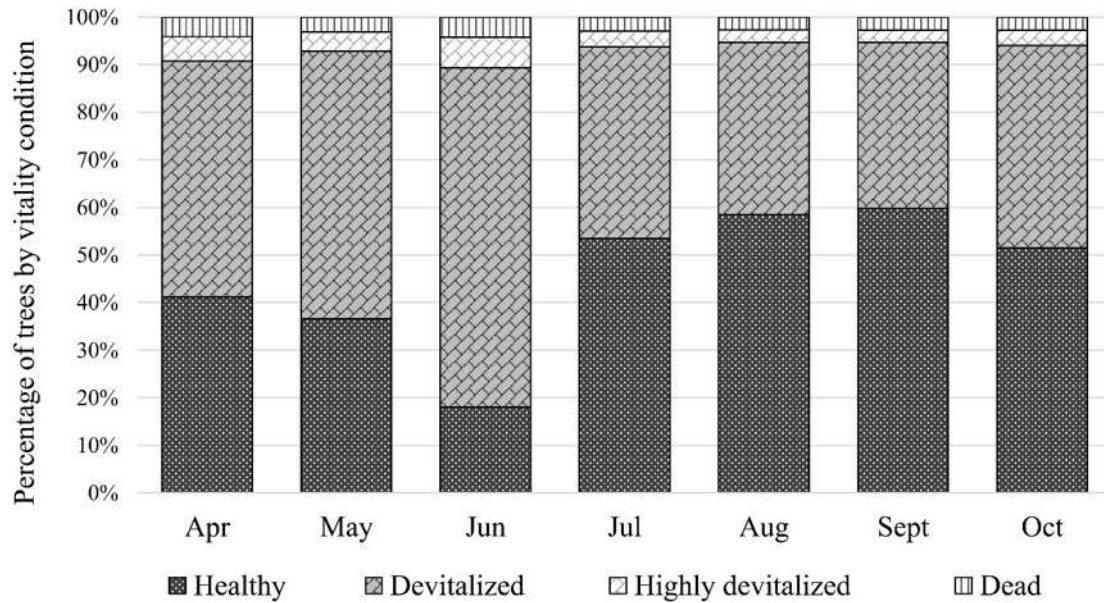


Figura 8. Porcentaje mensual de individuos de *Abies religiosa* clasificados según su condición de vitalidad (sanos, desvitalizados, muy desvitalizados y muertos) durante el período de abril a octubre 2023.

La Figura 9 muestra la relación entre el IAM y el número de árboles de *A. religiosa* clasificados como altamente desvitalizados y muertos en el área de estudio. Se ajustaron modelos de regresión cuadrática para ambas categorías, los cuales presentaron un ajuste significativo, indicando una fuerte relación entre las condiciones de aridez y el estado de vitalidad de los árboles. Para los árboles altamente desvitalizados (rombos grises en Figura 9), el modelo cuadrático explica el 95.9% de la variabilidad observada entre las relaciones de las condiciones de aridez y la proporción de individuos de *A. religiosa* en esta condición. La relación sugiere que a mayor IAM (es decir, a mayor aridez), el número de árboles altamente desvitalizados también incrementa de manera notable, alcanzando su punto máximo en condiciones de mayor aridez ($\text{IAM} > 1.0$), lo cual ocurrió en el mes de junio (Figura 5b). En consonancia, el modelo cuadrático para los árboles muertos (círculos negros), explica el 96.8% de la variabilidad en la relación entre el aumento del IAM y el incremento en la cantidad de árboles muertos. Aunque el impacto es más gradual en comparación con los árboles altamente desvitalizados, la tendencia muestra un incremento constante en el número de árboles muertos conforme se intensifican las condiciones de aridez. Estos resultados destacan que el IAM es un predictor robusto de la vitalidad de *A. religiosa*, subrayando la sensibilidad de esta especie a condiciones de aridez extrema. La fuerte relación cuantificada por

los modelos refuerza la importancia de monitorear estas variables para diseñar estrategias de mitigación frente al cambio climático y sus efectos en los ecosistemas forestales.

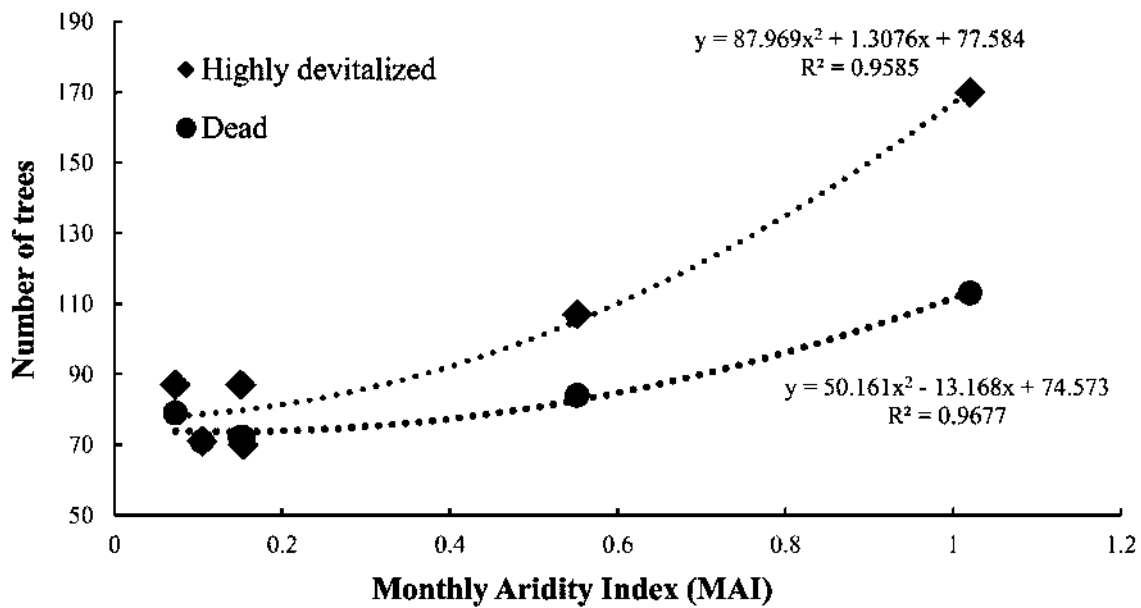


Figura 9. Relación entre el Índice de Aridez Mensual (IAM; valores mayores indican más aridez) y el número de árboles altamente desvitalizados y muertos. Las líneas de tendencia corresponden a modelos cuadráticos ajustados para cada categoría: árboles muy desvitalizados (línea gris punteada) y árboles muertos (línea negra punteada), con sus respectivas ecuaciones y coeficientes de determinación (R^2).

De la misma forma, la Figura 10 muestra la relación entre el IAM y el número de árboles clasificados como sanos y desvitalizados. Los modelos de regresión lineal ajustados para ambas categorías revelan tendencias opuestas en respuesta al aumento del IAM, con coeficientes de determinación (R^2) que indican un ajuste robusto en ambos casos. Para los árboles sanos (cuadrados grises en Figura 10), el modelo lineal presenta un coeficiente de determinación de $R^2=0.95$, lo que implica que el 95.1% de la variabilidad en el número de árboles sanos es explicada por el IAM. La pendiente negativa de la ecuación indica una disminución progresiva en el número de árboles sanos a medida que el IAM incrementa, reflejando el impacto adverso de la aridez en el vigor de estos individuos de *A. religiosa*.

Por el contrario, para los árboles desvitalizados (triángulos negros en Figura 10), el modelo lineal muestra un $R^2=0.95$, explicando el 94.9% de la variabilidad. La pendiente positiva del modelo

sugiere que el número de árboles desvitalizados aumenta significativamente con el incremento del IAM, evidenciando que las condiciones de aridez contribuyen al deterioro de los árboles previamente saludables. Los resultados destacan una transición gradual de árboles sanos a desvitalizados conforme aumentan las condiciones de aridez, subrayando la sensibilidad de *A. religiosa* al estrés hídrico. Este análisis refuerza la importancia de estrategias de manejo para mitigar los efectos de la aridez y preservar la vitalidad de las poblaciones forestales frente al cambio climático.

