



Universidad Autónoma del Estado De México

Facultad de Geografía

Identificación de zonas potenciales de recarga en la porción central del eje Neovolcánico y norte de la Sierra Madre del Sur desde un enfoque de modelo de distribución de especies en zonas de amplia distribución boscosa.

Modalidad:

Tesis

Para obtener título de licenciado en Geología Ambiental y Recursos Hídricos

Presenta:

Guillermo Carmona Hernández

Generación: 2017-2022

Director de Tesis:

Dr. Miguel Ángel Gómez Albores

Revisores:

Dra. Clarita Rodríguez Soto

Dr. Roberto Franco Plata

24 de abril del 2026, Toluca, Estado de México

Índice General

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	2
1.1.1. Enfoques basados en SIG y Análisis Multicriterio	2
1.1.2. Perspectiva del Balance Hídrico Cuantitativo	3
1.1.3. Modelación Predictiva bajo Escenarios de Cambio Climático	3
1.1.4. Modelo de Distribución de Especies con Maxent	4
1.2. Objetivo General	5
1.2.1. Objetivos Específicos	5
1.3. Hipótesis	6
1.4. Justificación	7
2. Marco Teórico-Conceptual	10
2.1. Recursos Hídricos en México	10
2.2. Disponibilidad de agua en México	10
2.3. Agua subterránea en México	11
2.4. Sobreexplotación de las aguas subterráneas	12
2.5. Ciclo Hidrológico	14
2.6. Generalidades de la recarga	16
2.7. Sistemas Gravitacionales de Flujo de Agua Subterránea	17
2.8. Estado de los bosques en México	18
2.9. Los Bosques y el Agua	19
2.10. <i>Pinus hartwegii</i>	20

2.11. <i>Pinus teocote</i>.....	21
2.12. <i>Pinus pseudostrobus</i>.....	22
2.13. <i>Pinus montezumae</i>.....	24
2.14. <i>Pinus douglasiana</i>.....	25
2.15. Sistemas de información Geográfica	27
2.16. Distribución de especies	28
2.17. Máxima entropía (Maxent)	29
2.18. Recarga Hídrica del Suelo para la estimación de la recarga	31
3. Metodología.....	33
3.1. Caracterización de la zona de Estudio	33
3.1.1. Orografía	34
3.1.2. Hidrografía	34
3.1.3. Clima	36
3.1.4. Vegetación y Uso de Suelo	38
3.1.5. Edafología	39
3.1.6. Litología	41
3.2. Esquema metodológico	43
3.2.1. Recopilación y estructura de información	45
3.2.2. Procesamiento de Variables para los MDPE	47
3.2.3. Precipitación acumulada mensual	47
3.2.4. Temperatura media mensual	48
3.2.5. Variables Bioclimáticas	48

3.2.6. Procesamiento de las variables para Balance Hídrico	50
3.2.7. Precipitación media anual (<i>P</i>)	50
3.2.8. Evapotranspiración real media anual (<i>ET</i>)	51
3.2.9. Escurrimiento Superficial medio anual	51
3.2.10. Registros de especies y depuración	52
3.3. Fase 1. Modelos de Distribución potencial de especies.....	53
3.3.1. Análisis de Valor de AUC	54
3.3.2. Tablas de Umbrales	54
3.3.3. Análisis de Contribución de Variables	55
3.3.4. Matriz de Correlación	55
3.4. Etapa 2. Recarga potencial (Balance Hídrico del Suelo).....	57
3.4.1. Definición de las áreas de análisis	57
3.4.2. Promedios de infiltración por unidad espacial	58
4. Resultados	60
4.1. Modelos de distribución potencial de especies	60
4.1.1. Modelos base y desempeño inicial	60
4.1.2. Análisis de contribución de variables y correlación	64
4.1.3. Modelos finales simplificados y validación	66
4.1.4. Variables determinantes en los MDPE simplificados	70
4.2. Componentes del Balance Hídrico Regional (1980-2020).....	71
4.2.1. Precipitación media anual (<i>P</i>)	72
4.2.2. Evapotranspiración real media anual (<i>ET</i>)	73

4.2.3. Esgurrimiento superficial medio anual (R_0)	73
4.3. Integración Espacial y Extracción de la recarga potencial.....	74
4.4. Síntesis de Potencial de Recarga Hídrica por Especie	80
4.4.1. Identificación de los escenarios óptimos	80
5. Conclusiones y Recomendaciones.....	82
5.1. Conclusiones	82
5.1.1. Modelos de Distribución Potencial de Especies (MDPE)	82
5.1.2. Estimación de la recarga potencial	83
5.1.3. Recarga potencial por especie	83
5.2.1. Gestión y conservación	84
5.2.2. Para Futuras investigaciones	85

Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama del acuífero y los flujos de agua subterránea (Recuperado de Hatch Kuri, 2018).....	12
Figura 2. Diagrama de Acuíferos sobreexplotados en México (CONAGUA, citado por Hatch Kuri, 2018).	13
Figura 3. Ciclo Hidrológico (Hamilton et al., 2009).....	15
Figura 4. Diagrama Sistemas Locales y Regionales de Agua Subterránea (Tóth, citado de Álvarez, 2021).	17
Figura 5. Distribución a Nivel Nacional de la Especie <i>P.hartwegii</i> . Fuente: Elaboración propia, a partir de datos obtenidos del Geoportal de la Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad (CONABIO).....	21
Figura 6. Distribución a Nivel Nacional de la Especie <i>P.teocote</i> . Fuente: Elaboración Propia, a partir de datos obtenidos del Geoportal de la Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad (CONABIO).....	22

Figura 7. Distribución a Nivel Nacional de la Especie P.pseudostrobus. Fuente: Elaboración Propia, a partir de datos obtenidos del Geoportal de la Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad (CONABIO).	23
Figura 8. Distribución a Nivel Nacional de la Especie P.montezumae. Fuente: Elaboración Propia, a partir de datos obtenidos del Geoportal de la Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad (CONABIO).	25
Figura 9. Distribución a Nivel Nacional de la Especie P.douglasia. Fuente: Elaboración propia, a partir de datos obtenidos del Geoportal de la Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad (CONABIO).	26
Figura 10. Ubicación de la Zona de Estudio. Fuente: Elaboración Propia, a partir de datos obtenidos del Geoportal de la Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad (CONABIO).	33
Figura 11. Hidrología. Fuente: Elaboración Propia, a partir de datos obtenidos del Geoportal de la Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad (CONABIO).	36
Figura 12. Clima. Fuente: Elaboración Propia, a partir de datos obtenidos del Geoportal de la Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad (CONABIO).	37
Figura 13. Vegetación y Uso de Suelo. Fuente: Elaboración Propia, a partir de datos obtenidos del Geoportal de la Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad (CONABIO).	39
Figura 14. Edafología. Fuente: Elaboración Propia, a partir de datos obtenidos del Geoportal de la Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad (CONABIO).	40
Figura 15. Litología. Fuente: Elaboración Propia, a partir de datos obtenidos del Servicio Geológico Mexicano (SGM).	42
Figura 16. Esquema Metodológico.	44
Figura 17. Estimación de la precipitación acumulada mensual	47
Figura 18. Estimación de la temperatura media anual.	48
Figura 19. Estimación de la precipitación media anual.	50
Figura 20. Estimación de la evapotranspiración real media anual.	51
Figura 21. Estimación del escurrimiento superficial medio anual	52
Figura 22. Módulo Habitat Suitability / Species Distribution Modeling e interfaz de Maxent.	53
Figura 23. Interfaz herramienta Crostabb.	58

Índice de Tablas

Tabla 1. Nomenclatura establecida para cálculo de la recarga potencial..	31
Tabla 2. Especies de Pino propuestas para la zona de estudio	46
Tabla 3. Variables Bioclimáticas	49
Tabla 4. Coeficiente de determinación, Fuente: (Minga., 2022)	56
Tabla 5. Valores de AUC por especie (Modelos Base).....	61
Tabla 6. Umbral 10 percentil por especie.....	64
Tabla 7. Porcentaje de Contribución por Especie.....	65
Tabla 8. Matriz de Correlación	66
Tabla 9. Valores de AUC por especie (Modelos Finales).....	67
Tabla 10. Porcentaje de Contribución por Especie (MDPE Finales).....	70
Tabla 11. Síntesis de potencial de recarga hídrica: Promedio de infiltración (mm/año).....	80

Resumen

Este estudio cuantifica el potencial de recarga hídrica a partir de cinco especies de *Pinus* (*hartwegii*, *douglasiana*, *montezumae*, *pseudostrobus* y *teocote*) en el centro del Eje Neovolcánico y porción norte de la Sierra Madre del Sur. A partir de Modelos de Distribución Potencial de Especies (MDPE), mediante el algoritmo de Máxima Entropía (Maxent) y la estimación del balance hídrico del suelo, donde se integraron predictores ambientales de precipitación, temperatura (variables bioclimáticas) y modelo digital de elevación para el periodo 1980-2020, junto con los registros de presencia de especies.

La evaluación de los MDPE base se realizó mediante curvas AUC, análisis de contribución de variables y matrices de correlación, dichos modelos mostraron alta precisión predictiva con valores que van de 0.849 (*Pinus teocote*) y 0.957 (*Pinus douglasiana*) en los modelos simplificados. Así mismo se estimó la recarga potencial mediante el balance hídrico del suelo, a partir de los productos medios anuales de escurrimiento superficial (R_0), evapotranspiración real (ET) y precipitación (P).

La innovación metodológica consistió en cruzar los productos correspondientes a los MDPE simplificados, con las clases de bosque (Pino-Encino, Pino, Oyamel, Encino-Pino y Encino) extraídos de la Serie VII de Uso y Cobertura de Suelo de INEGI mediante el análisis de tabulación cruzada (Crostabb), generando mapas que identifican las áreas de superposición, entre: Las zonas de idoneidad potencial para cada especie de *Pinus* y las coberturas forestales existentes. A partir de estas áreas de intersección, se extrajeron las tasas de infiltración específicas para cada combinación especie-bosque, permitiendo cuantificar con precisión el aporte hídrico de cada escenario.

Los resultados derivados del análisis de intersección entre los MDPE y las coberturas forestales permitieron identificar que la especie *Pinus hartwegii* posee la mayor capacidad de infiltración (77.05 mm/año), superando los (40.08 mm/año) de la especie *Pinus Douglasiana*. Crucialmente con este análisis de tabulación cruzada se muestra que los bosques de pino-encino presentes dentro de las áreas de distribución potencial de *P. hartwegii* funcionan como 'hotspots' de recarga. Esto demuestra que las áreas predichas por los MDPE, cuando coinciden con la cobertura forestal real, representan las zonas de más alta prioridad para la reforestación estratégica.

Esta investigación proporciona criterios científicos para programas de conservación que mitiguen los efectos del cambio climático, optimicen la gestión de acuíferos en regiones con estrés hídrico y fortalezcan la adaptación ante eventos climáticos extremos, integrando la preservación forestal con la seguridad hídrica nacional.

1. Introducción

La creciente presión a la que han estado expuestos los recursos hídricos en México, donde según la CONAGUA (2021) el 39% del abastecimiento depende de fuentes subterráneas y 115 acuíferos presentan condición de sobreexplotación, ha posicionado la recarga natural como un proceso primordial para la seguridad hídrica del país. Los ecosistemas forestales, particularmente los bosques de clima templado, poseen un papel fundamental en el ciclo hidrológico y los mecanismos de intercepción y almacenamiento de agua.

En este contexto, el género *Pinus* emerge como un componente ecológico clave. México es reconocido como centro de diversidad para este género, albergando cerca del 42% de las especies a nivel mundial con un endemismo superior al 55% (Sánchez, 2016). Sin embargo, estos ecosistemas enfrentan presiones antrópicas y climáticas crecientes, con una pérdida estimada de 155,000 hectáreas anuales (FAO & CONAFOR, 2015) que compromete severamente sus funciones hidrológicas.

La porción central del Eje Neovolcánico y norte de la Sierra Madre del Sur constituye una región prioritaria para este estudio, al concentrar una alta diversidad de pinos y representar una zona crítica de recarga para cuencas con alto estrés hídrico. No obstante, se desconoce con precisión qué especies de *Pinus* presentan mayor potencial para favorecer los procesos de infiltración y recarga de acuíferos en esta región.

Esta investigación integra modelado ecológico e hidrológico para cuantificar el potencial de recarga de las especies *Pinus* (*hartwegii*, *douglasiana*, *montezumae*, *pseudostrobus* y *teocote*), mediante la aplicación de Modelos de Distribución Potencial de Especies (MDPE) y el método de balance hídrico del suelo. El estudio busca identificar sinergias entre conservación de biodiversidad y seguridad hídrica, proporcionando bases científicas para programas de reforestación estratégica y gestión sostenible de recursos forestales e hídricos.

1.1. Antecedentes

La identificación de las zonas potenciales de recarga es de suma importancia en vías de fomentar la correcta gestión de los recursos hídricos, esto principalmente en regiones sujetas a una alta demanda como en el centro de México. Se han desarrollado distintas metodologías que abordan esta problemática, donde existe una brecha en la integración entre el modelo ecológico de distribución de especies forestales y la cuantificación de la recarga potencial de agua. A partir de esto, con la presente investigación se integran los Modelos de Distribución Potencial de Especies (MDPE), con el método de balance hídrico del suelo en vías de identificar las áreas idóneas para las 5 especies de *Pinus* propuestas (*hartwegii*, *douglasiana*, *montezumae*, *pseudostrobus* y *teocote*) y cuantificar su capacidad específica para favorecer la infiltración. A continuación, se recopila una serie de antecedentes metodológicos que fundamentan este enfoque integrador.

1.1.1. Enfoques basados en SIG y Análisis Multicriterio

La identificación de zonas de recarga hídrica mediante técnicas de modelado espacial ha sido abordada desde múltiples perspectivas metodológicas. Hernández et al. (2020) integraron Sistemas de Información Geográfica (SIG) con análisis multicriterio y la Teoría de los Sistemas de Flujo en la cuenca del río Ayuquila-Armería. Utilizaron ocho indicadores superficiales: litología, topografía, suelos, vegetación, pendiente, precipitación e Índice Topográfico de Humedad (ITH). Mediante combinación lineal ponderada, generaron un mapa de potencial recarga-descarga con cinco clases, identificando que el 22% del área presentaba muy alto potencial de recarga, 58% potencial alto, 15% medio, 3% bajo y 1% muy bajo. Las zonas de descarga se localizaron principalmente en la planicie costera de Jalisco y Colima.

En una aproximación metodológica similar, Lara et al. (2021) aplicaron SIG y análisis multicriterio en la subcuenca del Río Chambo. Consideraron la dinámica de flujos hidrológicos y su interacción con componentes ambientales superficiales. Incorporaron variables como litología, topofomas, pendiente, textura de suelo, cobertura vegetal y uso de suelo, identificando que las zonas de recarga se concentraban en las áreas de mayor elevación y cobertura forestal intacta, mientras que las descargas predominaban en valles y llanuras aluviales con suelos de baja permeabilidad.

1.1.2. Perspectiva del Balance Hídrico Cuantitativo

Desde la perspectiva del balance hídrico cuantitativo, Cruz et al. (2013) estimaron la recarga del acuífero de La Paz, BCS, aplicando la Ecuación General del Balance Hidrológico. Utilizaron información oficial de la CONAGUA sobre profundidad de nivel estático, conductividad, transividad hidráulica y espesor de la capa acuífera. Sus resultados revelaron una condición crítica de sobreexplotación, con un déficit de 9.70 Mm³ anuales, donde las extracciones (32.69 Mm³ año⁻¹) superaban significativamente a la recarga natural (22.98 Mm³ año⁻¹), caracterizando al acuífero como sobreexplotado.

1.1.3. Modelación Predictiva bajo Escenarios de Cambio Climático

En el ámbito de la modelación predictiva bajo escenarios de cambio climático, Guerrero et al. (2020) desarrollaron una metodología integral que combina simulación hidrológica con modelos de cambio de uso de suelo para el año 2050. Utilizaron clasificación supervisada y cadenas de Márkov con variables explicativas de infraestructura, topografía y clima, proyectando una reducción del 15-20% en la recarga potencial para 2050 debido al cambio climático y la expansión urbana, lo que enfatiza la urgencia de estrategias de adaptación.

1.1.4. Modelo de Distribución de Especies con Maxent

Específicamente en modelado de distribución de especies con Maxent, Tesfamariam et al. (2022) aplicaron el algoritmo de Máxima Entropía para la rehabilitación de *Podocarpus falcatus* en el escarpe sureste de Etiopía. Recolectaron datos de presencia mediante trabajo de campo y seleccionaron predictores topográficos, edáficos y bioclimáticos, identificando a la altitud (37.5%) y precipitación del trimestre más seco (30.8%) como variables más influyentes, y determinando que el 48% del área de estudio era apta para restauración con un AUC de 0.783. Este estudio demostró la utilidad de Maxent en la identificación de áreas prioritarias para restauración ecológica.

Finalmente, Cruz et al. (2014) propusieron una metodología robusta de selección de predictores ambientales mediante remuestreo Bootstrap para modelado de distribución de especies en Maxent. Evaluaron 56 covariables para cinco especies del Bosque Húmedo de Montaña mexicano, demostrando que los modelos simplificados mantenían precisiones comparables sin diferencias significativas ($p < 0.05$) en curvas COR, validando la eficacia de la selección de variables.

Estos antecedentes evidencian la necesidad de integrar modelado ecológico e hidrológico para identificar especies forestales con mayor potencial de recarga, vacío que esta investigación aborda mediante MDPE y balance hídrico para cinco especies de *Pinus* en el centro de México.

1.2. Objetivo General

Estimar la recarga de agua subterránea bajo diferentes escenarios de presencia de especies de *Pinus* en la porción central del Eje Neovolcánico y norte de la Sierra Madre del Sur, mediante la aplicación de modelos de distribución de especies y el método de balance hídrico del suelo para evaluar el potencial de infiltración que ofrece cada especie.

1.2.1. Objetivos Específicos

- Inventariar y geoespacializar las especies de *Pinus* de interés (*P. hartwegii*, *P. douglasiana*, *P. montezumae*, *P. pseudostrobus* y *P. teocote*) a partir de bases de datos de registros de especies para determinar su distribución actual en la zona de estudio.
- Recopilar y procesar la información climática de: precipitación (P), temperatura (T) y de balance hídrico del suelo: evapotranspiración real (ET) y escurrimiento superficial (R_o) de TerraClimate para el periodo 1980-2020, para la generación de los Modelos de Distribución Potencial de Especies (MDPE) y el cálculo de la recarga potencial.
- Generar las 19 variables bioclimáticas a partir de la precipitación mensual acumulada, temperatura máxima promedio y temperatura mínima promedio para el periodo 1980-2020 utilizando el módulo Bioclimatic Variables, como insumo para los MDPE iniciales.
- Desarrollar los MDPE iniciales para cada especie propuesta utilizando las 19 variables bioclimáticas y el Modelo Digital de Elevación (DEM), evaluando su rendimiento mediante curvas AUC e identificando las variables explicativas con mayor peso en cada modelo.

- Calibrar y optimizar los MDPE iniciales mediante análisis de matriz de correlación para eliminar variables redundantes que dupliquen información, manteniendo solo aquellas con contribución significativa e independiente.
- Generar MDPE finales simplificados con las variables seleccionadas del análisis de correlación, comparando los valores de AUC con respecto a los modelos iniciales para validar la eficiencia de la simplificación.
- Evaluar el desempeño predictivo de los MDPE mediante análisis de omisión y valores de AUC para identificar qué especie posee mayor potencial de distribución en el área de estudio.
- Estimar los componentes del balance hídrico (precipitación, evapotranspiración real y escurrimiento superficial medio anual) para el periodo 1980-2020 en el área de estudio.
- Cuantificar la recarga potencial mediante el método de balance hídrico con los datos medios anuales de precipitación, evapotranspiración y escurrimiento, para comparar el potencial de infiltración de cada especie de *Pinus* propuesta.
- Identificar sinergias espaciales entre las áreas de distribución potencial de cada especie y las coberturas forestales existentes mediante análisis de tabulación cruzada (Crosstab), para determinar las combinaciones especie-bosque con mayor potencial de recarga hídrica.

1.3. Hipótesis

Las áreas de distribución potencial para la especie *Pinus hartwegii* que fueron identificadas a partir de los MDPE en la porción central del Eje Neovolcánico y norte de la Sierra Madre del Sur, representan las zonas con una mayor capacidad de infiltración y recarga hídrica (>75 mm anuales), especialmente en los sectores donde forma parte de las asociaciones forestales Pino-Encino, constituyendo áreas prioritarias para la conservación y restauración forestal con fines de seguridad y gestión hídrica nacional.

1.4. Justificación

La relación entre los bosques y el agua resulta determinante para la disponibilidad de los recursos hídricos, tanto superficiales como subterráneos, dado que los ecosistemas forestales intervienen en procesos clave del ciclo hidrológico como la interceptación de precipitación, la evapotranspiración, la captación de humedad atmosférica y, de manera crítica, la infiltración en el suelo. Los bosques no solo favorecen la recarga de acuíferos gracias a su alta capacidad de almacenamiento, sino que actúan como barreras de protección frente a sedimentos y contaminantes derivados de actividades humanas en las zonas altas de las cuencas, contribuyendo así a mantener la calidad del agua disponible y a reducir los procesos erosivos.

En el contexto del cambio climático, el incremento de las temperaturas y la modificación de los patrones de precipitación impactarán de manera directa en la hidrología regional, aumentando la frecuencia e intensidad de riesgos hidrogeológicos como inundaciones, sequías y deslaves. Por ello, contar con bosques protegidos y sujetos a una gestión sostenible representa una alternativa estratégica para reducir los efectos adversos tanto en los ecosistemas como en las poblaciones humanas. Sin embargo, la magnitud de dichos beneficios hidrológicos depende de factores locales como el tipo de suelo, pendiente, clima, región biogeográfica y, de manera crítica, de la composición específica de las especies forestales.

En México, la porción central del Eje Neovolcánico y norte de la Sierra Madre del Sur constituyen regiones esenciales para la regulación hídrica. Según Padilla et al. (2014), estas provincias fisiográficas favorecen una amplia diversidad de tipos de vegetación, con predominio de bosques de coníferas (31%) y encinares (28%). México concentra la mayor riqueza mundial de bosques templados de *Pinus-Quercus*, con 55 especies de *Pinus* y 138 de encinos, de los cuales aproximadamente el 85% y 70% respectivamente son endémicas.

No obstante, se estima que entre el 37% y 67% de la superficie original de estos bosques ha sido transformada por el cambio de uso de suelo, ubicándolos entre los ecosistemas más amenazados del país.

Las alteraciones de los factores climáticos y físicos afectan directamente la distribución de las especies forestales, imponiéndoles un reto adaptativo frente a presiones ambientales como la variabilidad de los ciclos hidrológicos. Cuando los rangos de temperatura y precipitación superan los límites de tolerancia de una especie, su permanencia en el ecosistema se ve comprometida, con riesgo de declinación poblacional o incluso extinción local en el largo plazo.

En este contexto, el modelado de distribución de especies mediante el algoritmo Maxent constituye una herramienta eficaz, al permitir generar predicciones espacialmente explícitas a partir de registros de presencia y relacionarlos con variables ambientales del área de estudio. Este tipo de modelación resulta particularmente útil para evaluar los efectos del cambio climático, identificar áreas potenciales para conservación, anticipar riesgos de plagas o enfermedades forestales y apoyar la gestión de especies en riesgo.

La presente investigación aporta una innovación metodológica al integrar por primera vez los Modelos de Distribución Potencial de Especies (MDPE) con la cuantificación de la recarga hídrica mediante balance hídrico del suelo, específicamente para cinco especies de *Pinus* (*douglasiana*, *hartwegii*, *pseudostrobus*, *montezumae* y *teocote*) en una región críticamente importante para la seguridad hídrica del centro de México. A partir de estos modelos se aplicó el método de balance hídrico para estimar la infiltración potencial de cada especie en el periodo 1980-2020, lo que permite identificar con precisión las especies y asociaciones forestales con mayor capacidad de recarga.

Los hallazgos de este estudio adquieren relevancia práctica al demostrar que *Pinus hartwegii* en asociación con bosques de Pino-Encino bien conservados presenta la mayor capacidad de infiltración (77.05 mm/año), superando significativamente a otras especies analizadas. Esta información resulta fundamental para:

- Orientar programas de reforestación estratégica hacia especies con mayor potencial de recarga hídrica
- Focalizar esfuerzos de conservación en las áreas identificadas como prioritarias para la seguridad hídrica
- Optimizar la asignación de recursos en programas de pago por servicios hidrológicos
- Fortalecer la planeación territorial con criterios técnicos basados en evidencia científica
- Contribuir a la adaptación al cambio climático mediante la protección de bosques con funciones hidrológicas críticas

En un país donde el 39% del abastecimiento depende de fuentes subterráneas y 115 acuíferos presentan condición de sobreexplotación, contar con herramientas científicas que identifiquen y prioricen áreas para la recarga hídrica se convierte en una necesidad urgente. Esta investigación proporciona los fundamentos técnicos para transitar hacia una gestión forestal e hídrica integrada que reconozca el valor hidrológico de las especies nativas y su potencial para enfrentar los desafíos de seguridad hídrica en el siglo XXI.

2. Marco Teórico-Conceptual

2.1. Recursos Hídricos en México

México enfrenta un estrés hídrico crítico donde la demanda supera la disponibilidad, reflejándose en la reducción de los volúmenes de agua en las fuentes subterráneas y superficiales. Uno de cada seis acuíferos presenta una condición geohidrológica de sobreexplotación, salinización y contaminación, problemáticas que se presentan principalmente al norte y centro del país, mientras que la mitad de las cuencas nacionales exhibe alta y muy alta alteración ecohidrológica de ríos. El 39% del recurso hídrico corresponde a las aguas subterráneas y representa la principal fuente de abastecimiento en todo el país, mientras que el 61% es de aguas superficiales (López, 2018).

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) es el organismo federal que administra, regula, controla y protege las aguas nacionales. Todas las actividades que realiza se enmarcan en la Ley Nacional de Agua (Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo [AECID], 2017).

2.2. Disponibilidad de agua en México

El agua subterránea representa la fuente más abundante de agua dulce en la superficie terrestre, ya que constituye el 97% del agua no congelada de acuerdo con el International Groundwater Resources Assessment Centre (IGRAC, 2021, como se citó en López, 2017). Este recurso conforma el principal reservorio global físicamente disponible, con una participación del 30.28% en contraste con el 0.31% asociado al agua superficial presente en lagos, lagunas, ríos, arroyos y presas.

En el caso de México, las estimaciones oficiales del ciclo hidrológico indican que el volumen promedio anual de precipitación alcanza 1,450 km³, de los cuales el 72% se pierde a través de los procesos de evapotranspiración, mientras que el volumen restante constituye la oferta interna renovable. Al integrar los reportes transfronterizos, la oferta total de agua asciende a 447 km³ anuales, de los cuales el 21% se asocia a la recarga de acuíferos y con los cuerpos de agua superficial. La distribución espacial de este recurso representa fuertes contrastes. La escasez hídrica se concentra en las regiones centro y norte del país, mientras que la mayor disponibilidad de agua renovable se localiza en región sur (López, 2017).

2.3. Agua subterránea en México

La gestión de las aguas subterráneas en México corresponde al Poder Ejecutivo Federal, en concordancia con lo dispuesto en el artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (1917) y en el artículo 18 de la Ley de Aguas Nacionales (1992). La organización y administración de este recurso se fundamenta en dos unidades principales: los 653 acuíferos, definidos como divisiones administrativas para la explotación y control del agua subterránea, y las 731 cuencas hidrológicas, que constituyen la base de la gestión integral del recurso hídrico.

No obstante, los límites establecidos para cada acuífero tienen un carácter convencional y se fijan con fines meramente administrativos, sin considerar criterios geológicos o naturales. Esta aproximación puede derivar una gestión inadecuada del recurso, al no reflejar completamente sus características hidrogeológicas. El artículo 3° de la Ley de Aguas Nacionales (1992) define el término "acuífero" (Figura 1) como cualquier formación geológica, o conjunto de formaciones geológicas, hidráulicamente conectadas, a través de las cuales circulan o se almacenan aguas subterráneas susceptibles de ser extraídas para su explotación, uso y aprovechamiento.

