Novasinergia
Revista digital de ciencia, ingeniería y tecnología

Unach
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO

Artículo de Investigación

Balance hídrico y sequía en *Pinus hartwegii* Lindl.: evaluación ecohidrológica mediante datos satelitales en ecosistemas forestales de alta montaña de México

Water balance and drought in Pinus hartwegii Lindl: ecohydrological assessment using satellite data in high mountain forest ecosystems of Mexico

Moisés Arreguín Sámano[1,2], Eduardo Patricio Salazar Castañeda[3], Miguel Ángel Guallpa Calva[3], Alfredo Bonini Neto[4], Lorena Molina-Valdiviezo[5], Mónica Virginia Tapia Zúñiga[6], Salvador Sampayo Maldonado[7], Ángel Leyva Ovalle[8]

[1]*Instituto Tecnológico de México, Aguascalientes, México, 20256;*

[2]*Universidad Estatal de Bolívar, Bolívar, Ecuador, 020103;*

[3]*Carrera de Ingeniería Forestal, Facultad de Recursos Naturales, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 060155;*

[4]*School of Sciences and Engineering, São Paulo State University (UNESP), Tupã, Brasil, 17602-496;*

[5]*Carrera de Ingeniería en Tecnologías de la Información, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Chimborazo, Riobamba, Ecuador,060110;*

[6]*Carrera de Ingeniería Forestal, Facultad de Ciencias Naturales y de la Agricultura, Universidad Estatal del Sur de Manabí, Jipijapa, Ecuador, 130901;*

[7]*Unidad de Biotecnología y Prototipos, Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México, Estado de México, México. 54090;*

[8]*Carrera de Ingeniería Forestal, División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo estado de México, México, 56230;*

marreguin@ueb.edu.ec; eduardo.salazar@espoch.edu.ec; miguel.guallpa@espoch.edu.ec; alfredo.bonini@unesp.br; lmolina@unach.edu.ec; monica.tapia@unesum.edu.ec; ssampayom@hotmail.com

*Correspondencia: aleyvao@chapingo.mx

Citación: Arreguín, M.; Salazar, E.; Guallpa, M.; Bonini, A.; Molina, L.; Tapia, M.; Sampayo, S. & Leyva, A., (2026). Balance hídrico y sequía en Pinus hartwegii Lindl.: evaluación ecohidrológica mediante datos satelitales en ecosistemas forestales de alta montaña de México. *Novasinergia*. *9*(2). 96-127.

https://doi.org/10.37135/ns.01.18.06

Recibido: 02 enero 2026
Aceptado: 21 mayo 2026
Publicado: 08 julio 2026

Novasinergia
ISSN: 2631-2654

Copyright: 2026 derechos otorgados por los autores a Novasinergia.
Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de una licencia de Creative Commons Attribution (CC BY NC). (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

Resumen: El objetivo fue analizar asociaciones exploratorias de la influencia antropogénica en sistemas hídricos subterráneos mediante la cuantificación de patrones de equilibrio hídrico y de sequía en polígonos envolventes rectangulares (bounding boxes) que contienen árboles de *Pinus hartwegii* Lindl. en bases INFyS-SiBiFor de estados de México y Puebla, se calculó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) usando datos satelitales de Landsat 8 y GEE para evaluar salud y densidad de vegetación, se determinó el grosor equivalente promedio del agua subterránea usando GRACE, se ajustaron modelos de regresión lineal para predecir volúmenes maderables usando ecuaciones alométricas, valores de NDVI y GRACE, como variables independientes y, según condiciones ambientales establecidas por bases climáticas de CHIRPS en GEE, se evaluaron estos modelos para estimar la relación del incremento volumétrico con infiltración en áreas de estudio. Los datos de GRACE señalan rangos de agua subterránea de -0.78 a 0.57. Valores de NDVI cercanos a 0.80 indican vegetación densa y saludable; 0.0 áreas impactadas por actividades humanas y superficies sin vegetación. Polígonos envolventes rectangulares (bounding boxes): Puebla 1 y México 6 son grupo A; México 2 y México 4 son grupo B; poblaciones a 3300 m de altitud, con sequías más intensas y cálidas, y reducción hasta 70% del área debido al aumento de la temperatura por el cambio climático; Puebla 4 y México 3 se agrupan, con niveles más altos de agua en el subsuelo; Puebla 4 indica menor densidad de árboles respecto a Puebla 1, por factores ambientales o humanos. Las actividades humanas prolongaron la duración de las sequías, aumentaron su intensidad e incertidumbre y disminuyeron significativamente la escorrentía en la cuenca del río Xilin.

Palabras clave: Cambio climático, Ecuaciones alométricas, Evaluación ecohídrica, NDVI, *Pinus hartwegii*.

Abstract: *The objective was to evaluate the anthropogenic influence on underground water systems by quantifying water balance and drought patterns in georeferenced polygons containing Pinus hartwegii Lindl. trees. Using INFyS-SiBiFor databases from the states of Mexico and Puebla, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was calculated using Landsat 8 and GEE satellite data to assess vegetation health and density. The average equivalent thickness of groundwater was determined using GRACE. Linear regression models were fitted to predict timber volumes using allometric equations, NDVI, and GRACE as independent variables. Based on environmental conditions established by CHIRPS climate databases in GEE, these models were evaluated to estimate the relationship between volumetric increment and infiltration in the study areas. GRACE data indicate groundwater ranges of -0.78 to 0.57. NDVI values close to 0.80 indicate dense, healthy vegetation, 0.0 indicates areas impacted by human activities, and negative values indicate areas without vegetation. The amorphous polygons Puebla 1 and Mexico 6 belong to subgroup A, while Mexico 2 and Mexico 4 belong to subgroup B. These areas are located at 3300 m and experience more intense, warmer droughts, with up to a 70% reduction in area due to increased temperatures from climate change. Puebla 4 and Mexico 3 are grouped, with higher groundwater levels. Puebla 4 shows lower tree density than Puebla 1, due to environmental or human factors. Human activities have prolonged droughts, increased their intensity and uncertainty, and significantly reduced runoff in the Xilin River basin.*

Keywords*: Climate change, Allometric equations, Ecohydrological assessment, NDVI, Pinus hartwegii.*

1. Introducción

El aumento de la población y la escasez de recursos hídricos, sumados al impacto del cambio climático, provocarán que cada vez más personas sean víctimas de desastres naturales como inundaciones o sequías [1]. Las actividades humanas generan procesos internos que alteran el clima global, que se manifiesta en cambios de temperatura y en el deshielo. Estas variaciones modifican drásticamente el ciclo del agua, desde el caudal de los ríos (caudales) hasta la forma en que el agua se evapora y regresa a la tierra como lluvia [2]. *Pinus hartwegii* Lindl. es un árbol freatófito siempre verde, según [3], que llega a una altura de 20-30 m, con una corona redondeada y amplia; tiene un rango de 800–3000 mm, con el rango inferior en los límites superiores [4], [5], con lluvias concentradas en el verano [6], debido a que esta especie requiere condiciones ambientales muy específicas, funciona como un termómetro biológico del cambio climático. Actualmente, para sobrevivir al calentamiento global, se prevé que la especie se desplace hacia zonas más elevadas de las montañas en busca del clima fresco que necesita para crecer; sin embargo, la información climática es escasa, lo que evidencia la necesidad de más estudios al respecto. Es decir, a pesar de la importancia ecológica de *Pinus hartwegii* Lindl. y la provisión de varios servicios ecosistémicos, como la infiltración y el suministro de agua [7]. Entre los años 2000 y 2021, la literatura científica experimentó un crecimiento notable sobre esta especie, en que el 77% de las publicaciones se concentró en el manejo de la especie y en su vínculo con el cambio climático. Por el contrario, temáticas como el impacto antropogénico, la hidrología, la fenología y la evolución recibieron menor atención. Geográficamente, la investigación se ha centrado en puntos específicos del Eje Volcánico Transmexicano, tales como los parques nacionales Izta-Popo, Cofre de Perote y el Nevado de Toluca. Esta concentración sugiere que el conocimiento actual proviene de áreas geográficas muy limitadas o de estudios recurrentes [7]. Los modelos hidrológicos resultan fundamentales para la gestión hídrica y la planeación forestal, pues facilitan la toma de decisiones estratégicas. Estas herramientas permiten profundizar en el conocimiento de la interacción entre las aguas superficiales y los acuíferos, analizando cómo su comportamiento se ve afectado por los cambios climáticos estacionales en zonas de alta vulnerabilidad [8]. Evaluar el estado sanitario de las masas forestales es fundamental para garantizar su sostenibilidad, especialmente ante las alteraciones en la temperatura y en los ciclos hídricos derivadas del cambio climático. En este contexto, la teledetección se ha convertido en un recurso esencial, empleando métricas como el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) y el EVI (Índice de Vegetación Mejorado) para monitorear con precisión el vigor y la salud del ecosistema [9]. Entonces, el estudio detallado de las características de las sequías provocadas por la intensificación de las acciones humanas y el cambio climático permitirá, según [10], contribuir a la planificación y gestión de los recursos hídricos, así como a la formulación de estrategias y medidas de mitigación y a la adaptación de la población y de los territorios [11]. El propósito central de este estudio consistió en analizar el impacto de las actividades humanas sobre los acuíferos, vinculando la dinámica del balance hídrico y los regímenes de sequía con la presencia de *Pinus hartwegii* Lindl. Se emplearon datos en proyección UTM Zona 14N (EPSG:32614), transformadas a WGS84 de polígonos envolventes rectangulares (bounding boxes) del SiBiFor correspondientes a los estados de México y Puebla, los datos de GRACE representaron variaciones en el almacenamiento total de agua terrestre (TWS),

que incluye agua subterránea, humedad del suelo, nieve y agua superficial, que permitió un análisis espacial detallado mediante datos satelitales de la respuesta forestal al estrés hídrico en ecosistemas forestales de alta montaña de México.

2. Metodología

2.1. Desarrollo de geometrías poligonales en Google Earth Engine (GEE)

Para delimitar con exactitud las zonas de estudio de *Pinus hartwegii* Lindl., se emplearon datos en proyección UTM Zona 14N (EPSG:32614), transformadas a WGS84 de polígonos envolventes rectangulares (bounding boxes) de las bases SiBiFor [12] correspondientes de forma exclusiva a los estados de Puebla y de México. Utilizando las librerías especializadas de la plataforma GEE (v1.7.3) [13], se depuró la información, descartando registros inconsistentes [14], posteriormente, las coordenadas se transformaron al formato de grados decimales para su procesamiento. La delimitación espacial se optimizó mediante la creación de polígonos calculados (función st_bbox de GEE v1.7.3), que permitió estructurar la visualización de los rodales para el análisis geoespacial correspondiente (Figura 1).

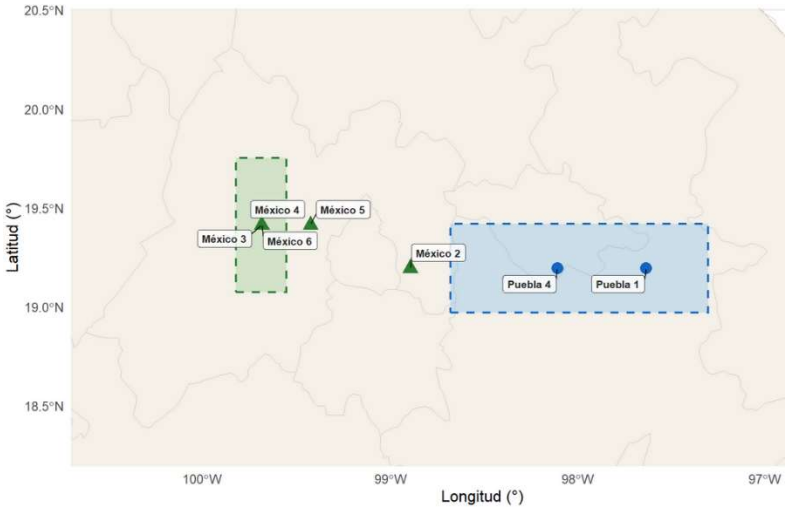


Figura 1. Ubicación de las regiones de muestreo de *Pinus hartwegii* Lindl. en los estados de Puebla (●) y México (▲). Los polígonos envolventes rectangulares (*bounding boxes*) delimitan las regiones de extracción de datos en GEE.

2.2. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

La evaluación del vigor y de la densidad fotosintética de las masas forestales de *Pinus hartwegii* Lindl. se realizó mediante el cálculo del NDVI en Google Earth Engine (GEE v1.7.3) a partir de datos de satélite de Landsat 8. El protocolo incluyó un filtrado por fechas y un control de la nubosidad inferior al 30%, aplicando la función clip para ajustar las imágenes a los polígonos de alta montaña. El índice se obtuvo aplicando la fórmula:

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$$

Donde, se emplearon las bandas 5 (NIR) y 4 (Red). Los resultados permitieron diagnosticar el estado de salud del dosel, evaluar la densidad vegetal en áreas vulnerables al cambio

climático y a factores antropogénicos, y, finalmente, exportar los datos en formato GeoTIFF para su procesamiento estadístico [13], [15].

2.3. Grosor equivalente promedio del agua subterránea usando GRACE

Para cuantificar las reservas hídricas subterráneas vinculadas a los ecosistemas de *Pinus hartwegii* Lind., se procesaron datos de la misión GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) en GEE (versión 1.7.3). El procedimiento consistió en el filtrado temporal y geográfico de la colección oficial de datos, empleando la variable `lwe_thickness_csr` para detectar cambios en el almacenamiento hídrico del subsuelo. Los resultados se plasmaron cartográficamente mediante una paleta cromática configurada para el visor de la `FeatureCollection`, que generó un enlace técnico para descargar los espesores hídricos equivalentes en formato GeoTIFF [13], [15].