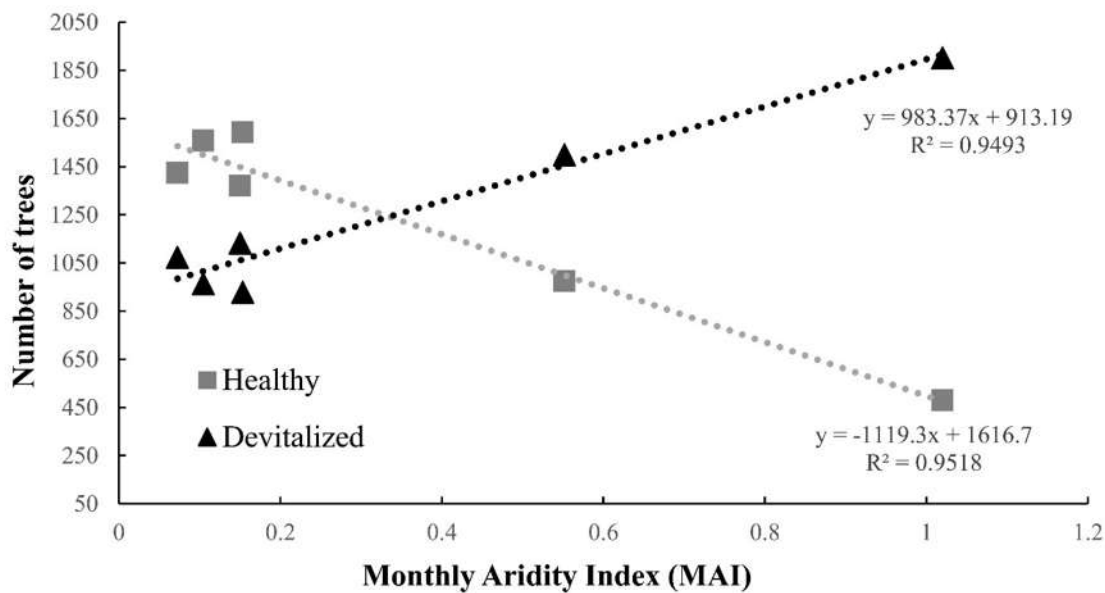


Figura 10. Relación entre el Índice de Aridez Mensual (IAM; valores mayores indican más aridez) y el número de árboles sanos y desvitalizados. Las líneas de tendencia corresponden a modelos lineales ajustados para cada categoría: árboles sanos (línea gris punteada) y árboles desvitalizados (línea negra punteada), con sus respectivas ecuaciones y coeficientes de determinación (R^2)

Discusión

Los resultados de este estudio demuestran la capacidad de la tecnología LiDAR aerotransportado para detectar y geolocalizar árboles de manera individual (Hui et al., 2022). Así como la sensibilidad de los sensores multispectrales montados en VANT para distinguir los diferentes niveles de vitalidad de *A. religiosa* (Dash et al., 2017). Si bien, estas tecnologías ya han sido utilizadas en numerosos estudios enfocados en el monitoreo de la salud forestal (Ecke et al., 2022), la aportación de la presente investigación fue combinar estas dos tecnologías para el caso específico de *A. religiosa* en la RBMM, que ha nuestro conocimiento es el primer estudio con este enfoque

en México. La integración de estas tecnologías (i.e. LiDAR y multiespectral) permitió realizar un monitoreo mensual eficiente de las respuestas fisiológicas de los individuos, proporcionando información clave sobre la dinámica de la desvitalización de esta especie en un contexto de cambio climático.

El NDVI utilizado como indicador de la actividad fotosintética y del vigor de los árboles, mostró una variación significativa durante el periodo de estudio (abril a octubre de 2023). En particular, el mes de junio presentó una disminución generalizada en los valores de NDVI, coincidiendo con el pico del IAM (Figure 5b), es decir, con una ola de calor, muy probablemente relacionada a El Niño 2023-2024 (Sáenz-Romero, 2024). Este resultado es consistente con estudios previos que destacan la sensibilidad del NDVI, como indicador de respuesta de la vegetación, a condiciones de sequía y aridez extrema en bosques templados (Ewane et al., 2023). La relación inversa entre el NDVI y el IAM subraya el impacto adverso de la reducción de la disponibilidad hídrica sobre la actividad fisiológica de los árboles de *A. religiosa*. Si bien se tienen identificados mecanismos de defensa de los árboles contra la sequía para reducir la transpiración (cierre de estomas) (Martin-StPaul et al., 2017), preocupantemente estos mecanismos parecen ser insuficientes ante la aceleración del cambio climático (Allen et al., 2015). Cuando se combina falta de precipitación con una ola de calor (como ocurrió en junio de 2023), el déficit de presión de vapor (una medida de la sequedad del aire), puede llegar a tener valores tan elevados, que propicia la pérdida de humedad de las hojas o acículas, aun cuando éstas han cerrado las estomas (Sáenz-Romero et al., 2023). Aunado a ello, el género *Abies* presenta un cierre de estomas menos estricto y menos eficiente (ante un aumento del estrés hídrico) en comparación con especies de los géneros *Pinus* y *Picea* (Leo et al., 2014). Esta regulación menos rígida sugiere un comportamiento anisohídrico, que puede incrementar el riesgo de cavitación en situaciones de sequía extrema, lo que exhibe una mayor vulnerabilidad de *A. religiosa* ante el cambio climático.

Por otro lado, los meses de julio y septiembre mostraron cierta estabilización en los valores de NDVI, muy probablemente debido a las precipitaciones intermitentes que mitigaron parcialmente el impacto de la aridez (Figura 5). Este patrón también ha sido reportado en bosques mediterráneos, donde las lluvias esporádicas pueden aliviar temporalmente el estrés hídrico y aumentar las posibilidades de regeneración (Matías et al., 2012). Sin embargo, el descenso gradual del NDVI hacia octubre sugiere una disminución en la actividad fotosintética debido al inicio de la

senescencia vegetativa, un fenómeno común en especies de coníferas al final del ciclo de crecimiento.

La categorización de los individuos de *A. religiosa* en sanos, desvitalizados, muy desvitalizados y muertos reveló patrones significativos en la distribución espacial y temporal de la vitalidad. A medida que el IAM incrementó durante mayo y junio, se observó un deterioro significativo en la vitalidad de los árboles, con una disminución de árboles sanos al 18%. Este cambio estuvo acompañado de un incremento en los árboles desvitalizados, que pasaron del 56% al 71%, evidenciando una transición crítica en el estado de salud del bosque. Además, los árboles muy desvitalizados aumentaron al 6% (un incremento del 2%), mientras que los árboles muertos permanecieron constantes en un 4%. Estos resultados son consistentes con estudios recientes que evidencian la transición de árboles saludables a estados de deterioro bajo condiciones de aridez inusual (Allen et al., 2015).

Uno de los principales hallazgos de este estudio fue la identificación y geolocalización de los individuos de *A. religiosa* categorizados como desvitalizados, los cuales presentan una mayor susceptibilidad a los ataques de plagas y enfermedades, como son *Scolytus mundus*, *Pseudohylesinus variegatus* y *Pityophthorus elatinus*, escarabajos descortezadores que afectan severamente a esta especie (Cibrián-Tovar et al., 1995). Este comportamiento ha sido corroborado por estudios que señalan que los árboles con condiciones de vitalidad reducida son más propensos a infestaciones por insectos descortezadores, incrementando su vulnerabilidad (Fonseca González et al., 2018). Además, esta predisposición puede estar asociada con factores ambientales que favorecen la proliferación de brotes de insectos descortezadores (Gómez-Pineda et al., 2022; Sáenz-Romero et al 2023). Estos resultados subrayan la importancia de implementar estrategias de monitoreo y manejo forestal que prioricen la identificación y tratamiento de árboles desvitalizados para prevenir brotes epidémicos (del-Val & Sáenz-Romero, 2017).

Finalmente, de manera preocupante, las anomalías de temperatura registradas durante el periodo de estudio revelaron un incremento significativo respecto al promedio histórico (1961-1990). En junio, se alcanzó un máximo de +2.71 °C, coincidiendo con el pico del índice de aridez (Figura 5). Este patrón sugiere que las condiciones térmicas anómalas más pronunciadas coincidieron con los meses de mayor radiación solar y menor cobertura nubosa, características de la temporada de transición entre primavera y verano, aunque de manera atípica, en el sentido de que la temporada

de lluvias usualmente inicia en mayo, lo cual no sucedió, sino que inició prácticamente en julio. Estos resultados subrayan la magnitud de la ocurrencia de sequías más cálidas recientes en el área de estudio, destacando la importancia de monitorear las condiciones locales para comprender mejor su impacto en los ecosistemas forestales y las especies más vulnerables como lo es *A. religiosa*. El aumento de la temperatura agrava el estrés hídrico en los ecosistemas forestales, reduciendo la eficiencia en el uso del agua y aumentando la vulnerabilidad de los árboles al colapso hidráulico, conocido también como cavitación (Arend et al., 2021). Estos resultados son consistentes con investigaciones que señalan cómo las temperaturas elevadas amplifican los efectos de la sequía, llevando a un aumento en la mortalidad forestal a nivel global (Hammond et al., 2022).

