



Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial, A.C.

Especialidad en Geomática

Proyecto Final de Geomática

“Modelo metodológico para la identificación de áreas prioritarias para la restauración ecológica en la Reserva de la Biósfera Montes Azules, Chiapas, 2023.”

Aldo Rey Hernández Macario
Roshana Yoselin Solís Remigio
Viviana Axel Rodríguez Galicia

Asesores:

Dr. Mauricio Pablo Cervantes Salas
Mtro. Daniel María López López

ÍNDICE

1.	Introducción.....	3
2.	Marco teórico	6
2.1	La restauración ecológica.....	6
2.1.	La restauración de ecosistemas terrestres en México	7
2.2.	Identificación de zonas prioritarias para la restauración.....	8
3.	Áreas Naturales Protegidas en México.....	10
4.	Problemáticas para el manejo y monitoreo de las ANP	11
4.1.	Reserva de la Biósfera Montes Azules	14
5.	Modelado geoespacial para la restauración ecológica	16
6.	Planteamiento del problema.....	19
7.	Justificación.....	20
8.	Objetivos	21
8.1	Objetivo general	21
8.2	Objetivos particulares	21
9.	Pregunta de investigación	22
10.	Alcances.....	22
11.	Área de estudio	23
11.1	Características biofísicas.....	24
i.	Hidrografía	25
ii.	Clima.....	26
iii.	Geología.....	26
iv.	Relieve	26
v.	Cobertura vegetal y uso de suelo	27
vi.	Biodiversidad.....	28
11.2	Características socioeconómicas.....	29
12.	Modelos.....	31
12.1	Modelo geográfico	34
12.2	Modelo cartográfico	35
12.3	Modelo computacional.....	36
13.	Metodología	37
13.1	Obtención de imágenes satelitales y pre-procesamiento.....	37
13.2	Clasificación de la cobertura vegetal	37

13.3 Tasa de transformación del hábitat.....	40
13.4 Índice de Erosión (USLE)	41
13.5 Zonificación de aptitud de las tierras.....	45
13.6 Fragmentación del paisaje y conectividad ecológica	48
13.6.1 Simulación Fragmentación del paisaje y conectividad ecológica	48
13.7 Modelo cascada	48
14. Resultados	51
14.1 Cobertura y uso de suelo.....	51
14.2 Tasa de transformación del hábitat.....	52
14.3 Erosión hídrica potencial	54
14.4 Fragmentación del paisaje y conectividad ecológica	55
14.5 Modelo de simulación	57
(Fragmentación y conectividad con R1 y R2 restauradas).....	57
14.7 Áreas prioritarias para la restauración ecológica	60
14.8 Visualizador web: Áreas prioritarias para la restauración ecológica.....	64
15. Conclusiones.....	65
16. Literatura citada.....	66

1. Introducción

En México, las Áreas Naturales Protegidas (ANP) son consideradas como el principal mecanismo dentro de la política de conservación y gestión de los recursos naturales a nivel territorial (Vazquez-Marquez, et. al; 2020). El éxito en su conservación radica en la eficacia de su gestión, la cual comienza con el diseño de la política de conservación que sustenta su creación y que abarca desde la planificación, la implementación de acciones de manejo hasta la evaluación de sus efectos e impactos (Binnqüist et al., 2017). Sin embargo, estas áreas enfrentan una serie de factores que limitan su desempeño y el logro de sus objetivos, los cuales pueden clasificarse en cuatro dimensiones: legal, política administrativa y económica (Binnqüist et al., 2017).

Respecto a la gestión de la Reserva de la Biósfera Montes Azules (REBIMA), esta enfrenta desafíos a nivel administrativo y financiero, de acuerdo con la evaluación de la i-efectividad para el año 2023, el Índice Administrativo y Financiero disminuyó presentando una efectividad media (CONANP, 2023), es un indicador clave para evaluar si el presupuesto y el personal son suficientes para el manejo adecuado de la ANP. Por otra parte, la falta de informes de monitoreo y seguimiento de las actividades de restauración en los últimos 15 años (FMCN-SEMARNAT, 2009) representan un desafío significativo para evaluar el estado de conservación de la zona.