Sus límites laterales y verticales se establecen de manera convencional con fines de evaluación, manejo y administración de las aguas nacionales del subsuelo (Hatch Kuri, 2018).

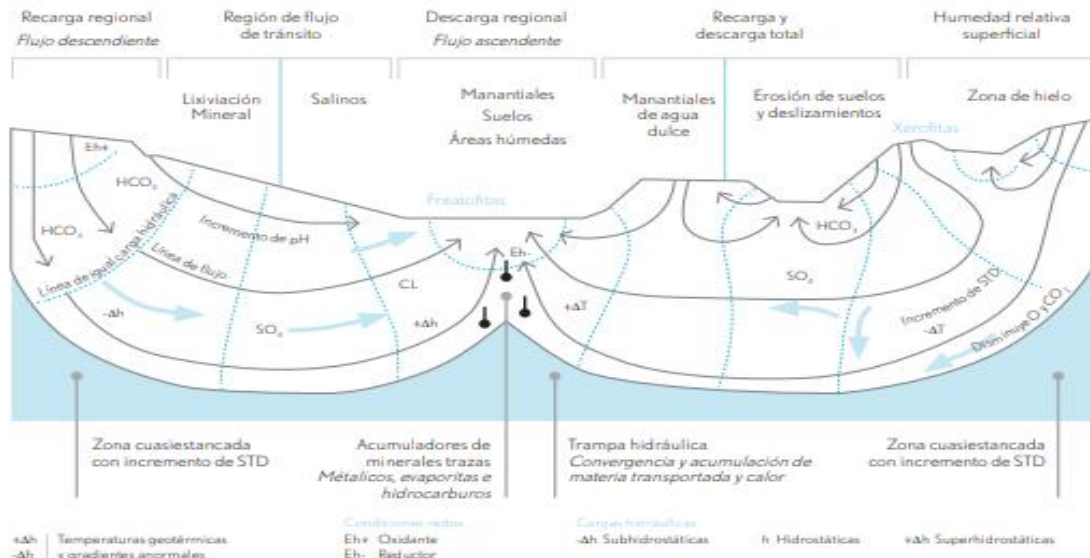


Figura 1. Diagrama del acuífero y los flujos de agua subterránea (Recuperado de Hatch Kuri, 2018).

2.4. Sobreexplotación de las aguas subterráneas

De los 653 acuíferos a nivel nacional, en 1972 se registraron 32 sobreexplotados. Esta cifra aumento a 80 en 1985, continuó creciendo hasta 104 en 2006 y alcanzo 106 en 2016, lo que representa el 16% del total.

La sobreexplotación (Figura 2) se refiere a la extracción de agua a tasas que se consideran excesivas por producir impactos negativos, tales como la reducción de los niveles (o presiones) del agua subterránea en los pozos, la reducción de los flujos de agua en puntos de descarga naturales como los manantiales, el deterioro de su calidad (presencia de contaminantes o aumento de los niveles de minerales y elementos radiactivos por encima de los señalados en la Norma) (Hatch Kuri, 2018).



Figura 2. Diagrama de Acuíferos sobreexplotados en México (CONAGUA, citado por Hatch Kuri, 2018).

Según un informe de la AECID (2017), hasta el 2013 el 55% de las aguas subterráneas del país contaban con decreto de veda, mientras que el 45% restante permitía el libre alumbramiento, es decir, la extracción de agua sin autorización de las autoridades. Esta situación incentivo la construcción indiscriminada de pozos en el sector agrícola e industrial, provocando una sobreexplotación severa, daños ambientales y prejuicios para otros usuarios.

Como consecuencia, se identificaron 115 acuíferos sobreexplotados, cuyos efectos se manifestaron en: desaparición de manantiales y lagos, disminución o pérdida de caudal base que afectó ecosistemas, hundimientos diferenciales del terreno, daños a infraestructura, descensos del nivel de saturación, incremento de costos de bombeo, deterioro de la calidad del agua, abandono de pozos y conflictos sociales por el acceso al recurso hídrico.

Para atender esta problemática, la Comisión Nacional del Agua diseñó e implementó un proyecto de ordenación de acuíferos orientado a la administración sustentable del recurso. Entre las acciones realizadas se incluyeron: delimitación de acuíferos, evaluación de la disponibilidad del agua subterránea, suspensión del libre alumbramiento, elaboración de estudios técnicos en 333 acuíferos donde se suspendió dicha práctica, y emisión de decretos de veda y zonas reglamentadas.

Las evaluaciones evidenciaron que 245 acuíferos presentaban déficit hídrico, mientras que 408 mantenían disponibilidad suficiente. Para el otorgamiento de nuevas concesiones se consideraron tanto los balances hídricos —recarga y descarga natural comprometida— como el Registro Público de Derechos de Agua, ya fuera con título, registro o pendiente de regularización.

Como resultado, el 5 de abril de 2013, el Diario Oficial de la Federación publicó ocho acuerdos generales emitidos por el titular del Poder Ejecutivo Federal, que suspendieron el libre alumbramiento en 333 acuíferos, prohibiendo la perforación de pozos, la construcción de obras de infraestructura y cualquier mecanismo destinado a la extracción o incremento de volúmenes previamente autorizados. Dichos acuerdos son provisionales y permanecerán vigentes hasta que se decreten las vedas y zonas reglamentadas correspondientes (AECID, 2017).

2.5. Ciclo Hidrológico

Maderey (2005) conceptualiza el ciclo hidrológico como un sistema integrado que regula el almacenamiento, distribución y transporte del agua en la atmósfera, biosfera, litosfera e hidrosfera. Este ciclo constituye un proceso fundamental para el equilibrio de los ecosistemas, asegurando y preservando la disponibilidad hídrica.

El agua circula constantemente entre sus diferentes estados (líquido, sólido y gaseoso) a través de la evaporación, condensación, precipitación, infiltración, escorrentía y transpiración. Maderey menciona que el ciclo inicia con la evaporación en los cuerpos de agua oceánicos y continentales, donde se forma vapor atmosférico que, a través de la condensación genera nubes y posteriormente da lugar a precipitaciones. Parte del agua precipitada al llegar a la superficie terrestre se evapora, escurre superficialmente hacia lagos y ríos y también se infiltra por medio del subsuelo para abastecer acuíferos y flujos subterráneos. Donde la infiltración funge como un proceso primordial para la recarga de fuentes subterráneas en función de las características del suelo y la cobertura vegetal las cuales son determinantes para su eficiencia (Maderey, 2005)

Hamilton et al. (2009) mencionan que los bosques tienen la capacidad de regular la infiltración a través de una serie de funciones: Interceptan la precipitación y reducen el escurrimiento superficial, facilitan la infiltración por medio del suelo y sistemas radiculares, contribuyen a la recarga por medio de los flujos subsuperficiales y regulan la humedad atmosférica a través de la evapotranspiración (Figura 3).

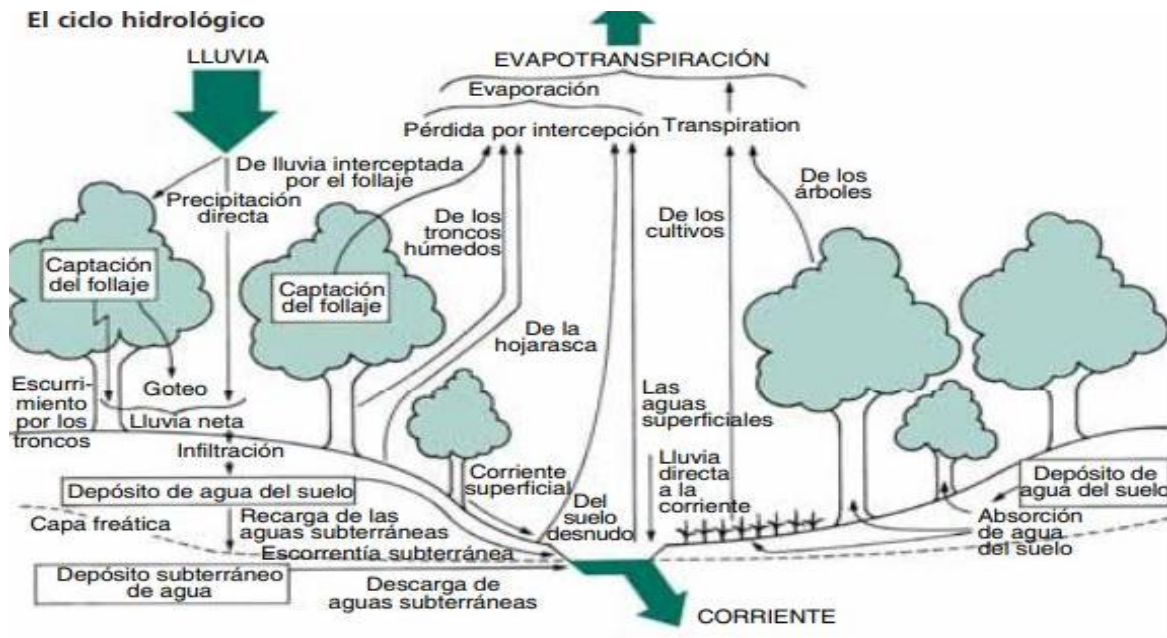


Figura 3. Ciclo Hidrológico (Hamilton et al., 2009).

Estas funciones adquieren relevancia en el contexto del cambio climático, ya que los bosques pueden amortiguar impactos hidrológicos extremos como inundaciones y sequías (Hamilton et al., 2009).

Para el presente tema de investigación, en la región de estudio (Porción central del Eje Neovolcánico y Norte de la Sierra Madre del Sur) la función regulatoria que posee la infiltración es determinante, dado que estas áreas forestales constituyen zonas prioritarias de recarga para acuíferos con estrés hídrico.

2.6. Generalidades de la recarga

La recarga de agua subterránea constituye un proceso fundamental para la sostenibilidad de los recursos hídricos, definida como el ingreso de agua hacia la zona saturada del subsuelo, donde pasa a formar parte de las reservas subterráneas. La estimación de la recarga, su calidad y origen resulta esencial en estudios relacionados con los recursos hídricos subterráneos, el transporte de contaminantes, la subsidencia del terreno y el diseño de campos de pozos interconectados.

Este proceso puede ocurrir de forma natural o artificial. La recarga natural se produce mediante la precipitación, el aporte de agua de cuerpos superficiales como ríos y lagos, y mediante transferencias desde otras unidades hidrogeológicas. Por otro lado, la recarga artificial está asociada a actividades humanas, como la irrigación, fugas en redes de abastecimiento, o la infiltración desde embalses y depósitos.

La identificación de las áreas de recarga y descarga puede realizarse mediante el uso de trazadores o mediante el análisis de redes de flujo, lo que permite comprender la dinámica del agua subterránea y orientar su manejo sostenible. El conocer las áreas de recarga o descarga en una cuenca es de suma importancia para el manejo sostenible a los acuíferos ya que con esto se pueden definir las áreas vulnerables a la contaminación (Vásquez & Vélez, 2004).

Las medidas contra la contaminación de las aguas subterráneas deben ser preferentemente protectoras: regulando, ordenando o prohibiendo determinadas actividades en diferentes zonas, o bien, estableciendo ciertas medidas de seguridad sobre actividades potencialmente nocivas. Ello es especialmente importante en acuíferos y captaciones que sirven para el abastecimiento público, a fin de evitar que diferentes agentes contaminantes alcancen el agua extraída (Expósito, 2001).

2.7. Sistemas Gravitacionales de Flujo de Agua Subterránea

Cruz et al. (2013) mencionan que mediante el análisis de las redes de flujo se pueden identificar los sistemas de flujo subterráneos a diferentes escalas espaciales y energéticas (Figura 4).

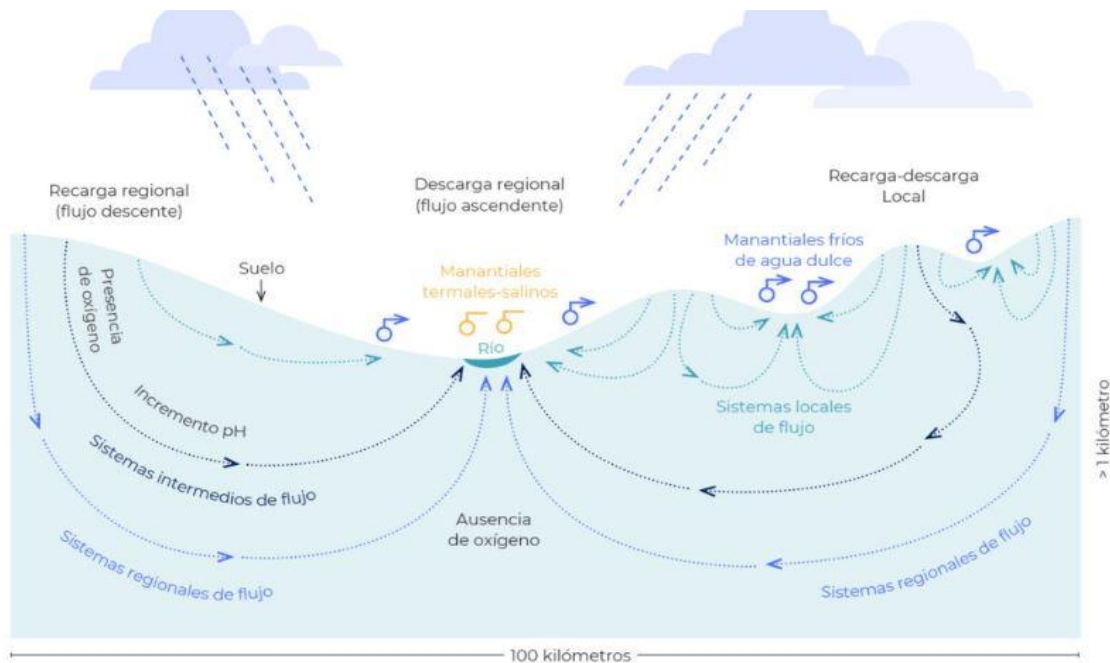


Figura 4. Diagrama Sistemas Locales y Regionales de Agua Subterránea (Tóth, citado de Álvarez, 2021).

Un sistema de flujo local desplaza el agua hacia áreas de descarga próximas con trayectorias cortas y concentradas; el sistema intermedio recorre distancias mayores atravesando divisorias y valles, en el caso del flujo regional, el agua circula por grandes distancias hasta descargar en ríos, lagos y océanos. La dinámica del agua subterránea responde a gradientes de energía potencial, desplazándose desde zonas de mayor elevación o presión hacia áreas de menor energía, integrándose así al ciclo hidrológico y manteniendo el equilibrio hídrico de los ecosistemas (Cruz et al., 2013).

En el contexto de este tema de investigación, la identificación de las zonas de infiltración potencial mediante los MDPE y el balance hídrico del suelo adquiere especial relevancia, ya que las áreas de recarga asociadas a coberturas forestales particularmente aquellas donde predomina *Pinus hartwegii* en bosques de Pino-Encino constituyen los puntos de partida de estos sistemas de flujo.

La estimación de la recarga en dichas zonas permite evaluar su capacidad de alimentación de acuíferos locales y la contribución a flujos subterráneos de mayor alcance, por ende, la importancia de la conservación forestal y la gestión sostenible del recurso hídrico a escala cuenca.

2.8. Estado de los bosques en México

De acuerdo con Chapela (2012), la política forestal de México establece que el sector debe contribuir al desarrollo económico y social sin afectar negativamente los recursos naturales del país.

La Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (2003) promueve un "Desarrollo Forestal" evaluable mediante criterios e indicadores ambientales, silvícolas, económicos y sociales, cuyo objetivo es el alcanzar una productividad óptima y sostenida de los recursos forestales sin comprometer la integridad de los ecosistemas, mejorar el ingreso y la calidad de vida de los actores del sector, y fomentar la generación de valor agregado y la diversificación productiva (Art. 30).

Además, la política forestal se considera un área prioritaria para el desarrollo nacional (Art. 29).

A pesar de estos marcos normativos, México continúa enfrentando una pérdida significativa de sus bosques. Entre 1982 y 1989 se registró una pérdida anual de 295,000 hectáreas de bosques y selvas, mientras que la FAO reporta que entre 2005 y 2010 la pérdida fue de 155,000 hectáreas anuales. Esta situación refleja la degradación progresiva de los ecosistemas forestales, la cual no ha sido detenida por los sistemas de manejo forestal implementados hasta el momento.

Cabe destacar que los bosques desempeñan un papel esencial en la regulación del ciclo hidrológico, ya que facilitan la intercepción de la precipitación, la infiltración al suelo y la recarga de acuíferos, contribuyendo así a la sostenibilidad de los recursos hídricos y al equilibrio de los ecosistemas (Chapela, 2012).

2.9. Los Bosques y el Agua

Hamilton et al. (2009) señalan que en el año 2003 se celebró el año internacional del agua dulce (AIAD), de las naciones unidas, donde se destacó la necesidad urgente de disponer de agua en el lugar correcto, en este sentido los bosques tienen una función fundamental en temas de disponibilidad y calidad. La comisión Económica para Europa advierte que la atención que se tiene en temas de agua dulce no considera la función de los ecosistemas, por lo que el fomentar conciencia en todos los sectores de la sociedad es de suma importancia para entender que los bosques son proveedores de agua en una cuenca.

Los bosques tienen un papel importante en la disponibilidad de agua subterránea; el agua que llega a los acuíferos se da a través de las corrientes superficiales que se interconectan con estas formaciones geológicas, mediante la evaporación de la humedad superficial de la vegetación, la transpiración de la humedad del suelo, a partir del agua que se infiltra, escurre y entre otros procesos más en los que interacciona el medio boscoso junto con el agua.

El contar con una cubierta forestal reduce la erosión a la que se encuentra expuesta el suelo, lo que permite que la calidad del agua no se altere derivado de la sedimentación ya que los bosques retienen sedimentos y contaminantes producidos por las actividades humanas y usos de suelo en zonas altas.

El cambio climático tendrá un impacto en la hidrología, lo cual puede manifestarse a través de la presencia de riesgos hidrometeorológicos como inundaciones, sequías, deslaves, etc. En estos riesgos la cubierta forestal puede influir ya que la presencia de bosques protegidos y sujetos a una buena ordenación puede ayudar a amortiguar los efectos del cambio climático (Hamilton et al., 2009).

2.10. *Pinus hartwegii*

Pinus hartwegii Lindl. es considerado una de las especies forestales más vulnerables ante el cambio climático. Presenta una distribución geográfica discontinua que se extiende desde el noreste de México hasta el norte de El Salvador, con mayor presencia en las zonas con mayor elevación de la Faja Volcánica Transmexicana, incluyendo el Nevado de Colima, el complejo Popocatepetl-Iztaccíhuatl, Pico de Orizaba y Cofre de Perote.

Estudios prospectivos coinciden en que el área ocupada por esta especie en el centro de México podría reducirse entre un 10% y un 70% (Figura 5) como respuesta al cambio climático, e incluso se prevé la extinción local de parte de sus poblaciones (Ramírez et al., 2000).

Esta especie adquiere especial relevancia en el presente tema de investigación no solo por su importancia ecológica y vulnerabilidad climática, sino por su potencial como especie indicadora de zonas con un alto potencial de recarga hídrica. Su alta presencia en ambientes de elevada altitud y en condiciones específicas de temperatura y humedad sugiere que las áreas donde se distribuye en base a los MDPE que indican la idoneidad ambiental pueden coincidir con zonas prioritarias de infiltración y recarga de acuíferos.

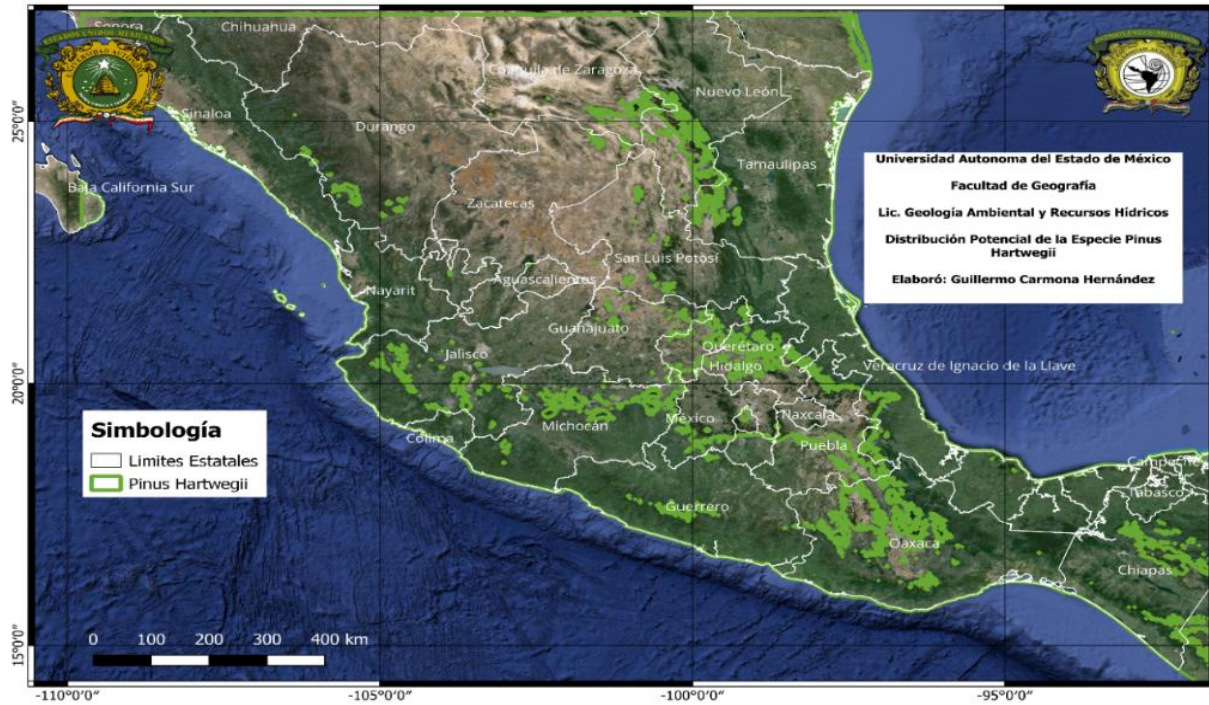


Figura 5. Distribución a Nivel Nacional de la Especie *Pinus hartwegii*. Fuente: Elaboración propia, a partir de datos obtenidos del Geoportal de la Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad (CONABIO).

2.11. *Pinus teocote*

Pinus teocote Schldl. & Chamk. es una conífera que mide hasta 25 m de altura, caracterizada por una copa redondeada, ramas espaciadas, corteza pardo-rojiza o grisácea de textura exfoliante y presencia de resina. Su distribución geográfica abarca los estados de Sinaloa, Durango, Coahuila, Querétaro, Nuevo León, Hidalgo, Chiapas, Chihuahua, Zacatecas, Aguascalientes, San Luis Potosí, Guerrero, Guanajuato, Jalisco, Nayarit, Michoacán, Estado de México, Morelos, Puebla, Oaxaca, Tamaulipas, Tlaxcala y Veracruz (Ramírez, 2000).

La importancia de esta especie en el marco de esta investigación está representada por su amplia distribución dentro del Eje Neovolcánico y la Sierra Madre del Sur, regiones prioritarias para la recarga hídrica.

Su presencia bajo diversas condiciones ambientales que van desde altitudes medias hasta zonas de transición ecológica, la convierten en un taxon indicador de hábitats con potencial moderado a alto de infiltración, especialmente en áreas donde coexiste con bosques mixtos de pino-encino. Los MDPE permite identificar no solo áreas idóneas para su conservación, si no también zonas donde los procesos hidrológicos superficiales y subterráneos pueden ser optimizados mediante la restauración forestal.

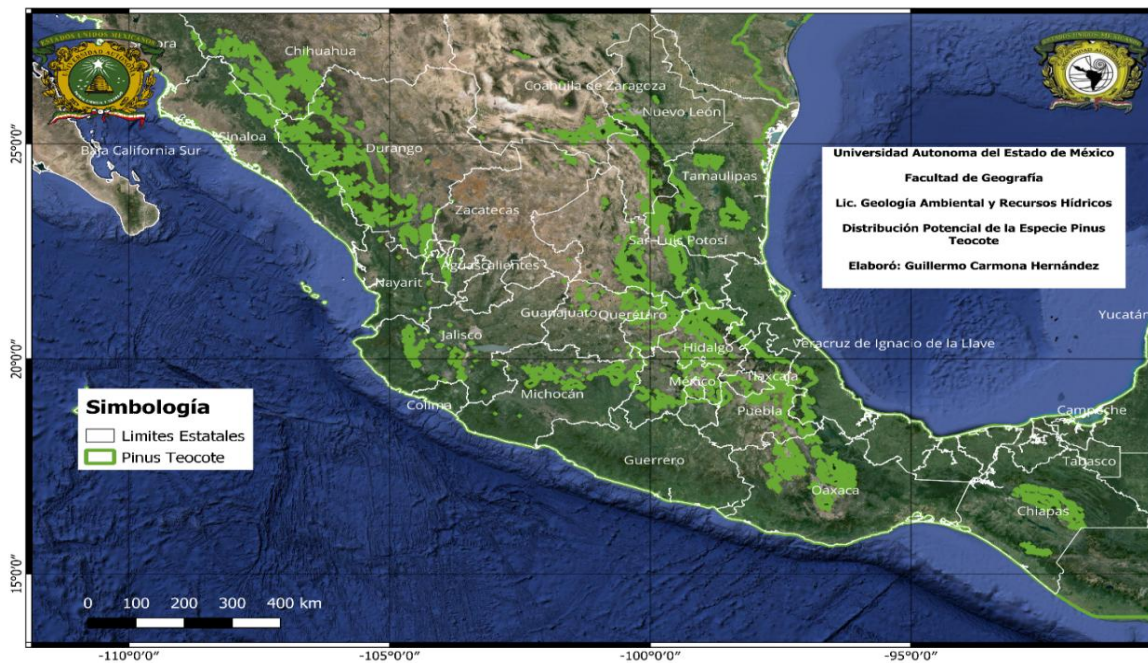


Figura 6. Distribución a Nivel Nacional de la Especie *Pinus teocote*. Fuente: Elaboración Propia, a partir de datos obtenidos del Geoportal de la Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad (CONABIO).

2.12. *Pinus pseudostrabus*

Pinus pseudostrabus Lindl. es un árbol perennifolio que mide entre 25 y 40 m de altura, con un diámetro de fuste de 40 a 80 cm, porte recto y presenta buena poda natural que deja entre el 30% y 50% de su altura libre de ramas.

Especie originaria de México, Guatemala y Honduras, se encuentra en laderas de montaña entre los 1,600 y 3,200 msnm.

En México su distribución abarca la Sierra Madre Oriental, el Eje Neovolcánico, la Sierra Madre del Sur y la Sierra Madre de Chiapas. Se tiene registros de presencia en los estados de Jalisco, Colima, Estado de México, Hidalgo, Ciudad de México, Guerrero, Morelos, Oaxaca, Coahuila, Guanajuato, Chiapas, Puebla, Querétaro, Nuevo León, San Luis Potosí, Tamaulipas, Veracruz y Tlaxcala (Delgado, 2014).

En el contexto de esta investigación es una especie clave debido a su amplia presencia dentro del área de estudio (Figura 7), particularmente en la porción central del Eje Neovolcánico Transversal y su asociación bajo condiciones ambientales que favorecen condiciones de infiltración. Su predominancia en elevaciones medias a altas y su capacidad para desarrollarse en suelos profundos y bien drenados sugieren que las áreas identificadas como idóneas mediante los MDPE pueden corresponder a zonas de moderado a alto potencial de recarga hídrica, especialmente donde coexiste con bosques de Pino-Encino.