Los hallazgos de este estudio pudieran tener implicaciones directas para el manejo forestal y la conservación de *A. religiosa*, una especie de gran importancia ecológica y cultural (Rendón-Salinas et al., 2023). La sensibilidad de esta especie a las condiciones de aridez (Ulrich & Grossiord, 2023) y su transición gradual hacia estados de desvitalización bajo estrés climático, subrayan la necesidad de estrategias de un manejo adaptativo ante el cambio climático. Estas estrategias podrían incluir la identificación y protección de microhábitats con mejores condiciones hídricas para el reclutamiento de regeneración natural y una mejor sobrevivencia de las reforestaciones, utilizando por ejemplo arbustos como plantas nodriza (Carbajal-Navarro et al., 2019), así como la implementación de prácticas de restauración forestal que contemplen el cambio climático, como la migración asistida (Cruzado-Vargas et al., 2021; Sáenz-Romero et al., 2024).

Conclusiones

La presente investigación resalta la efectividad de la combinación de la tecnología LiDAR aerotransportado e imágenes multiespectrales capturadas con VANTs para monitorear la dinámica de desvitalización de *Abies religiosa* en la RBMM. A lo largo del periodo de estudio (abril-octubre de 2023), se identificaron patrones claros en las condiciones de vitalidad de los árboles en relación con el IAM y las anomalías de temperatura. Se destaca a junio del 2023 como el mes más crítico, con una reducción significativa en los valores del NDVI, indicador clave de la actividad fotosintética, y un incremento notable en el porcentaje de árboles desvitalizados. Este análisis permitió categorizar los árboles en sanos, desvitalizados, muy desvitalizados y muertos,

geolocalizando a más de 2,600 individuos de *A. religiosa* y relacionando su condición con las variables climáticas observadas.

Uno de los principales hallazgos fue que las condiciones de aridez extrema agravan el deterioro fisiológico de los individuos de *A. religiosa*, incrementando su vulnerabilidad a plagas y enfermedades como *Scolytus mundus* y otras especies de insectos descortezadores. Los resultados refuerzan la importancia de integrar herramientas tecnológicas de alta resolución en los programas de manejo y conservación forestal, especialmente en un contexto de cambio climático acelerado. Asimismo, este estudio subraya la necesidad de implementar estrategias que combinen monitoreo continuo con medidas preventivas y prácticas de restauración forestal adaptativa ante el cambio climático. Sin embargo, futuras investigaciones deberán enfocarse en ampliar las escalas espaciales y temporales del monitoreo.

DISCUSIÓN GENERAL

La presente discusión general integra los hallazgos presentados en los dos capítulos de la presente tesis, analizando las tecnologías de sensores remotos, los tipos de drones y sensores utilizados y sus aplicaciones en la evaluación de la declinación forestal. Además, se contrastan estos resultados con otros estudios científicos para destacar el alcance y las limitaciones de las metodologías empleadas.

Tipos de drones y sensores

Los drones, también denominados Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs), están revolucionando la manera en que se evalúan los ecosistemas forestales (Guimarães et al., 2020). Existen principalmente dos tipos de drones empleados en el monitoreo forestal: los multirrotores y los de ala fija (Garg, 2022). Los drones multirrotores, como el DJI Mavic 3 Enterprise® y el DJI Matrice 350®, son ideales para capturar datos de alta resolución en áreas pequeñas o de difícil acceso debido a su capacidad de despegue vertical, vuelo estacionario, seguimiento del terreno en tiempo real y transporte más versátil (Gallardo-Salazar et al., 2020). Por otro lado, los drones de ala fija (no utilizados en la presente tesis) son más adecuados para cubrir grandes extensiones de terreno gracias a su mayor autonomía y eficiencia en el consumo de energía, sin embargo, es necesario contar con un área despejada para lograr un despegue seguro, lo que los hace inadecuados para trabajos en zonas con un dosel forestal (Garg, 2022).

En cuanto a los sensores más utilizados en el monitoreo de la salud forestal se incluyen:

- Sensores multiespectrales: Capturan imágenes en varias longitudes de onda del espectro electromagnético, permitiendo el cálculo de índices de vegetación como el NDVI.
- Sensores hiperspectrales: Ofrecen un nivel de detalle superior al captar cientos de bandas espectrales, lo que facilita la detección de cambios sutiles en la salud de los árboles.
- Sensores térmicos: Detectan diferencias en la temperatura de la superficie del dosel, lo que puede ser un indicador de estrés hídrico.
- LiDAR (*Light Detection and Ranging*): Proporciona información tridimensional de alta precisión sobre la estructura del dosel forestal, siendo clave para modelar la estructura y calcular variables dasométricas a nivel de árbol individual.

Cada tipo de dron y sensor tiene aplicaciones específicas que complementan las necesidades de monitoreo y la gestión forestal, como se demuestra en los diferentes capítulos de esta tesis. La Figura 1 ilustra un gráfico Sankey que representa las conexiones entre las tecnologías utilizadas (modelos de drones y sensores) y los productos derivados, destacando su utilidad en evaluaciones visuales, cuantitativas y sus aplicaciones en el monitoreo de la salud forestal.

Este flujo de relaciones resalta la importancia de combinar tecnología avanzada con análisis enfocados, en este caso, a la salud forestal. La capacidad de los sensores RGB, multiespectrales y LiDAR proporciona un enfoque integral que permite poseer mayor conocimiento para tomar decisiones en la implementación de estrategias de conservación y manejo sostenible basadas en datos cuantitativos más precisos.

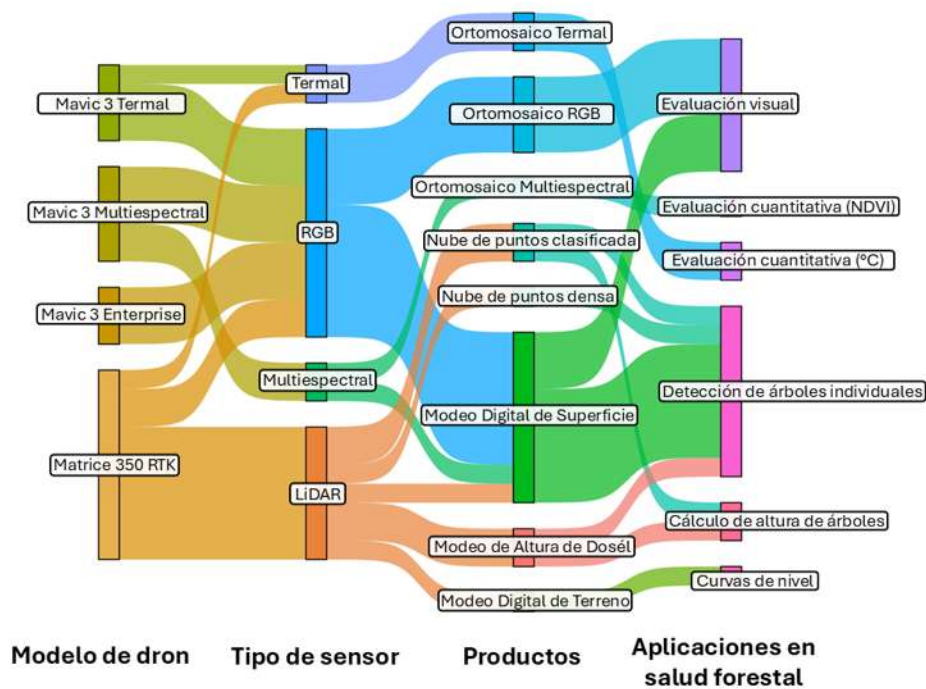


Figura 1. Flujo de relación entre modelos de drones, tipos de sensores, productos generados y sus aplicaciones en el monitoreo de la salud forestal.

Por otra parte, Ecke et al., (2022) analizaron el uso de drones en la detección temprana de enfermedades forestales, estrés hídrico y cambios en la estructura del dosel forestal. El estudio resalta la ventaja de los drones en la adquisición de datos precisos y rápidos, complementando

imágenes satelitales y trabajo en campo para mejorar la gestión y conservación de los ecosistemas forestales.

En comparación con estudios globales, como el de Huang et al. (2019), en el que exploran el uso de imágenes satelitales para monitorear estrés hídrico, pérdida de biomasa y otros indicadores de la declinación forestal, esta tesis integra tecnologías con mayor resolución y precisión. Los drones ofrecen una escala intermedia clave entre imágenes satelitales y trabajo de campo. Permiten obtener datos de alta resolución espacial y temporal a un costo relativamente bajo. Asimismo, facilitan la detección de cambios en el dosel, estrés hídrico y mortalidad de árboles con mayor detalle que los satélites, proporcionando mayor cobertura que los métodos terrestres.