Para 2009, más del 90% de la superficie de la reserva estaba cubierta por clase forestal, predominantemente selva alta perennifolia con vegetación primaria y secundaria (85%), mientras que las áreas agrícolas y los asentamientos humanos representaban aproximadamente el 5.5% y 0.2%, respectivamente (FMCN-SEMARNAT, 2009). El análisis del período 2005-2009 mostró una tasa de transformación del hábitat de 312 hectáreas por año, siendo la agricultura, los pastizales inducidos y los asentamientos humanos las principales causas de esta transformación (FMCN-SEMARNAT, 2009). No obstante, la priorización de estas áreas intervenidas ha sido ignorada en el contexto de la restauración ecológica, por lo que generalmente no se cuentan con estrategias que permitan focalizar las acciones de restauración (González, et al., 2016).

De acuerdo con estos datos, La REBIMA enfrenta un desafío continuo en cuanto a la transformación del hábitat, la tasa de cambio sigue siendo motivo de preocupación. Por lo que sin un seguimiento adecuado, resulta complicado medir el impacto real de las



actividades antropogénicas y planificar estrategias de conservación para mejorar la preservación de la biodiversidad y los recursos naturales de la reserva.

Este trabajo busca implementar una primera aproximación metodológica que sirva como herramienta para identificar áreas prioritarias para la restauración ecológica en la Reserva de la Biósfera Montes Azules, Chiapas, con base en la erosión hídrica potencial, factores edáficos y del relieve, a partir del análisis de dichos elementos mediante percepción remota y el modelado espacio-temporal. Con el fin de mejorar la toma de decisiones y las estrategias de conservación en la zona.

Además, se realizó un diagnóstico para conocer el estado de conservación de la REBIMA a partir de la clasificación de imágenes satelitales, se identificó la cobertura y uso de suelo para el año 2023; con ello se determinó la Tasa de Transformación del Hábitat, la fragmentación y la conectividad ecológica.

A partir de la clasificación supervisada de imágenes satelitales, se identificaron 17 clases de cobertura y uso de suelo en la REBIMA para el año 2023. La selva alta perennifolia (SAP) fue la clase con mayor superficie con 252,597.83 ha, seguida por la vegetación secundaria arbórea (VSA) con 30,322.82 ha, mientras que las áreas de cantera ocuparon 22.9 ha. La superficie transformada, dominada por el uso agrícola, aumentó de 38,884.10 ha en 2018 (11.87% del área total) a 39,475.40 hectáreas en 2023 (12.05% del área total), lo que representa una transformación de 314.14 hectáreas en cinco años.

El análisis de erosión hídrica mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) mostró que las áreas con mayor riesgo se encuentran cerca de los poblados, especialmente en el norte y suroeste de la reserva, donde se realizan actividades agrícolas y ganaderas. Además, se identificaron seis categorías de fragmentación del hábitat, siendo la zona núcleo la más extensa con un 79.35% de la superficie, mientras que los parches y bordes representan un 3.75% y 6.22%, respectivamente.

Se implementó un modelo en cascada para identificar áreas prioritarias para la restauración ecológica en la Reserva de la Biósfera Montes Azules (REBIMA). Este modelo integró la erosión hídrica potencial y la zonificación de aptitud de tierras, considerando factores como el sistema de cultivo, prácticas de manejo, tipo de suelo, patrón de lluvia y topografía así como la pendiente y la cobertura vegetal y el uso del suelo (Benavidez, R., et al., 2018; López y Saavedra, 2016). Para obtener un modelo de aptitud ajustado a partir del cual se priorizaron zonas según su susceptibilidad a la erosión y su aptitud para diversas actividades, clasificándolas en áreas de aprovechamiento restringido (AR1, AR2, AR3) y



áreas prioritarias para restauración (R1, R2, R3), con R1 siendo áreas de máxima prioridad. También se identificaron zonas de regulación hídrica y áreas de protección-conservación que deben mantenerse sin intervención para mejorar la conectividad ecológica dentro de la reserva.