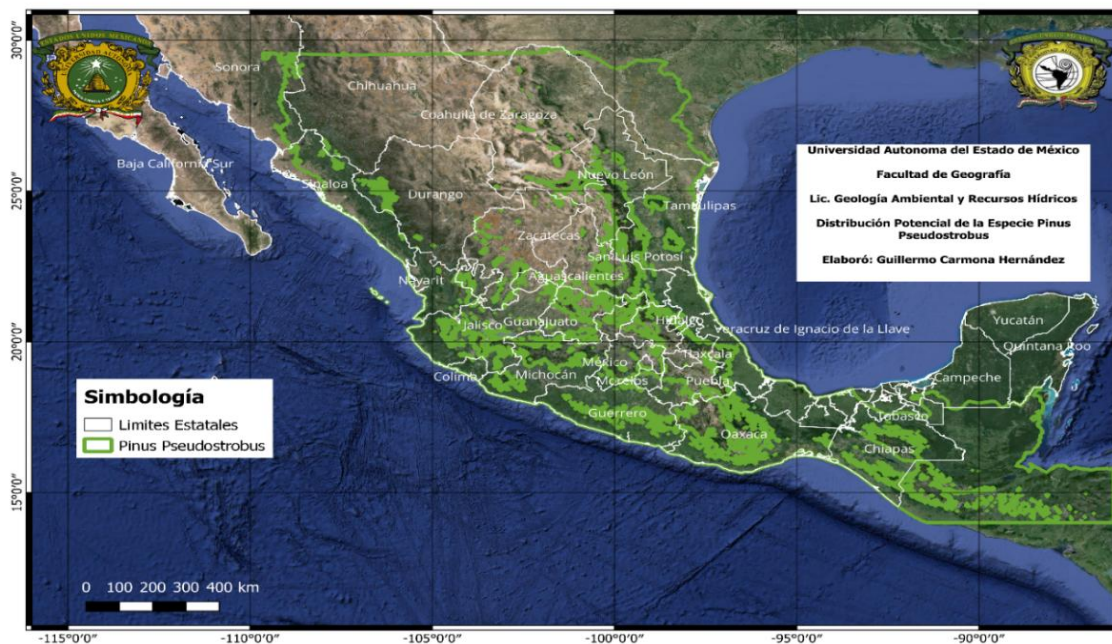


Figura 7. Distribución a Nivel Nacional de la Especie *Pinus pseudostrobus*. Fuente: Elaboración Propia, a partir de datos obtenidos del Geoportal de la Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad (CONABIO).

2.13. *Pinus montezumae*

Pinus montezumae Lamb. es un árbol que pertenece a la familia *Pinaceae*, que alcanza una altura que va de los 20 a 30 m de altura, con un tronco de hasta 80 cm de diámetro, corteza de tonalidad café rojizo, textura áspera y agrietada desde que es joven, ramas extendidas que forman una capa irregular redondeada.

Es una especie originaria de México y Guatemala que se distribuye en elevaciones que van desde los 1,200 hasta los 3,500 msnm. Su rango geográfico se extiende al norte de la Sierra Madre Oriental, abarcando también la Sierra Madre del Sur y la Sierra Madre de Chiapa, con registros en los estados de Nuevo León, Tamaulipas, Nayarit, San Luis Potosí, Jalisco, Colima, Michoacán, México, Ciudad de México, Morelos, Puebla, Querétaro, Hidalgo, Zacatecas, Tlaxcala, Guerrero, Oaxaca, Chiapas y Veracruz (Delgado, 2014).

Dentro de esta investigación es de importante relevancia por su amplia distribución en la región central del Eje Neovolcánico y su capacidad de adaptación a diversos tipos de suelo y condiciones topográficas. Los MDPE aplicados a esta especie permiten identificar zonas con condiciones ambientales óptimas para su establecimiento, las cuales coinciden con áreas que tiene un potencial de infiltración que va de 65.668 a 67.039 mm/año.

Esta correlación espacial entre idoneidad de hábitat y potencial de recarga refuerza la utilidad de esta especie como indicadora para programas de reforestación estratégica orientados a la conservación hídrica.

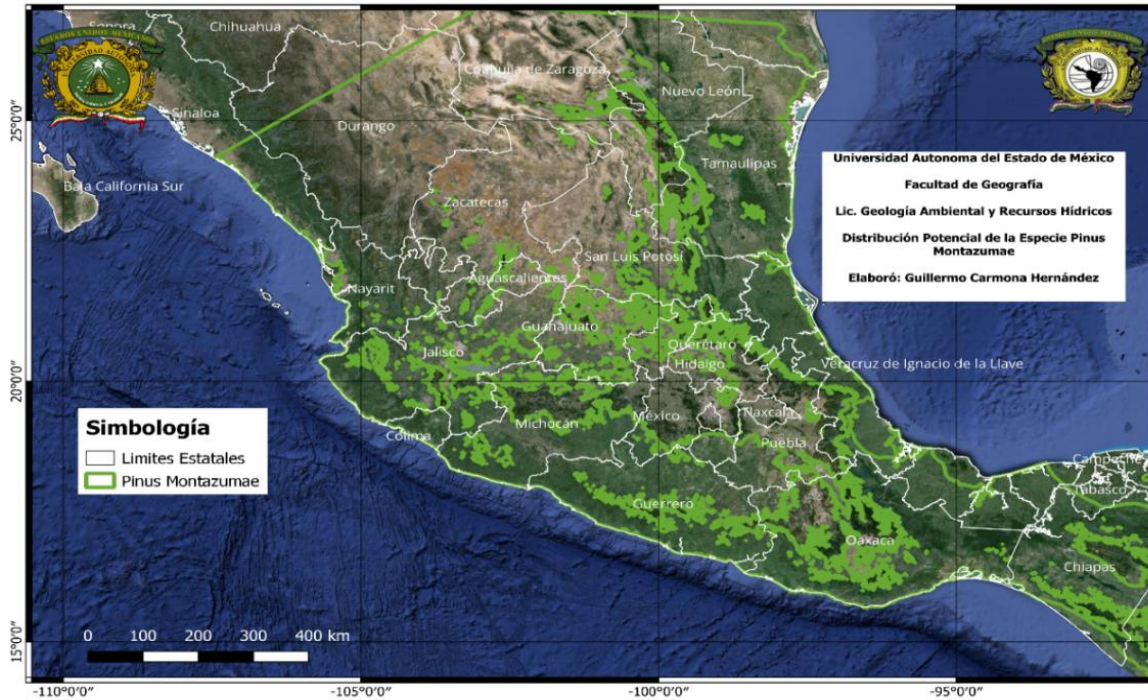


Figura 8. Distribución a Nivel Nacional de la Especie *Pinus montezumae*. Fuente: Elaboración Propia, a partir de datos obtenidos del Geoportal de la Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad (CONABIO).

2.14. *Pinus douglasiana*

Pinus douglasiana Martínez. es una conífera que se distribuye en las zonas subtropicales y templadas cálidas del oeste y centro de México, principalmente en la Sierra Madre Occidental, vertiente del Océano Pacífico a través de la Sierra Madre del Sur y Sierra Madre de Chiapas. Esta especie alcanza entre 20 y 40 m de altura, con una copa redondeada y densa, corteza áspera, rojiza y escamosa, dividida en placas irregulares y ramas extendidas agrupadas en la parte superior del tronco.

Se pueden encontrar registros en los estados de Durango, Chihuahua, Sonora, Sinaloa, Nayarit, Jalisco, Michoacán, Colima, México, Guerrero, Oaxaca y Chiapas en altitudes que rondan entre los 1500 y 2500 msnm (PRODEFO, 2019).

En el contexto de esta investigación dicha especie adquiere relevancia debido a su distribución en el occidente y centro de México, incluidas las porciones centrales del Eje Neovolcánico y norte de Sierra Madre del Sur (Figura 9), así como por su afinidad bajo condiciones ambientales relacionadas con la disponibilidad hídrica estacional. Los MDPE correspondientes a *P. douglasiana* permiten identificar áreas con condiciones óptimas de temperatura y precipitación que al mismo tiempo pueden presentar características edáficas y topográficas favorables para la infiltración.

Aunque su potencial de infiltración estimado resulto menor en comparación de otras especies analizadas, su amplia distribución y adaptabilidad la convierten en una especie importante para estrategias de conservación y restauración forestal, especialmente donde la precipitación estacional y la profundidad del suelo permiten una recarga efectiva.

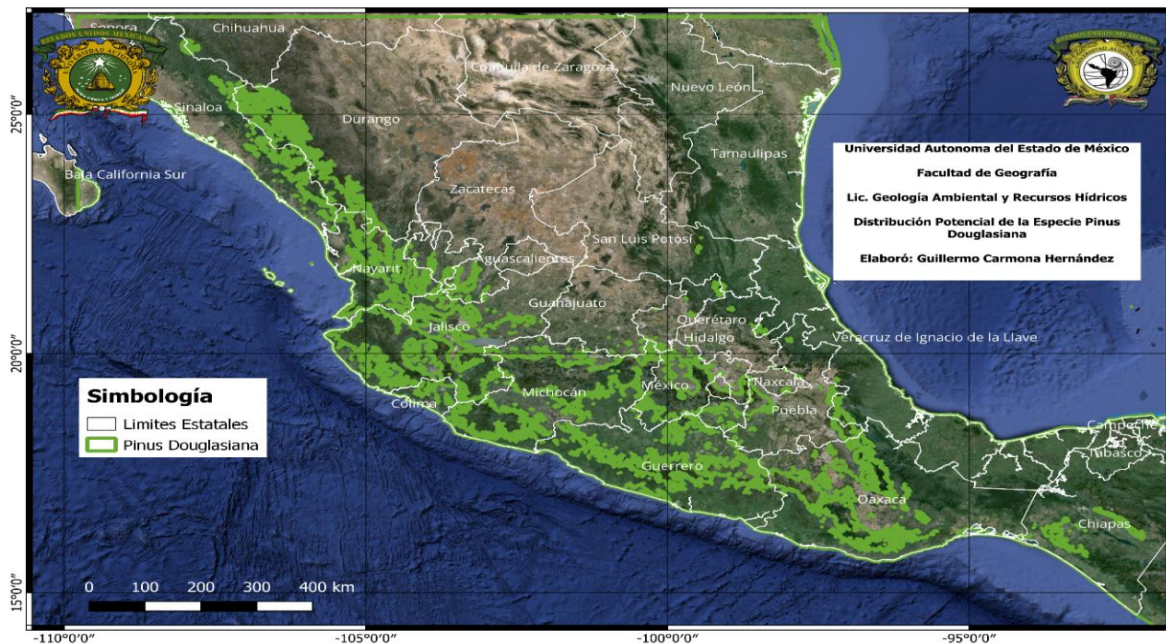


Figura 9. Distribución a Nivel Nacional de la Especie *Pinus douglasiana*. Fuente: Elaboración propia, a partir de datos obtenidos del Geoportal de la Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad (CONABIO).

2.15. Sistemas de información Geográfica

Rodríguez y Olivella (2010) recopilan diversas conceptualizaciones sobre los sistemas de información geográfica (SIG), destacando que Chrisman los define en términos operativos como un conjunto de acciones organizadas para medir y analizar fenómenos y procesos geográficos, enfatizando entidades espaciales y sus relaciones; Burrough los conceptualiza como una poderosa caja de herramientas para la captura, almacenamiento, manipulación y visualización de datos geoespaciales; Smith los describe como un sistema de base de datos con información indexada geográficamente que permite realizar consultas espaciales; y Cartero enfatiza el aspecto institucional, definiendo los SIG como una entidad organizada que integra tecnología, bases de datos, expertos y recursos económicos continuos para garantizar su funcionamiento y actualización.

En conjunto, estas perspectivas evidencian que los SIG no son meras herramientas tecnológicas, si no sistemas integrales que combinan información espacial, metodologías analíticas y capacidades organizativas, aplicables en múltiples ámbitos del conocimiento (Rodríguez y Olivella, 2010).

Para el desarrollo de esta investigación, los SIG constituyen una plataforma fundamental en el desarrollo de los MDPE, procesamiento de variables ambientales, la estimación del balance hídrico del suelo y la generación de análisis de tabulación cruzada (Crostabb) entre áreas de idoneidad de especies y coberturas forestales. La integración de estas capacidades analíticas permitió no solo modelar la distribución de cinco especies de *Pinus*, si no también cuantificar su potencial de infiltración y recarga hídrica.

2.16. Distribución de especies

Los modelos de distribución de especies representan una herramienta que sintetiza relaciones entre especies y variables ambientales. Mateo et al. (2011) explican que estos modelos generan mapas de idoneidad ambiental a partir de relaciones matemáticas entre registros de presencia y variables predictoras, permitiendo identificar las condiciones que delimitan el hábitat potencial de las especies. La evaluación de los MDPE emplea métricas como el AUC (Área bajo la curva ROC), donde los valores >0.9 indican excelente precisión predictiva, $0.7-0.9$ precisión buena, $0.5-0.7$ regular y <0.5 desempeño inferior al azar.

Un aspecto importante de mencionar en la implementación de los MDPE es la selección del punto de corte para transformar los modelos continuos de idoneidad en mapas binarios de presencia/ausencia. Mateo et al. (2011) señalan que una estrategia robusta consiste en establecer umbrales que excluyan un porcentaje determinado de presencias (entre 5% y 10%), los cuales se obtienen al interceptar los registros de presencia con los valores de idoneidad de los modelos.

Dentro de esta investigación los MDPE se desarrollaron mediante el algoritmo de máxima entropía (Maxent) para cinco especies de *Pinus* (*hartwegii*, *teocote*, *pseudostrobus*, *montezumae* y *douglasiana*) utilizando 19 variables bioclimáticas derivadas de datos mensuales de precipitación y temperatura para el periodo de 1980-2020, junto con el modelo digital de elevación. La validación de estos modelos se realizó mediante curvas ROC y valores de AUC, mientras que la selección de variables predictoras se optimizó mediante un análisis de correlación para evitar multicolinealidad. Los umbrales de corte se establecieron utilizando el percentil 10 de probabilidad de presencia, permitiendo generar mapas binarios que identifican áreas de alta idoneidad ambiental para cada especie, los cuales posteriormente se cruzaron con coberturas forestales mediante análisis de tabulación cruzada (Crosstab) para estimar su potencial de infiltración.

2.17. Máxima entropía (Maxent)

Maxent es un algoritmo de modelado de distribución de especies que busca representar la distribución de probabilidad de máxima entropía (es decir, la más uniforme posible) sujeta a restricciones derivadas de condiciones ambientales en los puntos de presencia conocidos. Birhane et al. (2022) explican que este enfoque parte de una distribución inicial y la ajusta iterativamente para maximizar la probabilidad de datos de presencia observados, generando como resultado un mapa de idoneidad ambiental continua donde cada pixel recibe un valor proporcional a su adecuación para la especie.

Estudios comparativos destacan que Maxent mantiene un alto rendimiento predictivo incluso con un número limitado de registros de presencia, lo que lo hace útil para especies con datos escasos o distribuidos de manera irregular.

Fundamento matemático del algoritmo

El algoritmo de Maxent permite estimar la distribución de una especie, a partir de la distribución de probabilidad de máxima entropía que satisface las restricciones impuestas por los valores de las variables ambientales en los sitios de presencia (Birhane et al., 2022). Matemáticamente Maxent modela la probabilidad de presencia de una especie en una celda x mediante una función exponencial de las variables predictoras (Phillips et al., 2006; Elith et al., 2011):

$$P(y = 1|x) = \frac{\exp(\sum_{j=1}^k \beta_j h_j(x))}{\sum_{x^1 \in X} \exp(\sum_{j=1}^k \beta_j h_j(x^1))}$$

Donde: $P(y=1 | x)$, es la probabilidad de presencia de la especie en la celda x ; $h_j(x)$ son las características ambientales (features) derivadas de las variables predictoras (temperatura, elevación, etc.); β_j son los coeficientes (pesos) estimados por el algoritmo para cada característica. El denominador es una constante de normalización (z) que asegura que las probabilidades sumen 1 sobre todos los pixeles del área de estudio X .

El algoritmo emplea regularización para evitar sobreajuste, penalizando modelos complejos y favoreciendo así la generalización a datos independientes. La salida del modelo se expresa en términos de ganancia, que representa cuanto mejora la probabilidad promedio de las presencias respecto a una distribución aleatoria (Birhane et al., 2022).

En la presente investigación se implementó en el módulo Habitat Suitability / Species Distribution Modeling de TerrSet. Donde se utilizaron registros de presencia provenientes de Global Biodiversity Information Facility (GBIF) y variables ambientales (19 variables bioclimáticas + DEM). Dicho proceso se sometió a una validación para obtener modelos finales robustos y ecológicamente interpretables para la estimación de zonas de idoneidad ambiental vinculadas a la recarga hídrica.

2.18. Recarga Hídrica del Suelo para la estimación de la recarga

La estimación de la recarga potencial de acuíferos requiere de métodos que permitan cuantificar el agua que percola más allá de la zona radicular, es por eso que el método del balance hídrico del suelo se destaca por su base conceptual sólida, al tener una aplicación directa en el principio de conservación de masa al sistema suelo-agua-planta-atmósfera (Allen et al., 1998).

La formulación teórica integral de este balance es establecida por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) para el cálculo de la evapotranspiración, este balance considera la totalidad de los flujos de agua en la zona radicular:

$$ET = I + P - R_0 - DP + CR \pm \Delta SF \pm \Delta SW$$

Para fines del presente estudio, se establece la siguiente nomenclatura fija, que se aplicará en el desarrollo de la metodología de esta investigación:

Tabla 1. Nomenclatura establecida para cálculo de la recarga potencial

Símbolo	Variable
P	Precipitación
R₀	Escorrentamiento Superficial
ET	Evapotranspiración Real
I	Infiltración (Recarga potencial)

Aplicando este principio a escala regional y para un periodo a largo plazo, se introducen simplificaciones: flujos horizontales despreciables ($\Delta SF \approx 0$), cambio de almacenamiento nulo ($\Delta SW \approx 0$), balance natural sin riego ($I_{riego} = 0$), y sin ascensión capilar ($CR \approx 0$). Por lo que la ecuación se reduce a:

$$DP = P - ET - R_0$$

Dado que la percolación profunda (DP) representa la recarga, para fines de esta investigación se denotará como infiltración (I):

$$I = P - ET - R_0$$

Esta expresión derivada del marco conceptual de la FAO, permite calcular la recarga potencial como el residuo de la precipitación una vez descontadas las pérdidas por evapotranspiración y escorrentía superficial, construyendo así la base metodológica para la estimación dentro del área de estudio.

3. Metodología

3.1. Caracterización de la zona de Estudio

El área de estudio comprende la porción central del Eje Neovolcánico Transmexicano y la porción norte de la Sierra Madre del Sur (Figura 10). Esta región se seleccionó por su importancia biológica, su alta diversidad de especies del género *Pinus*, así como por el potencial de recarga en acuíferos amenazados por estrés hídrico en el centro de México.

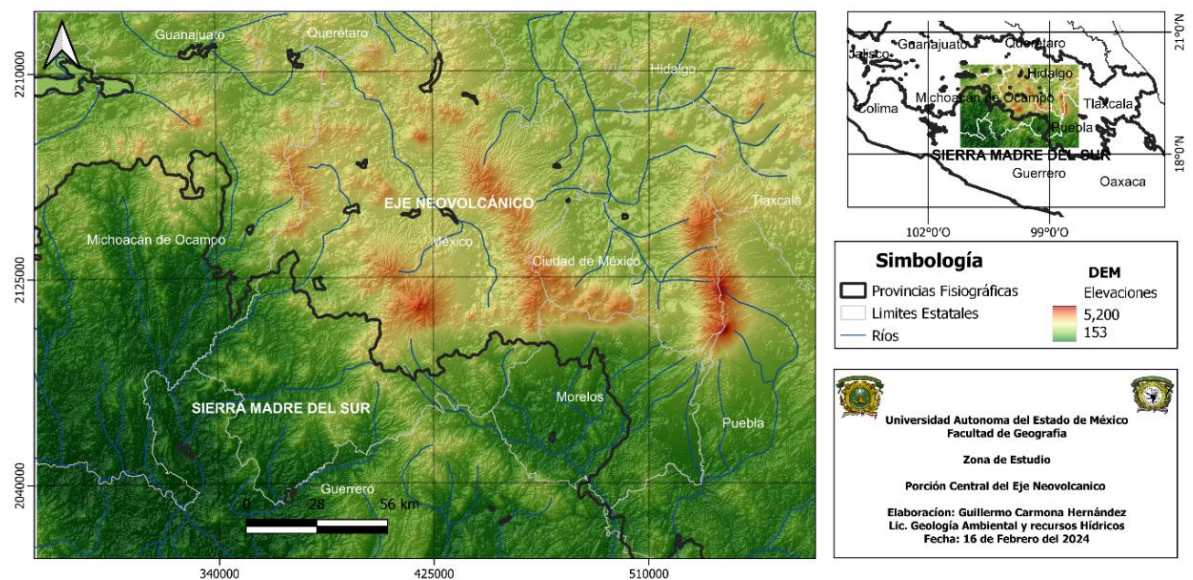


Figura 10. Ubicación de la Zona de Estudio. Fuente: Elaboración Propia, a partir de datos obtenidos del Geoportal de la Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad (CONABIO).

El eje Neovolcánico Transmexicano está constituido por cordilleras y volcanes alineados sobre una franja que atraviesa el territorio mexicano desde Cabo Corrientes, Nayarit, hasta la Sierra de Chiconquiaco, Veracruz, aproximadamente sobre el paralelo 19° N. Dentro de esta provincia fisiográfica se da la subducción de las placas de Cocos y Rivera por debajo de placa Norte Americana. La Sierra Madre del Sur por su parte, se extiende desde Michoacán hasta el Istmo de Tehuantepec y se compone en gran parte por rocas magmáticas (Morán et al., 2000).

Los estados comprendidos en su totalidad dentro del área de estudio son México, Morelos y Ciudad de México. Mientras que en porciones parciales se encuentra Puebla, Tlaxcala, Hidalgo, Querétaro, Michoacán de Ocampo y Guerrero.

3.1.1. Orografía

La orografía que se encuentra dentro del área de estudio se caracteriza por ser compleja y de gran relevancia, donde destaca la presencia de tres de los principales estratovolcanes en México: El Nevado de Toluca (4,680 msnm), el Iztaccíhuatl, (5,230 msnm), y el Popocatepetl (5,500 msnm).

Otro de los rasgos orográficos principales es la Sierra de Chichinautzin, que se extiende desde el Nevado de Toluca hasta el pie de la Sierra Nevada conformada por una serie de volcanes monogenéticos con orientación NE-SW.

3.1.2. Hidrografía

La zona de estudio abarca parcialmente cuatro Regiones Hidrológico-Administrativas (RHA) definidas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2021 a, 2021 b, 2021 c, 2021, d):

RHA IV Balsas: Cubre una extensión de 116, 098 km² (5.9% del territorio nacional) albergando para el año 2020 a 12,240,831 habitantes. El río Balsas es el colector principal, recibe aportes de la vertiente norte del Iztaccíhuatl y de numerosos afluentes como el Atoyac, Zahuapan y Amacuzac, descargando finalmente en el Océano Pacífico. (CONAGUA, 2021a).

Incluye dentro del área de estudio porciones de los estados de México, Morelos, Puebla, Guerrero y Michoacán.

RHA VIII Lerma-Santiago-Pacífico: Comprende una extensión de 182,460 km² y una población de 25.6 millones de habitantes para el año 2020. Esta región está organizada en 93 subcuencas y tiene al río Lerma como uno de sus causas principales, el cual nace en el estado de México (CONAGUA, 2021b).

Dentro del área de estudio abarca partes de los estados de México, Querétaro y Michoacán.

RHA XIII Aguas del Valle de México: Con una extensión de 18,228 km² (0.93% del territorio nacional), con una población de 23.8 millones de habitantes en el año 2020. Se conforma por 13 subcuencas y alberga 14 acuíferos, los cuales presentan una condición crítica de sobreexplotación, reflejando la alta presión a la que se ha sometido el recurso hídrico (CONAGUA, 2021c)

Dentro del área de estudio incluye a la ciudad de México y partes del Estado de México, Hidalgo y Tlaxcala.

RHA IX Golfo Norte: Ocupa una superficie de 125,972 km² (0.93%) del territorio nacional), con una población de 23.8 millones de habitantes en 2020. Se conforma por 13 subcuencas y alberga 14 acuíferos, los cuales presentan una condición geohidrológica crítica de sobreexplotación, reflejando una alta presión sobre el recurso hídrico (CONAGUA, 2021d).

Incluye dentro del área de estudio porciones de los estados de Hidalgo, Querétaro, Puebla y Veracruz.

Estas regiones (Figura 11) presentan diversidad hidrológica, extensión territorial y densidad poblacional, aspectos fundamentales para la gestión de recursos hídricos y planificación territorial (CONAGUA, 2021).

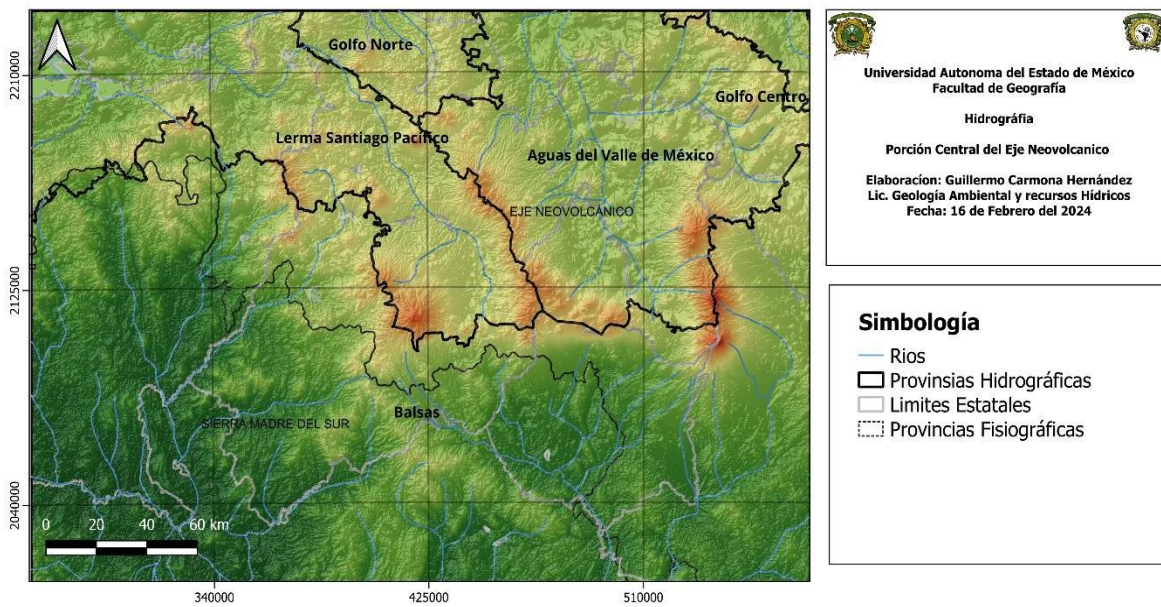


Figura 11. Hidrología. Fuente: Elaboración Propia, a partir de datos obtenidos del Geoportal de la Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad (CONABIO).

3.1.3. Clima

La orografía de la zona de estudio, que se conforma por elevaciones que van desde los valles intermontanos hasta cumbres volcánicas por encima de los 5,000 msnm, dan lugar a gran diversidad climática. De acuerdo con la clasificación derivada de los datos de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) en el área de estudio se presentan 21 subtipos climáticos, los cuales se agrupan en nueve categorías principales que van desde climas secos y muy cálidos hasta climas fríos.

Los climas secos y semisecos muy cálidos (**e.g., BS0(h)w(w) y BS1(h)w(w)**), se localizan principalmente en valles y depresiones de menor elevación, como algunas porciones del Valle de Toluca, Puebla y sur de Morelos. Los climas cálidos y semicálidos subhúmedos (**e.g., Aw0(w), Aw1(w), A(C)w2(w)**), se presentan en las faldas bajas de montaña y en la transición hacia la Sierra Madre del Sur.

La categoría más extendida es la de los climas templados subhúmedos (**e.g., C(w0) (w), C(w1) (w), C(w2)**), los cuales cubren la mayor parte de las laderas medias y altas del Eje Neovolcánico y estas asociados a los bosques de pino-encino. Finalmente, en partes altas de los volcanes y en las sierras tienen lugar los climas semifríos subhúmedos (**C(E)(w2), C(E)(w0) (w)**) y climas fríos (**C(E)(m)(w), E(T)(H)**), donde las temperaturas medias anuales son inferiores a los 1 °C, condiciones que favorecen el establecimiento de bosques de Oyamel (Figura 12).