2.4. Ajuste de modelos de regresión lineal que predicen los volúmenes maderables

La estimación del volumen e incremento maderable para esta especie freatófita se realizó mediante el ajuste de modelos de regresión lineal que integran parámetros dendrométricos excurrentes, ecuaciones alométricas teórico (trozas), Newton y entidades federativas, junto con los valores de NDVI y GRACE. Como factores predictivos, se incorporaron variables ambientales del periodo 2005-2014 obtenidas de capas de CHIRPS (precipitación) y MODIS (evapotranspiración) procesadas en GEE, junto con parámetros dendrométricos por entidad federativa y variaciones gravitacionales. El análisis de significancia estadística permitió determinar la influencia de la infiltración hídrica en el volumen del arbolado, considerando su rol como termómetro biológico ante el calentamiento global y diferenciándose de estudios que solo consideran la temperatura máxima [13], [15].

2.5. Balance hídrico mensual por año

Para el periodo analizado de una década (2005-2014), se calculó el equilibrio hídrico mensual mediante la sustracción técnica entre la precipitación (P) y la evapotranspiración (ET): P - ET. La representación cartográfica empleó una escala cromática de -50 mm a 200 mm para identificar déficits y superávits hídricos en los polígonos de estudio. Se desarrollaron gráficos de barras para monitorear las tendencias anuales y mensuales de la dinámica hídrica, y la capa resultante del promedio fue exportada mediante la función `Export.image.toDrive`(GEE v1.7.3) en formato GeoTIFF a Google Drive para el análisis de la sequía hidrológica y de su impacto en la especie forestal analizada [13], [15].

2.6. Índice de vegetación mejorado (EVI) mensual

Se realizó la cuantificación mensual del Índice de Vegetación Mejorado (EVI) mediante el conjunto de datos MOD13A1 y del Índice de Estrés Hídrico (MSI) relacionando las bandas de infrarrojo de onda corta (SWIR) e infrarrojo cercano (NIR) de los sensores MODIS bajo la fórmula:

$$MSI = SWIR / NIR.$$

En este caso se procesaron parámetros mensuales para interpretar el vigor forestal sistémico y detectar variaciones en la salud del bosque de pino. El análisis de estos índices permite determinar el grado de estrés hídrico en la cobertura vegetal, en el que los valores elevados de MSI son proporcionales a dicho estrés y reflejan el impacto de la actividad humana y del cambio climático. Las imágenes resultantes se exportaron a la nube para su análisis estadístico [13], [15].

2.7. Creación y evaluación de modelos

El proceso de modelado avanzado se fundamentó en la extracción de datos a partir de los polígonos envolventes rectangulares (*bounding boxes*) de *Pinus hartwegii Lind.* mediante la función `raster::extract`()(GEE v1.7.3), integrando capas TIFF de balance hídrico, precipitación y los índices espectrales EVI y MSI. La metodología del modelado dividió la información en un 70% para entrenamiento y un 30 % para prueba. Se emplearon herramientas de programación (dplyr, GEE v1.7.3) para depurar registros incompletos y se implementó el algoritmo (Lenguaje R v4.3.0) [16] para realizar una extrapolación XGBoost en que el volumen maderable comercial actuó como variable dependiente (endógena) frente a variables climáticas y de vigor vegetal (exógenas). La implementación comenzó con la fase de aprendizaje mediante el comando `xgb.train()`(Lenguaje R v4.3.0), seguida de proyecciones con la función `predict()`(Lenguaje R v4.3.0) para verificar la capacidad del modelo en datos nuevos. La precisión de las estimaciones se validó mediante la métrica del error cuadrático medio (MSE), contrastando los resultados proyectados con los valores reales observados en las entidades de México y de Puebla. Finalmente, se generó un esquema de la estructura lógica del algoritmo mediante `xgb.plot.tree`()(Lenguaje R v4.3.0), que proporcionó una visualización técnica de cómo el modelo procesa la relación entre el estrés hídrico y la productividad forestal de la especie [17]. Enseguida se describe la secuencia completa del procesamiento, distinguiendo las etapas realizadas en Google Earth Engine de las realizadas en R (Figura 2).

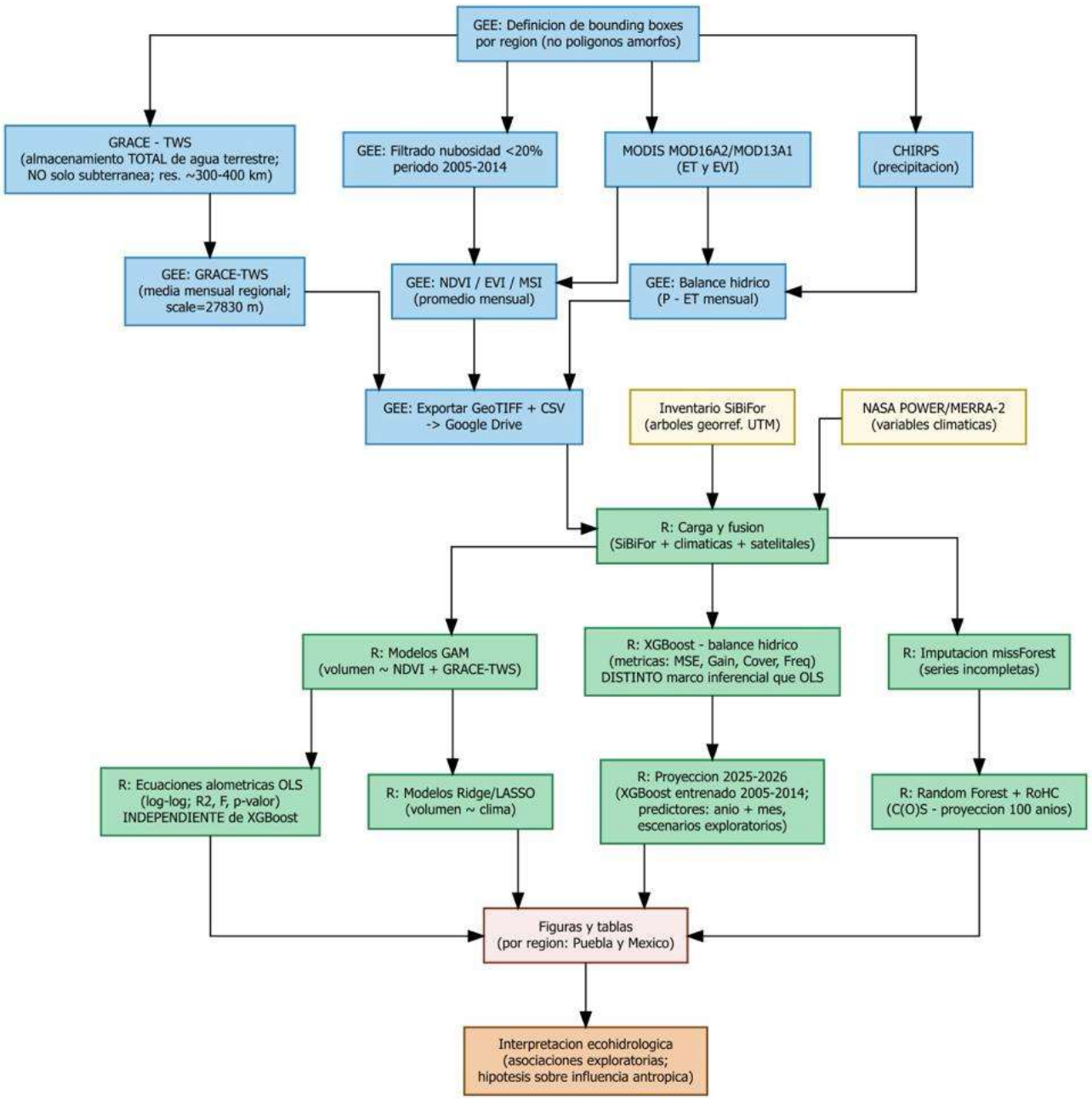


Figura 2. Diagrama de flujo metodológico con procesamiento en Google Earth Engine (azul) y procesamiento en R (verde).

3. Resultados

De acuerdo a la Tabla 1, los valores medianos NDVI y GRACE de los polígonos envolventes rectangulares (*bounding boxes*) puebla 1 (0.4438231 y 0.02376496) y mexico 6 (0.4260129 y 0.0140668) se podrían agrupar en A, mexico 2 que presenta patrones únicos en la distribución de árboles (0.558 y 0.014) y mexico 4 (0.5786600 y 0.0140668) se podrían agrupar en B pues, de acuerdo con [18], esto probablemente se atribuye debido a que las poblaciones de 3300 m de altitud o menores exhibieron condiciones de estrés más altas, una disminución en la actividad fotosintética, sequías cada vez más intensas y cálidas asociadas al límite xérico causando debilidad fisiológica en árboles, promoviendo daños por plagas y enfermedades, el eventual declive forestal y la reducción hasta en 70% del área de aptitud ambiental para *Pinus hartwegii* Lindl., como resultado del aumento de temperatura por

cambio climático, representados por valores más bajos de NDVI (error cuadrático medio (Std. Error): 0.1536 para Newton y 0.2242 para dendrométricos excurrentes o trozas).

Tabla 1. Resumen estadístico del índice de vegetación (NDVI) y del código de búsqueda de agua subterránea (GRACE) de *Pinus hartwegii* Lindl. por polígonos envolventes rectangulares (bounding boxes) y Google Earth Engine (GEE v1.7.3) por estado.

Concepto	**Estado**	**Polígonos envolventes rectangulares (*bounding boxes*)**	**Coordenadas**		**NDVI**	**GRACE**
			X	**Y**		
Min	Puebla	Puebla 1	-97.29898	18.96899	0.2822605	0.02376496
1er Cuartil			-97.29376	18.96899	0.3945997	0.02376496
Mediana			-97.29376	18.97495	0.4438231	0.02376496
3er Cuartil			-97.29898	18.97495	0.5030457	0.02376496
Max			-97.29898	18.96899	0.6328571	0.02376496
Min		Puebla 4	-98.67154	19.41125	0.4551274	0.01709776
1er Cuartil			-98.65078	19.41125	0.6550504	0.01709776
Mediana			-98.65078	19.41961	0.6954328	0.01709776
3er Cuartil			-98.67154	19.41961	0.7181615	0.01709776
Max			-98.67154	19.41125	0.7692392	0.01709776
Min		México 2	-99.40696	19.50719	-0.3089204	0.0140668
1er Cuartil			-99.33335	19.50719	0.4539997	0.0140668
Mediana			-99.33335	19.52718	0.5576222	0.0140668
3er Cuartil			-99.40696	19.52718	0.6203941	0.0140668
Max			-99.40696	19.50719	0.7485467	0.0140668
Min		México 3	-99.55017	19.60998	0.4598364	0.0140668
1er Cuartil			-99.54838	19.60998	0.6012394	0.0140668
Mediana			-99.54838	19.61917	0.6591494	0.0140668
3er Cuartil	Estado de México		-99.55017	19.61917	0.6891929	0.0140668
Max			-99.55017	19.60998	0.7475536	0.0140668
Min		México 4	-99.77687	19.74940	0.5005670	0.0140668
1er Cuartil			-99.77381	19.74940	0.5609691	0.0140668
Mediana			-99.77381	19.75206	0.5786600	0.0140668
3er Cuartil			-99.77687	19.75206	0.5928945	0.0140668
Max			-99.77687	19.74940	0.6309397	0.0140668
Min		Mexico 6	-99.81729	19.07215	-0.4414186	0.0140668
1er Cuartil			-99.71547	19.07215	0.3386888	0.0140668
Mediana			-99.71547	19.10871	0.4260129	0.0140668
3er Cuartil			-99.81729	19.10871	0.4777581	0.0140668
Max			-99.81729	19.07215	0.7739701	0.0140668

Según los valores medianos NDVI y GRACE de los polígonos envolventes rectangulares (*bounding boxes*) puebla 4 (0.6954328 y 0.01709776) y mexico 3 (0.6591494 y 0.0140668) se podrían agrupar en C, pues, según [18], los altos valores de NDVI en el follaje saludable

están asociados con la actividad fotosintética [100,101] debido al contraste en la baja reflectancia de la hoja en la banda roja que ocurre con el aumento de la absorción de clorofila, la alta reflexión infrarroja dentro de la capa de mesófilo esponjoso, pronosticar los efectos del cambio climático sobre toda la biomasa forestal aérea [19], el vigor, la dinámica de crecimiento [20] e indican áreas con una alta densidad de árboles y su distribución. Además, estos valores indican una relación positiva entre la densidad vegetal y las reservas de agua subterránea, pues las áreas con mayor cobertura vegetal tienden a mantener niveles más altos de agua subterránea, posiblemente debido a la infiltración facilitada por la vegetación y a una menor evaporación directa. Finalmente, el polígono envolvente rectangular (*bounding boxes*) puebla 4 presenta una menor densidad de árboles en comparación con puebla 1, quizás a factores ambientales o humanos.

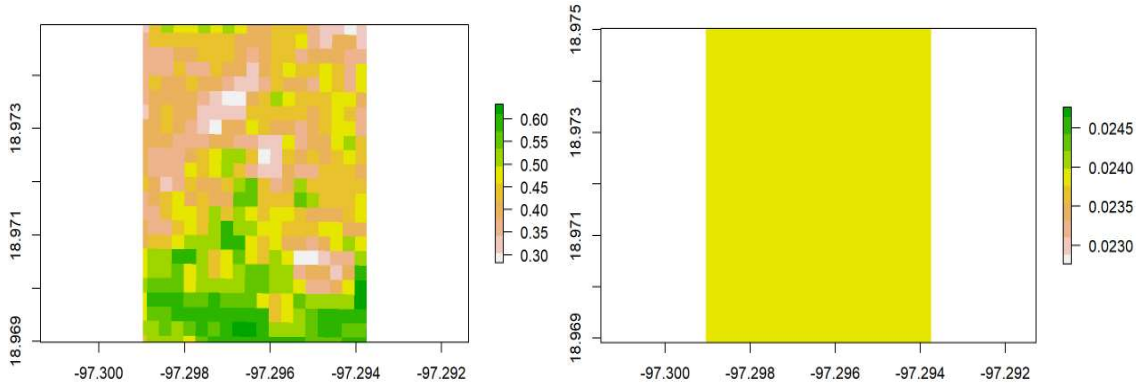


Figura 3. Índice de vegetación (NDVI) y código de búsqueda de agua subterránea (GRACE) de la poligonal amorfa Puebla 4 para *Pinus hartwegii* Lindl. por Google Earth Engine (GEE v1.7.3)

La Figura 3 ilustra la relación entre el vigor del follaje y las reservas hídricas en el polígono Puebla 4. Los altos valores de NDVI en esta zona se asocian con un follaje saludable y una alta densidad de arbolado, que sugiere que la vegetación densa facilita la infiltración hídrica en el subsuelo, minimiza la evaporación directa e indican áreas con una alta densidad de árboles y su distribución.