Se identificaron 19,514.56 hectáreas como zonas prioritarias para la restauración ecológica en la REBIMA, representando el 6% de su superficie total. Estas áreas, principalmente en el norte y oeste de la reserva, están en riesgo debido a actividades agrícolas en terrenos con pendientes superiores al 50% y suelos susceptibles a erosión severa. De estas, 6,860.44 hectáreas son de máxima prioridad (R1) y requieren restauración para recuperar los suelos y la cobertura vegetal. Las zonas R2 y R3, con menor prioridad, se recomiendan para reconversión a cultivos sostenibles como el café de sombra, que protege el suelo y favorece la conservación. Además, 19,111.24 hectáreas están bajo aprovechamiento restringido (AR), con suelos menos propensos a la erosión, permitiendo actividades productivas de bajo impacto.

Anteriormente se habían realizado estudios similares para la identificación de áreas prioritarias de restauración en México, por ejemplo, lo hecho por (González, et al., 2016), en el cual considera variables similares a las que se tomaron en cuenta en el presente trabajo, sin embargo, aún falta mejorar el modelo diversificando el tipo de variables, tales como las variables socioeconómicas, las que consideramos que potencializarían la metodología para este modelo.

Finalmente, se concluyó que la Reserva de la Biósfera Montes Azules (REBIMA) presenta un paisaje heterogéneo dominado por selva alta perennifolia, con parches de acahual, pastizal y cultivos, especialmente concentrados en las zonas norte y oeste. La tasa de transformación del hábitat fue de 0.022% anual. Este primer acercamiento a una metodología a base únicamente de percepción remota propuesta para identificar zonas prioritarias de restauración en la REBIMA es un primer paso significativo para instaurar planes de restauración en las diferentes ANPs del país e incluso otras áreas que requieran de atención ecosistémica.



2. Marco teórico

2.1 La restauración ecológica

Se define como el proceso destinado a la recuperación de un ecosistema que ha sido degradado, dañado o destruido, tiene como objetivo recuperar la integridad del ecosistema que incluye valores personales, culturales, socioeconómicos y ecológicos para aumentar la resiliencia socioecológica (Gann et al, 2019).

Existen distintos niveles de restauración, entre los que destacan la rehabilitación, la reclamación y la mitigación de un espacio natural. La rehabilitación enfatiza la reparación de los procesos, la productividad y los servicios de un ecosistema, mientras que las metas de la restauración también incluyen el restablecimiento de la integridad biótica preexistente en términos de composición de especies y estructura de la comunidad. Por otra parte, la reclamación se enfoca en la estabilización del terreno, el aseguramiento de la seguridad pública, el mejoramiento estético y, por lo general, el retorno de las tierras a lo que se consideraría un propósito útil dentro del contexto regional. Finalmente, la mitigación es una acción cuya intención es compensar los daños ambientales (Society for Ecological Restoration [SER], 2004).

De manera simplificada, la restauración puede definirse operativamente como el proceso de devolver un sistema degradado a un estado más sano, e implica cuatro tareas fundamentales para llevarse a cabo (Urban, 2006):

1. Planteamiento de un modelo (conceptual o de otro tipo) sobre el funcionamiento ecológico del sistema.
2. Evaluación del estado actual del área de estudio, para determinar qué tan degradado o conservado se encuentra el sistema del estado deseado.
3. Experimentación de la gestión del área para dirigir el sistema en la dirección deseada.
4. Seguimiento para evaluar el éxito relativo de las intervenciones de restauración para lograr el objetivo deseado.

La restauración implica un compromiso a largo plazo de tierras y recursos que demandan trabajo durante un horizonte de tiempo indefinido, de tal forma que la propuesta de restaurar un ecosistema requiere una deliberación cuidadosa. Las decisiones colectivas tienen más probabilidad de ser acatadas y ejecutadas que aquellas tomadas unilateralmente (Ostrom



E., 2000). Por lo tanto, es de conveniencia para todos los participantes tomar por consenso la decisión de iniciar un proyecto de restauración. Una vez que se toma la decisión de restaurar, el proyecto requiere una planificación cuidadosa y sistemática y un plan de seguimiento dirigido al restablecimiento del ecosistema (SER, 2004).