Capítulo I: evaluación de la desvitalización de Pinus hartwegii en el Nevado de Toluca

Los hallazgos en este capítulo indicaron que los síntomas de declinación forestal son más pronunciados en altitudes bajas, corroborando estudios previos que vinculan estas áreas con mayores temperaturas y menor disponibilidad hídrica (Mátyás et al., 2018). Además, el uso de sensores multiespectrales permitió identificar cambios en el vigor de los árboles a través de índices como el NDVI, alineándose con los resultados de Buras et al. (2018), quienes estudiaron mediante VANTs multiespectrales, la desvitalización de los árboles a partir de valores inferiores a 0.4 del NDVI.

Es importante destacar que el vuelo del dron en el gradiente altitudinal presentó varios desafíos técnicos significativos. Uno de los principales retos fue que aparentemente la reducción de la densidad del aire a mayores altitudes afecta el rendimiento del dron, aumentando el consumo de batería y reduciendo el tiempo efectivo de vuelo. Además, las condiciones atmosféricas variables, como vientos fuertes pueden dificultar la planificación y ejecución de las misiones. Finalmente, la topografía irregular del terreno y la insuficiencia de caminos complicó la ejecución de vuelos automatizados, requiriendo ajustes constantes en la altitud del dron para evitar colisiones y garantizar la captura precisa de las imágenes.

Capítulo II: evaluación de la desvitalización de Abies religiosa en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca

El tercer capítulo de esta investigación ha permitido una comprensión detallada sobre la dinámica de la desvitalización de *Abies religiosa* en la RBMM, mediante el uso de drones equipados con sensores LiDAR y cámaras multiespectrales. Los monitoreos realizados entre abril y octubre de

2023 revelaron patrones de deterioro fisiológico estrechamente relacionados con variables climáticas, como el índice de aridez mensual y las anomalías de temperatura.

Uno de los principales retos identificados en esta investigación fue la necesidad de mejorar la precisión en la detección y monitoreo de la desvitalización de *Abies religiosa* en la RBMM. Si bien la combinación de sensores LiDAR y cámaras multiespectrales ha demostrado ser una herramienta robusta para caracterizar la salud forestal, su implementación aún enfrenta desafíos como la posible confusión en la clasificación de los niveles de desvitalización debido a la transparencia del dosel forestal (Miraki et al., 2021). En algunos casos, la disminución en la densidad foliar y de ramas en árboles desvitalizados, puede hacer que las imágenes multiespectrales capten mayor reflectancia del suelo (y por tanto de la vegetación del sotobosque), en lugar de reflejar fielmente la vitalidad de la copa del árbol, lo que podría llevar a una sobreestimación de la severidad de la desvitalización si el suelo está desprovisto de vegetación, o a una subestimación si hay un sotobosque denso. Para subsanar este problema, se recomienda el uso combinado de LiDAR y modelos de clasificación basados en inteligencia artificial que permitan diferenciar entre copas abiertas y árboles muertos, minimizando los errores en la interpretación de los datos. En particular:

- Copas muy abiertas podrían ser mal clasificadas como árboles muertos o muy desvitalizados debido a la mayor presencia de píxeles del suelo (si éste tiene poca vegetación) en las imágenes multiespectrales.
- Uso de LiDAR y análisis de textura podrían ayudar a diferenciar entre copas abiertas y árboles realmente muertos o desvitalizados, minimizando errores en la clasificación.
- Estrategias de segmentación adaptativas de imágenes (tales como forzar la lectura de datos a partir de una altura predeterminada del árbol), podrían mejorar la detección de cambios en la estructura del dosel y evitar sobreestimaciones en la pérdida de follaje.

Asimismo, es crucial ampliar las escalas espaciales y temporales de los estudios de monitoreo, incorporando análisis multianuales que permitan evaluar tendencias a largo plazo en la desvitalización forestal. La integración de datos obtenidos con VANTs con modelos climáticos predictivos podría proporcionar información clave sobre la vulnerabilidad de los árboles frente a escenarios de cambio climático.

CONCLUSIONES GENERALES

El conjunto de información generada en esta tesis permite afirmar que el uso de VANT's en el monitoreo de la declinación forestal, es una poderosa herramienta para tener un rápido y confiable diagnóstico del estado del arbolado que está sufriendo un deterioro (desvitalización) inducido por el cambio climático. Este diagnóstico supera con mucho al que es factible realizar con inspecciones de campo, cuando las áreas afectadas son grandes superficies, y/o su deterioro tiene una dinámica temporal acelerada. Por ello, el diagnóstico con VANTs facilitará la toma de decisiones de manejo forestal informadas, decisiones difíciles (como proceder a realizar matarrasas de cortas fitosanitarias y aclareos anticipados), en un contexto de declinación forestal inducido por el cambio climático (Sáenz-Romero, 2024).

Es un hecho que el monitoreo forestal enfrenta el reto de equilibrar precisión y eficiencia operativa. La incorporación de VANTs con sensores avanzados permite generar modelos tridimensionales detallados y obtener información clave sobre la vitalidad del arbolado sin intervención invasiva. En este sentido, su uso en la gestión forestal aporta no sólo datos precisos, sino también una capacidad de respuesta rápida ante escenarios de estrés ambiental, lo que favorece la toma de decisiones informadas. Estas tecnologías, aplicadas en un contexto de cambio climático y declinación forestal, abren nuevas oportunidades para estrategias de manejo adaptativo, como la detección temprana de áreas vulnerables (por ejemplo, árboles desvitalizados susceptibles a ataques por descortezadores) y la planificación de medidas preventivas en ecosistemas forestales en riesgo.

A pesar de sus múltiples beneficios, la implementación de VANTs en el monitoreo forestal aún presenta desafíos que deben abordarse. Entre ellos, la reducción de costos de adquisición y operación, la estandarización de metodologías de análisis de datos y el desarrollo de modelos automatizados para la categorización del estado fisiológico del arbolado. La combinación de estas herramientas con inteligencia artificial y técnicas de teledetección de mayor alcance podría representar el siguiente paso en la evolución del monitoreo forestal, permitiendo una evaluación más robusta y escalable. En este sentido, la integración de nuevas tecnologías en las prácticas de manejo forestal no sólo mejorará la eficiencia en la detección y mitigación de la declinación forestal, sino que también contribuirá a la conservación y restauración de los ecosistemas en un contexto de creciente presión climática.

BIBLIOGRAFÍA

- Abbass, K., Qasim, M. Z., Song, H., Murshed, M., Mahmood, H., & Younis, I. (2022). A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(28), 42539–42559. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19718-6>
- Alba-Landa, J., Aparicio-Rentería, A., & Márquez-Ramírez, J. (2003). Potencial y eficiencia de producción de semillas de *Pinus Hartwegii* lindl. de dos poblaciones de México. *Foresta Veracruzana*, 5(1), 25–28. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49750104>
- Alfaro-Ramírez, F. U., Ramírez-Albores, J. E., Vargas-Hernández, J. J., Franco-Maass, S., & Pérez-Suárez, M. (2020). Potential reduction of Hartweg's Pine (*Pinus hartwegii* Lindl.) geographic distribution. *PLOS ONE*, 15(2), e0229178. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229178>
- Allen, C. D., Breshears, D. D., & McDowell, N. G. (2015). On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. *Ecosphere*, 6(8)(8), art129. <https://doi.org/10.1890/ES15-00203.1>
- Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D. D., Hogg, E. H. (Ted), Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J.-H., Allard, G., Running, S. W., Semerci, A., & Cobb, N. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259(4), 660–684. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001>
- Arend, M., Link, R. M., Patthey, R., Hoch, G., Schuldt, B., & Kahmen, A. (2021). Rapid hydraulic collapse as cause of drought-induced mortality in conifers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(16). <https://doi.org/10.1073/pnas.2025251118>
- Astudillo-Sánchez, C. C., Fowler, M. S., Villanueva-Díaz, J., Endara-Agramont, A. R., & Soria-Díaz, L. (2019). Recruitment and facilitation in *Pinus hartwegii*, a Mexican alpine treeline ecotone, with potential responses to climate warming. *Trees*, 33(4), 1087–1100. <https://doi.org/10.1007/s00468-019-01844-3>
- Balestra, M., Marselis, S., Sankey, T. T., Cabo, C., Liang, X., Mokroš, M., Peng, X., Singh, A., Stereńczak, K., Vega, C., Vincent, G., & Hollaus, M. (2024). LiDAR Data Fusion to Improve Forest Attribute Estimates: A Review. *Current Forestry Reports*, 10(4), 281–297. <https://doi.org/10.1007/s40725-024-00223-7>
- Bright, B. C., Hicke, J. A., & Hudak, A. T. (2012). Estimating aboveground carbon stocks of a forest affected by mountain pine beetle in Idaho using lidar and multispectral imagery. *Remote Sensing of Environment*, 124, 270–281. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.05.016>
- Brower, L. P., Williams, E. H., Fink, L. S., Slayback, D. A., Ramírez, M. I., García, M. V. L., Zubieta, R. R., Weiss, S. B., Calvert, W. H., & Zuchowski, W. (2011). Overwintering Clusters of the Monarch Butterfly Coincide with the Least Hazardous Vertical Temperatures in the Oyamel Forest. *Journal of the Lepidopterists' Society*, 65(1), 27–46. <https://doi.org/10.18473/lepi.v65i1.a3>
- Buras, A., Schunk, C., Zeitrüg, C., Herrmann, C., Kaiser, L., Lemme, H., Straub, C., Taeger, S., Gößwein, S., Klemmt, H.-J., & Menzel, A. (2018). Are Scots pine forest edges particularly prone to drought-induced mortality? *Environmental Research Letters*, 13(2), 025001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa0b4>