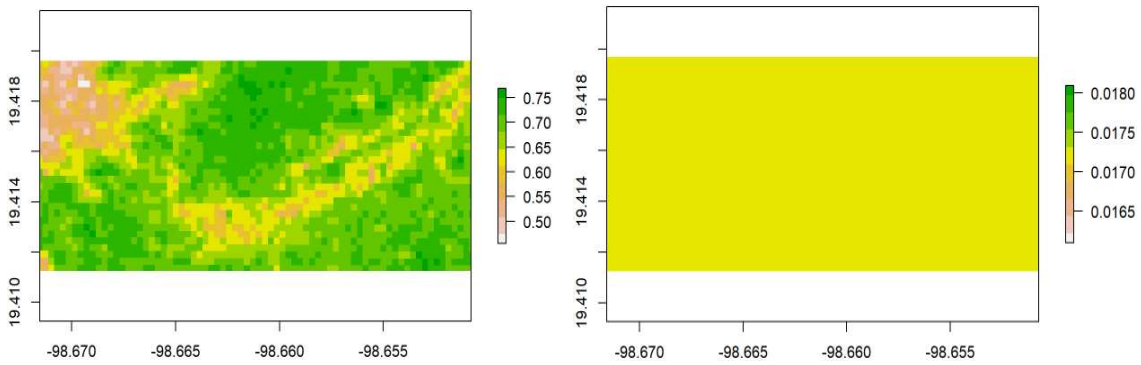


Figura 4. Índice de vegetación (NDVI) y código de búsqueda de agua subterránea (GRACE) de la poligonal amorfa Puebla 1 para *Pinus hartwegii* Lindl. por Google Earth Engine (GEE v1.7.3)

En contraste, esta Figura 4 muestra el NDVI y los datos de GRACE para el polígono Puebla 1. Con valores medianos de NDVI (0.4438231) y GRACE (0.02376496), esta área integra el grupo A, caracterizado por un menor vigor fotosintético. Su relevancia radica en monitorear

poblaciones a 3.300 m de altitud, que enfrentan un alto estrés hídrico y sequías intensas que podrían derivar en un declive forestal de hasta el 70% debido al cambio climático.

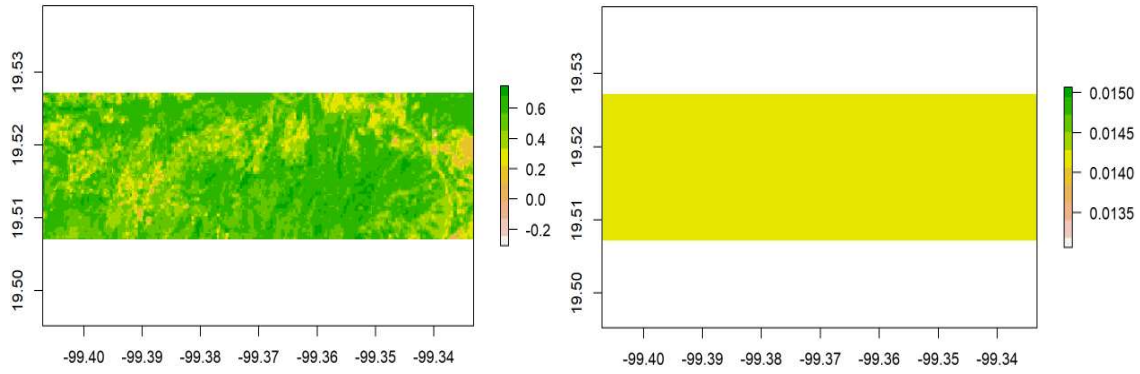


Figura 5. Índice de vegetación (NDVI) y código para la búsqueda de agua subterránea (GRACE) de poligonal amorfa Mexico 2 para *Pinus hartwegii* Lindl. por Google Earth Engine (GEE v1.7.3)

La Figura 5 presenta los datos de NDVI y GRACE para el polígono México 2. Con una mediana de NDVI de 0.558 y de 0.014 en GRACE, esta zona corresponde al grupo B y muestra patrones únicos en la distribución de los árboles, probablemente se atribuye debido a que las poblaciones de 3300 m de altitud o menores exhibieron condiciones de estrés más altas, una disminución en la actividad fotosintética, sequías cada vez más intensas y cálidas asociadas al límite xérico causando debilidad fisiológica en árboles, promoviendo daños por plagas y enfermedades, el eventual declive forestal y la reducción hasta en 70% del área de aptitud ambiental para *Pinus hartwegii* Lindl**.** [18].

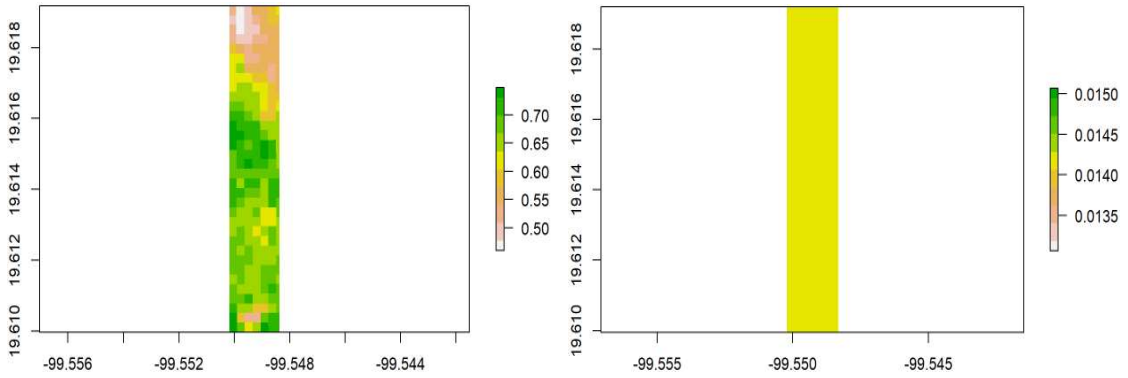


Figura 6. Índice de vegetación (NDVI) y código para la búsqueda de agua subterránea (GRACE) de poligonal amorfa Mexico 3 para *Pinus hartwegii* Lindl. por Google Earth Engine (GEE v1.7.3)

La Figura 6, muestra el NDVI y los datos de GRACE para el polígono México 3. Con una mediana de NDVI de 0.6591494 y de GRACE de 0.0140668, esta zona integra el grupo C y se destaca por su follaje saludable y su alta densidad de arbolado. La hidrología de los bosques y las relaciones agua-vegetación están íntimamente unidas. La hidrología de bosques se basa en el balance hídrico, que depende de la precipitación, la intercepción, la escorrentía directa y la evaporación [21]. Desde el punto de vista de los silvicultores, los temas más importantes asociados a la hidrología de los bosques son el efecto del raleo y de la tala rasa sobre el balance hidrológico. Las cuencas con superficies boscosas importantes suelen asociarse con una alta calidad de las aguas y una mayor estabilidad de la escorrentía superficial. En cambio, las cuencas deforestadas y degradadas se consideran

ambientalmente dañadas por prácticas no sustentables, debido a la erosión del suelo y a la baja calidad del agua [21].

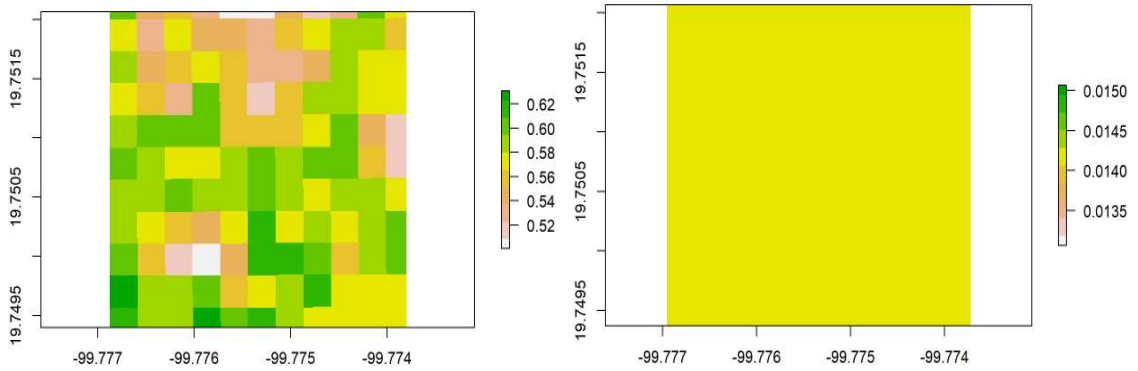


Figura 7. Índice de vegetación (NDVI) y código para la búsqueda de agua subterránea (GRACE) de poligonal amorfa Mexico 4 para *Pinus hartwegii* Lindl. por Google Earth Engine (GEE v1.7.3)

La Figura 7 muestra los datos de NDVI (mediana: 0.5786600) y GRACE (0.0140668) para el polígono México 4 de *Pinus hartwegii* Lindl. Esta zona pertenece al grupo B, probablemente se atribuye debido a que las poblaciones de 3300 m de altitud o menores exhibieron condiciones de estrés más altas, una disminución en la actividad fotosintética, sequías cada vez más intensas y cálidas asociadas al límite xérico causando debilidad fisiológica en árboles, promoviendo daños por plagas y enfermedades. Su importancia radica en monitorear la vulnerabilidad frente a sequías intensas y cálidas vinculadas al límite xérico, que podrían reducir hasta un 70% el área de aptitud ambiental de la especie.

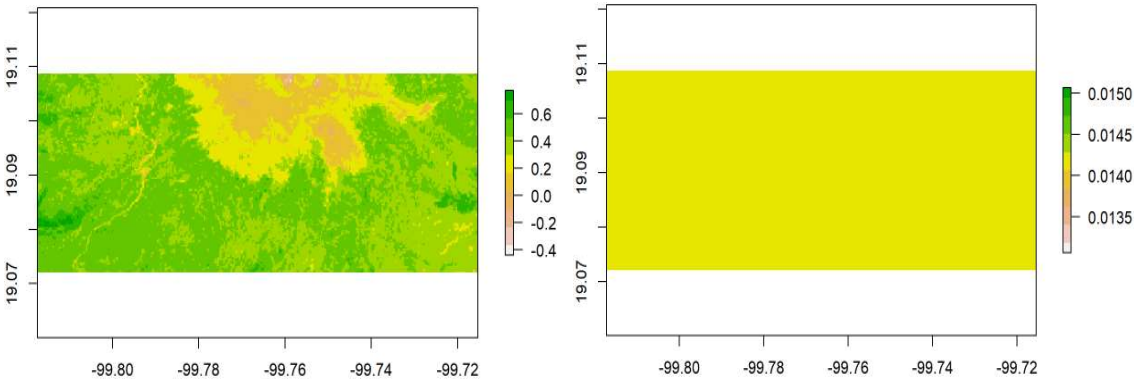


Figura 8. Índice de vegetación (NDVI) y código para la búsqueda de agua subterránea (GRACE) de poligonal amorfa Mexico 6 para *Pinus hartwegii* Lindl. por Google Earth Engine (GEE v1.7.3)

La Figura 8 detalla el NDVI y los datos de GRACE para el polígono México 6. Con una mediana de NDVI de 0.4260129 y de GRACE de 0.0140668, esta zona se integra en el grupo A. El uso del índice NDVI en áreas irregulares de *Pinus hartwegii* Lindl. permite monitorear su estado de salud y su densidad. Al contrastar datos NDVI de 0.8, indica bosques densos y valores cercanos a 0 o negativos, señala degradación o ausencia de vegetación, con la información satelital de GRACE (que registró variaciones en el nivel del agua subterránea entre -0.78 y 0.57 metros) es posible vincular el vigor del bosque con la disponibilidad hídrica, pues la evapotranspiración es el proceso dominante que contribuye al uso del agua y constituye el mecanismo por el cual los árboles interactúan directamente con el agua del suelo y subterránea para asegurar su desarrollo [22].

Tabla 2. Variables climáticas significativas estimadas mediante ecuaciones alométricas para *Pinus hartwegii* Lindl.