La variabilidad climática presente en el área de estudio, es un factor determinante para la distribución de especies del género *Pinus* y para los componentes del balance hídrico.

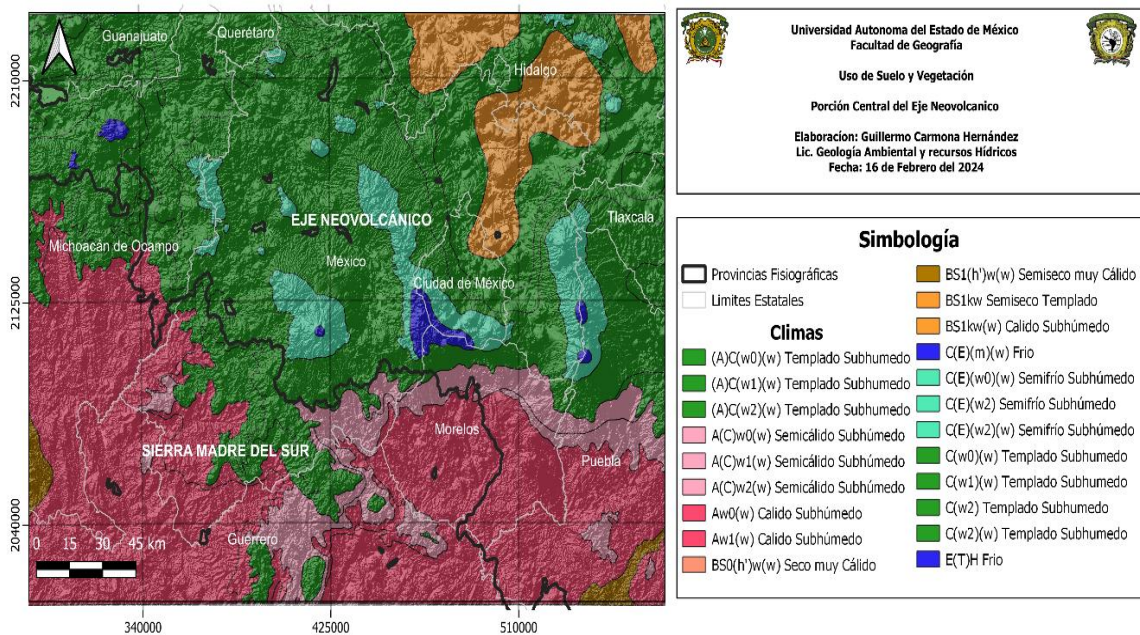


Figura 12. Clima. Fuente: Elaboración Propia, a partir de datos obtenidos del Geoportal de la Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad (CONABIO).

3.1.4. Vegetación y Uso de Suelo

La cobertura del suelo en la zona de estudio se caracteriza por ser muy diversa, esto por resultado de la interacción entre el complejo relieve, la variabilidad climática y donde el factor antrópico ha tenido mucha influencia históricamente. Esta diversidad se compone por ecosistemas naturales y por áreas transformadas para actividades humanas.

Los bosques templados constituyen la cobertura natural predominante en las zonas de montaña. En estas zonas destacan los **bosques de encino** y de manera crucial para esta investigación, los **bosques mixtos o de asociación Pino-Encino**, los cuales representan una de las coberturas forestales más extensas y biogeográficamente importantes del área. En las partes más altas y húmedas de los volcanes se presentan también **bosques de Oyamel** y remantes de **bosque mesófilo de montaña**.

En las regiones de menor altitud y en los valles intermontanos, la vegetación se compone por **matorrales**, **pastizales** y en algunas áreas **selvas bajas caducifolias**. Una porción significativa ha sido transformada para usos agropecuarios (**agricultura de temporal** y **riego**, así como **pastizal inducido**) los cuales conforman parte del uso antrópico, el cual es de los usos más extensos. Así mismo tienen lugar **asentamientos humanos** (zonas urbanas y rurales), **cuerpos de agua** y **áreas sin vegetación aparente**.

Los **bosques de Pino-Encino**, definen el contexto espacial en el que se evaluara el potencial de distribución de las especies propuestas de *Pinus* y su relación con los procesos de infiltración y recarga hídrica.

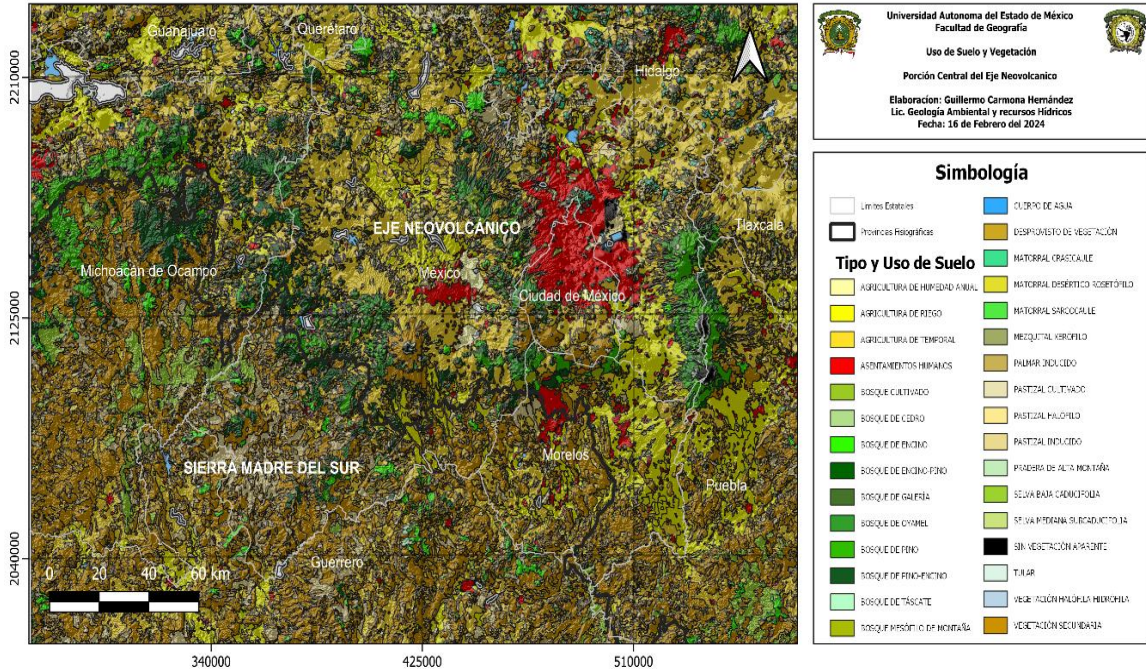


Figura 13. Vegetación y Uso de Suelo. Fuente: Elaboración Propia, a partir de datos obtenidos del Geoportal de la Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad (CONABIO).

3.1.5. Edafología

La edafología de la zona de estudio refleja la interacción entre el material volcánico, el relieve accidentado, el clima y la vegetación, resultado de una gran diversidad de las unidades de suelo. La distribución y tipo de suelo condiciona la infiltración y el almacenamiento de agua, procesos importantes en esta investigación.

Los **Andosoles** son uno de los grupos edáficos más importantes y extensos, particularmente en las laderas del Eje Neovolcánico. Se originan a partir de materiales volcánicos (cenizas, arenas) y se caracterizan por su alta porosidad, baja densidad aparente y una elevada capacidad de retención de agua y nutrientes, esto lo convierte en un suelo con un potencial muy alto para la infiltración y recarga hídrica.

Los Feozems se distribuyen ampliamente, especialmente en valles y ladeas suaves, son utilizados para actividades agropecuarias. Son suelos minerales, pardos a oscuros, con alto contenido de materia orgánica por lo que cuenta con una capacidad importante de infiltración.

En las zonas de menor pendiente y valles aluviales predominan los Vertisoles, suelos arcillosos que experimentan cambios de volumen entre estaciones húmedas y secas (agrietamiento). Pueden presentar baja permeabilidad cuando están saturados, a través de sus grietas se puede facilitar la infiltración, mostrando un comportamiento hidrológico estacional complejo.

Otras unidades edáficas importantes dentro del área de estudio son los Regosoles (suelos jóvenes y poco desarrollados, frecuentes en laderas erosionadas), Litosoles (suelos someros sobre roca), Cambisoles (suelos en proceso de desarrollo) y Luvisoles, entre otros (Figura 14).

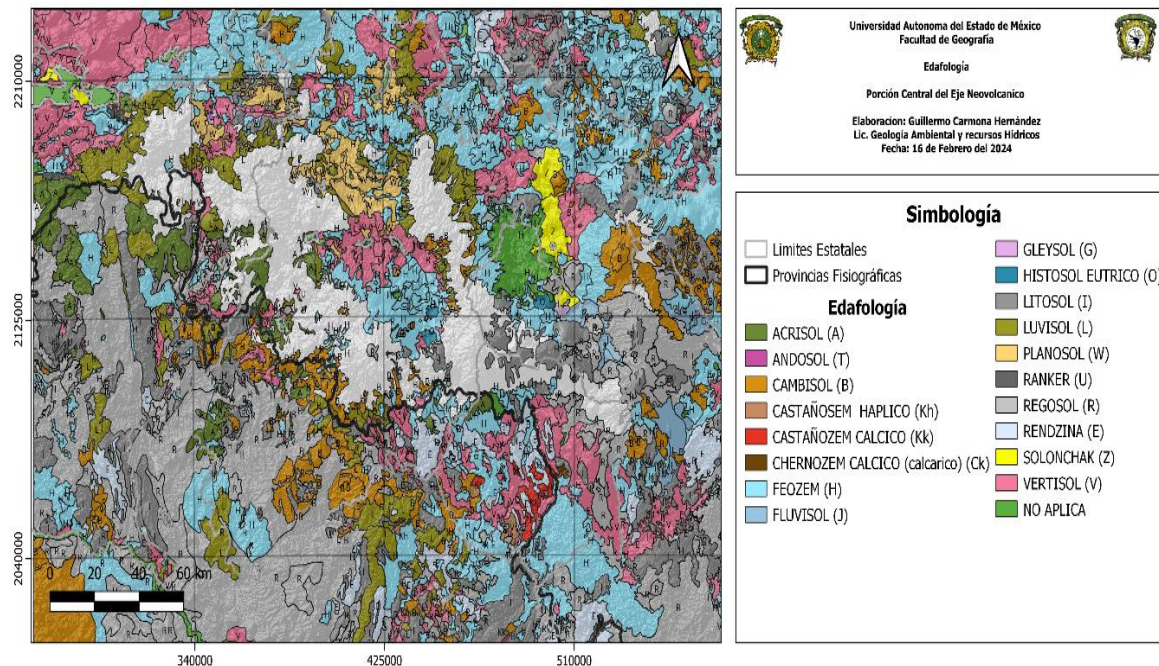


Figura 14. Edafología. Fuente: Elaboración Propia, a partir de datos obtenidos del Geoportail de la Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad (CONABIO).

3.1.6. Litología

La litología de la zona de estudio está asociada dos provincias fisiográficas, el Eje Neovolcánico Transmexicano y la Sierra Madre del Sur. La naturaleza y distribución de los materiales rocosos son fundamentales, ya que inciden en la permeabilidad del suelo y por ende en procesos de infiltración.

En la porción central del Eje Neovolcánico predomina rocas ígneas extrusivas del Terciario Superior y Cuaternario. Esta provincia se caracteriza por su amplia presencia de andesitas, basaltos, dacitas, riolitas y traquitas, que corresponden a derrames lávicos, así como depósitos piroclásticos (tobas e ignimbritas) y lahares. También se presentan depósitos aluviales, lacustres y conglomerados (monogenéticos y poligenéticos) en los valles y planicies, los cuales dependiendo de su grado de consolidación pueden actuar como acuíferos locales.

En la porción norte de la Sierra Madre del Sur predominan rocas ígneas intrusivas del Terciario, como granitos, dioritas y pórfidos, así como un complejo metamórfico que incluye **esquistos, pizarras, meta-andesitas, meta-basaltos y meta-sedimentarios**. También se tiene presencia de secuencias sedimentarias consolidadas del Mesozoico y Paleozoico, como **calizas, lutitas, areniscas y margas**.

En conjunto, la litología descrita configura un sustrato geológico complejo y heterogéneo que es fundamental para comprender la dinámica paisajista de la región (Figura 15), el cual en conjunto con los factores climáticos edáficos y bióticos previamente mencionados, contribuyen a definir la fisonomía y las condiciones ambientales generales de la zona de estudio

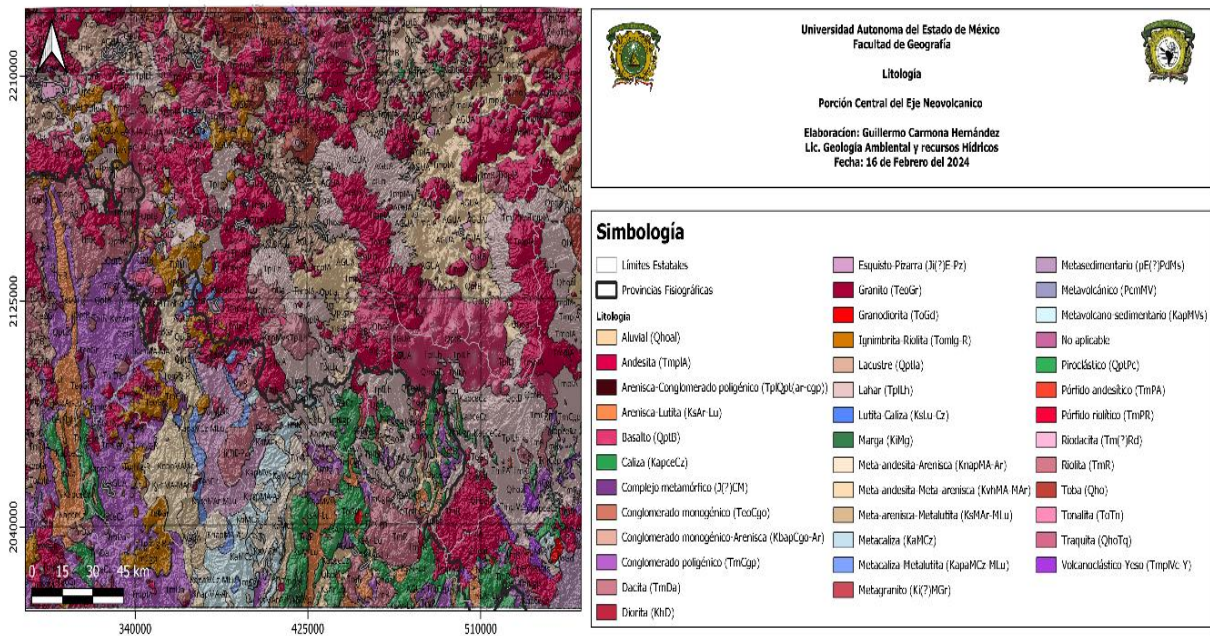


Figura 15. Litología. Fuente: Elaboración Propia, a partir de datos obtenidos del Servicio Geológico Mexicano (SGM).

3.2. Esquema metodológico

El esquema metodológico de esta investigación se diseñó en dos etapas secuenciales e integradoras, con el fin de vincular los Modelos de Distribución potencial de Especies (MDPE) con la cuantificación hidrológica de la recarga potencial.

La primera etapa consistió en la generación y optimización de los MDPE para las cinco especies de *Pinus* propuestas (*P. hartwegii*, *P. douglasiana*, *P. montezumae*, *P. pseudostrobus*, *P. teocote*). Esta etapa incluyó la recopilación y procesamiento de los registros de presencia de cada especie, así como las variables ambientales predictoras para el periodo 1980-2020: datos mensuales de precipitación y temperatura que derivaron en 19 variables bioclimáticas, junto con el Modelo Digital de Elevación (MDE). A partir de estos insumos, se generaron MDPE iniciales utilizando el algoritmo de Máxima Entropía (Maxent), los cuales posteriormente fueron calibrados y simplificados mediante análisis de correlación para eliminar redundancia y obtener modelos finales simplificados.

La segunda etapa tuvo como objetivo estimar la recarga potencial (infiltración) mediante el método de balance hídrico del suelo y realizar un análisis espacial integrador. Para ello, se procesaron los datos mensuales de evapotranspiración real y escurrimiento superficial del mismo periodo (1980-2020) para calcular la infiltración. De manera innovadora, los mapas de idoneidad potencial de cada especie (resultado de la primera etapa) se cruzaron espacialmente mediante tabulación cruzada (Crostabb) con las coberturas forestales reales extraídas de la cartografía de Uso de Suelo y Vegetación proporcionada por INEGI en su serie VII. Este proceso permitió generar mapas de intersección específicos para cada combinación especie *Pinus*-bosque real, a partir de los cuales se extrajeron y compararon los promedios de infiltración, logrando así una cuantificación del servicio ecosistémico de recarga asociado a escenarios específicos de distribución forestal.

Este esquema metodológico integral permitió no solo reducir áreas ambientalmente idóneas para las especies estudiadas, si no también evaluar cuantitativamente su potencial de contribución a la recarga hídrica en el contexto de las coberturas forestales existentes.

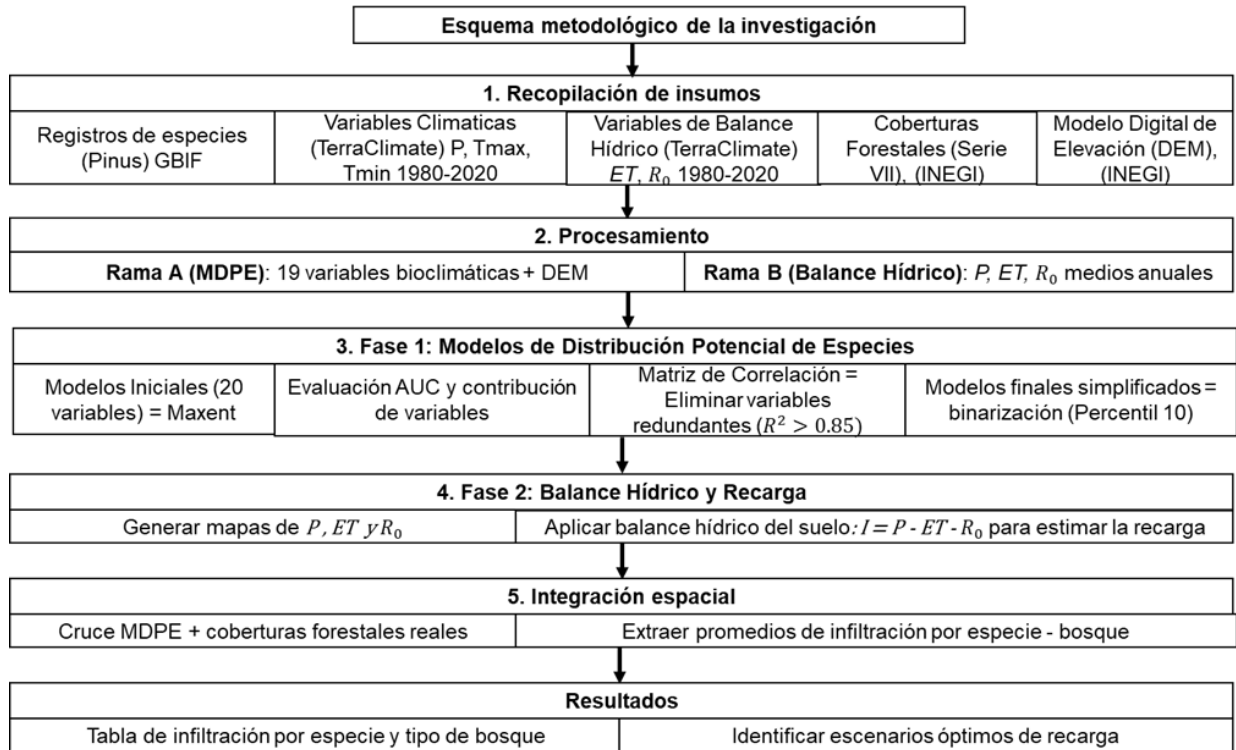


Figura 16. Esquema Metodológico.

3.2.1. Recopilación y estructura de información

Para el desarrollo de las dos etapas metodológicas (Fase 1: Modelos de distribución potencial de especies; Fase 2: Estimación de la recarga potencial por balance hídrico del suelo), se recopilaron datos geospaciales y climáticos de fuentes oficiales y bases de datos globales, para el periodo 1980-2020.

El área de estudio se delimito a partir del Modelo Digital de Elevación (DEM) del Continuo de Elevaciones Mexicanas (CEM 3.0, INEGI), con resolución espacial de 15 metros, equivalente a una escala aproximada de 1:50,000:

<https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>.

Se seleccionando la porción central del Eje Neovolcánico y norte de la Sierra Madre del Sur. Una vez definida el aérea de estudio, se generó una máscara raster que fue utilizada para recortar todas las capas recopiladas.

La información climática y de balance hídrico se obtuvo de la base de datos global Terraclimate (Abatzoglou et al., 2018), descargando series mensuales en formato raster (resolución espacial ≈ 4 km), que cubren el periodo de 1980-2020, para las variables de precipitación (P), temperatura máxima (t_{max}), temperatura mínima (t_{min}), evapotranspiración real (ET) y escurrimiento superficial (R_0):

<http://www.climatologylab.org/terraclimate.html>.

Para el procesamiento de las variables de precipitación, temperatura, evapotranspiración real y escurrimiento superficial se utilizó el software TerrSet, donde se importaron dichas variables en su formato *.nc a idrisi y homogenizado el sistema de referencia WGS84 para ajustarlo a la zona de estudio.

Las imágenes originales están rescaladas y con unidades milimétricas (mm), por ello al recortarlas a la zona de estudio se multiplica por 0.1 para precipitación y 0.01 para temperatura, ya que este factor estandariza los valores dentro del conjunto de datos de TerraClimate para el manejo de información en un dato de medición real.

Es importante mencionar que la variable de precipitación se procesó de dos formas distintas según la fase de estudio (ver secciones 3.2.3 y 3.2.7), mientras que en el caso de la temperatura, evapotranspiración real y escurrimiento superficial se descargaron directamente y se procesaron para obtener promedios mensuales y anuales. (ver secciones 3.2.4, 3.2.8 y 3.2.9).

Los registros de presencia de las cinco especies de *Pinus* propuestas (Tabla 2) en este estudio se descargaron del Sistema Global de Información sobre Biodiversidad (GBIF):

https://www.gbif.org/es/ocurrence/search?occurrence_status=present&q.

Tabla 2. Especies de Pino propuestas para la zona de estudio

Especie (Nombre científico)	Nombre común
<i>Pinus hartwegii</i>	Ocote Blanco
<i>Pinus teocote</i>	Ocote / Teocote
<i>Pinus pseudostrobus</i>	Pino Lacio/Pacingo/Chamite
<i>Pinus montezumae</i>	Pino Chamite
<i>Pinus douglasiana</i>	Pino de Douglas

Finalmente, la información de la cobertura forestal para el análisis integrador se obtuvo de la Serie VII de Uso de Suelo y Vegetación (escala 1:250,000) de INEGI en el geoportal de CONABIO:

http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/usv/inegi/usv250s7gw

Para garantizar la compatibilidad espacial entre todas las capas, se tomó como referencia la resolución de los datos climáticos (4km), por ser la variable de menor resolución espacial. En consecuencia, el DEM original de 15 metros fue remuestreado a 4 km para igualar la resolución espacial de los datos climáticos.

3.2.2. Procesamiento de Variables para los MDPE

El procesamiento de las variables predictoras para los MDPE involucro dos componentes principales: las 19 variables bioclimáticas y el Modelo Digital de Elevación (DEM).

3.2.3. Precipitación acumulada mensual

A partir de las series mensuales de precipitación (P) para el periodo 1980-2020, se generaron dos productos derivados con diferentes estructuras y propósitos dentro del estudio: uno para la generación de las variables bioclimáticas (Fase 1) y otro para el balance hídrico del suelo (Fase 2).

Este producto se conforma por 12 capas raster, una por cada mes del año (enero a diciembre), donde cada capa representa la suma total de la precipitación de ese mes a lo largo de los 40 años del periodo de estudio (1980-2020). La unidad de estas capas es el milímetro (mm), representando la lámina de agua acumulada durante todo el periodo de cada mes en particular. Se obtuvo de la siguiente manera: Se organizaron las 480 capas mensuales de precipitación en 12 grupos, correspondientes a cada mes del año (enero a diciembre). Para cada grupo mensual, se sumaron los valores de todos los años, generando así una capa de precipitación acumulada para cada mes.

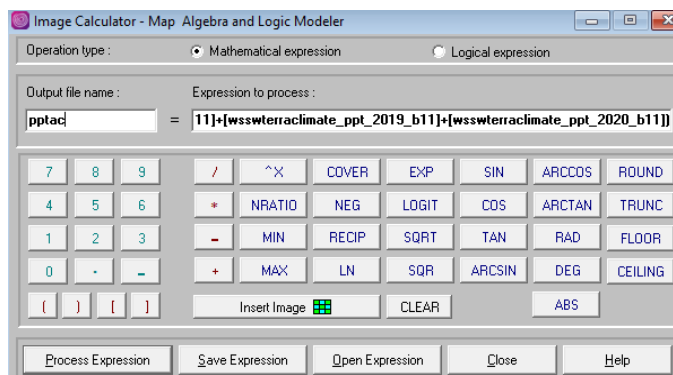


Figura 17. Estimación de la precipitación acumulada mensual

3.2.4. Temperatura media mensual

Para el procesamiento de los datos de temperatura máxima (*tmax*) y temperatura mínima (*tmin*) se calculó la temperatura media mensual. A partir de la herramienta Image Calculator, para cada mes del año (enero a diciembre) se creó un grupo raster conteniendo las 40 capas mensuales, sobre cada uno de los doce grupos raster, se aplicó una sumatoria de valores de temperatura (tanto para temperatura máxima como para temperatura mínima) donde el resultado para cada mes se dividió entre 40 (el número de años que contiene el periodo de estudio) para obtener la temperatura media mensual (Figura 18).

Se obtuvieron 12 capas raster (enero a diciembre) de temperatura media mensual, expresadas en grados Celsius (°C).

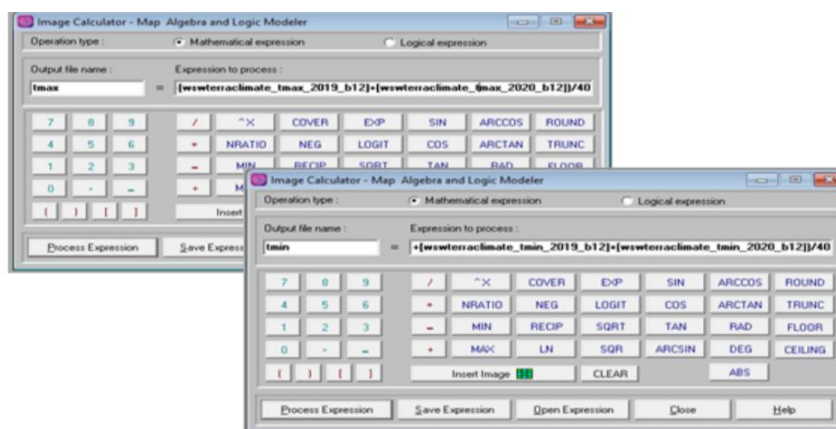


Figura 18. Estimación de la temperatura media anual.

3.2.5. Variables Bioclimáticas

Las variables bioclimáticas se derivaron a partir de las series mensuales de precipitación (*P*), temperatura máxima (*tmax*) y temperatura mínima (*tmin*).

Mediante el módulo Bioclimatic Variables de TerrSet, se sintetizaron las 19 variables bioclimáticas (Tabla 3) que representan tendencias anuales, estacionalidad y extremos climáticos.