- Campbell, M. J., Dennison, P. E., Tune, J. W., Kannenberg, S. A., Kerr, K. L., Coddling, B. F., & Anderegg, W. R. L. (2020). A multi-sensor, multi-scale approach to mapping tree mortality in woodland ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 245, 111853. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111853>
- Carbajal-Navarro, A., Navarro-Miranda, E., Blanco-García, A., Cruzado-Vargas, A. L., Gómez-Pineda, E., Zamora-Sánchez, C., Pineda-García, F., O'Neill, G., Gómez-Romero, M., Lindig-Cisneros, R., Johnsen, K. H., Lobit, P., Lopez-Toledo, L., Herrerías-Diego, Y., & Sáenz-Romero, C. (2019). Ecological Restoration of *Abies religiosa* Forests Using Nurse Plants and Assisted Migration in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Mexico. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 7. <https://doi.org/10.3389/fevo.2019.00421>
- Carlón Allende, T., Villanueva Díaz, J., Soto Castro, G., Mendoza, M. E., & Macías, J. L. (2021). Tree rings as indicators of climatic variation in the Trans-Mexican Volcanic Belt, central Mexico. *Ecological Indicators*, 120, 106920. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106920>
- Carrillo-Arizmendi, L., Pérez-Suárez, M., Vargas-Hernández, J. J., Rozenberg, P., & Martínez-Campos, A. R. (2022). Warming effects on tree-ring variables in *P. hartwegii* Lindl. at the extremes of its natural elevational distribution in central Mexico. *Agricultural and Forest Meteorology*, 324, 109109. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109109>
- Castellanos-Acuña, D., Vance-Borland, K. W., St. Clair, J. B., Hamann, A., López-Upton, J., Gómez-Pineda, E., Ortega-Rodríguez, J. M., & Sáenz-Romero, C. (2018). Climate-based seed zones for Mexico: guiding reforestation under observed and projected climate change. *New Forests*, 49(3), 297–309. <https://doi.org/10.1007/s11056-017-9620-6>
- Chavana-Bryant, C., Malhi, Y., Wu, J., Asner, G. P., Anastasiou, A., Enquist, B. J., Cosio Caravasi, E. G., Doughty, C. E., Saleska, S. R., Martin, R. E., & Gerard, F. F. (2017). Leaf aging of Amazonian canopy trees as revealed by spectral and physiochemical measurements. *New Phytologist*, 214(3), 1049–1063. <https://doi.org/10.1111/nph.13853>
- Chávez-Aguilar, G., Campos-Ángeles, G. V., & Pérez-Suárez, M. (2022). Estructura y composición del bosque de *Pinus hartwegii* Lindl. en su distribución altitudinal en el Nevado de Toluca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(74), 54–76. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i74.1257>
- Choat, B., Brodribb, T. J., Brodersen, C. R., Duursma, R. A., López, R., & Medlyn, B. E. (2018). Triggers of tree mortality under drought. *Nature*, 558(7711), 531–539. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0240-x>
- Cibrián-Tovar, D., Méndez, M. J. T., Campos, B., Yates, R., & Flores, L. J. E. (1995). *Insectos Forestales de México/Forest Insects of Mexico*. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Estado de México, México; Subsecretaría Forestal y de Fauna Silvestre, SARH, México; Forest Service USDA EUA. Natural Resources, Canada. Pub, 6.
- CONANP. (2001). Programa de Manejo Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca . https://Simec.Conanp.Gob.Mx/Pdf_libro_pm/40_libro_pm.Pdf .
- CONANP. (2017). Programa de Manejo Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. https://simec.conanp.gob.mx/pdf_libro_pm/104_libro_pm.pdf

- Cornejo-Tenorio, G., & Ibarra-Manriquez, G. (2017). Flora of the core zones of the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Mexico: composition, geographical affinities and beta diversity. *Botanical Sciences*, 95(1), 103–129. <https://doi.org/10.17129/botsoci.803>
- Cruzado-Vargas, A., Blanco-García, A., Lindig-Cisneros, R., Gómez-Romero, M., Lopez-Toledo, L., de la Barrera, E., & Sáenz-Romero, C. (2021). Reciprocal Common Garden Altitudinal Transplants Reveal Potential Negative Impacts of Climate Change on *Abies religiosa* Populations in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve Overwintering Sites. *Forests*, 12(1), 69. <https://doi.org/10.3390/f12010069>
- Czúcz, B., Gálhidy, L., & Mátyás, C. (2011). Present and forecasted xeric climatic limits of beech and sessile oak distribution at low altitudes in Central Europe. *Annals of Forest Science*, 68(1), 99–108. <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0011-4>
- Dash, J. P., Watt, M. S., Pearse, G. D., Heaphy, M., & Dungey, H. S. (2017). Assessing very high resolution UAV imagery for monitoring forest health during a simulated disease outbreak. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 131, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.07.007>
- Datt, B. (1999). A New Reflectance Index for Remote Sensing of Chlorophyll Content in Higher Plants: Tests using *Eucalyptus* Leaves. *Journal of Plant Physiology*, 154(1), 30–36. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(99\)80314-9](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(99)80314-9)
- del-Val, E., & Sáenz-Romero, C. (2017). Insectos descortezadores (Coleoptera: Curculionidae) y cambio climático: problemática actual y perspectivas en los bosques templados. *TIP*, 20(2), 53–60. <https://doi.org/10.1016/j.recqb.2017.04.006>
- Ecke, S., Dempewolf, J., Frey, J., Schwaller, A., Endres, E., Klemmt, H.-J., Tiede, D., & Seifert, T. (2022). UAV-Based Forest Health Monitoring: A Systematic Review. *Remote Sensing*, 14(13). <https://doi.org/10.3390/rs14133205>
- Eitel, J. U. H., Vierling, L. A., Litvak, M. E., Long, D. S., Schulthess, U., Ager, A. A., Krofcheck, D. J., & Stoscheck, L. (2011). Broadband, red-edge information from satellites improves early stress detection in a New Mexico conifer woodland. *Remote Sensing of Environment*, 115(12), 3640–3646. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.002>
- Ewane, E. B., Mohan, M., Bajaj, S., Galgamuwa, G. A. P., Watt, M. S., Arachchige, P. P., Hudak, A. T., Richardson, G., Ajithkumar, N., Srinivasan, S., Corte, A. P. D., Johnson, D. J., Broadbent, E. N., de-Miguel, S., Bruscolini, M., Young, D. J. N., Shafai, S., Abdullah, M. M., Jaafar, W. S. W. M., ... Cardil, A. (2023). Climate-Change-Driven Droughts and Tree Mortality: Assessing the Potential of UAV-Derived Early Warning Metrics. *Remote Sensing*, 15(10), 2627. <https://doi.org/10.3390/rs15102627>
- Feldman, A. F., Konings, A. G., Gentine, P., Cattry, M., Wang, L., Smith, W. K., Biederman, J. A., Chatterjee, A., Joiner, J., & Poulter, B. (2024). Large global-scale vegetation sensitivity to daily rainfall variability. *Nature*, 636(8042), 380–384. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08232-z>
- Felton, A., Belyazid, S., Eggers, J., Nordström, E.-M., & Öhman, K. (2024). Climate change adaptation and mitigation strategies for production forests: Trade-offs, synergies, and uncertainties in biodiversity and ecosystem services delivery in Northern Europe. *Ambio*, 53(1), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s13280-023-01909-1>