Concepto	Entidad federativa mexicana						
	Puebla			Estado de México			
	Puebla 1		Puebla 4	México 2		Mexico 6	
	Método para la dimensión volumétrica comercial						
	Newton	Teórico (trozas)	Newton	Newton	Teórico (trozas)	Newton	Teórico (trozas)
(Intercepto)	-3.309286e+02	-458.23080995	12.7704144559	-1.526892e+02	-344.56044976	-1.062313e+02	-1.706698e+02
Temperatura superficial de la Tierra (C) (TS)	-3.406161e-02	-0.04976730	-0.0099327166	-1.920280e-02	-0.03706368	-9.830140e-03	-1.189124e-02
Temperatura 2 metros (C) (T2M)	-2.146086e-02	-0.03337181	-0.0139429173	-2.833437e-02	-0.05560159	-1.108989e-02	-1.296006e-02
Cantidad de nubes en la atmósfera (CLOUD_AMT)	3.901375e-02	0.05408284	-0.0014815287	5.378143e-03	0.01258796	3.764906e-03	6.321329e-03
Irradiancia descendente de onda corta en la parte superior de la atmósfera (TOA_SW_DWN)	7.607901e+00	10.55831673	0.0008950962	4.264587e+00	9.43864115	2.755777e+00	4.302694e+00
Superficie de todo el cielo PAR Total (ALLSKY_SFC_PAR_TOT)	-6.141507e-02	-0.08410746	0.0021413039	-6.567072e-03	-0.01542251	-4.637544e-03	-7.865218e-03
Superficie de cielo despejado PAR Total (CLRSKY_SFC_PAR_TOT)	6.763747e-03	0.01064166	0.0045934013	-1.002804e-02	-0.02441798	-7.462349e-03	-1.324474e-02
Presión superficial (PS)	9.483447e-01	1.29505253	-0.1376875011	1.360418e-01	0.36312101	1.962330e-01	3.586205e-01
Humedad específica a 2 metros (QV2M)	1.643335e-01	0.22781675	-0.0050629620	4.358724e-02	0.09905543	3.107094e-02	5.043247e-02
Humedad relativa a 2 metros (RH2M)	3.092699e-02	0.04310216	-0.0003287542	8.374307e-03	0.01871234	7.552408e-03	1.189290e-02
Humedad del suelo en la zona de raíces (GWETROOT)	1.571715e+00	2.21068542	0.1247606414	1.416583e+00	3.03485553	2.484378e-01	3.089585e-01
Precipitación corregida (PRECTOTCORR)	9.112925e-02	0.13020045	0.0190904799	1.547454e-01	0.33195773	2.871043e-02	3.911835e-02

Según la estimación de los métodos volumétricos de Newton, Teórico (trozas) y Entidad federativa para *Pinus hartwegii* Lindl. (Tabla 2), las variables climáticas significativas que influyen en la estimación del volumen comercial son TS, T2M, CLOUD_AMT, TOA_SW_DWN, ALLSKY_SFC_PAR_TOT, CLRSKY_SFC_PAR_TOT, PS, QV2M, RH2M, GWETROOT y PRECTOTCORR. Su importancia radica en ofrecer una base científica para la gestión de los recursos hídricos y la predicción de la productividad maderable ante el cambio climático.

Tabla 3. Resumen de ecuaciones alométricas ajustadas con el algoritmo R (v4.3.0) para *Pinus hartwegii* Lindl. en estado de Puebla

Clasificación del volumen de madera según los criterios XGBoost			**Criterio estadístico**	**Resultado estadístico por método ANOVA**		**Ecuación alométrica estimada por método**	
Polígonos envolventes rectangulares (*bounding boxes*)	**Método volumétrico**	**Dimensión volumétrica**		**XGBoost**	**OLS (Puebla)**	**XGBoost**	**OLS (Puebla)**
Puebla 1	Newton	Comercial	R-cuadrado múltiple	0.992	0.9627	$\mathrm{Vol} = \mathrm{e}^{-0.058}\mathrm{diam}^{0.310}\mathrm{h}^{0.006}$	$\log(\mathrm{Vol}) = -0.07 + 0.05\ \log_\mathrm{h} + 0.27\ \log_\mathrm{diam}$
			R-cuadrado ajustado	0.9919	0.9624		
			Estadístico F	9042	3831		
			Valor-p	< 2.2e-16	< 2.2e-16		
	Teórico (trozas)	Comercial	R-cuadrado múltiple	0.9837	0.9642	$\mathrm{Vol} = \mathrm{e}^{-0.012}\mathrm{diam}^{0.285}\mathrm{h}^{0.110}$	$\log(\mathrm{Vol}) = 0.12 + 0.15\ \log_\mathrm{h} + 0.22\ \log_\mathrm{diam}$
			R-cuadrado ajustado	0.9835	0.964		
			Estadístico F	4379	4000		
			Valor-p	< 2.2e-16	< 2.2e-16		
	Entidad federativa	Comercial	R-cuadrado múltiple	0.9949	0.9709	$\mathrm{Vol} = \mathrm{e}^{-8.405}\mathrm{diam}^{2.171}\mathrm{h}^{0.227}$	$\log(\mathrm{Vol}) = -8.18 + 0.61\ \log_\mathrm{h} + 1.79\ \log_\mathrm{diam}$
			R-cuadrado ajustado	0.9948	0.9707		
			Estadístico F	1.404e+04	4889		
			Valor-p	< 2.2e-16	< 2.2e-16		
Puebla 4	Newton	Comercial	R-cuadrado múltiple	0.964	0.9627	$\mathrm{Vol} = \mathrm{e}^{-0.035}\mathrm{diam}^{0.269}\mathrm{h}^{0.044}$	$\log(\mathrm{Vol}) = -0.07 + 0.05\ \log_\mathrm{h} + 0.27\ \log_\mathrm{diam}$
			R-cuadrado ajustado	0.9635	0.9624		
			Estadístico F	1980	3831		
			Valor-p	< 2.2e-16	< 2.2e-16		
	Teórico (trozas)	Comercial	R-cuadrado múltiple	0.9649	0.9642	$\mathrm{Vol} = \mathrm{e}^{0.144}\mathrm{diam}^{0.214}\mathrm{h}^{0.149}$	$\log(\mathrm{Vol}) = 0.12 + 0.15\ \log_\mathrm{h} + 0.22\ \log_\mathrm{diam}$
			R-cuadrado ajustado	0.9645	0.964		
			Estadístico F	2022	4000		
			Valor-p	< 2.2e-16	< 2.2e-16		
	Entidad federativa	Comercial	R-cuadrado múltiple	0.9727	0.9709	$\mathrm{Vol} = \mathrm{e}^{-8.339}\mathrm{diam}^{1.841}\mathrm{h}^{0.599}$	$\log(\mathrm{Vol}) = -8.18 + 0.61\ \log_\mathrm{h} + 1.79\ \log_\mathrm{diam}$
			R-cuadrado ajustado	0.9723	0.9707		
			Estadístico F	2637	4889		
			Valor-p	< 2.2e-16	< 2.2e-16		

Tabla 4. Resumen de ecuaciones alométricas ajustadas con el algoritmo R (v4.3.0) para *Pinus hartwegii* Lindl. en el estado de México

Clasificación del volumen de madera según los criterios XGBoost			**Criterio estadístico**	**Resultado estadístico por método ANOVA**		**Ecuación alométrica estimada por método**	
Polígonos envolventes rectangulares (*bounding boxes*)	**Método volumétrico**	**Dimensión volumétrica**		**XGBoost**	**OLS (México)**	**XGBoost**	**OLS (México)**
Mexico 2	Newton	Comercial	R-cuadrado múltiple	0.9833	0.9827	$\mathrm{Vol} = \mathrm{e}^{-0.194}\mathrm{diam}^{0.348}\mathrm{h}^{0.012}$	$\log(\mathrm{Vol}) = -0.12 + 0\ \log_\mathrm{h} + 0.33\ \log_\mathrm{diam}$
			R-cuadrado ajustado	0.9827	0.9826		
			Estadístico F	1646	8037		
			Valor-p	< 2.2e-16	< 2.2e-16		
	Teórico (trozas)	Comercial	R-cuadrado múltiple	0.9657	0.9748	$\mathrm{Vol} = \mathrm{e}^{0.028}\mathrm{diam}^{0.258}\mathrm{h}^{0.147}$	$\log(\mathrm{Vol}) = 0.11 + 0.12\ \log_\mathrm{h} + 0.25\ \log_\mathrm{diam}$
			R-cuadrado ajustado	0.9645	0.9746		
			Estadístico F	788.2	5463		
			Valor-p	< 2.2e-16	< 2.2e-16		
	Entidad federativa	Comercial	R-cuadrado múltiple	N/A	0.9971	N/A	$\log(\mathrm{Vol}) = -9.94 + 0.85\ \log_\mathrm{h} + 2.05\ \log_\mathrm{diam}$
			R-cuadrado ajustado	N/A	0.997		
			Estadístico F	N/A	4.373e+04		
			Valor-p	N/A	< 2.2e-16		
Mexico 3	Newton	Comercial	R-cuadrado múltiple	0.9926	0.9827	$\mathrm{Vol} = \mathrm{e}^{0.017}\mathrm{diam}^{0.280}\mathrm{h}^{0.021}$	$\log(\mathrm{Vol}) = -0.12 + 0\ \log_\mathrm{h} + 0.33\ \log_\mathrm{diam}$
			R-cuadrado ajustado	0.9923	0.9826		
			Estadístico F	3143	8037		
			Valor-p	< 2.2e-16	< 2.2e-16		
	Teórico (trozas)	Comercial	R-cuadrado múltiple	0.9787	0.9748	$\mathrm{Vol} = \mathrm{e}^{0.098}\mathrm{diam}^{0.225}\mathrm{h}^{0.156}$	$\log(\mathrm{Vol}) = 0.11 + 0.12\ \log_\mathrm{h} + 0.25\ \log_\mathrm{diam}$
			R-cuadrado ajustado	0.9778	0.9746		
			Estadístico F	1078	5463		
			Valor-p	< 2.2e-16	< 2.2e-16		
	Entidad federativa	Comercial	R-cuadrado múltiple	N/A	0.9971	N/A	$\log(\mathrm{Vol}) = -9.94 + 0.85\ \log_\mathrm{h} + 2.05\ \log_\mathrm{diam}$
			R-cuadrado ajustado	N/A	0.997		
			Estadístico F	N/A	4.373e+04		
			Valor-p	N/A	< 2.2e-16		
	Newton	Comercial	R-cuadrado múltiple	0.9905	0.9827	$\mathrm{Vol} = \mathrm{e}^{0.015}\mathrm{diam}^{0.284}\mathrm{h}^{0.018}$	
			R-cuadrado ajustado	0.9903	0.9826		
			Estadístico F	4026	8037		

			Valor-p	< 2.2e-16	< 2.2e-16		log(Vol) = −0.12 + 0 log_h + 0.33 log_diam
Mexico 4	Teórico (trozas)	Comercial	R-cuadrado múltiple	0.9683	0.9748	$Vol = e^{0.126} diam^{0.226} h^{0.151}$	log(Vol) = 0.11 + 0.12 log_h + 0.25 log_diam
			R-cuadrado ajustado	0.9674	0.9746		
			Estadístico F	1174	5463		
			Valor-p	< 2.2e-16	< 2.2e-16		
	Entidad federativa	Comercial	R-cuadrado múltiple	N/A	0.9971	N/A	log(Vol) = −9.94 + 0.85 log_h + 2.05 log_diam
			R-cuadrado ajustado	N/A	0.997		
			Estadístico F	N/A	4.373e+04		
			Valor-p		< 2.2e-16		
	Newton	Comercial	R-cuadrado múltiple	0.914	0.9827	$Vol = e^{-0.104} diam^{0.274} h^{0.080}$	log(Vol) = −0.12 + 0 log_h + 0.33 log_diam
			R-cuadrado ajustado	0.8895	0.9826		
			Estadístico F	37.21	8037		
			Valor-p	0.0001863	< 2.2e-16		
	Teórico (trozas)	Comercial	R-cuadrado múltiple	0.9794	0.9748	$Vol = e^{-0.192} diam^{0.269} h^{0.234}$	log(Vol) = 0.11 + 0.12 log_h + 0.25 log_diam
			R-cuadrado ajustado	0.9735	0.9746		
Mexico 5			Estadístico F	166	5463		
			Valor-p	1.264e-06	< 2.2e-16		
	Entidad federativa	Comercial	R-cuadrado múltiple	N/A	0.9971	N/A	log(Vol) = −9.94 + 0.85 log_h + 2.05 log_diam
			R-cuadrado ajustado	N/A	0.997		
			Estadístico F	N/A	4.373e+04		
			Valor-p	N/A	< 2.2e-16		
	Newton	Comercial	R-cuadrado múltiple	0.9878	0.9827	$Vol = e^{0.074} diam^{0.282} h^{-0.003}$	log(Vol) = −0.12 + 0 log_h + 0.33 log_diam
			R-cuadrado ajustado	0.9875	0.9826		
			Estadístico F	3469	8037		
			Valor-p	< 2.2e-16	< 2.2e-16		
	Teórico (trozas)	Comercial	R-cuadrado múltiple	0.9635	0.9748	$Vol = e^{0.307} diam^{0.213} h^{0.103}$	log(Vol) = 0.11 + 0.12 log_h + 0.25 log_diam
			R-cuadrado ajustado	0.9627	0.9746		
Mexico 6			Estadístico F	1136	5463		
			Valor-p	< 2.2e-16	< 2.2e-16		
	Entidad federativa	Comercial	R-cuadrado múltiple	N/A	0.9971	N/A	log(Vol) = −9.94 + 0.85 log_h + 2.05 log_diam
			R-cuadrado ajustado	N/A	0.997		
			Estadístico F	N/A	4.373e+04		
			Valor-p	N/A	< 2.2e-16		

Con base en la evaluación del modelo matemático del volumen maderable en función de las ecuaciones alométricas estimadas por OLS y por el Modelo Ridge, y en las simulaciones con los coeficientes lineales de diámetro-altura por árbol ubicado en las UMAFOR y con las variables climáticas significativas para el periodo temporal 2022-2024 en los estados de Puebla y México, se obtiene una mejor aproximación volumétrica de las ecuaciones matemáticas de Newton y de los modelos teóricos para tipos dendrométricos excurrentes. Según [23] , "si se aplica un coeficiente de 50.81 % a la biomasa calculada con las ecuaciones alométricas para el diámetro basal o la altura total, es suficiente para conocer el contenido de carbono en un árbol, un rodal o una plantación de brinzales de *Pinus hartwegii* Lindl; por lo tanto, su uso es confiable". Aunque, [24] afirman que la distribución de la biomasa en los árboles fue 65.3% en fuste, 23.8% en ramas, 10.9% en follaje, la ecuación para la estimación de la biomasa fue $B=0.0635DN^{2.4725}$ y para el contenido de carbono $C=0.0309DN^{2.4722}$, con R^2 de 0.98. El modelo ajustado es de la forma $Y=bX^k$ donde la variable dependiente (Y) es biomasa o carbono y la variable independiente es el diámetro normal [25].

Los modelos OLS, ecuaciones alométricas son completamente independientes de XGBoost, modelado hidrológico, en las tablas anteriores y no son comparables entre sí. En este caso, en la Tabla 4, se representan con el propósito de escenarios exploratorios, no de pronósticos determinísticos. El uso de ecuaciones alométricas permite realizar estimaciones rápidas y efectivas del estado del bosque y se relaciona de manera significativa con la densidad vegetal [26]. Los polígonos envolventes rectangulares (*bounding boxes*) que faltan en las tablas anteriores no son lo suficientemente robustos como para estimar los modelos.