Tabla 3. Variables Bioclimáticas

Variables Bioclimáticas					
Variable	Descripción	Unidades	Variable	Descripción	Unidades
Bio 1	Temperatura Media Anual	Grados Celsius	Bio 11	Temperatura media del trimestre más cálido	Grados Celsius
Bio 2	Rango medio diurno (Media mensual (temperatura máxima - temperatura mínima))	Grados Celsius	Bio 12	Temperatura media del trimestre más frío	Grados Celsius
Bio 3	Isotermalidad (BIO2/BIO7) (×100)	Porcentaje	Bio 13	Precipitación Anual	Milímetros
Bio 4	Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar ×100)	Porcentaje	Bio 14	Precipitación del mes más húmedo	Milímetros
Bio 5	Temperatura máxima del mes más cálido	Grados Celsius	Bio 15	Precipitación del Mes Más Seco	Milímetros
Bio 6	Temperatura mínima del mes más frío	Grados Celsius	Bio 16	Estacionalidad de las Precipitaciones (Coeficiente de Variación)	Milímetros
Bio 7	Rango Anual de Temperatura (BIO5-BIO6)	Grados Celsius	Bio 17	Precipitación del trimestre más húmedo	Milímetros
Bio 8	Temperatura media del trimestre más húmedo	Grados Celsius	Bio 18	Precipitación del Cuarto Más Seco	Milímetros
Bio 9	Temperatura media del trimestre más seco	Grados Celsius	Bio 19	Precipitación del trimestre más cálido	Milímetros
Bio 10	Temperatura media del trimestre más cálido	Grados Celsius			

3.2.6. Procesamiento de las variables para Balance Hídrico

Para la estimación de la recarga potencial mediante el método de balance hídrico del suelo (véase apartado 2.18), se procesaron las variables de evapotranspiración real media anual (ET), escurrimiento superficial medio anual (R_0) y precipitación media anual (P). A diferencia de las variables para los MDPE, el objetivo fue generar representaciones de la climatología media anual para ser utilizadas directamente en la ecuación de balance hídrico. A continuación, se describen los productos medios anuales generados para cada variable.

3.2.7. Precipitación media anual (P)

El procesamiento en TerrSet se realizó a través de la herramienta Image calculator, a partir de las capas mensuales de precipitación, se calculó la precipitación media anual (mm/año). Para ello primero se sumaron las 12 capas mensuales de cada año (1980-2020), obteniendo 41 capas de precipitación acumulada anual. Posteriormente, estas 41 capas se sumaron entre sí y el resultado se dividió entre 41, obteniendo así la precipitación promedio anual (Figura 19) que se utiliza en la ecuación de balance hídrico (P).

```
File Edit Tools Help
OVERLAY x 1*TerraClimate_ppt_1980_%fml_rst*TerraClimate_ppt_1981_%fml_rst*idradd1_rst
OVERLAY x 1*idradd1_rst*TerraClimate_ppt_1982_%fml_rst*idradd2_rst
OVERLAY x 1*idradd2_rst*TerraClimate_ppt_1983_%fml_rst*idradd3_rst
OVERLAY x 1*idradd3_rst*TerraClimate_ppt_1984_%fml_rst*idradd4_rst
OVERLAY x 1*idradd4_rst*TerraClimate_ppt_1985_%fml_rst*idradd5_rst
OVERLAY x 1*idradd5_rst*TerraClimate_ppt_1986_%fml_rst*idradd6_rst
OVERLAY x 1*idradd6_rst*TerraClimate_ppt_1987_%fml_rst*idradd7_rst
OVERLAY x 1*idradd7_rst*TerraClimate_ppt_1988_%fml_rst*idradd8_rst
OVERLAY x 1*idradd8_rst*TerraClimate_ppt_1989_%fml_rst*idradd9_rst
OVERLAY x 1*idradd9_rst*TerraClimate_ppt_1990_%fml_rst*idradd10_rst
OVERLAY x 1*idradd10_rst*TerraClimate_ppt_1991_%fml_rst*idradd11_rst
OVERLAY x 1*idradd11_rst*TerraClimate_ppt_1992_%fml_rst*idradd12_rst
OVERLAY x 1*idradd12_rst*TerraClimate_ppt_1993_%fml_rst*idradd13_rst
OVERLAY x 1*idradd13_rst*TerraClimate_ppt_1994_%fml_rst*idradd14_rst
OVERLAY x 1*idradd14_rst*TerraClimate_ppt_1995_%fml_rst*idradd15_rst
OVERLAY x 1*idradd15_rst*TerraClimate_ppt_1996_%fml_rst*idradd16_rst
OVERLAY x 1*idradd16_rst*TerraClimate_ppt_1997_%fml_rst*idradd17_rst
OVERLAY x 1*idradd17_rst*TerraClimate_ppt_1998_%fml_rst*idradd18_rst
OVERLAY x 1*idradd18_rst*TerraClimate_ppt_1999_%fml_rst*idradd19_rst
OVERLAY x 1*idradd19_rst*TerraClimate_ppt_2000_%fml_rst*idradd20_rst
OVERLAY x 1*idradd20_rst*TerraClimate_ppt_2001_%fml_rst*idradd21_rst
OVERLAY x 1*idradd21_rst*TerraClimate_ppt_2002_%fml_rst*idradd22_rst
OVERLAY x 1*idradd22_rst*TerraClimate_ppt_2003_%fml_rst*idradd23_rst
OVERLAY x 1*idradd23_rst*TerraClimate_ppt_2004_%fml_rst*idradd24_rst
OVERLAY x 1*idradd24_rst*TerraClimate_ppt_2005_%fml_rst*idradd25_rst
OVERLAY x 1*idradd25_rst*TerraClimate_ppt_2006_%fml_rst*idradd26_rst
OVERLAY x 1*idradd26_rst*TerraClimate_ppt_2007_%fml_rst*idradd27_rst
OVERLAY x 1*idradd27_rst*TerraClimate_ppt_2008_%fml_rst*idradd28_rst
OVERLAY x 1*idradd28_rst*TerraClimate_ppt_2009_%fml_rst*idradd29_rst
OVERLAY x 1*idradd29_rst*TerraClimate_ppt_2010_%fml_rst*idradd30_rst
OVERLAY x 1*idradd30_rst*TerraClimate_ppt_2011_%fml_rst*idradd31_rst
OVERLAY x 1*idradd31_rst*TerraClimate_ppt_2012_%fml_rst*idradd32_rst
OVERLAY x 1*idradd32_rst*TerraClimate_ppt_2013_%fml_rst*idradd33_rst
OVERLAY x 1*idradd33_rst*TerraClimate_ppt_2014_%fml_rst*idradd34_rst
OVERLAY x 1*idradd34_rst*TerraClimate_ppt_2015_%fml_rst*idradd35_rst
OVERLAY x 1*idradd35_rst*TerraClimate_ppt_2016_%fml_rst*idradd36_rst
OVERLAY x 1*idradd36_rst*TerraClimate_ppt_2017_%fml_rst*idradd37_rst
OVERLAY x 1*idradd37_rst*TerraClimate_ppt_2018_%fml_rst*idradd38_rst
OVERLAY x 1*idradd38_rst*TerraClimate_ppt_2019_%fml_rst*idradd39_rst
OVERLAY x 1*idradd39_rst*TerraClimate_ppt_2020_%fml_rst*idradd40_rst
SCALAR x Fpadd_80-20_%.1_rst*PP_80_20_%.1_rst*4*41
cursor position: 49,41
```

Figura 19. Estimación de la precipitación media anual.

3.2.8. Evapotranspiración real media anual (ET)

Esta variable representa la cantidad de agua que regresa a la atmosfera desde la superficie, a partir de las series mensuales de evapotranspiración para el periodo de 1980-2020, se calculó la evapotranspiración real media anual en (mm/año). Para ello se sumaron las 12 capas mensuales de cada año, obteniendo 41 capas de evapotranspiración acumulada anual, las cuales se promediaron para obtener el mapa final (Figura 20).

```
File Edit Tools Help
OVERLAY x 1*TerraClimate_aet_1980_%1fnl_rst*TerraClimate_aet_1981_%1fnl_rst*idradd1_rst
OVERLAY x 1*idradd1_rst*TerraClimate_aet_1982_%1fnl_rst*idradd2_rst
OVERLAY x 1*idradd2_rst*TerraClimate_aet_1983_%1fnl_rst*idradd3_rst
OVERLAY x 1*idradd3_rst*TerraClimate_aet_1984_%1fnl_rst*idradd4_rst
OVERLAY x 1*idradd4_rst*TerraClimate_aet_1985_%1fnl_rst*idradd5_rst
OVERLAY x 1*idradd5_rst*TerraClimate_aet_1986_%1fnl_rst*idradd6_rst
OVERLAY x 1*idradd6_rst*TerraClimate_aet_1987_%1fnl_rst*idradd7_rst
OVERLAY x 1*idradd7_rst*TerraClimate_aet_1988_%1fnl_rst*idradd8_rst
OVERLAY x 1*idradd8_rst*TerraClimate_aet_1989_%1fnl_rst*idradd9_rst
OVERLAY x 1*idradd9_rst*TerraClimate_aet_1990_%1fnl_rst*idradd10_rst
OVERLAY x 1*idradd10_rst*TerraClimate_aet_1991_%1fnl_rst*idradd11_rst
OVERLAY x 1*idradd11_rst*TerraClimate_aet_1992_%1fnl_rst*idradd12_rst
OVERLAY x 1*idradd12_rst*TerraClimate_aet_1993_%1fnl_rst*idradd13_rst
OVERLAY x 1*idradd13_rst*TerraClimate_aet_1994_%1fnl_rst*idradd14_rst
OVERLAY x 1*idradd14_rst*TerraClimate_aet_1995_%1fnl_rst*idradd15_rst
OVERLAY x 1*idradd15_rst*TerraClimate_aet_1996_%1fnl_rst*idradd16_rst
OVERLAY x 1*idradd16_rst*TerraClimate_aet_1997_%1fnl_rst*idradd17_rst
OVERLAY x 1*idradd17_rst*TerraClimate_aet_1998_%1fnl_rst*idradd18_rst
OVERLAY x 1*idradd18_rst*TerraClimate_aet_1999_%1fnl_rst*idradd19_rst
OVERLAY x 1*idradd19_rst*TerraClimate_aet_2000_%1fnl_rst*idradd20_rst
OVERLAY x 1*idradd20_rst*TerraClimate_aet_2001_%1fnl_rst*idradd21_rst
OVERLAY x 1*idradd21_rst*TerraClimate_aet_2002_%1fnl_rst*idradd22_rst
OVERLAY x 1*idradd22_rst*TerraClimate_aet_2003_%1fnl_rst*idradd23_rst
OVERLAY x 1*idradd23_rst*TerraClimate_aet_2004_%1fnl_rst*idradd24_rst
OVERLAY x 1*idradd24_rst*TerraClimate_aet_2005_%1fnl_rst*idradd25_rst
OVERLAY x 1*idradd25_rst*TerraClimate_aet_2006_%1fnl_rst*idradd26_rst
OVERLAY x 1*idradd26_rst*TerraClimate_aet_2007_%1fnl_rst*idradd27_rst
OVERLAY x 1*idradd27_rst*TerraClimate_aet_2008_%1fnl_rst*idradd28_rst
OVERLAY x 1*idradd28_rst*TerraClimate_aet_2009_%1fnl_rst*idradd29_rst
OVERLAY x 1*idradd29_rst*TerraClimate_aet_2010_%1fnl_rst*idradd30_rst
OVERLAY x 1*idradd30_rst*TerraClimate_aet_2011_%1fnl_rst*idradd31_rst
OVERLAY x 1*idradd31_rst*TerraClimate_aet_2012_%1fnl_rst*idradd32_rst
OVERLAY x 1*idradd32_rst*TerraClimate_aet_2013_%1fnl_rst*idradd33_rst
OVERLAY x 1*idradd33_rst*TerraClimate_aet_2014_%1fnl_rst*idradd34_rst
OVERLAY x 1*idradd34_rst*TerraClimate_aet_2015_%1fnl_rst*idradd35_rst
OVERLAY x 1*idradd35_rst*TerraClimate_aet_2016_%1fnl_rst*idradd36_rst
OVERLAY x 1*idradd36_rst*TerraClimate_aet_2017_%1fnl_rst*idradd37_rst
OVERLAY x 1*idradd37_rst*TerraClimate_aet_2018_%1fnl_rst*idradd38_rst
OVERLAY x 1*idradd38_rst*TerraClimate_aet_2019_%1fnl_rst*idradd39_rst
OVERLAY x 1*idradd39_rst*TerraClimate_aet_2020_%1fnl_rst*aetpadd_80-20_%1_rst
SCALAR x aetpadd_80-20_%1_rst*aet_80_20_%1_rst*4*41
cursor position: 49,41
```

Figura 20. Estimación de la evapotranspiración real media anual.

3.2.9. Esguerrimiento Superficial medio anual

Esta variable representa la lámina de agua que fluye por la superficie, a partir de las series mensuales de esguerrimiento superficial para el periodo 1980-2020, se calculó el esguerrimiento superficial medio anual en (mm/año). Se sumaron las 12 capas mensuales de cada año y se promediaron las 41 capas anuales resultantes.

Este producto completa los componentes de la ecuación del balance hídrico del suelo (Figura 21).

```

File Edit Tools Help
OVERLAY x 1*TerraClimate_q_1980_%ifnl rst*TerraClimate_q_1981_%ifnl rst*idradd1 rst
OVERLAY x 1*idradd1 rst*TerraClimate_q_1982_%ifnl rst*idradd2 rst
OVERLAY x 1*idradd2 rst*TerraClimate_q_1983_%ifnl rst*idradd3 rst
OVERLAY x 1*idradd3 rst*TerraClimate_q_1984_%ifnl rst*idradd4 rst
OVERLAY x 1*idradd4 rst*TerraClimate_q_1985_%ifnl rst*idradd5 rst
OVERLAY x 1*idradd5 rst*TerraClimate_q_1986_%ifnl rst*idradd6 rst
OVERLAY x 1*idradd6 rst*TerraClimate_q_1987_%ifnl rst*idradd7 rst
OVERLAY x 1*idradd7 rst*TerraClimate_q_1988_%ifnl rst*idradd8 rst
OVERLAY x 1*idradd8 rst*TerraClimate_q_1989_%ifnl rst*idradd9 rst
OVERLAY x 1*idradd9 rst*TerraClimate_q_1990_%ifnl rst*idradd10 rst
OVERLAY x 1*idradd10 rst*TerraClimate_q_1991_%ifnl rst*idradd11 rst
OVERLAY x 1*idradd11 rst*TerraClimate_q_1992_%ifnl rst*idradd12 rst
OVERLAY x 1*idradd12 rst*TerraClimate_q_1993_%ifnl rst*idradd13 rst
OVERLAY x 1*idradd13 rst*TerraClimate_q_1994_%ifnl rst*idradd14 rst
OVERLAY x 1*idradd14 rst*TerraClimate_q_1995_%ifnl rst*idradd15 rst
OVERLAY x 1*idradd15 rst*TerraClimate_q_1996_%ifnl rst*idradd16 rst
OVERLAY x 1*idradd16 rst*TerraClimate_q_1997_%ifnl rst*idradd17 rst
OVERLAY x 1*idradd17 rst*TerraClimate_q_1998_%ifnl rst*idradd18 rst
OVERLAY x 1*idradd18 rst*TerraClimate_q_1999_%ifnl rst*idradd19 rst
OVERLAY x 1*idradd19 rst*TerraClimate_q_2000_%ifnl rst*idradd20 rst
OVERLAY x 1*idradd20 rst*TerraClimate_q_2001_%ifnl rst*idradd21 rst
OVERLAY x 1*idradd21 rst*TerraClimate_q_2002_%ifnl rst*idradd22 rst
OVERLAY x 1*idradd22 rst*TerraClimate_q_2003_%ifnl rst*idradd23 rst
OVERLAY x 1*idradd23 rst*TerraClimate_q_2004_%ifnl rst*idradd24 rst
OVERLAY x 1*idradd24 rst*TerraClimate_q_2005_%ifnl rst*idradd25 rst
OVERLAY x 1*idradd25 rst*TerraClimate_q_2006_%ifnl rst*idradd26 rst
OVERLAY x 1*idradd26 rst*TerraClimate_q_2007_%ifnl rst*idradd27 rst
OVERLAY x 1*idradd27 rst*TerraClimate_q_2008_%ifnl rst*idradd28 rst
OVERLAY x 1*idradd28 rst*TerraClimate_q_2009_%ifnl rst*idradd29 rst
OVERLAY x 1*idradd29 rst*TerraClimate_q_2010_%ifnl rst*idradd30 rst
OVERLAY x 1*idradd30 rst*TerraClimate_q_2011_%ifnl rst*idradd31 rst
OVERLAY x 1*idradd31 rst*TerraClimate_q_2012_%ifnl rst*idradd32 rst
OVERLAY x 1*idradd32 rst*TerraClimate_q_2013_%ifnl rst*idradd33 rst
OVERLAY x 1*idradd33 rst*TerraClimate_q_2014_%ifnl rst*idradd34 rst
OVERLAY x 1*idradd34 rst*TerraClimate_q_2015_%ifnl rst*idradd35 rst
OVERLAY x 1*idradd35 rst*TerraClimate_q_2016_%ifnl rst*idradd36 rst
OVERLAY x 1*idradd36 rst*TerraClimate_q_2017_%ifnl rst*idradd37 rst
OVERLAY x 1*idradd37 rst*TerraClimate_q_2018_%ifnl rst*idradd38 rst
OVERLAY x 1*idradd38 rst*TerraClimate_q_2019_%ifnl rst*idradd39 rst
OVERLAY x 1*idradd39 rst*TerraClimate_q_2020_%ifnl rst*Opadd_80-20_%1 rst
SCALAR x Opadd_80-20_%1 rst*Q_80_20_%1 rst*4*41

```

cursor position: 1,1

Figura 21. Estimación del escurrimiento superficial medio anual

3.2.10. Registros de especies y depuración

Los registros de presencia de las especies *Pinus hartwegii*, *P. douglasiana*, *P. montezumae*, *P. pseudostrobus*, y *P. teocote* se descargaron en formato CSV desde el portal de Gbif, utilizando filtros de presencia confirmada. La base de datos fue importada y depurada en el software TerrSet, donde; 1) Se eliminaron los registros duplicados, 2) Verificación y correlación taxonómica, y 3) Eliminación de registros de coordenadas erróneas.

Una vez depurados los registros de presencia fueron exportados y homogenizados espacialmente para que concidieran con las dimensiones, resolución y extensión de las capas climáticas (variables bioclimáticas). Esto implicó que cada registro de presencia se asignara a la celda raster de ~4km de resolución que le correspondía, garantizando que todos los datos de entrada al modelo Maxent compartieran la misma referencia espacial y tamaño de pixel.

3.3. Fase 1. Modelos de Distribución potencial de especies.

La primera fase de esta investigación consistió en generar, calibrar, y validar los MDPE para las cinco especies de *Pinus* propuestas. Se utilizó el algoritmo de Máxima entropía (Maxent) implementado a través del módulo Habitat Suitability / Species Distribution Modeling del software TerrSet.

Configuración del algoritmo

Como datos de entrada se utilizaron los registros de presencia depurados para cada especie y el conjunto de 20 variables predictoras ambientales (19 variables bioclimáticas + DEM). La configuración de parámetros se mantuvo con los valores predeterminados del software, los cuales se detallan a continuación (Figura 22):

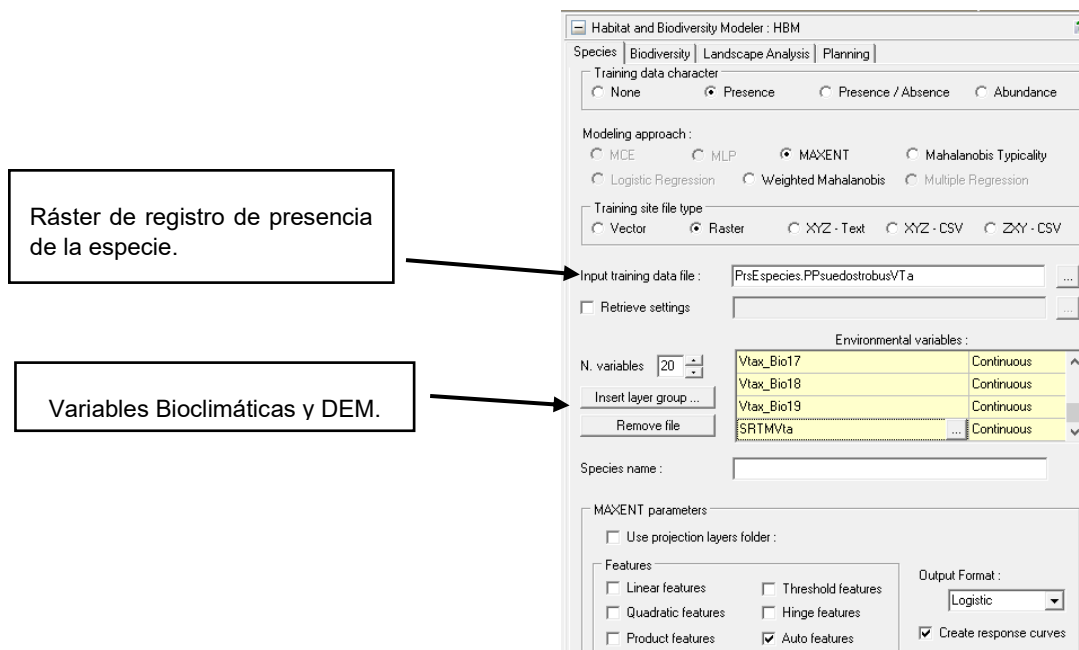


Figura 22. Módulo Habitat Suitability / Species Distribution Modeling e interfaz de Maxent.

Ejecución de los modelos

Se ejecuto un modelo inicial por especie utilizando el conjunto completo de 20 variables. El proceso de validación y análisis de cada modelo se realizó de manera sistemática para garantizar su robustez y validez ecológica, procediendo a una simplificación mediante análisis de correlación.

3.3.1. Análisis de Valor de AUC

La evaluación del rendimiento predictivo de cada MDPE generado se realizó mediante al análisis del Área Bajo la Curva (AUC) de la curva Receiver Operating Characteristic (AUC) se siguieron los estándares de (Araujo et al., 2005) donde un valor de 0.5 indica un desempeño no mejor que el azar, valores entre 0.7 y 0.9 indican un desempeño bueno y superior a 0.9 un desempeño excelente. La interpretación de estos modelos se completó con el análisis de omisión, contribución de variables y la evaluación de los mapas de idoneidad ambiental.

3.3.2. Tablas de Umbrales

Para transformar los mapas continuos de idoneidad ambiental (valores de probabilidad entre 0 y 1) en mapas binarios de presencia/ausencia, se definió un umbral de corte. Se selecciono el umbral 10° percentil de probabilidad de presencia en los puntos de entrenamiento (10 percentile training presence logistic threshold).

Este umbral excluye el 10% de los registros de presencia con los valores de idoneidad más bajos, lo que permite controlar errores de georreferenciación en los datos originales y genera un mapa predictivo más conservador (Tabla 4). El valor específico de este umbral es diferente para cada especie según su distribución ecológica, el cual se extrajo de los reportes de Maxent.

En base a los valores obtenidos en este umbral se aplicó una reclasificación (Reclass) para generar mapas booleanos que representan áreas predichas para cada especie.

3.3.3. Análisis de Contribución de Variables

Cada modelo ejecutado en Maxent genera un reporte de cuantificación de porcentaje de contribución de cada variable predictora. Este análisis identifica las variables ambientales más influyentes para predecir la distribución de cada especie.

La contribución se calcula mediante un proceso de permutación de modelado. Los porcentajes de contribución obtenidos en cada especie para los modelos iniciales se muestran en la (Tabla 5).

Este análisis es fundamental para la interpretación ecológica del modelo, ya que revela los factores climáticos y topográficos que limitan o favorecen la distribución potencial de cada taxon.

3.3.4. Matriz de Correlación

Previo a la generación de los modelos finales simplificados, se realizó un análisis de correlación entre las 20 variables predictoras (19 variables bioclimáticas y DEM) para identificar posibles relaciones lineales entre ellas. La presencia de multicolinealidad (alta correlación entre 2 o más variables independientes) puede inflar la varianza de las estimaciones de los parámetros y dificultar la interpretación ecológica de los modelos.

Este análisis se basó en el coeficiente de determinación de Pearson (r), calculado para cada par de variables mediante la siguiente ecuación (Rodgers & Nicewender, 1988):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

Donde: $x_i y_i$ (Valores de las dos variables comparadas en la celda i), \bar{x} y \bar{y} (Medias de cada variable) y n (Numero de celdas).

A partir de r , se obtuvo el coeficiente de determinación ($R^2 = r^2$), que representa la proporción de la varianza que comparten entre si dos variables. Siguiendo el criterio reportado por Minga (2022) para la evaluación de las correlaciones en estudios hidrogeológicos y ambientales, se consideraron los umbrales que se muestran a continuación (Tabla 4) para clasificar la fuerza de correlación:

Tabla 4. Coeficiente de determinación, Fuente: (Minga., 2022)

Eficiencia	R² (Coeficiente de determinación)
Muy bueno	$R^2 > 0.85$
Bueno	$0.75 < R^2 < 0.85$
Satisfactorio	$0.60 < R^2 < 0.75$
Insatisfactorio	$R^2 \leq 0.60$

Para cada par de variables con un $R^2 > 0.85$ (correlación “muy buena”), se conservo unicamente la variable con el mayor porcentaje de contribución individual en los MDPE base (Tabla 6), eliminado así la variable redundante. A partir de este proceso se definieron los conjuntos reducidos de variables independientes para la generación de los MDPE simplificados.

La matriz de correlación resultante (Tabla 7) muestra los valores de r (coeficiente de correlación) entre cada par de variables, mientras que la clasificación de fuerza se realizo con base en R^2 .

3.4. Etapa 2. Recarga potencial (Balance Hídrico del Suelo)

La segunda etapa de esta investigación consistió en la estimación de la recarga potencial de agua subterránea por el método de balance hídrico del suelo para el periodo 1980-2020, aplicando la ecuación establecida en el apartado 2.18:

$$I = P - R_0 - ET$$

La aplicación de este método se llevó a cabo mediante una extracción estadística espacial, que integró los componentes del Balance Hídrico previamente estructurados (ver apartados 3.2.6).

El proceso se realizó en TerrSet a partir de la herramienta Extract, donde se creó un grupo raster con los tres mapas de entrada correspondientes a: precipitación media anual (P), evapotranspiración real media anual (ET) y escurrimiento superficial medio anual (R_0).

3.4.1. Definición de las áreas de análisis

Para aislar y definir las unidades espaciales específicas de interés, se realizó un análisis de tabulación cruzada (Crostabb) entre dos conjuntos de información geográfica:

- Mapas de idoneidad potencial binarizados: Los mapas boléanos (presencia = 1, ausencia = 0) generados como resultado de los MDPE simplificados para cada una de las cinco especies de *Pinus* propuestas.
- Mapa de cobertura forestal real: Los raster derivados de la Serie VII de INEGI, donde se extrajeron únicamente las clases de interés: Bosque de Pino-Encino, Bosque de Pino, Bosque de Oyamel, Bosque de Encino-Pino y Bosque de Encino.

El algoritmo Crostabb genera un nuevo mapa raster donde a cada pixel se le asigna un valor único (clase) que representa la combinación específica de las categorías de las dos imágenes de entrada.

Este análisis se ejecutó mediante la herramienta Crostabb (cross-tabulation) en TerrSet, la cual permite generar una imagen de clasificación cruzada a partir de dos capas raster categóricas (Figura 23).