- Fettig, C. J., Reid, M. L., Bentz, B. J., Sevanto, S., Spittlehouse, D. L., & Wang, T. (2013). Changing Climates, Changing Forests: A Western North American Perspective. *Journal of Forestry*, 111(3), 214–228. <https://doi.org/10.5849/jof.12-085>
- Fonseca González, A., Burgos Solorio, A., Fonseca González, J., De los Santos Posadas, H. M., & Juárez Muñoz, J. (2018). Descortezadores y sus enemigos naturales en *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(26), 90–97. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v5i26.292>
- Forzieri, G., Dakos, V., McDowell, N. G., Ramdane, A., & Cescatti, A. (2022). Emerging signals of declining forest resilience under climate change. *Nature*, 608(7923), 534–539. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04959-9>
- Gallardo-Cruz, J. A., Pérez-García, E. A., & Meave, J. A. (2009). β -Diversity and vegetation structure as influenced by slope aspect and altitude in a seasonally dry tropical landscape. *Landscape Ecology*, 24(4), 473–482. <https://doi.org/10.1007/s10980-009-9332-1>
- Gallardo-Salazar, J. L., Carrillo-Aguilar, D. M., Pompa-García, M., & Aguirre-Salado, C. A. (2021). Multispectral indices and individual-tree level attributes explain forest productivity in a pine clonal orchard of Northern Mexico. *Geocarto International*, 1–13. <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1886341>
- Gallardo-Salazar, J. L., Pompa-García, M., Aguirre-Salado, C., López-Serrano, P., & Meléndez-Soto, A. (2020). Drones: technology with a promising future in forest management. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(61). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i61.794>
- Gallardo-Salazar, J. L., Sáenz-Romero, C., Lindig-Cisneros, R., López-Toledo, L., Blanco-García, J. A., & Endara-Agramont, Á. R. (2023). Three decades of remote sensing analysis of forest decline related to climate change. *Cuadernos de Investigación Geográfica*. <https://doi.org/10.18172/cig.5639>
- Gamon, J. A., Kovalchuck, O., Wong, C. Y. S., Harris, A., & Garrity, S. R. (2015). Monitoring seasonal and diurnal changes in photosynthetic pigments with automated PRI and NDVI sensors. *Biogeosciences*, 12(13), 4149–4159. <https://doi.org/10.5194/bg-12-4149-2015>
- Garg, P. K. (2022). Characterisation of Fixed-Wing Versus Multirotors UAVs/Drones. *Journal of Geomatics*, 16(2), 152–159. <https://doi.org/10.58825/jog.2022.16.2.44>
- Gómez-Pineda, E., Hammond, W. M., Trejo-Ramírez, O., Gil-Fernández, M., Allen, C. D., Blanco-García, A., & Sáenz-Romero, C. (2022). Drought years promote bark beetle outbreaks in Mexican forests of *Abies religiosa* and *Pinus pseudostrobus*. *Forest Ecology and Management*, 505, 119944. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119944>
- Gómez-Pineda, E., Sáenz-Romero, C., Ortega-Rodríguez, J. M., Blanco-García, A., Madrigal-Sánchez, X., Lindig-Cisneros, R., López-Toledo, L., Pedraza-Santos, M. E., & Rehfeldt, G. E. (2020). Suitable climatic habitat changes for Mexican conifers along altitudinal gradients under climatic change scenarios. *Ecological Applications*, 30(2). <https://doi.org/10.1002/eap.2041>
- Guimarães, N., Pádua, L., Marques, P., Silva, N., Peres, E., & Sousa, J. J. (2020). Forestry Remote Sensing from Unmanned Aerial Vehicles: A Review Focusing on the Data, Processing and Potentialities. *Remote Sensing*, 12(6), 1046. <https://doi.org/10.3390/rs12061046>

- Hammond, W. M., Williams, A. P., Abatzoglou, J. T., Adams, H. D., Klein, T., López, R., Sáenz-Romero, C., Hartmann, H., Breshears, D. D., & Allen, C. D. (2022). Global field observations of tree die-off reveal hotter-drought fingerprint for Earth's forests. *Nature Communications*, 13(1), 1761. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29289-2>
- Hill, A. P., Nolan, C. J., Hemes, K. S., Cambron, T. W., & Field, C. B. (2023). Low-elevation conifers in California's Sierra Nevada are out of equilibrium with climate. *PNAS Nexus*, 2(2). <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad004>
- Hoffrén, R., & García, M. B. (2023). Thermal unmanned aerial vehicles for the identification of microclimatic refugia in topographically complex areas. *Remote Sensing of Environment*, 286, 113427. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113427>
- Huang, C., Anderegg, W. R. L., & Asner, G. P. (2019). Remote sensing of forest die-off in the Anthropocene: From plant ecophysiology to canopy structure. *Remote Sensing of Environment*, 231, 111233. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111233>
- Hui, Z., Cheng, P., Yang, B., & Zhou, G. (2022). Multi-level self-adaptive individual tree detection for coniferous forest using airborne LiDAR. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 114, 103028. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103028>
- Iglesias, L. G., Solís-Ramos, L. Y., & Viveros-Viveros, H. (2012). Variación morfométrica en dos poblaciones naturales de *Pinus hartwegii* Lindl. del estado de Veracruz. *Phyton (Buenos Aires)*, 81(2), 239–246. <https://www.biodiversitylibrary.org/part/114010>
- INEGI. (2000). Cartografía Edafológica Temática, escala 1:250,000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- Jay, L., Josue, M.-A., John, D., & Kathleen, S. (2018). Lessons from California's 2012–2016 Drought. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 144(10), 04018067. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000984](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000984)
- Kobler, J., Zehetgruber, B., Dirnböck, T., Jandl, R., Mirtl, M., & Schindlbacher, A. (2019). Effects of aspect and altitude on carbon cycling processes in a temperate mountain forest catchment. *Landscape Ecology*, 34(2), 325–340. <https://doi.org/10.1007/s10980-019-00769-z>
- Kopačková-Strnadová, V., Koucká, L., Jelének, J., Lhotáková, Z., & Oulehle, F. (2021). Canopy Top, Height and Photosynthetic Pigment Estimation Using Parrot Sequoia Multispectral Imagery and the Unmanned Aerial Vehicle (UAV). *Remote Sensing*, 13(4), 705. <https://doi.org/10.3390/rs13040705>
- Leo, M., Oberhuber, W., Schuster, R., Grams, T. E. E., Matyssek, R., & Wieser, G. (2014). Evaluating the effect of plant water availability on inner alpine coniferous trees based on sap flow measurements. *European Journal of Forest Research*, 133(4), 691–698. <https://doi.org/10.1007/s10342-013-0697-y>
- Loya-Rebollar, E., Sáenz-Romero, C., Lindig-Cisneros, R. A., Lobit, P., Villegas-Moreno, J. A., & Sánchez-Vargas, N. M. (2013). Clinal variation in *Pinus hartwegii* populations and its application for adaptation to climate change. *Silvae Genetica*, 62(1–6), 86–95. <https://doi.org/10.1515/sg-2013-0011>
- Lu, H., Fan, T., Ghimire, P., & Deng, L. (2020). Experimental Evaluation and Consistency Comparison of UAV Multispectral Minisensors. *Remote Sensing*, 12(16). <https://doi.org/10.3390/rs12162542>