2.1. La restauración de ecosistemas terrestres en México

La restauración ecológica es una disciplina emergente que está ganando impulso en México. A pesar de los desafíos políticos, económicos y sociales que enfrenta el país, esta disciplina ha empezado a atraer cada vez más atención de diversos grupos de trabajo y organizaciones (Calva-Soto y Pavón., 2018).

En el país, las entidades gubernamentales como la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) y la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) han sido las principales impulsoras de la restauración, ya que financian o apoyan la mayoría de los proyectos. Por otro lado, las instituciones académicas se mencionan con mayor frecuencia como responsables del diseño y la supervisión técnica (Méndez-Toribio et al., 2018). Esto destaca la necesidad de formar equipos conformados por actores sociales y gubernamentales con perfiles profesionales multidisciplinarios para abordar todos los aspectos necesarios en la creación de proyectos de restauración ecológica dentro de sistemas socioecológicos dinámicos (Calva-Soto y Pavón., 2018).

Los proyectos de restauración son abordados desde enfoques basados en ecosistemas, cuencas o paisajes, siendo este último el más comúnmente utilizado (Méndez-Toribio et al., 2018). El paisaje se define como "el área de un territorio conformada por un conjunto heterogéneo de ecosistemas que interactúan entre sí" (Méndez-Toribio et al., 2018). Además, en muchos casos, se considera la conectividad espacial en la planificación de estos proyectos (Méndez-Toribio et al., 2018).

Mientras que los principales agentes de degradación ambiental identificados en las áreas restauradas son la ganadería extensiva, el desarrollo de infraestructura y la fragmentación del hábitat (Méndez-Toribio et al., 2018). La fragmentación se refiere al proceso de división de un hábitat continuo en secciones más pequeñas. Estos fragmentos, aislados en diversos grados, exhiben efectos de borde (CONABIO, 2020).



Respecto a la priorización de los sitios a restaurar, esta se ha basado en el análisis de diferentes criterios biofísicos y socioeconómicos, tales como: (i) la recuperación de servicios ecosistémicos, (ii) la conservación de suelos, (iii) la recuperación de la cubierta forestal, (iv) presencia de especies endémicas, (v) la vulnerabilidad al cambio climático, (vi) la afectación por incendios, plagas o enfermedades y (vii) el número de personas beneficiadas. El criterio más utilizado es la recuperación de la cubierta forestal, aunque en muchos proyectos se emplean múltiples criterios para la priorización (Méndez-Toribio et al., 2018). Otros criterios considerados incluyen el grado de deterioro del sitio, la tenencia de la tierra y los convenios existentes, el cumplimiento de lineamientos legales, la provisión de hábitat para la fauna y la disponibilidad de agua (Méndez-Toribio et al., 2018).

Mientras que las variables ambientales que se han considerado para identificar áreas prioritarias para la restauración ecológica y sitios de referencia potenciales mediante un análisis multicriterio son variables como clima, suelo, topografía, cobertura vegetal y perturbación, definidas por expertos en el tema (González, et al., 2016), otro ejemplo son las variables de erosión, suelo, drenaje y clima (Arguedas, 2022). Es por ello que para esta metodología elegimos variables similares las cuales son: profundidad, drenaje y fertilidad que componen la zonificación de la aptitud de las tierras, de igual forma se consideraron la pendiente, erosividad, erosionabilidad, cobertura y manejo, las cuales conforman la erosión hídrica potencial.

2.2. Identificación de zonas prioritarias para la restauración

Los estudios relacionados con la identificación de zonas prioritarias incluyen al espacio geográfico, el objetivo y los aspectos sociales como términos comunes en la definición de este concepto (Arriaga et al., 2000; Galindo et al., 2009; SEMARNAT, 2011).