En este caso, las clases resultantes identifican de manera explícita todas las posibles áreas de superposición espacial entre la distribución potencial idónea de una especie y cada tipo de cobertura boscosa real. Este proceso se repitió para cada una de las cinco especies propuestas, generando un conjunto de mapas donde cada clase temática corresponde a una combinación única entre “especie – cobertura boscosa real”

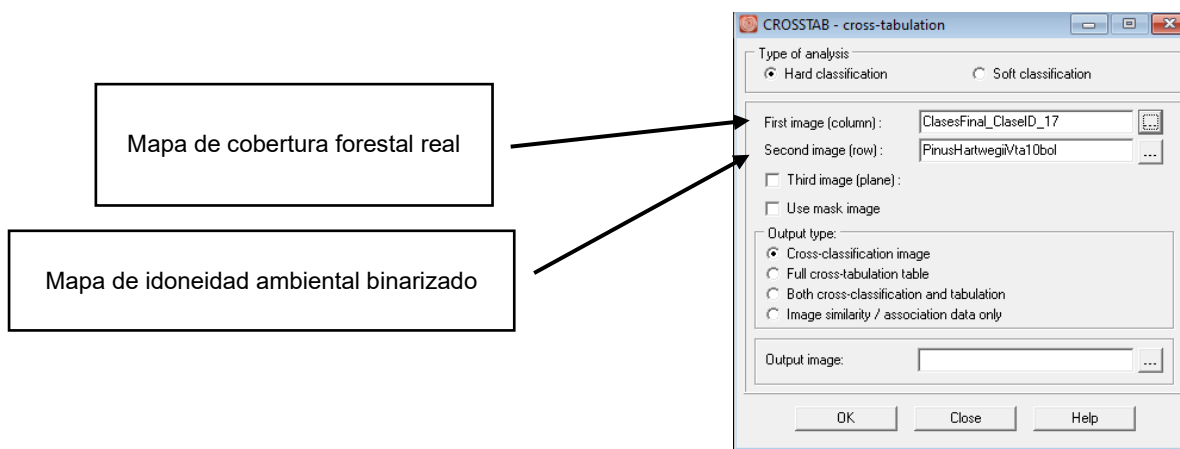


Figura 23. Interfaz herramienta Crostabb.

3.4.2. Promedios de infiltración por unidad espacial

Para la extracción de los promedios de infiltración en las zonas donde la idoneidad potencial coincide con la cobertura forestal real, se empleó la herramienta (Extract) de TerrSet. El procedimiento fue el siguiente:

- Identificación de la clase de intersección: En cada mapa Crostabb resultante, se identificó la clase temática específica que representa los píxeles donde coinciden espacialmente la distribución potencial idónea de la especie (valor del mapa MDPE = 1 y la presencia de un tipo de bosque real (valor del mapa de cobertura = clase de bosque). Esta clase es la de interés para el análisis.
- Creación de las máscaras booleanas: A partir de cada mapa Crostabb, se generó un nuevo raster booleano (valores 1/0) aislando únicamente los píxeles pertenecientes a dicha clase de intersección para cada combinación especie-bosque.
- Cálculo de estadísticas zonales: Utilizando las máscaras booleanas, con la herramienta Extract se calculó el valor promedio de cada variable de la ecuación (P, R_0, ET .) sobre todos los píxeles de la clase de intersección. Para ello como datos de entrada se utilizó el grupo raster con las variables hidrológicas ya mencionadas y la máscara booleana.

Los promedios de la ecuación del balance hídrico del suelo (P, R_0, ET) para cada área de intersección (especie-bosque) se exportaron a una hoja de cálculo. Posteriormente la ecuación ($I = P - R_0 - ET$) se aplicó a los tres promedios, obteniendo así el promedio de infiltración potencial (I) asociado de manera exclusiva a las áreas donde la distribución potencial de una especie se superpone efectivamente con un tipo de cobertura boscosa real.

4. Resultados

Los resultados de la metodología integrada que combina los MDPE con el método de balance hídrico del suelo, permitió generar un conjunto de hallazgos espaciales y numéricos. Esta sección como parte de la primera etapa, se organiza para presentar, los resultados de los MDPE (calibración, simplificación y validación) para las 5 especies de *Pinus* propuestas. En cuanto a la segunda etapa se caracterizan los componentes principales del balance hídrico a escala regional para el periodo 1980-2020, donde se sintetiza la cuantificación y comparación del potencial de recarga hídrica asociado a la distribución potencial de cada especie en diferentes contextos de cobertura forestal. Los mapas, gráficas y tablas que se presentan a continuación constituyen la evidencia empírica que sustenta el análisis y conclusiones de este estudio.

4.1. Modelos de distribución potencial de especies

Los MDPE generados para las cinco especies de *Pinus* propuestas mostraron un alto desempeño predictivo, lo que hace a estos modelos útiles para identificar áreas ambientalmente idóneas dentro de la zona de estudio. Los resultados de los MDPE se generaron en dos fases: la primera con el conjunto completo de variables predictoras (20) y la segunda con las variables resultantes de la calibración y validación de los modelos base para obtener los modelos finales (simplificados).

4.1.1. Modelos base y desempeño inicial

Para los modelos base se utilizaron las 19 variables bioclimáticas y el Modelo Digital de Elevación (DEM). Los mapas de idoneidad resultantes (Figura 23 a 32) muestran la distribución espacial de la probabilidad de presencia para cada especie.

Dicha probabilidad se clasifico en 5 intervalos de igual amplitud que representan categorías de idoneidad: Muy alta (Rojo, 0.8 - 1.0), Alta (Naranja, 0.6 – 0.8), Media (Amarillo, 0.4 – 0.6), Baja (Verde Claro, 0.2 – 0.4) y Muy baja (Verde oscuro <0.2). La evaluación mediante el estadístico Área Bajo la Curva (AUC) mostro que todos los modelos base poseían una buena a excelente capacidad predictiva. Con valores de AUC para datos de entrenamiento que oscilan entre 0.856 (*Pinus teocote*) y 0.957 (*Pinus douglasiana*) (Tabla 5).

Tabla 5. Valores de AUC por especie (Modelos Base).

Modelo	Especie	N° Variables	Training data AUC
1	<i>Pinus hartwegii</i>	20	0.955
2	<i>Pinus montezumae</i>	20	0.928
3	<i>Pinus douglasiana</i>	20	0.957
4	<i>Pinus teocote</i>	20	0.856
5	<i>Pinus pseudostrobus</i>	20	0.918

- *Pinus hartwegii*

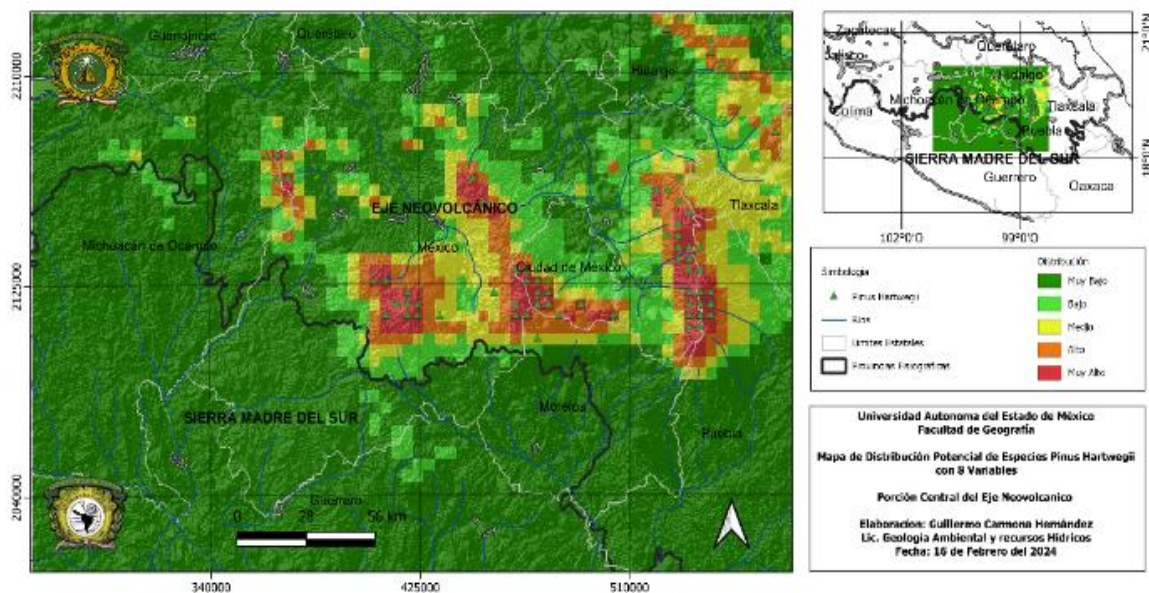


Figura 23. Modelo de distribución potencial 20 Variables (*P. hartwegii*), Fuente: Elaboración Propia.

- *Pinus teocote*

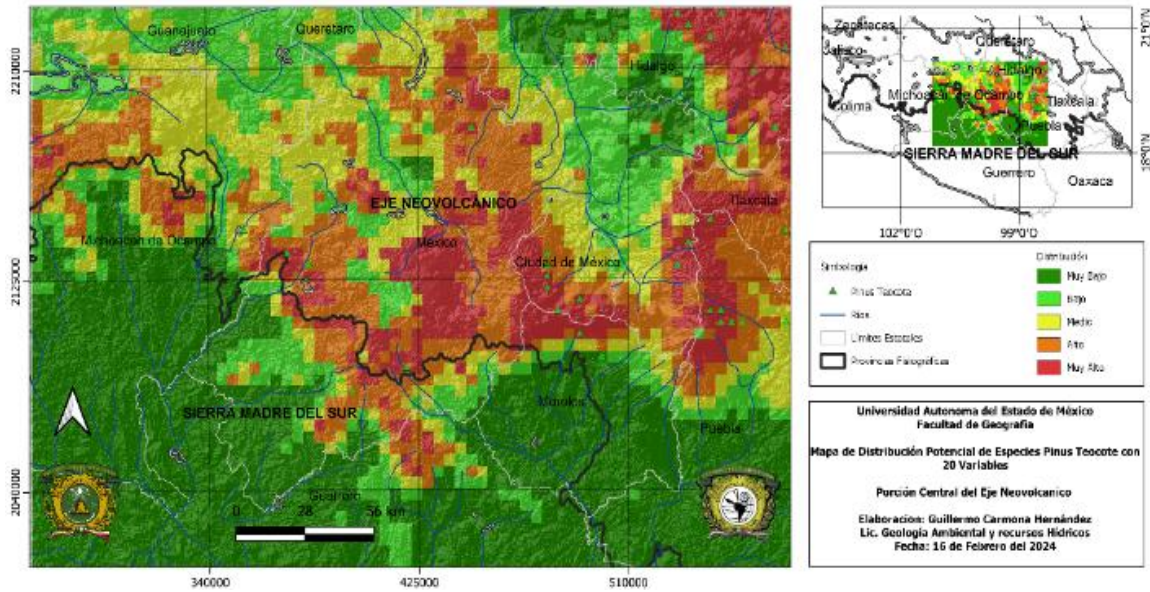


Figura 24. Modelo de distribución potencial 20 Variables (*P. teocote*), Fuente: Elaboración Propia.

- *Pinus pseudostrabus*

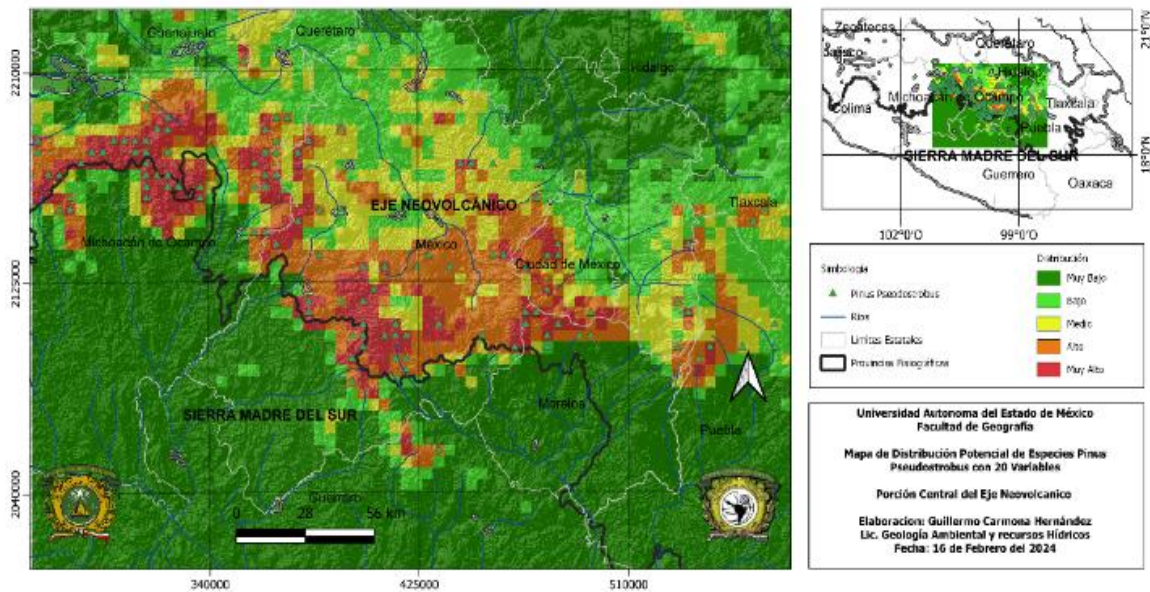


Figura 25. Modelo de distribución potencial 20 Variables (*P. pseudostrabus*), Fuente: Elaboración Propia.

- *Pinus douglasiana*

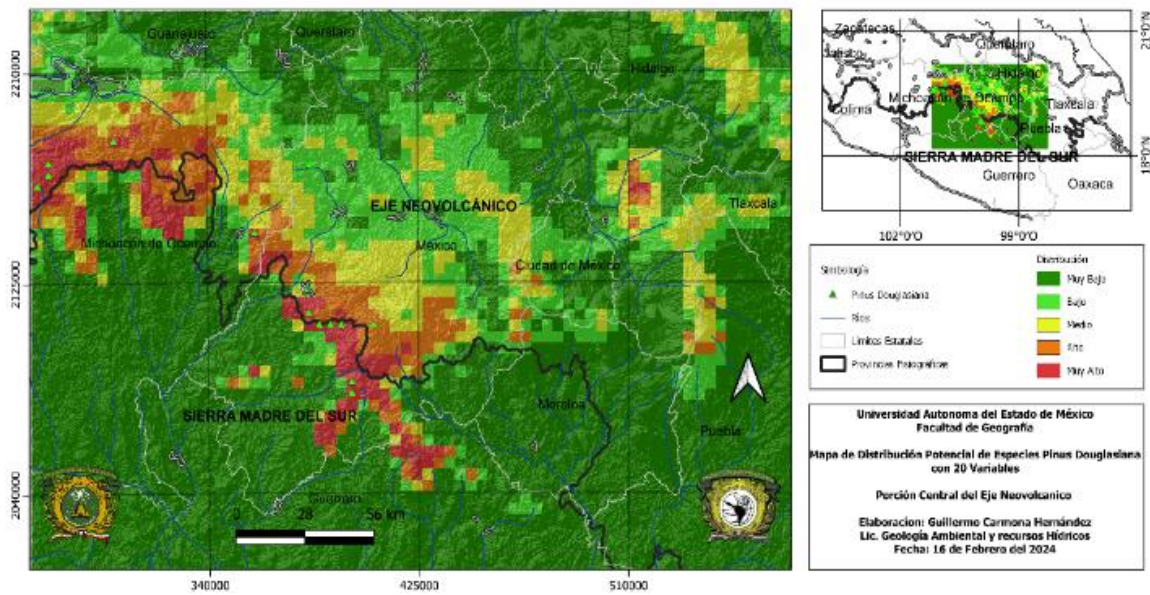


Figura 26. Modelo de distribución potencial 20 Variables (*P. douglasiana*), Fuente: Elaboración Propia.

- *Pinus montezumae*

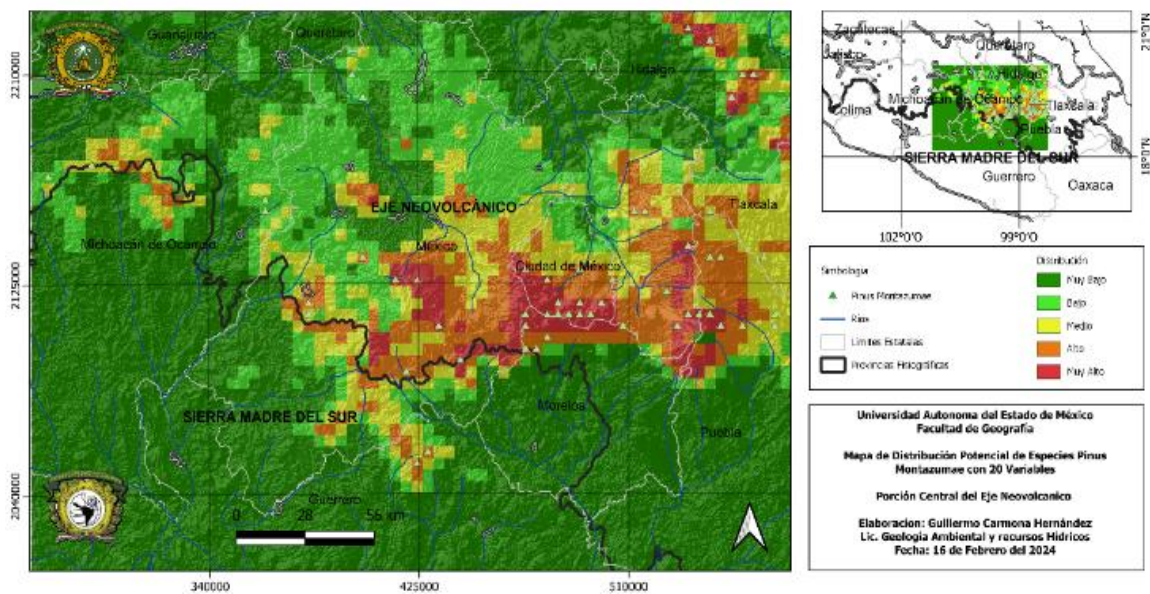


Figura 27. Modelo de distribución potencial 20 Variables (*P. montezumae*), Fuente: Elaboración Propia.

Para transformar los mapas continuos de idoneidad en áreas binarias de presencia/ausencia potencial, se identificó el umbral de corte que genera el reporte de Maxent, utilizando el percentil 10 de probabilidad de presencia en los puntos de entrenamiento. Este umbral para cada especie, excluye el 10% de los registros con la idoneidad más baja para controlar posibles errores de georreferenciación y generando una predicción conservadora (Tabla 6).

Tabla 6. Umbral 10 percentil por especie.

Especie	Logistic threshold	Description
<i>P. hartwegii</i>	0.162	10 percentile training presence
<i>P. teocote</i>	0.336	10 percentile training presence
<i>P. pseudostrobus</i>	0.294	10 percentile training presence
<i>P. douglasiana</i>	0.286	10 percentile training presence
<i>P. montezumae</i>	0.342	10 percentile training presence

4.1.2. Análisis de contribución de variables y correlación

El análisis de contribución de variables para los MDPE base reveló los factores ambientales más influyentes para cada especie (Tabla 7). Este análisis que cuantifica el peso relativo de cada predictor en el modelo, evidencia como la idoneidad de hábitat de cada especie responde a combinaciones distintas de variables climáticas y topográficas.

La heterogeneidad en los patrones de contribución refleja la diversidad de nichos ecológicos que ocupan las cinco especies de *Pinus* dentro de la región de estudio, confirmando que el potencial de distribución está condicionado por regímenes ambientales particulares.

Tabla 7. Porcentaje de Contribución por Especie.

Porcentaje de Contribución					
Variable	<i>hartwegii</i>	<i>montezumae</i>	<i>douglasiana</i>	<i>teocote</i>	<i>pseudostrobus</i>
DEM	31.5	0.3	0	4.8	12.6
Bio 1	0.4	0	0	0	0
Bio 2	5.4	0.1	12.4	0.2	4.7
Bio 3	0.1	1.2	1.4	4	1.1
Bio 4	8.4	29.1	1.3	6.3	3.9
Bio 5	0.4	29.7	0	42.3	2.3
Bio 6	2.9	4	0	2.6	5.9
Bio 7	3.7	1.3	0	3.5	0.1
Bio 8	31.4	8.2	0	3.8	0.2
Bio 9	8.1	0.3	11.5	1.1	5.2
Bio 10	2.4	9.8	0	0	8.9
Bio 11	2.1	0	0	0	5.2
Bio 12	0.1	4	5	0.4	2.4
Bio 13	0.2	4.3	0	4.4	0.1
Bio 14	0.7	0.3	68.3	0	11.3
Bio 15	1.3	0.4	0	2.8	4.5
Bio 16	0.5	2.3	0	0	11.4
Bio 17	0.1	0.4	0	20.7	19.1
Bio 18	0	1.5	0.1	3.2	1.1
Bio 19	0.5	2.7	0	0	0.1

Para evitar multicolinealidad, se realizó un análisis de matriz de contribución de variables, entre las 20 variables predictoras. Siguiendo el criterio de Minga (2022), se identificaron pares de variables con un coeficiente de determinación (R^2) superior a 0.85, indicando una correlación muy buena, para cada par de variables que estuvieran altamente correlacionadas, se seleccionó y conservó únicamente la que tuviera un mayor porcentaje de contribución individual en los MDPE base.

A partir de este proceso se definió un conjunto reducido de variables independientes para la generación de los MDPE simplificados (Tabla 8).

Tabla 8. Matriz de Correlación

Correlación	Bio1	Bio2	Bio3	Bio4	Bio5	Bio6	Bio7	Bio8	Bio9	Bio10	Bio11	Bio12	Bio13	Bio14	Bio15	Bio16	Bio17	Bio18	Bio19	SRTMvta
Bio1	1	0.087782	-0.373974	0.124739	0.993857	0.984855	0.301573	0.996334	0.982333	0.997564	0.997893	0.236812	0.402775	-0.812897	0.806345	0.435428	-0.867977	-0.742723	-0.7218	-0.973872
Bio2	0.087782	1	0.368583	0.327331	0.17222	-0.065023	0.854094	0.127735	-0.018497	0.089655	0.060009	-0.594113	-0.548121	-0.380269	-0.139107	-0.537006	-0.339175	-0.145868	-0.448612	-0.080184
Bio3	-0.373974	0.368583	1	-0.620201	-0.392174	-0.375046	-0.167271	-0.373929	-0.462917	-0.418875	-0.349382	-0.198787	-0.3894	0.136682	-0.505699	-0.360996	0.194239	0.15463	0.024095	0.43434
Bio4	0.124739	0.327331	-0.620201	1	0.196597	0.007894	0.69628	0.16372	0.12013	0.175218	0.062962	-0.365643	-0.174939	-0.135542	0.145109	-0.21722	-0.152877	0.069064	-0.130124	-0.183407
Bio5	0.993857	0.17222	-0.392174	0.196597	1	0.96298	0.398571	0.993539	0.972803	0.994959	0.987025	0.179515	0.357016	-0.833998	0.794382	0.307357	-0.884796	-0.742894	-0.744538	-0.971071
Bio6	0.984855	-0.065023	-0.375046	0.007894	0.96298	1	0.13658	0.972909	0.981205	0.979059	0.991193	0.344316	0.430244	-0.762222	0.817614	0.524413	-0.820484	-0.732589	-0.683247	-0.953749
Bio7	0.301573	0.854094	-0.167271	0.69628	0.398571	0.13658	1	0.341047	0.236622	0.325341	0.254906	-0.511743	-0.355933	-0.47156	0.137526	-0.360689	-0.459979	-0.237588	-0.479542	-0.323667
Bio8	0.996334	0.127735	-0.373929	0.16372	0.993539	0.972909	0.341047	1	0.972362	0.995114	0.991021	0.19474	0.365338	-0.819147	0.794321	0.396407	-0.872138	-0.729585	-0.734275	-0.972151
Bio9	0.982333	-0.018497	-0.462917	0.12013	0.972803	0.981205	0.236622	0.972362	1	0.982271	0.981803	0.299231	0.476285	-0.752619	0.840714	0.503981	-0.819323	-0.726331	-0.636931	-0.961435
Bio10	0.997564	0.089655	-0.418875	0.175218	0.994959	0.979059	0.325341	0.995114	0.982171	1	0.992621	0.225673	0.401899	-0.810176	0.816934	0.430784	-0.86633	-0.711582	-0.719914	-0.97339
Bio11	0.997893	0.060009	-0.349382	0.062962	0.987025	0.991193	0.254906	0.991021	0.981803	0.992621	1	0.267045	0.421712	-0.807842	0.803072	0.457439	-0.862688	-0.752198	-0.716043	-0.967897
Bio12	0.236812	-0.594113	-0.198787	-0.365643	0.179515	0.344316	-0.511743	0.19474	0.299231	0.225673	0.267045	1	0.941543	0.070764	0.527481	0.957477	0.06144	-0.079423	0.150406	-0.201458
Bio13	0.402775	-0.548121	-0.3894	-0.174939	0.357016	0.490244	-0.355933	0.365338	0.476285	0.401899	0.421712	0.941543	1	-0.066477	0.7396	0.991003	-0.089682	-0.160715	0.056632	-0.386052
Bio14	-0.812897	-0.380269	0.136682	-0.135542	-0.833998	-0.762222	-0.47156	-0.819147	-0.752619	-0.810176	-0.807842	0.070764	-0.066477	1	-0.549374	-0.108327	0.939742	0.691837	0.898712	0.774867
Bio15	0.806345	-0.139107	-0.505699	0.145109	0.794382	0.817614	0.137526	0.794321	0.840714	0.816934	0.803072	0.527481	0.7396	-0.549374	1	0.73183	-0.601533	-0.442241	-0.421117	-0.798068
Bio16	0.435428	-0.537006	-0.360996	-0.21722	0.307357	0.524413	-0.360689	0.396407	0.503981	0.430784	0.457439	0.957477	0.991003	-0.108327	0.73183	1	-0.132935	-0.209343	0.011026	-0.411075
Bio17	-0.867977	-0.339175	0.194239	-0.152877	-0.884796	-0.820484	-0.459979	-0.872138	-0.819323	-0.86633	-0.862688	0.06144	-0.089682	0.939742	-0.601533	-0.132935	1	0.714565	0.934612	0.835682
Bio18	-0.742723	-0.145868	0.15463	0.069064	-0.742894	-0.732589	-0.237588	-0.729585	-0.726331	-0.711582	-0.752198	-0.079423	-0.160715	0.691837	-0.442241	-0.209343	0.714565	1	0.594547	0.727848
Bio19	-0.7218	-0.448612	0.024095	-0.130124	-0.744538	-0.663247	-0.479542	-0.734275	-0.636931	-0.719914	-0.718043	0.150406	0.056632	0.898712	-0.421117	0.011026	0.934612	0.594547	1	0.672636
SRTMvta	-0.973872	-0.080184	0.43434	-0.183407	-0.971071	-0.953749	-0.323667	-0.972151	-0.961435	-0.97339	-0.967897	-0.201458	-0.386052	0.774867	-0.798068	-0.411075	0.835682	0.727848	0.672636	1

4.1.3. Modelos finales simplificados y validación

En base al conjunto de variables independientes resultado del análisis de correlación, se generaron los MDPE simplificados. El número de variables por modelo se redujo significativamente:

- *P. hartwegii* (8 variables)
- *P. montezumae* (10 variables)
- *P. douglasiana* (6 variables)
- *P. teocote* (8 variables)
- *P. pseudostrobus* (7 variables)

Las validaciones de estos modelos simplificados confirmo que la depuración de variables no comprometido su poder predictivo. Los valores de AUC para datos de entrenamiento se mantuvieron en los siguientes rangos (Tabla 9): *P. hartwegii* (0.950), *P. montezumae* (0.910), *P. douglasiana* (0.957), *P. teocote* (0.849) y *P. pseudostrobus* (0.905).

Tabla 9. Valores de AUC por especie (Modelos Finales).