- Malhi, Y., Franklin, J., Seddon, N., Solan, M., Turner, M. G., Field, C. B., & Knowlton, N. (2020). Climate change and ecosystems: threats, opportunities and solutions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 375(1794), 20190104. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0104>
- Manrique, O. B., Díaz Concepción, G., & Codrington Smith, I. C. (2020). Construction of pluviometers with recyclable materials for the mensuration of the pluvial precipitation. *Universidad & Ciencia*, 9(1), 96–110. <https://revistas.unica.cu/index.php/uciencia/article/view/1504>
- Manzanilla-Quñones, U., Aguirre-Calderón, Ó. A., Jiménez-Pérez, J., Treviño-Garza, E. J., & Yeren-Yamallel, J. I. (2019). Distribución actual y futura del bosque subalpino de *Pinus hartwegii* Lindl en el Eje Neovolcánico Transversal. *Madera y Bosques*, 25(2). <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2521804>
- Martin-StPaul, N., Delzon, S., & Cochard, H. (2017). Plant resistance to drought depends on timely stomatal closure. *Ecology Letters*, 20(11), 1437–1447. <https://doi.org/10.1111/ele.12851>
- Matías, L., Zamora, R., & Castro, J. (2012). Sporadic rainy events are more critical than increasing of drought intensity for woody species recruitment in a Mediterranean community. *Oecologia*, 169(3), 833–844. <https://doi.org/10.1007/s00442-011-2234-3>
- Mátyás, C. (2010). Forecasts needed for retreating forests. *Nature*, 464(7293), 1271–1271. <https://doi.org/10.1038/4641271a>
- Mátyás, C., Berki, I., Bidló, A., Csóka, G., Czimber, K., Führer, E., Gálos, B., Gribovszki, Z., Illés, G., Hirka, A., & Somogyi, Z. (2018). Sustainability of Forest Cover under Climate Change on the Temperate-Continental Xeric Limits. *Forests*, 9(8), 489. <https://doi.org/10.3390/f9080489>
- Mátyás, C., BERKI, I., Czúcz, B., Gálos, B., Móricz, N., & Rasztoivits, E. (2010). Future of Beech in Southeast Europe from the Perspective of Evolutionary Ecology. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, 6, 91–110.
- McDowell, N. G., Allen, C. D., Anderson-Teixeira, K., Aukema, B. H., Bond-Lamberty, B., Chini, L., Clark, J. S., Dietze, M., Grossiord, C., Hanbury-Brown, A., Hurtt, G. C., Jackson, R. B., Johnson, D. J., Kueppers, L., Lichstein, J. W., Ogle, K., Poulter, B., Pugh, T. A. M., Seidl, R., ... Xu, C. (2020). Pervasive shifts in forest dynamics in a changing world. *Science*, 368(6494), eaaz9463. <https://doi.org/10.1126/science.aaz9463>
- McDowell, N. G., Sapes, G., Pivovarov, A., Adams, H. D., Allen, C. D., Anderegg, W. R. L., Arend, M., Breshears, D. D., Brodribb, T., Choat, B., Cochard, H., De Cáceres, M., De Kauwe, M. G., Grossiord, C., Hammond, W. M., Hartmann, H., Hoch, G., Kahmen, A., Klein, T., ... Xu, C. (2022). Mechanisms of woody-plant mortality under rising drought, CO₂ and vapour pressure deficit. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(5), 294–308. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00272-1>
- Mejía Canales, A., Franco-Maass, S., Endara Agramont, A. R., & Ávila Akerberg, V. (2018). Caracterización del sotobosque en bosques densos de pino y oyamel en el Nevado de Toluca, México. *Madera y Bosques*, 24(3). <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2431656>
- Meng, P., Wang, H., Qin, S., Li, X., Song, Z., Wang, Y., Yang, Y., & Gao, J. (2022). Health assessment of plantations based on LiDAR canopy spatial structure parameters. *International Journal of Digital Earth*, 15(1), 712–729. <https://doi.org/10.1080/17538947.2022.2059114>

- Millar, C. I., & Stephenson, N. L. (2015). Temperate forest health in an era of emerging megadisturbance. *Science*, 349(6250), 823–826. <https://doi.org/10.1126/science.aaa9933>
- Minařík, R., & Langhammer, J. (2016). USE OF A MULTISPECTRAL UAV PHOTOGRAMMETRY FOR DETECTION AND TRACKING OF FOREST DISTURBANCE DYNAMICS. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLI-B8, 711–718. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B8-711-2016>
- Miraki, M., Sohrabi, H., Fatehi, P., & Kneubuehler, M. (2021). Individual tree crown delineation from high-resolution UAV images in broadleaf forest. *Ecological Informatics*, 61, 101207. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2020.101207>
- Mohan, M., Leite, R. V., Broadbent, E. N., Wan Mohd Jaafar, W. S., Srinivasan, S., Bajaj, S., Dalla Corte, A. P., do Amaral, C. H., Gopan, G., Saad, S. N. M., Muhmad Kamarulzaman, A. M., Prata, G. A., Llewelyn, E., Johnson, D. J., Doaemo, W., Bohlman, S., Almeyda Zambrano, A. M., & Cardil, A. (2021). Individual tree detection using UAV-lidar and UAV-SfM data: A tutorial for beginners. *Open Geosciences*, 13(1), 1028–1039. <https://doi.org/doi:10.1515/geo-2020-0290>
- Paneque-Gálvez, J., McCall, M., Napoletano, B., Wich, S., & Koh, L. (2014). Small Drones for Community-Based Forest Monitoring: An Assessment of Their Feasibility and Potential in Tropical Areas. *Forests*, 5(6), 1481–1507. <https://doi.org/10.3390/f5061481>
- Peng, H., Jia, Y., Zhan, C., & Xu, W. (2020). Topographic controls on ecosystem evapotranspiration and net primary productivity under climate warming in the Taihang Mountains, China. *Journal of Hydrology*, 581, 124394. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124394>
- Pérez-Suárez, M., Ramírez-Albores, J. E., Vargas-Hernández, J. J., & Alfaro-Ramírez, F. U. (2022). A review of the knowledge of Hartweg's Pine (*Pinus hartwegii* Lindl.): current situation and the need for improved future projections. *Trees*, 36(1), 25–37. <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02221-9>
- Randolph, K. C., & Thompson, M. T. (2010). Descriptive statistics of tree crown condition in the United States Interior West. <https://doi.org/10.2737/SRS-GTR-127>
- Rehfeldt, G. E., Ferguson, D. E., & Crookston, N. L. (2009). Aspen, climate, and sudden decline in western USA. *Forest Ecology and Management*, 258(11), 2353–2364. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.06.005>
- Rendón-Salinas, E., Alonso, A., García-Serrano, E., Valera-Bermejo, A., & Quesada, M. (2023). The monarch butterfly in Mexico: a conservation model. *Current Opinion in Insect Science*, 60, 101112. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2023.101112>
- Ricker, M., Gutiérrez-García, G., & Daly, D. C. (2007). Modeling long-term tree growth curves in response to warming climate: test cases from a subtropical mountain forest and a tropical rainforest in Mexico. *Canadian Journal of Forest Research*, 37(5), 977–989. <https://doi.org/10.1139/X06-304>
- Ripple, W. J., Wolf, C., Newsome, T. M., Barnard, P., & Moomaw, W. R. (2020). World Scientists' Warning of a Climate Emergency. *BioScience*, 70(1), 8–12. <https://doi.org/10.1093/biosci/biz088>
- Rowland, L., da Costa, A. C. L., Galbraith, D. R., Oliveira, R. S., Binks, O. J., Oliveira, A. A. R., Pullen, A. M., Doughty, C. E., Metcalfe, D. B., Vasconcelos, S. S., Ferreira, L. V., Malhi, Y., Grace, J., Mencuccini, M., & Meir, P. (2015). Death from drought in tropical forests is triggered by hydraulics not carbon starvation. *Nature*, 528(7580), 119–122. <https://doi.org/10.1038/nature15539>

- Rullan-Silva, C. D., Olthoff, A. E., Delgado de la Mata, J. A., & Pajares-Alonso, J. A. (2013). Remote Monitoring of Forest Insect Defoliation -A Review-. *Forest Systems*, 22(3), 377. <https://doi.org/10.5424/fs/2013223-04417>
- Sáenz-Romero, C. (2024). Arriving at a tipping point for worldwide forest decline due to accelerating climatic change. *The Forestry Chronicle*, 100(1), 5–7. <https://doi.org/10.5558/tfc2024-003>
- Sáenz-Romero, C., Cambrón-Sandoval, V. H., Hammond, W., Méndez-González, J., Luna-Soria, H., Macías-Sámamo, J. E., Gómez-Romero, M., Trejo-Ramírez, O., Allen, C. D., Gómez-Pineda, E., & del-Val, E. (2023). Abundance of *Dendroctonus frontalis* and *D. mexicanus* (Coleoptera: Scolytinae) along altitudinal transects in Mexico: Implications of climatic change for forest conservation. *PLOS ONE*, 18(7), e0288067. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0288067>
- Sáenz-Romero, C., Mendoza-Maya, E., Gómez-Pineda, E., Blanco-García, A., Endara-Agramont, A. R., Lindig-Cisneros, R., López-Upton, J., Trejo-Ramírez, O., Wehenkel, C., Cibrián-Tovar, D., Flores-López, C., Plascencia-González, A., & Vargas-Hernández, J. J. (2020). Recent evidence of Mexican temperate forest decline and the need for ex situ conservation, assisted migration, and translocation of species ensembles as adaptive management to face projected climatic change impacts in a megadiverse country. *Canadian Journal of Forest Research*, 50(9), 843–854. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0329>
- Sáenz-Romero, C., Osuna-Vallejo, V., Herrejón-Calderón, P., Pérez-Cruz, L. A., Joaquín-Juan, M. G., Cruzado-Vargas, A. L., O'Neill, G. A., Zacarías-Correa, A. G., Manzanilla-Quijada, G. E., Lindig-Cisneros, R., Blanco-García, A., Endara-Agramont, A. R., & Lopez-Toledo, L. (2024). Establishing monarch butterfly overwintering sites for future climates: *Abies religiosa* upper altitudinal limit expansion by assisted migration. *Frontiers in Forests and Global Change*, 7. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2024.1440517>
- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Crookston, N. L., Duval, P., St-Amant, R., Beaulieu, J., & Richardson, B. A. (2010). Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for Mexico and their use in understanding climate-change impacts on the vegetation. *Climatic Change*, 102(3–4), 595–623. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9753-5>
- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Duval, P., & Lindig-Cisneros, R. A. (2012). *Abies religiosa* habitat prediction in climatic change scenarios and implications for monarch butterfly conservation in Mexico. *Forest Ecology and Management*, 275, 98–106. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.03.004>
- Sagan, V., Maimaitijiang, M., Sidike, P., Eblimit, K., Peterson, K., Hartling, S., Esposito, F., Khanal, K., Newcomb, M., Pauli, D., Ward, R., Fritsch, F., Shakoar, N., & Mockler, T. (2019). UAV-Based High Resolution Thermal Imaging for Vegetation Monitoring, and Plant Phenotyping Using ICI 8640 P, FLIR Vue Pro R 640, and thermoMap Cameras. *Remote Sensing*, 11(3), 330. <https://doi.org/10.3390/rs11030330>
- Sánchez González, A., López Mata, L., & Granados Sánchez, D. (2012). Semejanza florística entre los bosques de *Abies religiosa* (H.B.K.) Cham. & Schltdl. de la Faja Volcánica Transmexicana. *Investigaciones Geográficas*, 56, 62. <https://doi.org/10.14350/rig.30097>
- Seidl, R., Thom, D., Kautz, M., Martin-Benito, D., Peltoniemi, M., Vacchiano, G., Wild, J., Ascoli, D., Petr, M., Honkaniemi, J., Lexer, M. J., Trotsiuk, V., Mairota, P., Svoboda, M., Fabrika, M., Nagel, T. A., & Reyer, C. P. O. (2017). Forest disturbances under climate change. *Nature Climate Change*, 7(6), 395–402. <https://doi.org/10.1038/nclimate3303>