Las zonas prioritarias para la restauración pueden definirse como espacios con un alto valor de biodiversidad y/o endemismos, que pueden o no funcionar como corredores que conectan dos zonas ecosistémicas importantes, que han sufrido cambios en su cobertura original, ya sea por un disturbio natural y/o humano, lo que los vuelve susceptibles a prácticas de manejo inadecuadas, poniendo en riesgo los servicios ecosistémicos y por lo tanto se comprometen las necesidades ambientales de la sociedad. La conservación de los recursos naturales debería centrarse en áreas donde se produzca un beneficio mayor el esfuerzo invertido



deriva en impactos positivos mayores, principalmente ambientales (Benegas y León, 2009; Geneletti et al., 2011 en Chávez, 2014).

Por lo que la determinación de zonas prioritarias incluye la identificación de sitios con un alto valor de biodiversidad en los ambientes terrestres del país, utilizando diversos criterios para su determinación, entre los que se encuentran de tipo biológico, criterios de amenazas para el mantenimiento de la biodiversidad y criterios de oportunidad para su conservación (Arriaga et al., 2009). Asimismo, la elección de los sitios destinados a restauración ecológica es una decisión que debe tomarse en conjunto con los criterios y preferencias de los propietarios y con la opinión de expertos. Y debe justificarse en una priorización técnica, basada en las necesidades de la comunidad y en criterios de estrategias globales de conservación o en las políticas de gestión de autoridades (González, et al., 2016).

No obstante, la priorización de estas áreas ha sido ignorada en el contexto de la restauración ecológica, por lo que generalmente no se cuentan con estrategias que permitan focalizar las acciones de restauración (González, et al., 2016). Además, la falta de monitoreo impide verificar si se alcanzaron los resultados esperados y evaluar el éxito del proyecto de restauración (Calva-Soto y Pavón, 2018). Por otra parte, la carencia de recursos económicos limita la cantidad de trabajos que se pueden realizar en sitios específicos (Binnquist et al., 2017).

En consecuencia, se consideró el enfoque secuencial del modelo en cascada. Este modelo organiza las etapas desde la recopilación de datos iniciales hasta la identificación de zonas prioritarias, destaca porque cada etapa tiene un objetivo específico, alineándose con la idea de que cada fase debe tener un entregable claro. Este modelo se ha empleado y adaptado a diversas áreas de estudio, como, por ejemplo, el modelo en cascada relacionado a la estructura y funciones de los ecosistemas con la provisión de servicios ecosistémicos, la generación de bienestar humano, y la retroalimentación social en la toma de decisiones que impactan el paisaje y los ecosistemas que lo componen (Haines-Young y Potschin, 2010). Una de las adaptaciones clave que realizamos fue la integración de tecnologías modernas como las imágenes Sentinel y Google Earth para mejorar la precisión del geoprocamiento asegurando resultados más robustos y alineados con las necesidades actuales del proyecto.

En este sentido, es crucial desarrollar herramientas metodológicas para identificar los sitios prioritarios de restauración, centrándose en las áreas más degradadas y donde los usos actuales no sean los adecuados para el área, y que su restauración ofrezca mayores beneficios para el medio ambiente.



3. Áreas Naturales Protegidas en México.

De acuerdo con la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP; 2024b) las Áreas Naturales Protegidas (ANP) son espacios establecidos por ley con el propósito de preservar y conservar la biodiversidad, los ecosistemas, los paisajes y los recursos naturales para las generaciones presentes y futuras. Dudley 2008, (como se citó en Vázquez-Márquez, et. al; 2020) las define como “espacios geográficos bien delimitados, con reconocimiento, dedicados y gestionados por medios legales u otros tipos eficaces, para buscar alcanzar la conservación a largo plazo de la naturaleza y sus servicios ecosistémicos, así como de los valores culturales asociados al desarrollo territorial en el ámbito local”.