Modelo	Especie	N° Variables	Training data Auc	N° Variables	Training data Auc
1	<i>Pinus hartwegii</i>	20	0.955	8	0.950
2	<i>Pinus montezumae</i>	20	0.928	10	0.910
3	<i>Pinus douglasiana</i>	20	0.957	6	0.957
4	<i>Pinus teocote</i>	20	0.856	8	0.849
5	<i>Pinus pseudostrobus</i>	20	0.918	7	0.905

- *Pinus hartwegii*

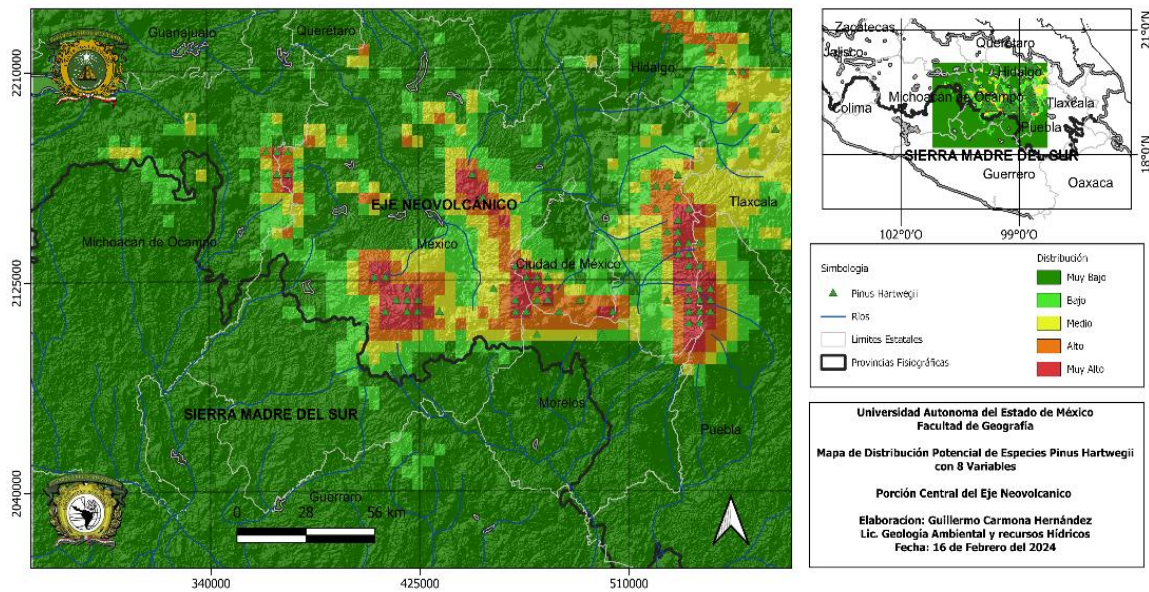


Figura 28. Modelo de distribución potencial final 8 variables (*P. hartwegii*), Fuente: Elaboración propia.

- *Pinus teocote*

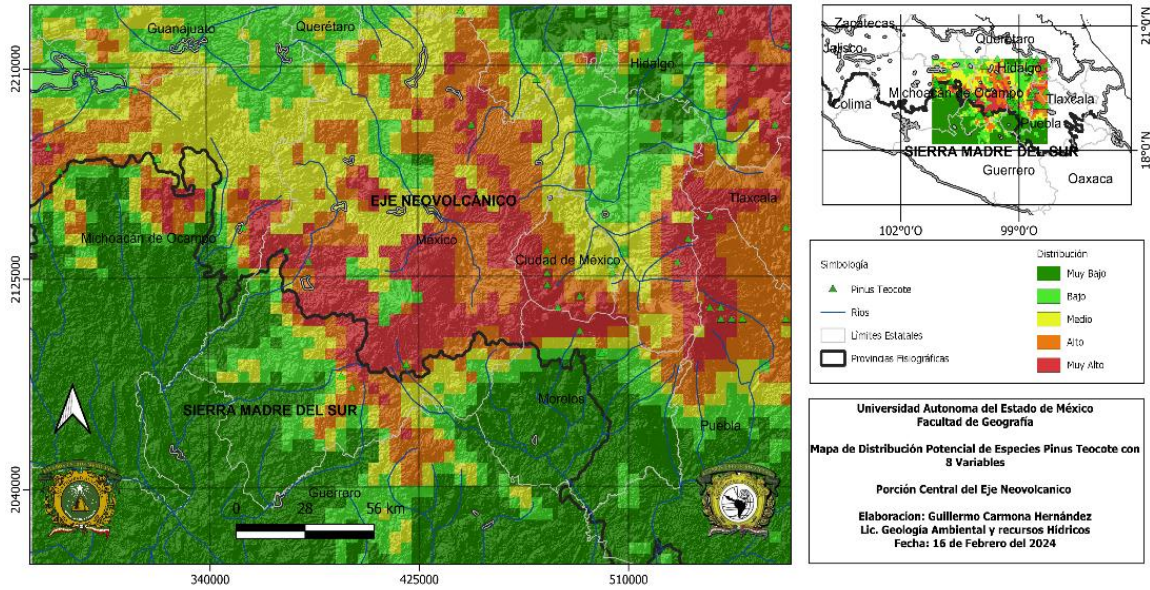


Figura 29. Modelo de distribución potencial simplificado 8 variables (*P. teocote*), Fuente: Elaboración propia.

- *Pinus pseudostrobus*

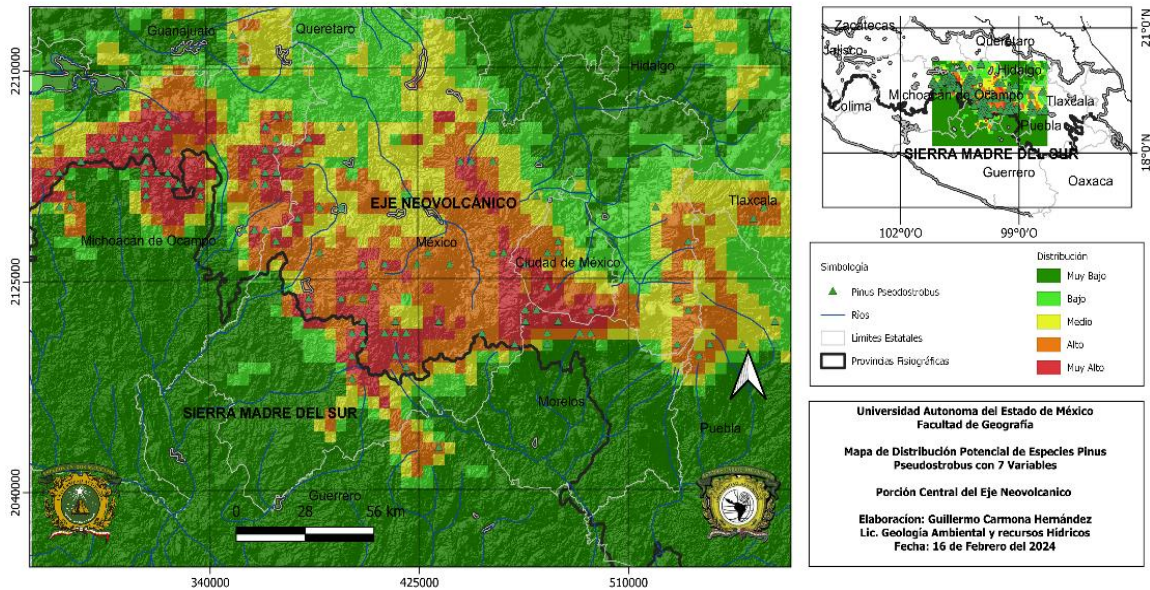


Figura 30. Modelo de distribución potencial simplificado 7 variables (*P. pseudostrobus*), Fuente: Elaboración propia.

- *Pinus douglasiana*

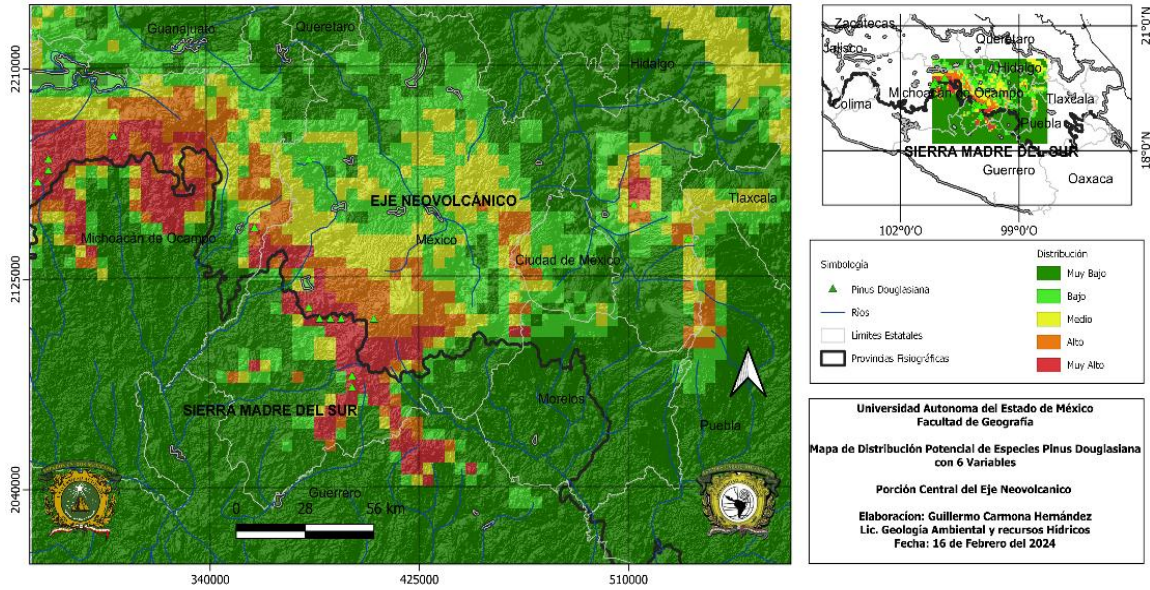


Figura 31. Modelo de Distribución Potencial Final 6 Variables (*P. douglasiana*), Fuente: Elaboración Propia.

- *Pinus montezumae*

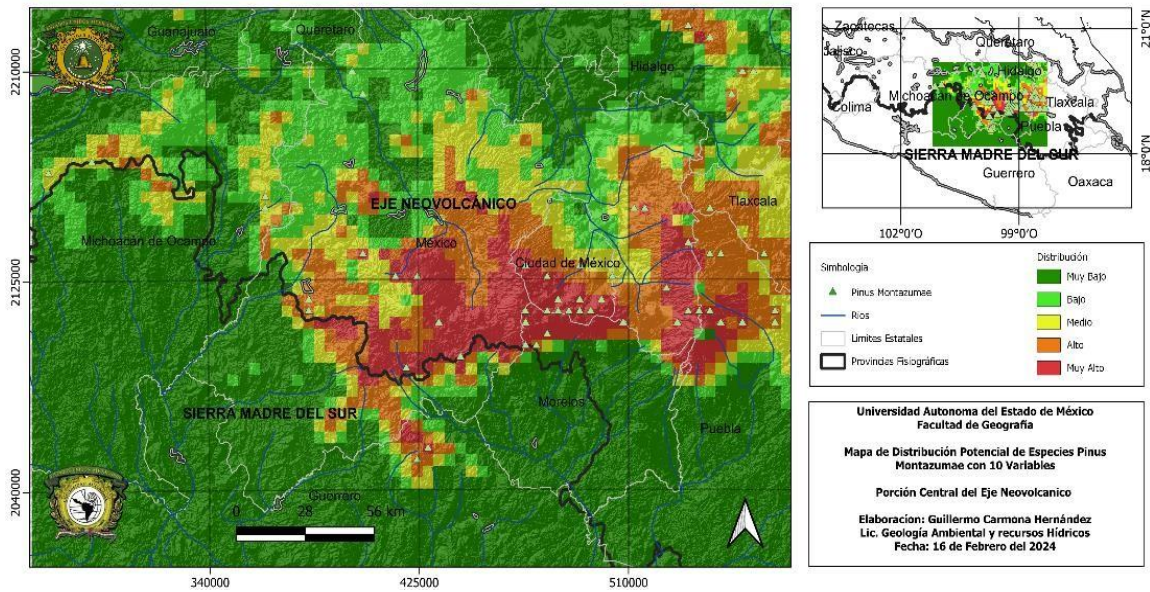


Figura 32. Modelo de Distribución Potencial Final 10 Variables (*P. montezumae*), Fuente: Elaboración Propia.

4.1.4. Variables determinantes en los MDPE simplificados

El análisis de contribución de variables para los MDPE simplificados (Tabla 10) permitió identificar los factores ambientales clave que permitieron realizar la predicción para definir la idoneidad de hábitat de cada especie, mostrando patrones ecológicos distintivos.

Tabla 10. Porcentaje de Contribución por Especie (MDPE Finales).

Porcentaje de Contribución					
Variable	<i>hartwegii</i>	<i>montezumae</i>	<i>douglasiana</i>	<i>teocote</i>	<i>pseudostrobus</i>
DEM	44.8	0	N/A	N/A	N/A
Bio 1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Bio 2	2.3	N/A	12.8	N/A	8.3
Bio 3	1.6	1	0.7	N/A	2.1
Bio 4	11.4	32.6	2	N/A	4
Bio 5	N/A	32.2	N/A	62.1	N/A
Bio 6	N/A	4.7	N/A	1.3	N/A
Bio 7	N/A	1.6	N/A	13	N/A
Bio 8	38.8	N/A	N/A	1.4	N/A
Bio 9	N/A	N/A	11.5	N/A	N/A
Bio 10	N/A	18.1	N/A	N/A	36.9
Bio 11	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Bio 12	N/A	5.7	5.1	8.4	N/A
Bio 13	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Bio 14	0.4	N/A	68	N/A	N/A
Bio 15	N/A	N/A	N/A	1.5	N/A
Bio 16	0.3	N/A	N/A	N/A	16.7
Bio 17	N/A	N/A	N/A	2.4	28.9
Bio 18	0.3	1.6	N/A	2.3	3
Bio 19	N/A	2.5	N/A	N/A	N/A

- *Pinus hartwegii*: Las variables que prevalecieron fueron el (DEM, 44.8%) y la temperatura media del trimestre más húmedo (Bio 8, 33.8%), con lo que se afirmó su afinidad por ambientes de alta montaña con humedad estacional constante.
- *Pinus montezumae*: Las variables predominantes fueron la estacionalidad de la temperatura (Bio 4, 32.6%) y la temperatura máxima del mes más cálido (Bio 5, 32.2%).
- *Pinus teocote*: El factor predominante fue la temperatura máxima del mes más cálido (Bio 5, 62.1%).
- *Pinus pseudostrobus*: Las variables que tuvieron una mayor influencia fueron la temperatura media del trimestre más cálido (Bio 10, 36.9%) y variables de precipitación en temperatura seca (Bio 17, 28.9%).
- *Pinus douglasiana*: La variable predominante fue la precipitación del mes más seco (Bio 14, 68%).

Con este análisis se evidencia que los requerimientos ambientales de cada especie *Pinus* responde a combinaciones específicas de factores topográficos, térmicos e hídricos.

4.2. Componentes del Balance Hídrico Regional (1980-2020).

Para poder comprender la dinámica hídrica en base a la estimación de la recarga potencial por el método de balance hídrico del suelo, se estimaron los componentes de esta ecuación para el periodo (1980-2020). Los mapas resultantes muestran la distribución espacial de la precipitación acumulada (P), mientras que para la evapotranspiración real (ET) y el escurrimiento superficial (R_o) la distribución espacial media anual.

4.2.1. Precipitación media anual (P)

El mapa de precipitación media anual muestra una clara variabilidad espacial, con un claro gradiente altitudinal. La lamina de precipitación acumulada en el periodo 1980-2020 oscila entre un mínimo de 428.02 mm/año y un máximo de 1,537.49 mm/año.

Los valores más altos se concentran en las partes con mayor elevación, correspondiente a la porción central del Eje Neovolcánico y en las estribaciones de la Sierra Madre del Sur con exposición a flujos de humedad, mientras que los valores mínimos se presentan valles Intermontanos y depresiones asociadas a clima más seco (Figura 33).

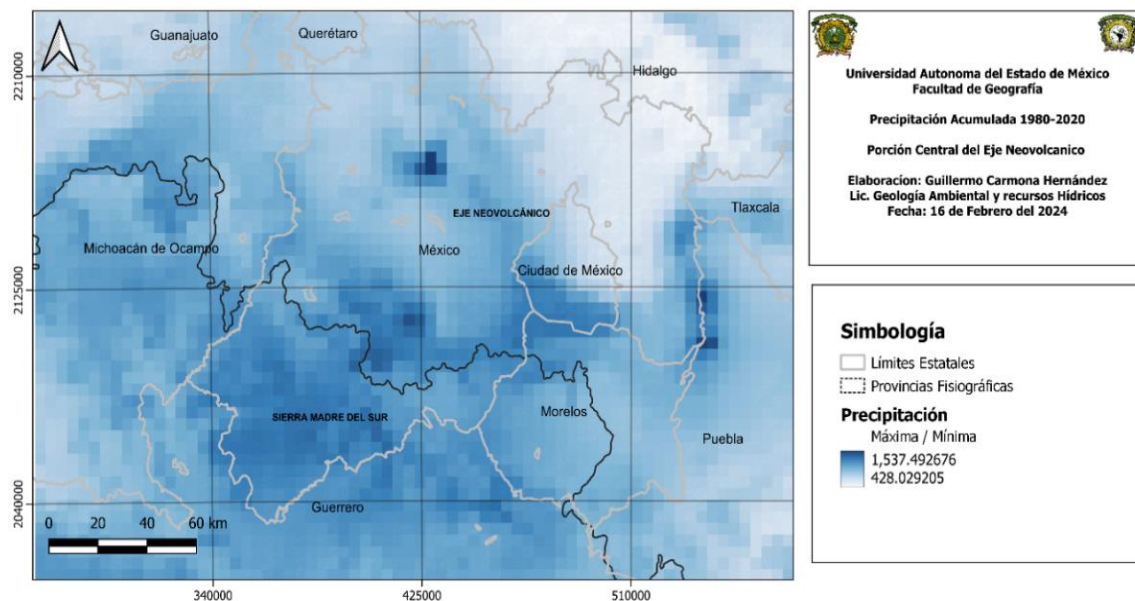


Figura 33. Mapa de Precipitación media anual para el Periodo de 1980-2020, Fuente: Elaboración Propia.

4.2.2. Evapotranspiración real media anual (*ET*)

La evapotranspiración real representa la cantidad de agua que retorna a la atmosfera, presentó un rango de 356.52 mm/año como valor mínimo y de 924.31 mm/año como valor máximo. Su distribución espacial está ligada fuertemente a la disponibilidad de agua (precipitación) y a la energía disponible (temperatura).

Los valores más altos coinciden con las zonas de alta precipitación y cobertura vegetal densa, especialmente en los bosques templados de las partes medias y altas de las montañas (Figura 34).

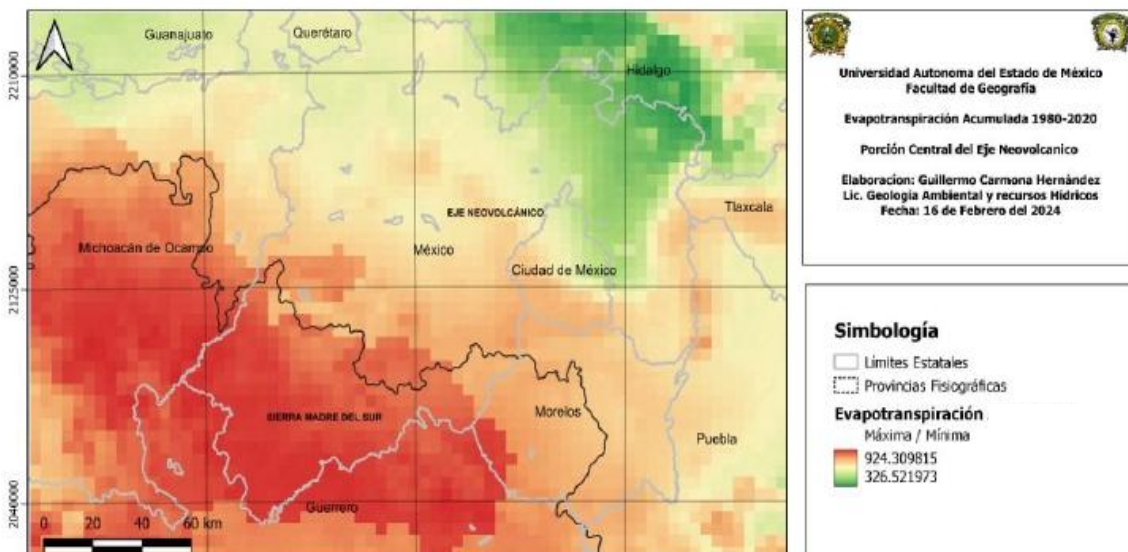


Figura 34. Mapa de Evapotranspiración Real para el Periodo de 1980-2020, Fuente: Elaboración Propia.

4.2.3. Escurrimiento superficial medio anual (*R₀*)

El escurrimiento superficial medio anual representa la lámina de agua que fluye por la superficie, mostro un rango de valores que oscila entre 21.40 mm/año a 751.58 mm/año. Su distribución espacial sigue el patrón de precipitación, al presentar los valores más altos en las zonas montañosas de mayor elevación y los valores más bajos en las áreas planas y secas de los valles.

A diferencia de la (*ET*), el escurrimiento muestra una magnitud significativamente menor, lo que indica que en la zona de estudio una gran parte del agua precipitada es retornada a la atmosfera (Figura 35).

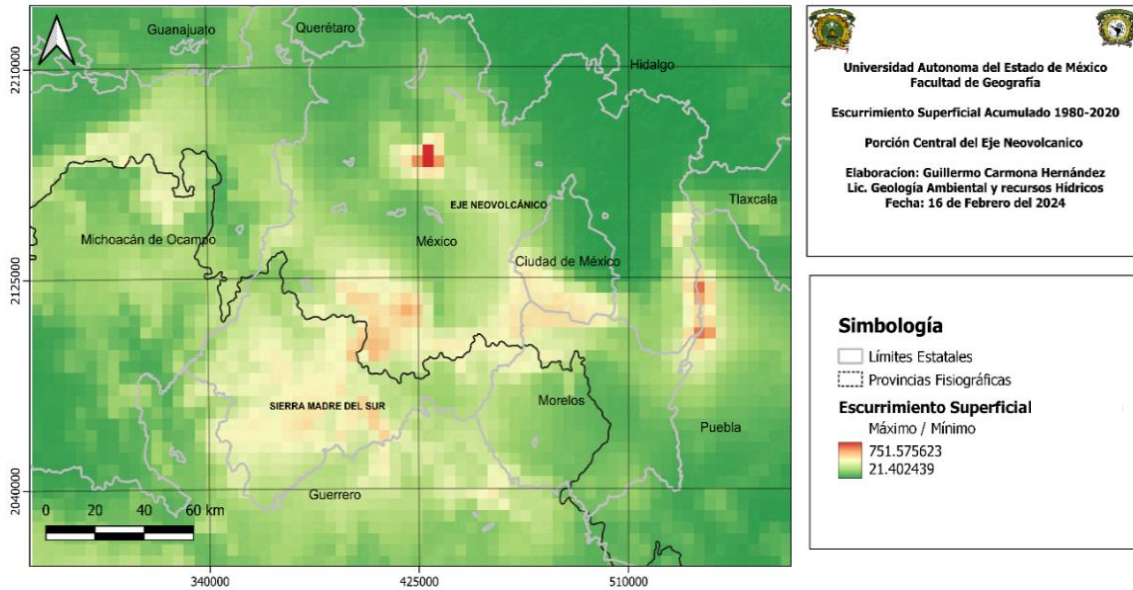


Figura 35. Mapa de Escurrimiento Superficial para el Periodo de 1980-2020, Fuente: Elaboración Propia.

4.3. Integración Espacial y Extracción de la recarga potencial

Para estimar la recarga potencial correspondiente a los MDPE, se realizó un proceso de integración espacial, a partir de un análisis de tabulación cruzada (Crostabb), el cual permitió identificar las áreas de superposición exacta entre los mapas binarizados de idoneidad de cada especie de *Pinus* resultado de los MDPE simplificados y las cinco clases de bosque real (Pino-Encino, Pino, Oyamel, Encino-Pino) extraídas de la Serie VII de INEGI.

Los mapas resultantes de este cruce para cada especie (Figura 36 a 40) representan los pixeles donde coincide espacialmente la idoneidad ambiental de la clase de interés *Pinus* y la cobertura forestal real.

A partir de estas áreas de intersección, mediante la herramienta Extract de TerrSet se estimaron los valores de cada componente de la ecuación de balance hídrico (P, R_0, ET) a excepción de la infiltración.

Finalmente se ejecutó la ecuación de balance hídrico ($I = P - R_0 - ET$) para poder estimar el índice de infiltración para el periodo de estudio, asociado a cada combinación *Pinus*-Bosque real.

- ***Pinus hartwegii***

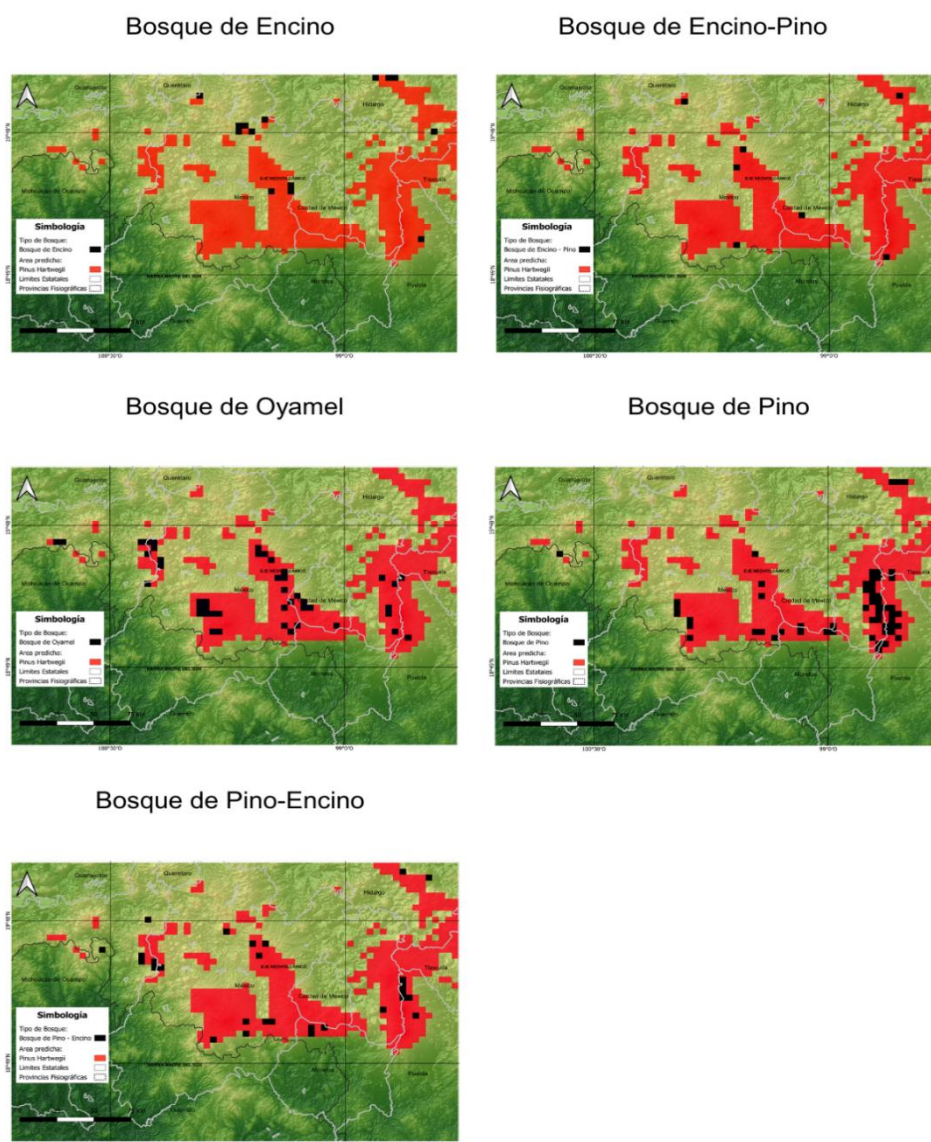
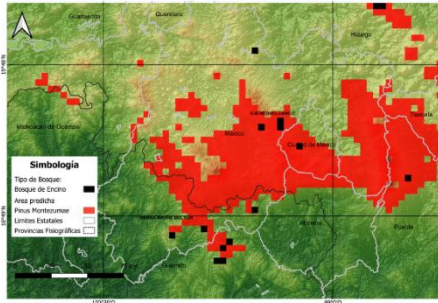


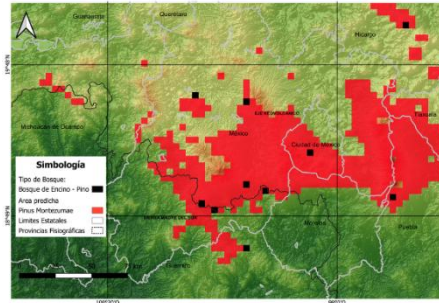
Figura 36. Crostabb *Pinus hartwegii* y coberturas forestales reales.