La relación del índice de vegetación con las características del subsuelo (Tabla 5), como el agua subterránea y las ecuaciones alométricas, es positiva, pues el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) se relaciona con el grosor equivalente promedio del agua subterránea, lo que permite evaluar la salud de la masa forestal y la densidad vegetal de *Pinus hartwegii* Lindl. debido a que el potencial anual significativo para la infiltración, facilitado por la estructura del suelo y su cobertura [27], y, mediante su sistema radicular, el retener agua son fundamentales para la recarga de acuíferos y la prevención de la erosión del suelo, específicamente en áreas con precipitaciones irregulares [28].

Tabla 5. Resumen estadístico de coeficientes paramétricos por ecuación alométrica ajustada, con respecto al índice de vegetación (NDVI) y al código para la exploración de aguas subterráneas (GRACE), variables exógenas, mediante Google Earth Engine (GEE v1.7.3) para *Pinus hartwegii* Lindl.

Método volumétrico	**Coeficientes paramétricos**	**Resultado estadístico ANOVA**			
		Estimado	**Std. Error**	**t value**	**Pr(>|t|)**
Newton	(Intercept)	2.5941	0.1113	23.311	<2e-16 ***
	ndvi_Pixel	0.3755	0.1536	2.444	0.0148 *
	grace_Pixel	6.3411	4.0304	1.573	0.1162
	R-sq.(adj)		0.011		
	Deviance explained (%)		1.45		
	GCV		0.14665		
	Scale est.		0.14588		
Teórico (trozas)	(Intercept)	3.5638	0.1622	21.974	< 2e-16 ***
	ndvi_Pixel	0.7683	0.2242	3.428	0.000653 ***
	grace_Pixel	-9.0163	5.8693	-1.536	0.125049
	R-sq.(adj)		0.021		
	Deviance explained (%)		2.45		
	GCV		0.311		
	Scale est.		0.30936		
Entidad federativa	(Intercept)	0.1642	0.3166	0.519	0.60428
	ndvi_Pixel	1.2887	0.4371	2.949	0.00332 **
	grace_Pixel	27.5513	11.4654	2.403	0.01658 *
	R-sq.(adj)		0.0211		
	Deviance explained (%)		2.45		
	GCV		1.1868		
	Scale est.		1.1805		

Debido a que las acciones humanas alteran el ciclo del agua, las sequías ya no pueden considerarse fenómenos puramente naturales; además, estas actividades modifican los patrones regulares de los procesos hídricos [29]. La disponibilidad y la calidad del recurso hídrico se ven alteradas por factores como la expansión urbana, la tala de bosques y la crisis climática, que interrumpen el funcionamiento normal del ciclo del agua [30]. Los resultados muestran que la intervención humana es la principal causa de la disminución del caudal en la cuenca de algunas fuentes fluviales (P.ej., río Xilin, China). Además, estas acciones han provocado que las sequías en la zona sean más prolongadas, más severas y más difíciles de predecir [29].

Se ha comprobado que el método de cuantificación basado en patrones de equilibrio hídrico y de sequía es una herramienta eficaz para medir el impacto humano sobre el régimen hidrológico. Los resultados de esta investigación ofrecen un sustento científico esencial para optimizar la gestión del agua, así como para mejorar los sistemas de alerta y predicción en contextos de alta intervención antrópica [29]. Se ha comprobado que el método de cuantificación basado en patrones de equilibrio hídrico y de sequía es una herramienta

eficaz para medir el impacto humano sobre el régimen hidrológico. Los resultados de esta investigación ofrecen un sustento científico esencial para optimizar la gestión del agua, así como para mejorar los sistemas de alerta y predicción en contextos de alta intervención antrópica.

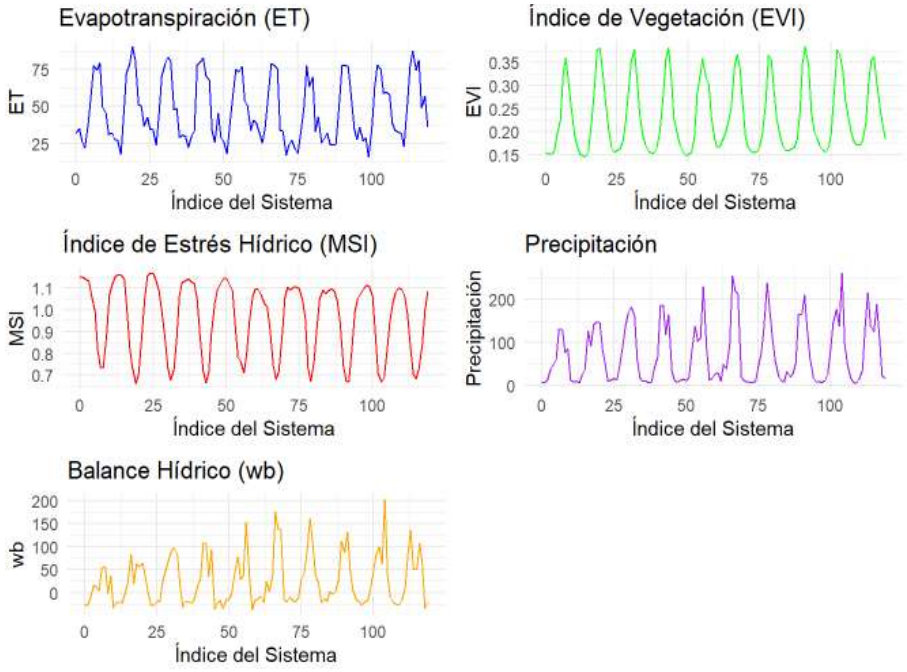


Figura 9. Balance hídrico mensual promedio, evapotranspiración mensual anual, índices de vegetación mejorada (IVM) y estrés hídrico (IEH) promedio mensual de *Pinus hartwegii* Lindl. para el estado de Puebla

La Figura 9 integra el balance hídrico mensual, la evapotranspiración y los índices de vegetación mejorada (EVI) y de estrés hídrico (MSI) para *Pinus hartwegii* Lindl. en Puebla. Una relación significativa entre ET con EVI, ET con precipitación y EVI con precipitación existe. Esto se explica debido a que el balance hídrico en un sitio en particular o en una cuenca es influenciado por los bosques, pues intervienen en todos los procesos del ciclo hidrológico, excepto la precipitación; es decir, todos estos procesos están fuertemente influenciados por la densidad de los árboles, la estructura de los rodales y la arquitectura del dosel arbóreo o arbustivo y los estratos herbáceos [21]. El wb presenta una relación significativa con la precipitación y una oscilación menor en los últimos datos del índice del sistema.

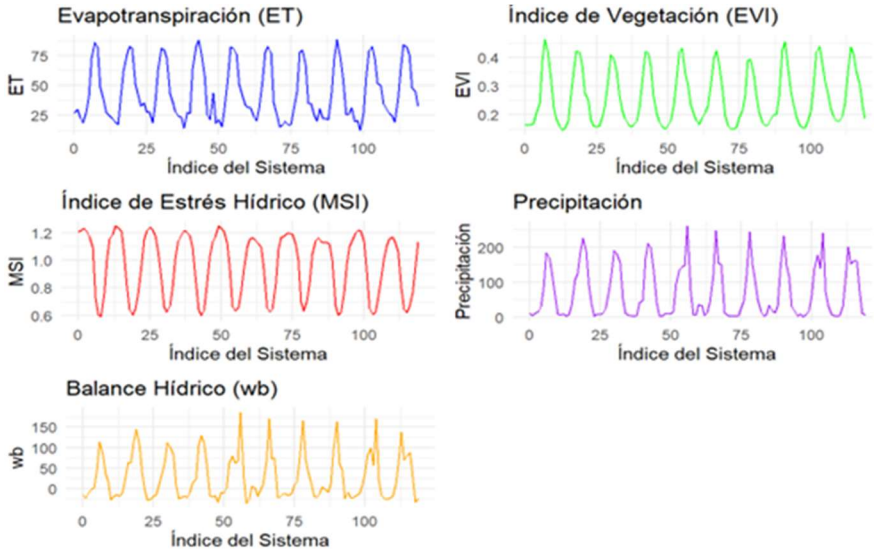


Figura 10. Balance hídrico mensual promedio, evapotranspiración mensual anual, índices de vegetación mejorada (IVM) y estrés hídrico (IEH) promedio mensual de *Pinus hartwegii* Lindl. para el estado de México

La Figura 10 integra el balance hídrico mensual, la evapotranspiración y los índices de vegetación mejorada (EVI) y de estrés hídrico (MSI) para *Pinus hartwegii* Lindl. en estado de México. Una relación significativa entre ET con EVI, ET con precipitación y EVI con precipitación existe. Desde el punto de vista del balance de masas, la tasa de extracción de agua desde la zona de raíces dependerá de la tasa de transpiración y de la capacidad de los árboles para sustentar esta tasa, que declina con la disminución del contenido de agua del suelo [21]. Sin embargo, la intensidad de la competencia estará dada por la posición del rodal en el paisaje, la especie, la estacionalidad de la lluvia y las prácticas de manejo de los bosques [31]. Los cambios de la cobertura de uso de la tierra de bosques nativos o bosques plantados generalmente provocan cambios en la evapotranspiración, de tal forma que afecta los otros componentes del balance hídrico, como la escorrentía y la recarga de capas freáticas [21]. El wb presenta una relación significativa con la precipitación y una oscilación menor en los últimos datos del índice del sistema.

Los modelos XGBoost entrenados con la serie 2005–2014 se usan para extrapolar variables hidrológicas a 2025–2026, usando como únicos predictores el año y el mes (componentes temporales). Los supuestos son: (a) los patrones estacionales históricos se mantienen; (b) no se incorporan cambios en forzantes externos. Los resultados son escenarios exploratorios, no pronósticos determinísticos. Su importancia reside en proyectar el impacto de la actividad humana sobre la recarga de acuíferos y la oscilación del nivel freático, Estos datos permiten evaluar la respuesta de *Pinus hartwegii* Lindl. y fundamentan estrategias de gestión hídrica ante el cambio climático.

Tabla 6. Simulación del balance hídrico con base en la precipitación, el índice de vegetación mejorada (IVM) promedio mensual y el estrés hídrico (IEH) para *Pinus hartwegii* Lindl. por estado.

Estado	Fecha	Resultados estadísticos de la simulación del balance hídrico						
		Precipitación	Evapotranspiración	Balance hídrico	EVI	MSI	NDVI	Oscilación del nivel freático
Puebla	2025-01-01	8.24261	32.92585	-25.07314	0.1785968	1.0810438	0.1652077	-21.19965
	2025-02-01	5.73869	31.70487	-25.86038	0.1719896	1.1000093	0.1563529	-22.12316
	2025-03-01	13.93923	31.21233	-17.68696	0.1708934	1.0945344	0.1561334	-15.57130
	2025-04-01	34.75516	21.26212	14.40896	0.1787775	1.0672268	0.1675159	10.49155
	2025-05-01	137.69754	42.67369	98.42336	0.2170916	0.9855911	0.2202653	79.28563
	2025-06-01	216.04356	61.17882	147.86598	0.3022164	0.8171936	0.3698222	122.77631
Estado de México	2025-01-01	5.375047	30.15850	-22.15811	0.1935951	1.102638	0.1755744	-18.67012
	2025-02-01	3.416557	26.09864	-21.91196	0.1780094	1.157922	0.1537318	-19.23310
	2025-03-01	6.351458	24.26435	-18.37574	0.1778489	1.167884	0.1522830	-16.47728
	2025-04-01	32.389984	17.68780	15.21681	0.193424	1.131668	0.1709195	11.01314
	2025-05-01	113.152031	32.92150	79.13254	0.2407827	1.061197	0.2268974	63.81133
	2025-06-01	199.670807	55.20061	140.50430	0.3567792	0.792900	0.4499675	118.75625

Los datos simulados para los estados de Puebla y México en 2025 son, respectivamente, precipitación promedio mensual de 74.45 mm, 72.94 mm, evapotranspiración promedio de 43.65 mm, 40.51 mm, balance hídrico promedio de 30.72 mm, 32.67 mm, un aumento en la actividad humana está relacionado con reducciones en el balance hídrico, recarga promedio actual de -2.52 mm, -2.34 mm, existe una relación inversa entre densidad de vegetación y recarga, reforzando el impacto de la actividad humana, recarga promedio en escenario 1, -20% actividad humana de -2.02 mm, -1.88 mm, es una mejora respecto a la actual e indica menor impacto negativo y recarga promedio en escenario 2, +20% actividad humana de -3.03 mm, -2.81 mm, es mayor pérdida de recarga con efecto negativo del aumento en actividad humana. Finalmente, con valores p de 0.983 y 0.983, las diferencias entre los escenarios no son estadísticamente significativas. Los escenarios base consideran una proyección sin modificar actividad humana, escenarios con −20% actividad humana consideran mayor densidad vegetal e implica una mayor recarga potencial mientras que escenarios con +20% actividad humana contemplan una menor densidad vegetal e implica una menor recarga potencial.

Las proyecciones 2025–2026 son escenarios exploratorios obtenidos por extrapolación XGBoost con predictores temporales (año y mes), entrenados con datos 2005–2014 representados en las siguientes figuras. Los escenarios son proyección sin modificar actividad humana (base), mayor densidad vegetal que implica una mayor recarga potencial (−20% actividad humana) y menor densidad vegetal que indica menor recarga potencial (+20% actividad humana) que influyen en la recarga del acuífero. Su importancia reside en proyectar el impacto de la actividad humana sobre la recarga de acuíferos y la oscilación del

nivel freático, estos datos permiten evaluar la respuesta de *Pinus hartwegii* Lindl. y fundamentan estrategias de gestión hídrica ante el cambio climático.