- Silva, C. A., Hudak, A. T., Vierling, L. A., Valbuena, R., Cardil, A., Mohan, M., de Almeida, D. R. A., Broadbent, E. N., Almeyda Zambrano, A. M., Wilkinson, B., Sharma, A., Drake, J. B., Medley, P. B., Vogel, J. G., Prata, G. A., Atkins, J. W., Hamamura, C., Johnson, D. J., & Klauber, C. (2022). Treetop: A Shiny-based application and R package for extracting forest information from LiDAR data for ecologists and conservationists. *Methods in Ecology and Evolution*, 13(6), 1164–1176. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13830>
- Şimonca, V., Oroian, I., Chira, D., & Taut, I. (2017). Methods for Quantification of the Decline Phenomenon and Determination of the Vulnerability Degree for the Oak Stands in Northwestern Transylvania, Romania. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 45(2), 623–631. <https://doi.org/10.15835/nbha45210839>
- Stojanović, D. B., Kržič, A., Matović, B., Orlović, S., Duputie, A., Djurdjević, V., Galić, Z., & Stojnić, S. (2013). Prediction of the European beech (*Fagus sylvatica* L.) xeric limit using a regional climate model: An example from southeast Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 176, 94–103. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.03.009>
- Swain, D. L., Prein, A. F., Abatzoglou, J. T., Albano, C. M., Brunner, M., Diffenbaugh, N. S., Singh, D., Skinner, C. B., & Touma, D. (2025). Hydroclimate volatility on a warming Earth. *Nature Reviews Earth & Environment*, 6(1), 35–50. <https://doi.org/10.1038/s43017-024-00624-z>
- Syettiawan, A., Gularso, H., Kusnadi, G. I., & Pramudita, G. N. (2020). Precise topographic mapping using direct georeferencing in UAV. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 500, 12029. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/500/1/012029>
- Tapia-Vázquez, I., Sánchez-Cruz, R., Arroyo-Domínguez, M., Lira-Ruan, V., Sánchez-Reyes, A., del Rayo Sánchez-Carbente, M., Padilla-Chacón, D., Batista-García, R. A., & Folch-Mallol, J. L. (2020). Isolation and characterization of psychrophilic and psychrotolerant plant-growth promoting microorganisms from a high-altitude volcano crater in Mexico. *Microbiological Research*, 232, 126394. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2019.126394>
- Tejeda-Landero, V. M., Sánchez-Velásquez, L. R., Viveros-Viveros, H., Aparicio-Rentería, A., & Flores-Peredo, R. (2019). Seed bank formation and removal of *Pinus hartwegii* (Pinaceae) seeds along an altitudinal gradient in the Cofre de Perote National Park, Veracruz, Mexico. *Botanical Sciences*, 97(4), 623–629. <https://doi.org/10.17129/botsci.2204>
- Torresan, C., Berton, A., Carotenuto, F., Di Gennaro, S. F., Gioli, B., Matese, A., Miglietta, F., Vagnoli, C., Zaldei, A., & Wallace, L. (2017). Forestry applications of UAVs in Europe: a review. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8–10), 2427–2447. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1252477>
- Ulrich, D. E. M., & Grossiord, C. (2023). Faster drought recovery in anisohydric beech compared with isohydric spruce. *Tree Physiology*, 43(4), 517–521. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpad009>
- Villers-Ruiz, L., & Castañeda-Aguado, D. (2013). Species and plant community reorganization in the Trans-Mexican Volcanic Belt under climate change conditions. *Journal of Mountain Science*, 10(6), 923–931. <https://doi.org/10.1007/s11629-013-2719-0>
- Viveros-Viveros, H., Sáenz-Romero, C., López-Upton, J., & Vargas-Hernández, J. J. (2007). Growth and frost damage variation among *Pinus pseudostrobus*, *P. montezumae* and *P. hartwegii* tested in Michoacán, México. *Forest Ecology and Management*, 253(1–3), 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.07.005>

- Zarco-Tejada, P. J., Hornero, A., Hernández-Clemente, R., & Beck, P. S. A. (2018). Understanding the temporal dimension of the red-edge spectral region for forest decline detection using high-resolution hyperspectral and Sentinel-2a imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 137, 134–148. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.01.017>
- Zepeda Gómez, C., Estrada Zuñiga, M. E., Burrola Aguilar, C., Manjarrez, J., & White Olascoaga, L. (2023). Diversidad, estructura y regeneración del bosque de *Abies religiosa* en una zona de hibernación de la mariposa monarca del centro de México. *Madera y Bosques*, 29(2), e2922488. <https://doi.org/10.21829/myb.2023.2922488>

José Luis Gallardo Salazar

Evaluación de la declinación forestal en bosques templados relacionada al cambio climático mediante

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:439003938

Fecha de entrega

13 mar 2025, 7:15 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

13 mar 2025, 7:29 a.m. GMT-6

Nombre de archivo

Evaluación de la declinación forestal en bosques templados relacionada al cambio climático med....pdf

Tamaño de archivo

5.2 MB

72 Páginas

23,004 Palabras

128,587 Caracteres

33% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Fuentes principales

- 32%  Fuentes de Internet
- 25%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Programa Institucional de Doctorado en Ciencias Biológicas Opción: Ciencias Agropecuarias, Forestales y Ambientales	
Título del trabajo	"Evaluación de la declinación forestal en bosques templados relacionada al cambio climático mediante drones (VANTs)"	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	José Luis Gallardo Salazar	2251351x@umich.mx
Director	Dr. Cuauhtémoc Sáenz Romero	cuauhtemoc.saenz@umich.mx
Codirector	Dr. Roberto Lindig Cisneros	rlindig@iies.unam.mx
Coordinador del programa	Dr. Omar Chassin Noria	doc.ciencias.biologicas@umich.mx

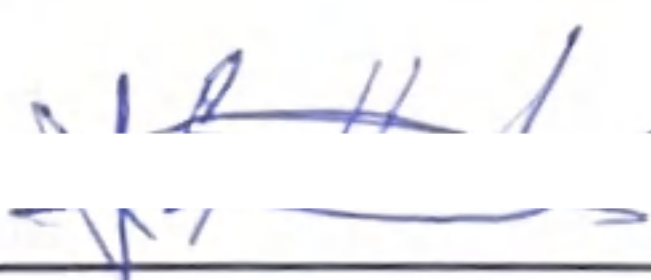
Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	NO	

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	NO	
Traducción a otra lengua	NO	
Revisión y corrección de estilo	NO	
Análisis de datos	NO	
Búsqueda y organización de información	NO	
Formateo de las referencias bibliográficas	NO	
Generación de contenido multimedia	NO	
Otro	NO	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Jose Luis Gallardo S.I. 
Lugar y fecha	Morelia, Michoacán 10-marzo-2025