- ***Pinus montezumae***

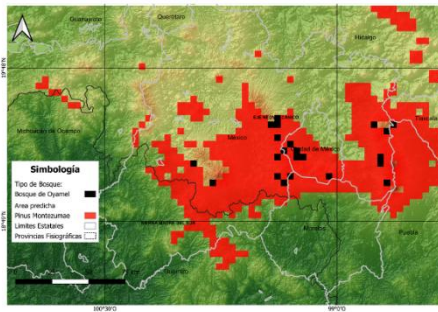
Bosque de Encino



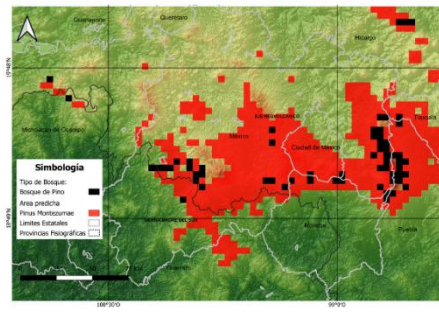
Bosque de Encino-Pino



Bosque de Oyamel



Bosque de Pino



Bosque de Pino-Encino

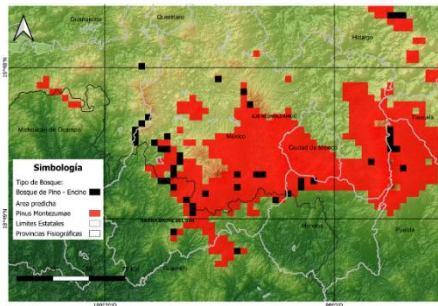


Figura 37. Crostabb *Pinus montezumae* y coberturas forestales extraídas

- *Pinus douglasiana*

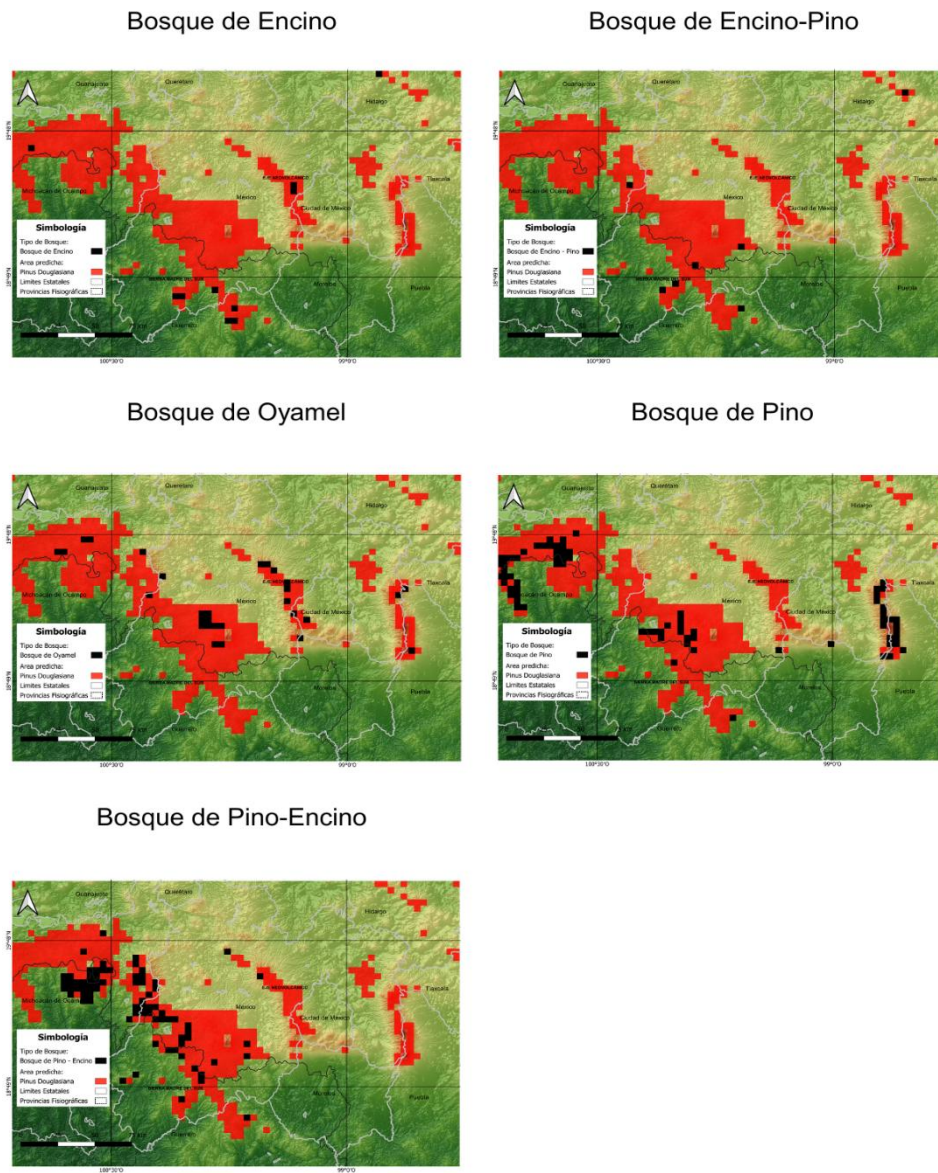
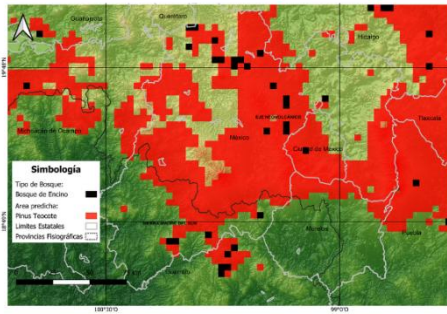


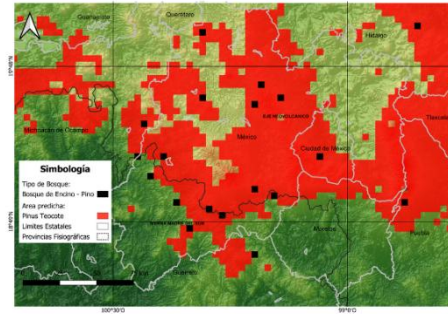
Figura 38. Crostabb *Pinus douglasiana* y coberturas forestales extraídas

- **Pinus teocote**

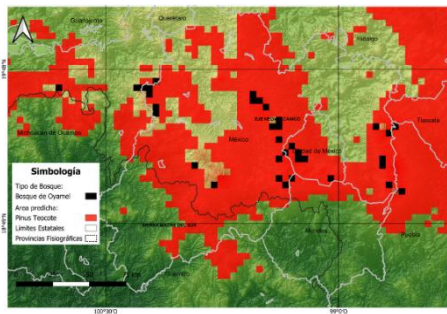
Bosque de Encino



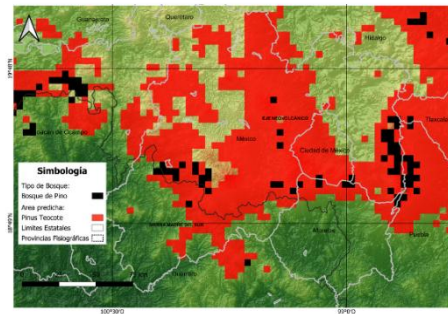
Bosque de Encino-Pino



Bosque de Oyamel



Bosque de Pino



Bosque de Pino-Encino

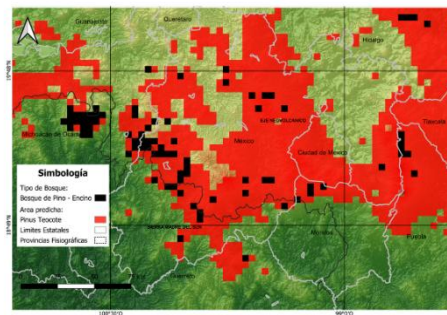


Figura 39. Crostabb *Pinus teocote* y coberturas forestales extraídas

- **Pinus pseudostrobus**

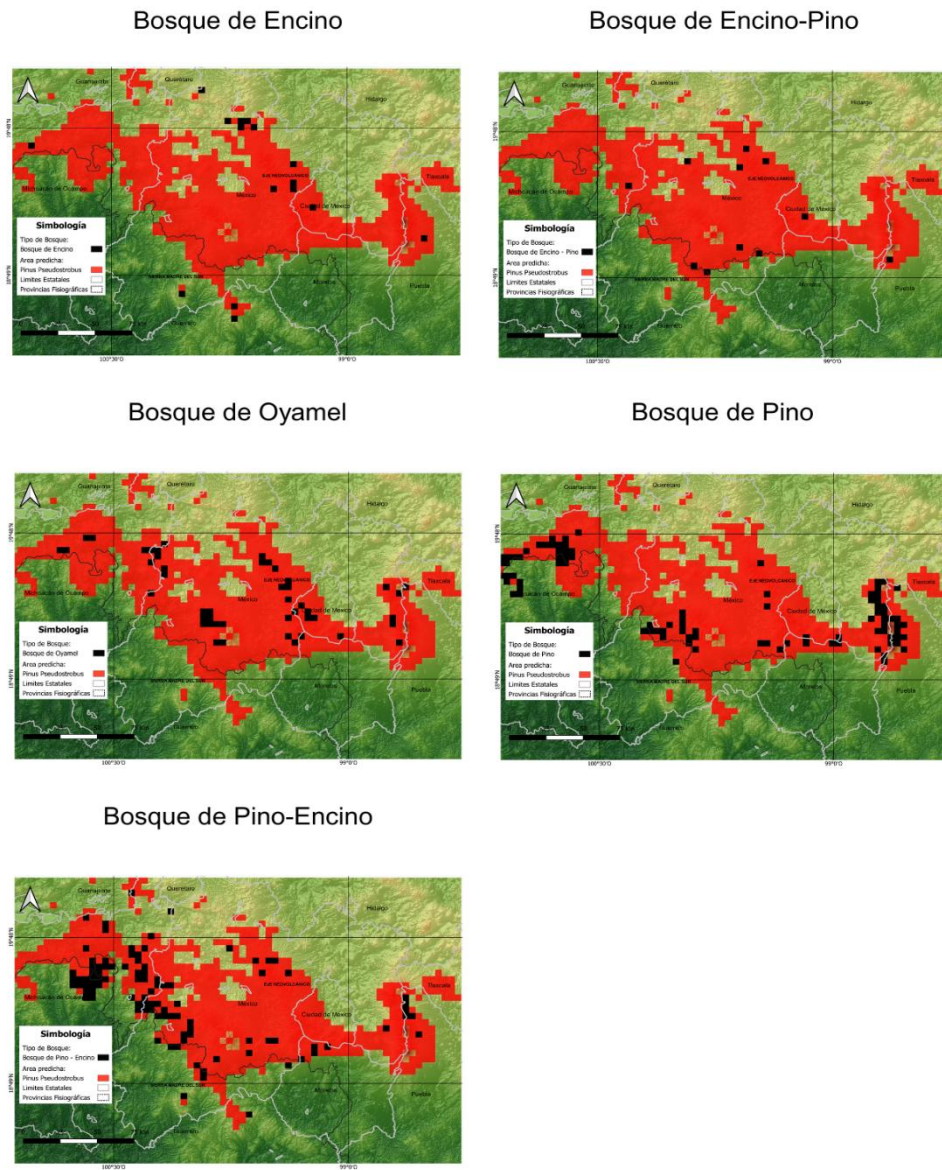


Figura 40. Crostabb *Pinus pseudostrobus* y coberturas forestales extraídas

4.4. Síntesis de Potencial de Recarga Hídrica por Especie

A partir de los valores de infiltración obtenidos se puede comparar la capacidad potencial de las diferentes especies de *Pinus* para favorecer la recarga hídrica en los bosques con una distribución idónea. La Tabla 11 sintetiza el hallazgo central, presentando los valores de infiltración (I) para cada escenario.

Tabla 11. Síntesis de potencial de recarga hídrica: Promedio de infiltración (mm/año).

Tasas de infiltración por escenario					
<i>Pinus</i> -Bosque real	Pino-Encino	Pino	Oyamel	Encino-Pino	Encino
<i>hartwegii</i>	76.99	76.97	77.05	76.79	76.74
<i>montezumae</i>	67.50	65.67	66.07	66.75	67.04
<i>douglasiana</i>	44.46	41.55	40.09	42.02	42.28
<i>teocote</i>	66.31	65.14	64.29	64.92	64.82
<i>pseudostrobus</i>	64.92	63.64	61.86	62.58	62.68

4.4.1. Identificación de los escenarios óptimos

A partir de tabla 10 se identifican los siguientes patrones:

1. **Especie con mayor potencial de recarga:** *Pinus hartwegii* presenta los mayores **promedios de infiltración** con respecto al resto de especies *Pinus*, en todos los tipos de cobertura forestal real con valores que oscilan entre **76.74 y 77.05 mm/año**. Con estos valores, esta especie presenta la **mayor capacidad para favorecer la recarga hídrica** en la zona de estudio.
2. **Cobertura forestal asociada a mayor infiltración:** Para cuatro de las cinco especies *Pinus* (*hartwegii*, *montezumae*, *douglasiana* y *teocote*), la cobertura forestal de **Bosque de Pino-Encino estuvo asociada con los valores más altos de infiltración**.

En el caso particular de la especie *P. hartwegii*, el valor máximo de infiltración se registró en la cobertura forestal de Bosque de Oyamel.

3. **Especie con menor potencial de recarga:** La especie *P. douglasiana* presentó los menores promedios de infiltración, con un rango entre **40.09 y 44.46 mm/año**, lo que representa **aproximadamente la mitad de potencial de *P. hartwegii***.
4. **Rango General:** El potencial de recarga estimado para las áreas de distribución potencial de las cinco especies *Pinus* en la zona de estudio varia en un rango amplio que va **de 40 mm/año hasta 77 mm/año**.

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

A partir del presente tema de investigación se logró integrar exitosamente los MDPE con el método de balance hídrico del suelo para estimar y comparar el potencial de recarga hídrico asociado a las cinco especies de *Pinus* propuestas (*hartwegii*, *montezumae*, *douglasiana*, *teocote* y *pseudostrobus*) en la porción central del Eje Neovolcánico y norte de la Sierra Madre del Sur. A continuación, se desglosan las conclusiones derivadas de las dos fases propuestas en la metodología

5.1.1. Modelos de Distribución Potencial de Especies (MDPE)

1. Los MDPE generados para las cinco especies *Pinus* mostraron un alto desempeño predictivo, con valores de AUC en los modelos simplificados que oscilan entre 0.849 (*P. teocote*) y 0.957 (*P. douglasiana*). Con estos se valida la capacidad del algoritmo de Maxent para identificar las áreas ambientalmente idóneas para estas especies en la zona de estudio utilizando variables climáticas y topográficas para el periodo 1980-2020.
2. Los MDPE simplificados mediante el análisis de correlación permitió reducir significativamente el número de variables predictoras, sin comprometer el poder predictivo de los modelos. La consistencia espacial entre los modelos base y simplificados confirman la eficiencia de este procedimiento para eliminar redundancia y así obtener modelos parsimoniosos.
3. A partir del análisis de contribución de variables se revelaron patrones ecológicos distintivos entre las especies *Pinus*. Para el caso de *P. hartwegii* estuvo condicionado la potencial distribución por la altitud (DEM, 44.8%), para *P. douglasiana* influyo principalmente la precipitación del mes más seco (Bio 14, 68%), con lo que se evidencia la diversidad de nichos ecológicos dentro del género *Pinus* en la zona de estudio.

5.1.2. Estimación de la recarga potencial

1. La estimación de la recarga potencial por el método de balance hídrico del suelo permitió establecer el marco hidrológico regional para el periodo 1980-2020. La precipitación media anual mostró un rango de 428.02 mm/año a 1,537.49 mm/año, los valores más altos se concentraron en las zonas de alta montaña. La evapotranspiración real media anual presento valores entre 326.52 mm/año y 924.31 mm/año, mientras que para el escurrimiento superficial medio anual oscilo entre 21.40 mm/año y 751.58 mm/año, lo que refleja la compleja dinámica hídrica de la región.
2. La integración espacial de ambas fases de la metodología fue mediante el análisis de tabulación cruzada (Crostabb) esta herramienta demostró ser eficaz para vincular resultados ecológicos e hidrológicos, permitiendo extraer los promedios de infiltración para las áreas de superposición entre la idoneidad potencial de la especie y las coberturas forestales reales.

5.1.3. Recarga potencial por especie

1. Se confirmo la hipótesis planteada: Las zonas con mayor capacidad de infiltración corresponden a las áreas de distribución potencial correspondiente a la especie *P. hartwegii*. Esta especie presento los promedios de infiltración más altos con relación a todas las coberturas forestales reales analizadas, con valores que oscilan entre 76.74 mm/año y 77.05 mm/año.
2. La superposición de las áreas potenciales de distribución de la especie *P. hartwegii* con Bosque de Oyamel registro el valor máximo de infiltración (77.05 mm/año), seguido por la asociación con Bosque Pino-Encino (76.99 mm/año). Dichos ecosistemas constituyen cuenta con una alta probabilidad para ser considerados de alta prioridad para conservación y restauración con fines de recarga y seguridad hídrica.

3. Se identificó un gradiente en el potencial de recarga entre las especies: *P. hartwegii* (>76 mm/año) > *P. montezumae* y *P. teocote* (~65-67 mm/año) > *P. pseudostrobus* (~62-65 mm/año) > *P. douglasiana* (~40-44 mm/año).
Dicha jerarquización proporciona criterios científicos objetivos para orientar programas de reforestación y asignación de recursos en esquemas de pago por servicios ambientales.
4. La cobertura de Bosque de Pino-Encino se asoció con los valores de infiltración más altos para la mayoría de las especies de *Pinus*, con lo que destaca su importancia hidrológica en el contexto de los bosques templados del centro de México.

5.2. Recomendaciones

5.2.1. Gestión y conservación

1. **Priorizar la conservación y restauración a partir de la especie *P. hartwegii*** en las zonas de alta montaña del Eje Neovolcánico, particularmente en asociaciones con Bosque de Oyamel y Bosque de Pino-Encino, por el alto potencial de recarga hídrica que ofrecen.
2. **Fortalecer los esquemas de pago por servicios ambientales hidrológicos**, considerando criterios técnicos, como: la capacidad de infiltración por especie y tipo de bosque para optimizar la asignación de recursos áreas prioritarias.
3. **Incorporar mapas de idoneidad potencial y las áreas prioritarias de recarga** en los instrumentos de planeación territorial y ordenamiento ecológico de los estados que conforman la zona de estudio (México, Morelos, Ciudad de México, Puebla, Tlaxcala, Hidalgo, Querétaro, Michoacán y Guerrero).

5.2.2. Para Futuras investigaciones

1. **Validar en campo los valores de infiltración** mediante el establecimiento de parcelas de monitoreo, específicamente en las áreas identificadas con mayor potencial, para poder calibrar y refinar modelos hidrológicos.
2. **Investigar el efecto de la estructura y edad del bosque** en la capacidad de infiltración, para complementar el análisis de cobertura con variables de densidad arbórea, profundidad de hojarasca y propiedades edáficas.
3. **Incorporar escenarios de cambio climático** que permitan evaluar cómo podrían verse modificada la distribución potencial de las especies, así como los componentes del balance hídrico y como esto afectaría el potencial de recarga.
4. **Extender la metodología a otras especies del género *Pinus*** y otros tipos de vegetación para mantener una visión más completa del potencial de recarga asociado a los ecosistemas forestales de la región.
5. **Analizar la conectividad ecológica entre las áreas de idoneidad para *P. hartwegii* y otras especies**, con el fin de diseñar y proponer corredores biológicos que funcionen como corredores de recarga hídrica.

En México 115 acuíferos presentan una condición geohidrológica de sobreexplotación y el 39% del abastecimiento depende de fuentes subterráneas, por lo que contar con herramientas científicas que identifiquen y prioricen áreas de recarga hídrica se convierte en una necesidad. Por medio de esta investigación se proporcionan los fundamentos técnicos para transitar hacia una gestión forestal e hídrica integrada que considere el valor hidrológico de las especies endémicas y su potencial para enfrentar los desafíos de la seguridad hídrica en el siglo XXI.

Referencias

Abatzoglou, J. T., Dobrowski, S. Z., Parks, S. A., & Hegewisch, K. C. (2018). TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015. *Scientific Data*, 5(1), 1-12.

AECID. (2017). *La importancia de las aguas subterráneas en la gestión integrada de los recursos hídricos: Aplicaciones prácticas en proyectos de cooperación internacional para el desarrollo*. Centro de Formación de la Cooperación Española en La Antigua Guatemala.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Álvarez, M. E. (2021). *Ciencias y humanidades*. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

Araújo, M. B., Pearson, R. G., Thuiller, W., & Erhard, M. (2005). Validation of species–climate impact models under climate change. *Global Change Biology*, 11(9), 1504-1513.

Birhane, E., Gebrehiwot, K., Tadesse, T., & Hishe, M. (2022). MaxEnt-based modeling of suitable habitat for *Juniperus procera* in the dry evergreen afromontane forest of Northern Ethiopia. *Ecological Processes*, 11(1), 1-15.

Chapela, F. (2012). *Estado de los bosques de México*. Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible.

Comisión Nacional del Agua. (2021a). *Programa Hídrico Regional 2021-2024: Región Hidrológico-Administrativa IV Balsas*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Comisión Nacional del Agua. (2021b). *Programa Hídrico Regional 2021-2024: Región Hidrológico-Administrativa VIII Lerma Santiago Pacífico*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Comisión Nacional del Agua. (2021c). *Programa Hídrico Regional 2021-2024: Región Hidrológico-Administrativa XIII Aguas del Valle de México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Comisión Nacional del Agua. (2021d). *Programa Hídrico Regional 2021-2024: Región Hidrológico-Administrativa IX Golfo Norte*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

CONABIO. (s.f.). *Geoportal de la CONABIO*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Recuperado el 21 de abril de 2026 de <https://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

Cruz Falcón, A., Ramírez-Hernández, J., Vázquez-González, R., Nava-Sánchez, E. H., Troyo-Diéguez, E., & Fraga-Palomino, H. C. (2013). Estimación de la recarga y balance hidrológico del acuífero de La Paz, BCS, México. *Universidad y Ciencia*, 29(1), 87-100.

Delgado, P., Rebollado, V., Flores, C., García, J., Manzanilla, U., & Corona, D. L. (2014). *Catálogo descriptivo de áreas productoras de semillas y de conservación del género Pinus*. Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías.

Elith, J., Phillips, S. J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y. E., & Yates, C. J. (2011). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17(1), 43-57.

Expósito, J. L. (2001). *Delimitación de los perímetros de protección de pozos mediante técnicas numéricas y el método analítico, acuífero Margarita, Cuba* [Tesis de maestría]. Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua.

FAO & CONAFOR. (2015). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2015: Informe México*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura / Comisión Nacional Forestal.

Guerrero-Morales, J., Fonseca, C. R., Gómez-Albores, M. A., Sampedro-Rosas, M. L., & Silva-Gómez, S. E. (2020). Proportional variation of potential groundwater recharge as a result of climate change and land-use: A study case in Mexico. *Land*, 9(10), Article 364.

Hamilton, L. S., Dudley, N., Greminger, G., Hassan, N., Lamb, D., Stolton, S., & Tognetti, S. (2009). *Los bosques y el agua*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

Hatch Kuri, G. (2018). Agua subterránea en México: retos y pendientes para la transformación de su gestión. En C. A. López, L. Zambrano, R. Ruiz Ortega, M. A. Guzmán, R. Pérez Espejo, R. Sandoval, G. Hatch Kuri, N. Pineda Pablos, R. Pacheco-Vega, & A. Caldera, *El agua en México. Actores, sectores y paradigmas para una transformación social-ecológica* (pp. 149-170). Friedrich-Ebert-Stiftung.

Hernández-Juárez, R. A., Martínez Rivera, L. M., Peñuela-Arévalo, L. A., & Rivera-Reyes, S. (2020). Identificación de zonas potenciales de recarga y descarga de agua subterránea en la cuenca del río Ayuquila-Armería mediante el uso de SIG y el análisis multicriterio. *Investigaciones Geográficas*, (101).

Lara Vasconez, N. X., Cushquicullma Colcha, D. F., Guaiña Yungán, J. I., Espinoza, V. M., & Ati Cutiupala, G. M. (2021). Identificación de zonas potenciales de recarga y descarga de agua subterránea en la subcuenca del Río Chambo mediante los sistemas de información geográfica y el análisis multicriterio. *Polo del Conocimiento*, 6(6), 122-148.

López, C. A. (2017). El agua en México: retos oportunidades y perspectivas. En C. A. López, L. Zambrano, R. Ruiz Ortega, M. A. Guzmán, R. Pérez Espejo, R. Sandoval, G. Hatch Kuri, N. Pineda Pablos, R. Pacheco-Vega, & A. Caldera, *El agua en México. Actores, sectores y paradigmas para una transformación social-ecológica* (pp. 1-24). Friedrich-Ebert-Stiftung.

Maderey, L. E. (2005). *Principios de hidrogeografía: Estudio del ciclo hidrológico*. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.

Mateo, R. G., Felicísimo, Á. M., & Muñoz, J. (2011). Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética. *Revista Chilena de Historia Natural*, 84(2), 217-240.

Minga, R. C. (2022). *Evaluación de la recarga hídrica en la microcuenca del río Shullcás utilizando el método de balance hídrico* [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional de Cajamarca.

Morán, D. J., Martiny, B., Tolson, G., Solís, G., Alba, L., del Sol Hernández, M., Macías, C., Martínez, R. G., Schaaf, P., & Silva, G. (2000). Geocronología y características geoquímicas de las rocas magmáticas terciarias de la Sierra Madre del Sur. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 53(1), 27-58.

Padilla, V. J. A., Martínez, E. E., Ortega-Rubio, A., Miranda, R. P., & Hernández, A. R. G. (2014). Deterioro en áreas naturales protegidas del centro de México y del Eje Neovolcánico Transversal. *Investigación Ambiental*, 6(1), 38-49.

Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3-4), 231-259.

PRODEFO. (2019). *Pinus douglasiana Martínez en Jalisco, México* (Monografías de pinos nativos promisorios para Plantaciones Forestales Comerciales en Jalisco, México).

https://geoportal.fiprodefo.gob.mx/wpcontent/uploads/2019/01/Monografia_pinus_douglas_jal.pdf

Ramírez, E. L. (2000). *Variación de semillas y plántulas de tres procedencias de Pinus teocote Schltld. & Cham.* [Tesis de maestría]. Universidad Veracruzana.

Rodgers, J. L., & Nicewander, W. A. (1988). Thirteen ways to look at the correlation coefficient. *The American Statistician*, 42(1), 59-66.

Rodríguez, J., & Olivella, R. (2010). *Introducción a los sistemas de información geográfica: Conceptos y operaciones fundamentales*. Universitat Oberta de Catalunya.

Sánchez-González, A. (2008). Una visión actual de la diversidad y distribución de los pinos de México. *Madera y Bosques*, 14(1), 107-120.

Servicio Geológico Mexicano. (s.f.). *GeoInfoMex: Información geocientífica al servicio de México*. Recuperado el 21 de abril de 2026 de <https://www.sgm.gob.mx/GeoInfoMexGobMx/>

Tesfamariam, B. G., Gessesse, B., & Melgani, F. (2022). MaxEnt-based modeling of suitable habitat for rehabilitation of Podocarpus forest at landscape-scale. *Environmental Systems Research*, 11(1), Article 4.

Vásquez, L. M., & Vélez, M. V. (2004). Métodos para determinar la recarga en acuíferos. *Avances en Recursos Hidráulicos*, (11), 51-62.