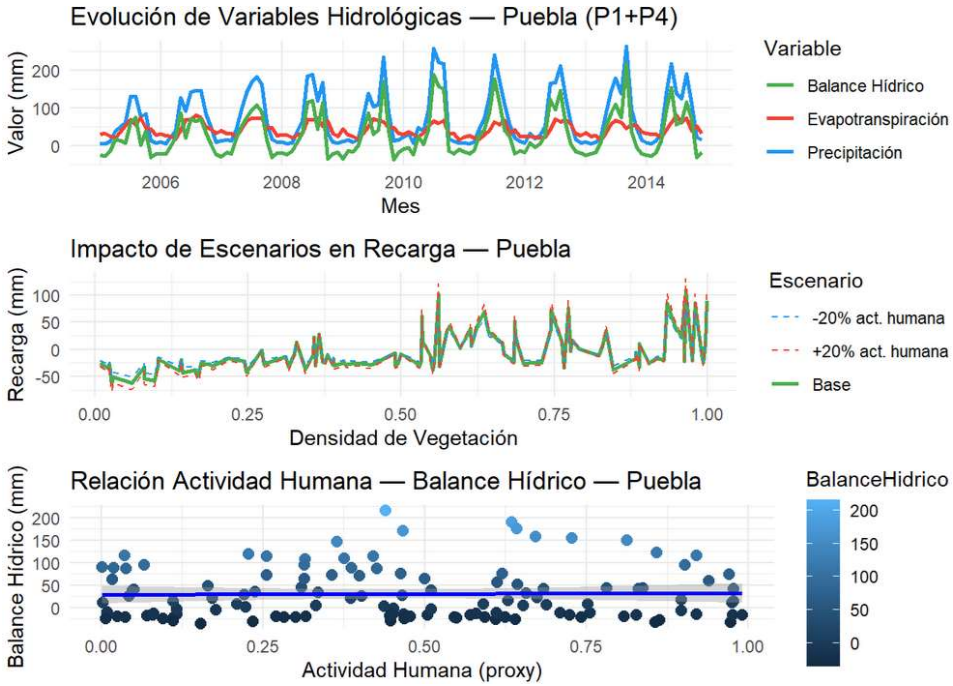


Figura 11. Simulación del balance hídrico con base en la precipitación, evapotranspiración, % de actividad humana, el índice de vegetación mejorada (IVM) promedio mensual y el estrés hídrico (IEH) para *Pinus hartwegii* Lindl. en estado de Puebla

Los resultados (Figura 11) indican una alta correlación positiva entre los niveles de precipitación con el balance hídrico, una alta correlación positiva entre mayor densidad vegetal con balance hídrico y alta correlación negativa entre la actividad humana con balance hídrico. La diminución de las actividades humanas en los polígonos envolventes rectangulares (*bounding boxes*) que contienen los individuos muestreados de *Pinus hartwegii* Lind. favorece a una mayor recarga de los mantos freáticos, que respalda el diseño de estrategias de gestión del agua en el estado de Puebla.

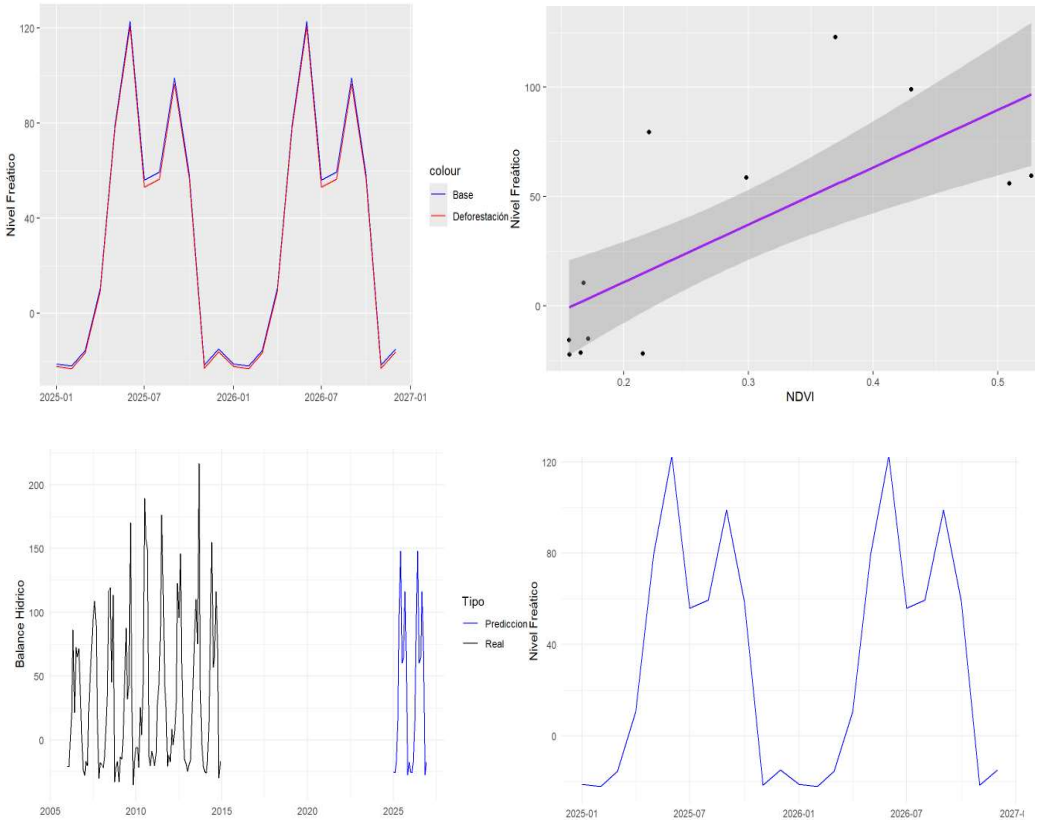


Figura 12. Impacto de la influencia humana en la oscilación del agua subterránea, relación del NDVI con la oscilación del nivel freático, comparación del balance hídrico (2025-2026) y la oscilación del nivel freático (2025-2026) para *Pinus hartwegii* Lindl. en estado de Puebla

Los resultados (Figura 12) indican que el impacto humano tiene influencia en la oscilación del agua subterránea y su vínculo con el NDVI en Puebla para 2025-2026. La densidad vegetal favorece la recarga del acuífero mientras que la presión antropogénica, mediante actividades de urbanización, la deforestación, tala u otras, altera el ciclo hidrológico y, en consecuencia, la reduce. Además, la proyección de la evolución del nivel freático ofrece un sustento científico para la gestión hídrica y la mitigación del cambio climático.

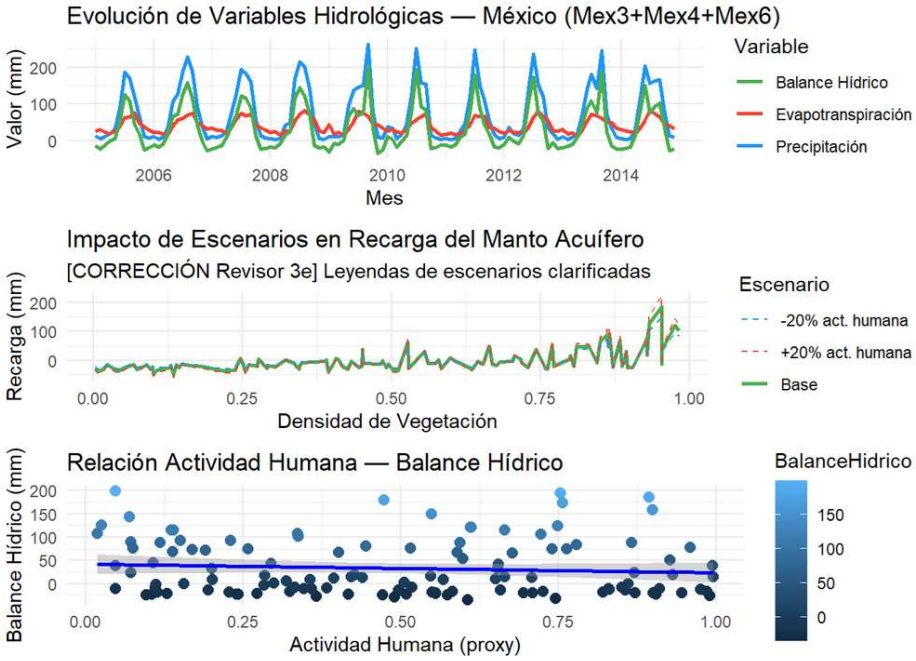


Figura 13. Simulación del balance hídrico con base en la precipitación, evapotranspiración, % de actividad humana, el índice de vegetación mejorada (IVM) promedio mensual y el estrés hídrico (IEH) para *Pinus hartwegii* Lindl. en estado de México

Los resultados mostrados en la Figura 13 indican una alta correlación positiva entre los niveles de precipitación con el balance hídrico, una alta correlación positiva entre mayor densidad vegetal con balance hídrico y alta correlación negativa entre la actividad humana con balance hídrico. La diminución de las actividades humanas en los polígonos envolventes rectangulares (*bounding boxes*) que contienen los individuos muestreados de *Pinus hartwegii* Lindl. favorece a una mayor recarga de los mantos freáticos, que fundamenta las estrategias de gestión forestal y del agua en el estado de México.

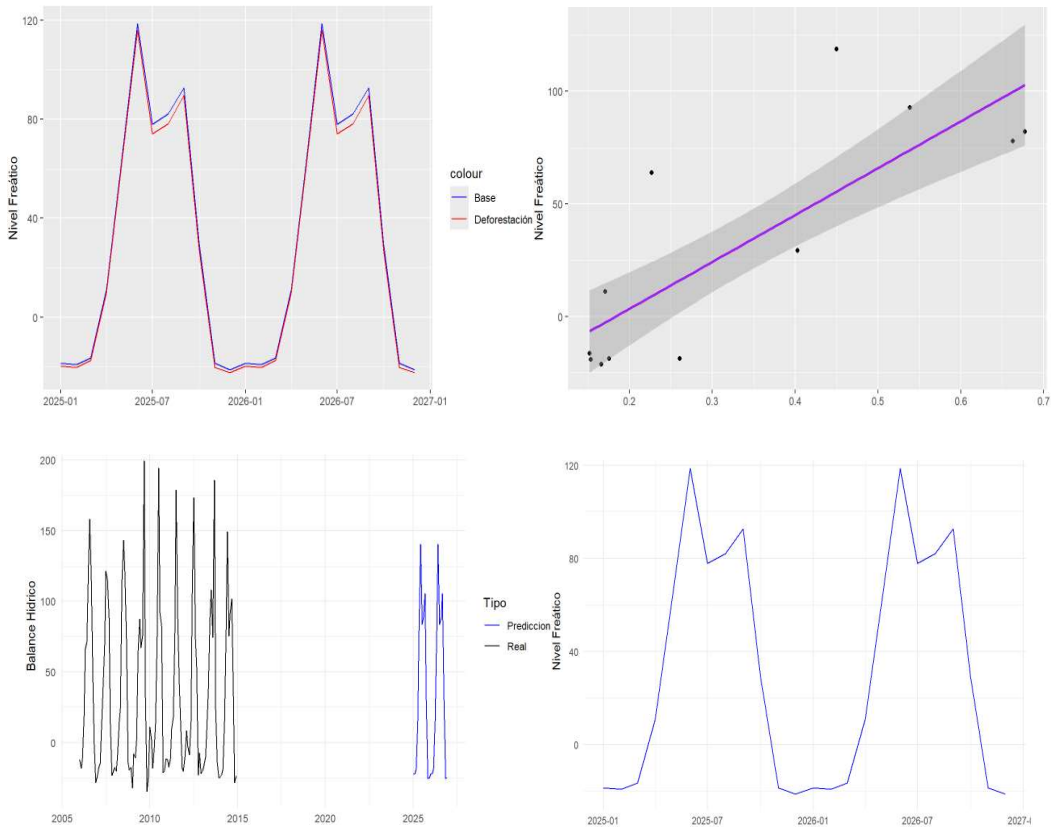


Figura 14. Impacto de la influencia humana en la oscilación del agua subterránea, relación del NDVI con la oscilación del nivel freático, comparación del balance hídrico (2025-2026) y la oscilación del nivel freático (2025-2026) para *Pinus hartwegii* Lindl. en estado de México

Los resultados (Figura 14) indican que el impacto humano tiene influencia en la oscilación del agua subterránea y su vínculo con el NDVI en el estado de México para 2025-2026. La densidad vegetal favorece la recarga del acuífero mientras que la presión antropogénica, mediante actividades de urbanización, tala u otras, altera el ciclo hidrológico y, en consecuencia, la reduce. El análisis hidrológico indica que las lluvias siguen ciclos estacionales que elevan el balance hídrico.

Los resultados indican que, con la aproximación metodológica empleada y los datos disponibles, no es posible establecer una relación causal determinante entre la presión antrópica simulada y el balance hídrico. Las tendencias direccionales observadas son, menor recarga bajo mayor actividad humana, coherentes con la hipótesis eco hidrológica de partida y justifican investigación futura con variables antropogénicas directas, pues la evolución del nivel freático ofrece un sustento científico para la gestión hídrica y la mitigación del cambio climático en los estados de Puebla y México.

4. Discusión

A diferencia de investigaciones con alcances estrictamente locales o limitadas a sitios de monitoreo convencionales, este estudio se fundamentó en el análisis de polígonos envolventes rectangulares (*bounding boxes*) que contienen datos georreferenciados de *Pinus hartwegii* Lindl. obtenidos de los inventarios INFyS (2009-2013) y SiBiFor (2013-2015) en los estados de Puebla y México [32]. Estudiar estas poblaciones es importante porque enfrentan un riesgo inminente de una contracción de entre el 30% y el 70% de su área de aptitud

ambiental en las próximas décadas [33], [34]. Al habitar por encima de los 3500 m, actúa como un "termómetro biológico" del cambio climático [35], [36], es una especie amenazada, debido al cambio climático, particularmente al incremento en temperatura y al estrés hídrico, que amenaza la conservación de los ecosistemas de alta montaña [37], pues la zona de humedad de la raíz (GWETROOT) es crítica en la estación seca, noviembre–abril, porque la temperatura superficial (TS) modula la actividad cambial, el inicio del crecimiento anual ocurre cuando TS supera sostenidamente ~5°C, a >3 500 msnm la TS puede ser subóptima incluso en verano, la interacción GWETROOT × TS es el principal determinante del crecimiento radial en poblaciones del límite xérico inferior (~3 300 msnm) y, respectivamente, el crecimiento cambial anual depende de las reservas hídricas acumuladas en el perfil del suelo debido a que la precipitación invernal es mínima, actúa como integrador de la recarga del período húmedo anterior, determinando la longitud del período de crecimiento activo y, con valores < 0.2, se asocian durante la estación seca con anillos de crecimiento estrechos o ausentes. Esta vulnerabilidad se ve agravada por la pérdida de vigor, que incrementa la susceptibilidad a ataques de agentes parásitos como los muérdagos enanos (*Arceuthobium spp.*) y los escarabajos descortezadores (*Dendroctonus spp.*), fenómenos que afectan a más del 40% de los árboles en zonas como el Nevado de Toluca [35], [38], [39], pues el estrés crónico redujo la síntesis de oleorresinas defensivas, mecanismo primario de resistencia a *Dendroctonus spp*, se corroboró las correlaciones significativas entre seis factores ambientales (temperatura, precipitación, presión atmosférica, temperatura del viento, sensación térmica y el cociente temperatura/humedad T/H) y las abundancias de dos especies de escarabajos descortezadores de importancia económica y ambiental (*Dendroctonus frontalis* y *Dendroctonus mexicanus*), que podrían explicar una mayor variación de las abundancias de estos escarabajos [40]. Al comparar este enfoque con otros enfoques previos [8], [29], se destaca que esta base de datos ofrece una visión más amplia de las variables climáticas de mayor relevancia para la especie [7].

Los resultados capturan la dinámica del almacenamiento de agua subterránea al integrar los impactos humanos y naturales, que resulta esencial, dado que esta conífera es fundamental para la infiltración hídrica en cuencas de alta montaña [33], [36], [41]. Según los valores medianos NDVI y GRACE de los polígonos envolventes rectangulares (*bounding boxes*), puebla 1 y mexico 6 es el grupo A, muestra NDVI ≥ percentil 66 (alto) y GRACE-TWS Alta/Moderada, con mayor cobertura vegetal, mejor balance hídrico y menor estrés. mexico 2, que presenta patrones únicos en la distribución de árboles y mexico 4 es el grupo B, señala percentil 33–66 (medio) y GRACE-TWS Moderada, con condiciones intermedias. puebla 4 y mexico 3 es el grupo C, presenta NDVI < percentil 33 (bajo) y GRACE-TWS Baja, con menor cobertura, mayor estrés hídrico, límite xérico inferior (~3 300 msnm), pues de acuerdo con [18], probablemente se atribuye a que las poblaciones de 3300 m de altitud o menores exhibieron condiciones de estrés más altas, una disminución en la actividad fotosintética, sequías cada vez más intensas y cálidas asociadas al límite xérico causando debilidad fisiológica en árboles, promoviendo daños por plagas y enfermedades, el eventual declive forestal y la reducción hasta en 70% del área de aptitud ambiental para *Pinus hartwegii* Lindl., como resultado del aumento de temperatura por cambio climático, representados por valores más bajos de NDVI (error cuadrático medio (Std. Error): 0.1536 para Newton y 0.2242 para dendrométricos excurrentes o trozas) [32], [38], [39]. Según [18], estos subgrupos

indican sequías probables cada vez más intensas y cálidas asociadas a la debilidad fisiológica en dicho límite. En contraste, el grupo A (polígonos envolventes rectangulares -*bounding boxes*- puebla 1 y mexico 6) demuestra que una mayor densidad vegetal y un follaje saludable están positivamente asociados con niveles más altos de agua en el subsuelo [20], [42], [43], [44]. Esto subraya la importancia de la cobertura vegetal para facilitar la infiltración y reducir la evaporación directa mediante la modificación de la caída de las gotas y la redistribución hidráulica [45], [46]. Estos hallazgos son consistentes con estudios que señalan que los micrositios con mayor humedad favorecen el éxito del reclutamiento [32].

La correlación observada entre el NDVI y el crecimiento radial refuerza la utilidad de la teledetección para inferir la productividad forestal, especialmente durante la estación seca [36]. A pesar de ciertas incertidumbres estadísticas, la extrapolación de XGBoost evidencia una tendencia clara: la actividad humana —como la deforestación, la expansión urbana y la tala desmedida— afecta negativamente el balance hídrico [35], [43], [44], [47], [48]. Esta intervención antropogénica interrumpe el ciclo hidrológico, transformando la sequía en un fenómeno impulsado por el hombre, de mayor intensidad y duración [29], [30]. La incorporación de variables como la humedad del suelo en la zona de raíces (GWETROOT) y la temperatura superficial en los modelos alométricos proporciona un sólido sustento científico para estimar la biomasa forestal en escenarios de estrés hídrico extremo [49], [50]. El objetivo de estimar las ecuaciones alométricas mediante polígonos envolventes rectangulares (bounding boxes) fue establecer escenarios exploratorios comparativos [43] e identificar coeficientes paramétricos significativos mediante métodos volumétricos que inciden en la estimación del bosque. Finalmente, este trabajo valida la relevancia de emplear ecuaciones alométricas ajustadas y datos satelitales (GRACE/Landsat) para cuantificar la capacidad productiva y la resiliencia de *Pinus hartwegii* Lindl. [34], [36], [50]. Estudios semejantes son fundamentales para planificar y gestionar los recursos hídricos, diseñar estrategias para mitigar los desafíos de adaptación territorial y evaluar la salud de los bosques [10], [11].

La mayor parte de la población se encuentra en situación de riesgo debido a factores hidroclimatológicos, fuertemente influidos por la variabilidad (VC) y el cambio climático (CC). Se suma el aumento de la vulnerabilidad debido a la inadecuada planificación y ocupación del territorio, propias de los países en desarrollo. En este sentido, los sistemas de alerta temprana (SAT) facilitan los procesos de adaptación y de mitigación de impactos [40]. Los sistemas de alertas tempranas (SAT) son una de las principales estrategias de adaptación frente al CC, pues su eficacia radica en la participación activa de las comunidades, siendo la educación la base para tomar conciencia de los riesgos a los que se enfrentan. Un SAT comprende cuatro elementos fundamentales: 1) conocimiento del riesgo; 2) monitoreo, análisis y pronóstico de la amenaza; 3) comunicación o difusión de las alertas y los avisos; y 4) capacidades locales para responder a la alerta recibida [40]. Integran aspectos misionales e incorporan todos sus componentes: prospectivo, correctivo y reactivo, específicamente de tipo reactivo; de acuerdo con [51] , la metodología desarrollada —NDVI, GRACE-TWS, balance hídrico (P−ET), MSI, EVI y modelos XGBoost— constituye la base técnica para un sistema de alerta temprana para la gestión hídrica forestal, como umbral de alerta hídrica con GWETROOT < 0.2 y balance hídrico mensual < −20 mm durante tres meses consecutivos activan alerta para medidas de manejo (reducción de aprovechamiento,

retención de hojarasca, captación), datos de acceso libre con Sentinel-2, MODIS, CHIRPS y GRACE, que son públicos y actualizables mensualmente en GEE sin costo de adquisición, integración con SiBiFor con la georreferenciación que permite vincular los umbrales con parcelas específicas para decisiones a escala de rodal y la recalibración periódica de modelos XGBoost al incorporar nuevos datos, mejorando la precisión de los escenarios progresivamente representa una línea prioritaria de investigación futura para el análisis de la amenaza, el establecimiento de sistemas de monitoreo para la alerta, preparación, adaptación, la mitigación, la prevención de la población para actuar frente al riesgo e incorporar nuevas tecnologías en sistemas de monitoreo y sistemas de alerta temprana (SMAT) [52].

5. Conclusiones

- Los polígonos envolventes rectangulares (*bounding boxes*) puebla 1, NDVI 0.4438231, GRACE 0.02376496 y mexico 6, NDVI 0.4260129, GRACE 0.0140668, son grupo A mientras que mexico 2, NDVI 0.558, GRACE 0.014 y mexico 4, NDVI 0.5786600, GRACE 0.0140668, es grupo B y puebla 4, NDVI 0.6954328, GRACE 0.01709776 y mexico 3 NDVI 0.6591494, GRACE 0.0140668 es grupo C, indica probables sequías cada vez más intensas y cálidas asociadas al límite xérico que causan la eventual aparición de fenómenos de declive forestal.
- Los polígonos envolventes rectangulares (*bounding boxes*) puebla 1, NDVI 0.4438231, GRACE 0.02376496 y mexico 6, NDVI 0.4260129, GRACE 0.0140668, son grupo A indican follaje saludable y áreas con una alta densidad de árboles, que tienden a mantener niveles más altos de agua subterránea debido a la modificación de la trayectoria de la caída de las gotas y la infiltración facilitada por la vegetación.
- La aproximación metodológica empleada y los datos disponibles no es permiten establecer una relación causal determinante entre la presión antrópica simulada y el balance hídrico. Las tendencias direccionales observadas —menor recarga bajo mayor actividad humana— son coherentes con la hipótesis ecohidrológica de partida y justifican investigación futura con variables antropogénicas directas.
- Según la estimación de los métodos volumétricos de Newton, Teórico (trozas) y Entidad federativa para *Pinus hartwegii* Lindl, las variables climáticas significativas que influyen en su estimación comercial son TS, T2M, CLOUD_AMT, TOA_SW_DWN, ALLSKY_SFC_PAR_TOT, CLRSKY_SFC_PAR_TOT, PS, QV2M, RH2M, GWETROOT y PRECTOTCORR.
- Con base en el criterio estadístico de Pr(>|t|), índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y código para la exploración de aguas subterráneas (GRACE), los coeficientes paramétricos significativos que influyen en la estimación volumétrica comercial por métodos son Newton con ndvi_Pixel 0.0148* y grace_Pixel 0.1162, Teórico (trozas) con ndvi_Pixel 0.000653*** y grace_Pixel 0.125049, Entidad federativa con ndvi_Pixel 0.00332** y grace_Pixel 0.01658*.
- Los hallazgos confirman que la densidad vegetal y la actividad humana tienen efectos opuestos sobre el acuífero: mientras la primera favorece la recarga, la segunda la reduce drásticamente. Esta relación inversa evidencia cómo la urbanización y la

deforestación alteran el ciclo hidrológico, comprometiendo no solo el balance hídrico, sino también la calidad y disponibilidad del recurso hídrico ante el cambio climático.

- La metodología basada en patrones de equilibrio hídrico y sequía demuestra ser una herramienta eficaz para medir el impacto de las actividades antrópicas en la sequía hidrológica. Los resultados obtenidos constituyen un fundamento científico esencial para la administración del agua y el desarrollo de sistemas de alerta temprana, permitiendo una planificación prospectiva frente a las variaciones generadas por el cambio climático.

Contribuciones de los autores

Conceptualización, E.P.S.C. y M.A.G.C.; metodología, M.V.T.Z. y S.S.M.; software, A.L.O. y L.P.M.V.; validación, M.A.S. y A.B.N.; análisis formal, M.A.S. y A.B.N.; investigación, M.A.S. y A.L.O.; curación de bases de datos, M.A.S. y A.L.O.; redacción—preparación del borrador original, M.A.S. y A.L.O.; redacción—revisión y edición, E.P.S.C. y M.A.G.C.; supervisión, L.P.M.V. y A.L.O. Todos los autores han leído y aprobado la versión publicada del manuscrito.

Agradecimientos

Los coautores agradecen al grupo de investigación SiBiFor y a la Comisión Nacional Forestal de México por las bases numéricas Sistema Biométrico Forestal para el manejo de los bosques de México e Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) proporcionadas, respectivamente.

Conflictos de interés

Los autores no reportan conflictos de interés relacionados con esta investigación.

Declaración sobre el uso de Inteligencia Artificial Generativa

No se utilizó inteligencia artificial generativa en la preparación de este artículo.

Fuente de financiamiento

Esta investigación fue financiada por los coautores.

Referencias

[1] ONU-HABITAT, "Sequías, tormentas e inundaciones: el agua y el cambio climático dominan la lista de desastres". [En línea]. Disponible en: https://onu-habitat.org/index.php/sequias-tormentas-e-inundaciones-el-agua-y-el-cambio-climatico-dominan-la-lista-de-desastres

[2] J. R. Valles León, "Impactos del Cambio Climático en la Hidrología y en los Recursos Hídricos", en *Congreso de Ingeniería y Arquitectura*, San Salvador, El Salvador, 2018.

[3] SEMARNAT y CONANP, "Ficha de identificación de *Pinus hartwegii* (Lindl.)," Ciudad de México, México, 2014. [En línea]. Disponible en: https://www.conanp.gob.mx/conanp/dominios/iztapopo/documentos/fichas_de_especies/Pinus_hartwegii.pdf

[4] W. Lauer, "La posición de los páramos en la estructura del paisaje de los Andes tropicales," en El medio ambiente páramo, M. L. Salgado-Labouriau, Ed. Caracas, Venezuela: CEA/IVIC, 1979, pp. 29–45. [En línea]. Disponible en: https://www.adwmainz.de/fileadmin/adwmainz/bibliothek/Wilhelm_Lauer_Publikationsliste/102._Lauer_1978_La_posicioen_de_los_paeramos_en_la_estructura....pdf

[5] J. P. Perry, *The Pines of Mexico and Central America*. Portland, OR, EE.UU: Timber Press, 1991.

[6] A. Farjon y B. T. Styles, *Pinus (Pinaceae)*, Flora Neotropica Monograph 75. The New York, NY, EE. UU: The New York Botanical Garden, 1997.

[7] M. Pérez-Suárez, J. E. Ramírez-Albores, J. J. Vargas-Hernández, y F. U. Alfaro-Ramírez, "A review of the knowledge of Hartweg's *Pine (Pinus hartwegii* Lindl.): current situation and the need for improved future projections», *Trees*, vol. 36, pp. 25-37, oct. 2021, doi: 10.1007/s00468-021-02221-9.

[8] R. L. Manzione y R. de C. Ferreira da Silva, "Monitoramento de níveis freáticos e interações com clima e vegetação em área cultivada com *Pinus* na estação ecológica de Água de Santa Bárbara/Sp", en *XVIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*, Brasilia, Brazil, 2015.

[9] J. P. Crespo-Antia *et al.*, "Matching Vegetation Indices and Tree Vigor in Pyrenean Silver Fir Stands", *Remote Sensing*, vol. 16, no. 23, 4564, dic. 2024, doi: 10.3390/rs16234564.

[10] J. Zhou *et al.*, "An improved methodology for quantifying the impact of human activities on hydrological drought change", *Journal of Hydrology: Regional Studies*, vol. 50, 101603, dic. 2023, doi: 10.1016/j.ejrh.2023.101603.

[11] J. Pang, S. Chen, B. Men y H. Wang, "Causal networks and spatiotemporal patterns of different droughts from the perspective of hydrological cycle - a case study of the Nenjiang River Basin, China", *Ecological Indicators*, vol. 166, sep. 2024, doi:10.1016/j.ecolind.2024.112326.

[12] B. Vargas-Larreta *et al.*, "SiBiFor: Sistema Biométrico Forestal para el manejo de los bosques de México", *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, vol. 23, no. 3, pp. 437-455, sep. 2017, doi: 10.5154/r.rchscfa.2017.06.040.

[13] Google Cloud, "Google Earth Engine". [En línea]. Disponible en: https://cloud.google.com/earth-engine?hl=es-419

[14] J. Hernández-Rivera, R. Razo-Zárate, R. Rodríguez-Laguna, G. González-Flores, R. Goche-Telles, y J. Á. Prieto-Ruíz, "Regeneración natural de *Pinus hartwegii Lindl*", *Revista Iberoamericana de Ciencias*, vol. 7, no. 2, pp. 12-18, oct. 2020, [En línea]. Disponible en: https://www.reibci.org/publicados/2020/oct/4000108.pdf

[15] J. A. Cardille, M. A. Crowley, D. Saah, y N. E. Clinton, Eds., *Cloud-Based Remote Sensing with Google Earth Engine: Fundamentals and Applications*. Cham, Suiza: Springer International Publishing, 2024. doi: 10.1007/978-3-031-26588-4.

[16] T. Chen y C. Guestrin, "XGBoost: A Scalable Tree Boosting System", en *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, ACM, pp. 785-794, ago. 13, 2016. doi: 10.1145/2939672.2939785.

[17] GitHub, "XGBoost R Tutorial". [En línea]. Disponible en: https://xgboost.readthedocs.io/en/stable/R-package/xgboostPresentation.html

[18] J. L. Gallardo, R. A. Lindig, T. L. López, A. R. Endara, A. Blanco, y C. Sáenz, "Analysis of the Vigor of *Pinus hartwegii Lindl*. along an Altitudinal Gradient Using UAV Multispectral Images: Evidence of Forest Decline Possibly Associated with Climatic Change", *Forests*, vol. 14, no. 6, jun. 2023, doi: 10.3390/f14061176..

[19] J. Masëk, J. Tumajer, J. Lange, R. Kaczka, P. Fisër, y V. Treml, "Variability in tree-ring width and NDVI responses to climate at a landscape level", *Ecosystems*, vol. 26, pp. 1144-1157, ene. 2023, doi: 10.1007/s10021-023-00822-8.

[20] J. Xue y B. Su, "Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications", *Journal of Sensors*, vol. 2017, no. 1, pp. 1-17, 2017, doi: 10.1155/2017/1353691.

[21] M. Espinosa, E. Acuña, J. Garcia, R. Rodríguez, y R. Rubilar, *Silvicultura de bosques plantados con fines productivos*. Concepción, Chile: Universidad de Concepción, 2024. [En línea]. Disponible en: https://libros.udec.cl/index.php/udec/catalog/book/68

[22] D. White, C. Beadle, M. Battaglia, R. Benyon, F. Dunin, y J. Medhurst, "A physiological basis for management of water use by tree crops", en *Plantations, Farm Forestry and Water: Proceedings of a national workshop, Melbourne, Australia*, Proceedings, 2001, pp. 20-27. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Keith-Smettem/publication/233532381_Manipulating_catchment_water_balance_using_plantation_and_farm_forestry_case_studies_from_south-western_Australia/links/00b7d52f61df589834000000/Manipulating-catchment-water-balance-using-plantation-and-farm-forestry-case-studies-from-south-western-Australia.pdf

[23] J. E. Martínez-Luna, F. Carrillo-Anzures, M. Acosta-Mireles, M. E. Romero-Sánchez, y R. Pérez-Miranda, "Ecuaciones alométricas para estimar carbono en brinzales de *Pinus hartwegii* Lindl.," *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, vol. 11, no. 60, pp. 144-160, 2020, doi: 10.29298/rmcf.v11i60.726.

[24] F. Carrillo-Anzures, M. Acosta-Mireles, C. del R. Jiménez-Cruz, L. González-Molina, y J. D. Etchevers-Barra, "Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa y el carbono de la parte aérea de *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional Ixta-Popo, México", *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. 7, no. 3, pp. 681-691, 2016, [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342016000300681

[25] M. Arreguín Sámano, J. A. Paucar Camacho, E. P. Salazar Castañeda, M. T. Vallejo Illijama, M. Á. Guallpa Calva, y Á. Leyva Ovalle, "Quantifying the impact of climate change on *Pinus hartwegii* Lindl. forests: A novel approach using AI-powered allometric models", *Journal of Ecohumanism*, vol. 3, no. 8, pp. 6936-6952, dic. 2024, doi: 10.62754/joe.v3i8.5292.

[26] G. Chávez, G. V. Campos, y M. Pérez, "Estructura y composición del bosque de *Pinus hartwegii Lindl*. en su distribución altitudinal en el Nevado de Toluca", *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, vol. 13, no. 74, pp. 54-76, oct. 2022, doi: 10.29298/rmcf.v13i74.1257.

[27] E. Zavaleta, H. Cruz, y J. Márquez, "Potencial de infiltración de agua de lluvia a partir de la retención de una plantación forestal", *Foresta Veracruzana*, vol. 14, no. 1, pp. 23-28, mar. 2012. Disponible en: http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49724122004.

[28] A. Ortega, L. Mendiezábal, J. Alba, y A. Aparicio, "Germinación y crecimiento inicial de *Pinus hartwegii Lindl.* de siete poblaciones del estado de México", *Foresta Veracruzana*, vol. 5, no. 2, pp. 29-34, 2003. Disponible en: http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49750205.

[29] W. Li, W. Wang, Y. Wu, Q. Quan, S. Zhao, y W. Zhang, "Impact of Human Activities on Hydrological Drought Evolution in the Xilin River Basin", *Atmosphere*, vol. 13, no. 12, dic. 2022, doi: 10.3390/atmos13122079.

[30] A. Jaramillo Moreno, "Aprendiendo cómo los humanos modifican el ciclo hidrológico". [En línea]. Disponible en: https://www.atmosfera.unam.mx/eventos/aprendiendo-como-los-humanos-modifican-el-ciclo-hidrologico/

[31] R. Vertessy, "Impacts of plantation forestry on catchment runoff", en *Plantations, Farm Forestry and Water: Proceedings of a national workshop*, *Melbourne, Australia*, Proceedings, 2001, 2001, pp. 9-19. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Keith-Smettem/publication/233532381_Manipulating_catchment_water_balance_using_plantation_and_farm_forestry_case_studies_from_south-western_Australia/links/00b7d52f61df589834000000/Manipulating-catchment-water-balance-using-plantation-and-farm-forestry-case-studies-from-south-western-Australia.pdf

[32] C. C. Astudillo-Sánchez, M. S. Fowler, J. Villanueva-Díaz, A. R. Endara-Agramont, y L. Soria-Díaz, "Recruitment and facilitation in *Pinus hartwegii,* a Mexican alpine treeline ecotone, with potential responses to climate warming", *Trees*, vol. 33, pp. 1087-1100, mar. 2019, doi: 10.1007/s00468-019-01844-3.

[33] J. L. Sánchez-Mendoza, "Calidad de semilla y respuesta al déficit hídrico en plantas de Pinus hartwegii Lindl. adaptadas a diferentes niveles altitudinales," Tesis de maestría, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México, 2021. [En línea]. Disponible en: http://colposdigital.colpos.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/10521/4758/Sanchez_Mendoza_JL_MC_Ciencias_Forestales_2021.pdf

[34] L. Carrillo-Arizmendi, J. J. Vargas-Hernández, P. Rozenberg, M. Pérez-Suárez, y A. R. Martínez-Campos, "Phenotypic plasticity of growth ring traits in *Pinus hartwegii* at the ends of its elevational gradient", *Front. Plant Sci.*, vol. 14, sep. 2023, doi: 10.3389/fpls.2023.1072638.

[35] R. L. Heredia-Bobadilla, G. Gutiérrez-González, D. Cibrián Tovar, A. R. Endara Agramont, M. del Colín. Ferreyra, y A. M. Arzate Fernández, "Genes de resistencia inducida en *Pinus hartwegii (Pinaceae)* en el centro de México", *Acta Botanica Mexicana*, no. 131, jun. 2024, doi: 10.21829/abm131.2024.2282.

[36] L. R. Montoya-Jiménez, A. Gómez-Guerrero, F. J. A. Pedraza-Oropeza, T. M. González-Martínez, y A. Correa-Díaz, "Short-Term Tree-Ring Series of *Pinus hartwegii* Lindl. Taken at Ground Level Correlate to Normalized Difference Vegetation Index Series", *Forests*, vol. 15, no. 2, feb. 2024, doi: 10.3390/f15020324.

[37] J. L. Sánchez-Mendoza, M. Jiménez-Casas, C. Ramírez-Herrera, y H. Viveros-Viveros, "Calidad de semilla y crecimiento de planta en poblaciones y altitudes de *Pinus hartwegii* Lindl.", *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, pp. 143-165, 2023, doi: 10.29298/rmcf.v14i75.1297.

[38] V. Couto Antelo, "Las plagas forestales se están volviendo cada vez más agresivas a causa del calentamiento global", CREAF. Accedido: 23 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.creaf.cat/es/articulos/las-plagas-forestales-se-estan-volviendo-cada-vez-mas-agresivas-causa-del-calentamiento-global

[39] C. Sáenz-Romero *et al.*, "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", *Can. J. For. Res.*, vol. 50, no. 9, pp. 843-854, abr. 2020, doi: 10.1139/cjfr-2019-0329.

[40] J. D. López-García, Y. Carvajal-Escobar, y A. M. Enciso-Arango, "Sistemas de alerta temprana con enfoque participativo: un desafío para la gestión del riesgo en Colombia", *Luna Azul*, no. 44, pp. 231–246, 2017, doi: 10.17151/luaz.2017.44.14.

[41] A. S. Richey *et al.*, "Quantifying renewable groundwater stress with GRACE", *Water Resources Research*, vol. 51, no. 7, pp. 5217-5238, jul. 2015, doi: 10.1002/2015wr017349.

[42] B. Moore y G. Allard, "Los impactos del cambio climático en la sanidad forestal", FAO, Roma, Italia, 2008. [En línea]. Disponible en: https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/a9dae251-02ba-43df-a81c-1b140dc94047/content

[43] T. D. Ramsfield, B. J. Bentz, M. Faccoli, H. Jactel, y E. G. Brockerhoff, "Forest health in a changing world: effects of globalization and climate change on forest insect and pathogen impacts", *Forestry*, vol. 89, no. 3, pp. 245-252, jul. 2016, doi: 10.1093/forestry/cpw018.

[44] C. Tipán-Torres, "Impacto del Cambio Climático en los Ecosistemas Forestales: Un Análisis Exploratorio", *Horizon Nexus Journal*, vol. 2, no. 3, pp. 1-17, jul. 2024, doi: 10.70881/hnj/v2/n3/4.

[45] E. Flores Ayala *et al.*, "Estudios de interceptación de lluvia en bosques de importancia hidrologico-forestal", *Sociedades Rurales, Producción y Medio Ambiente*, vol. 18, no. 35, pp. 45-63, 2018. Disponible en: https://sociedadesruralesojs.xoc.uam.mx/index.php/srpma/article/view/341/339

[46] M. W. Lubczynski, "The hydrogeological role of trees in water-limited environments", *Hydrogeology Journal*, vol. 17, pp. 247-259, oct. 2008, doi: 10.1007/s10040-008-0357-3.

[47] J. Rzedowski, *Vegetación de México*, 1ra. Edición digital. Ciudad de México, México: CONABIO, 2006. [En línea]. Disponible en: https://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMx_Cont.pdf

[48] J. Villanueva *et al.*, "Red dendrocronológica del pino de altura (*Pinus hartwegii* Lindl.) para estudios dendroclimáticos en el noreste y centro de México", *Investigaciones Geográficas,* no. 86, pp. 5-14, 2015, doi: 10.14350/rig.42003.

[49] J. Dai *et al.*, "Drought-modulated allometric patterns of trees in semi-arid forests", *Commun Biol*, vol. 3, jul. 2020, doi: 10.1038/s42003-020-01144-4.

[50] T. Jucker *et al.*, "Allometric equations for integrating remote sensing imagery into forest monitoring programmes", *Global Change Biology*, vol. 23, no. 1, pp. 177-190, jul. 2016, doi: 10.1111/gcb.13388.

[51] UNESCO, *Enfoques estratégicos sobre las TIC en educación en América Latina y el Caribe*. Santiago, Chile: OREALC/UNESCO Santiago, 2013. [En línea]. Disponible en: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000223251

[52] C. Oberli, J. Gironas, C. Escauriaza, y R. Cienfuegos, *Sistemas de monitoreo y alerta temprana (SMAT), un elemento esencial en la gestión de desastres de origen hidrometeorológico*, Serie Policy Papers CIGIDEN. Santiago, Chile: CIGIDEN, 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.cigiden.cl/wp-content/uploads/2021/04/PP_SMAT_v06-con-ISBN-DIGITAL.pdf.