En México, la importancia de estas áreas se destaca al ser un país con gran diversidad biológica (SRE, 2013). Según la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2024), las ANP no sólo tienen un impacto ecológico significativo, sino que también fomentan el desarrollo sostenible, ya que impulsan actividades económicas compatibles con la conservación, como el turismo ecológico y la investigación científica. Asimismo, fortalecen la identidad cultural al preservar sitios arqueológicos, históricos y culturales, valorando el patrimonio intangible de las comunidades locales.

No obstante, se ven afectadas por factores como la deforestación, la tala ilegal y los conflictos socioambientales. Para conservar estas zonas se requiere de un enfoque integral y colaborativo que considere las necesidades de la sociedad y de las comunidades locales, así como las características particulares de cada ANP para garantizar su conservación a largo plazo (CONANP, 201; Domínguez, 2019).

La protección de las ANP en México se rige por un marco legal sólido, a través de la CONANP (SEMARNAT, 2023), asumiendo la responsabilidad de la administración y manejo de las ANP federales. Actualmente, la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas tiene bajo su administración un total de 226 Áreas Naturales Protegidas de carácter federal. De estas, 187 se localizan en áreas exclusivamente terrestres, 31 abarcan tanto territorio terrestre como marino, y 8 están ubicadas únicamente en aguas marinas (Figura 1). En conjunto, estas áreas protegidas representan una extensión de 93,807,804 hectáreas (CONANP, 2024a).



Figura 1. Áreas Naturales Protegidas de México, CONANP (2024).

4. Problemáticas para el manejo y monitoreo de las ANP

En México, las Áreas Naturales Protegidas (ANP) son consideradas como el principal mecanismo dentro de la política de conservación y gestión de los recursos naturales a nivel territorial (Vazquez-Marquez, et. al; 2020). El éxito en su conservación radica en la eficacia de su gestión, la cual comienza con el diseño de la política de conservación que sustenta su creación y que abarca desde la planificación, la implementación de acciones de manejo hasta la evaluación de sus efectos e impactos (Binnqüist et al., 2017).

Según Binnqüist et al. (2017), en México, las ANP están afectadas por una serie de factores que restringen su desempeño y el logro de sus objetivos. Estos factores pueden ser clasificados en cuatro dimensiones:

1. Dimensión Legal: Se refiere a las leyes, reglamentos y normativas que rigen la creación, gestión y protección de las ANP. Esto incluye la claridad y consistencia de las leyes, así como la capacidad para hacer cumplir las regulaciones existentes.
2. Dimensión Política: Engloba las decisiones y acciones de los diferentes niveles de gobierno, así como las políticas públicas relacionadas con la conservación y el



manejo de las ANP. Esto incluye la voluntad política para asignar recursos y tomar medidas efectivas para proteger y gestionar adecuadamente estas áreas.

3. Dimensión Administrativa: Se refiere a la eficacia y eficiencia de la gestión y administración de las ANP. Esto implica la capacidad de las instituciones responsables para planificar, implementar y evaluar programas de conservación, así como la coordinación entre diferentes entidades gubernamentales y actores involucrados.
4. Dimensión Económica: Se relaciona con los recursos financieros disponibles para la conservación y el manejo de las ANP. Esto incluye la asignación de presupuestos adecuados, la generación de ingresos a través del ecoturismo u otras actividades sostenibles, y la capacidad para obtener financiamiento externo a través de donaciones o colaboraciones con organizaciones internacionales.

Por tanto, estas dimensiones interactúan entre sí y pueden influir en el éxito o fracaso de las iniciativas de conservación en las ANP. Es decir, se deben abordar cada una de estas dimensiones de manera integral y coordinada para garantizar la efectividad y sostenibilidad de la gestión de estas áreas protegidas (Binnqüist et al., 2017).

A partir del año 2018 se implementó el Sistema Permanente de Evaluación de la Efectividad del Manejo de las Áreas Naturales Protegidas Federales de México (i-efectividad) que tiene como objetivo medir el esfuerzo invertido en mantener estas áreas en buenas condiciones, evaluando el cumplimiento de los objetivos para los cuales fueron creadas (CONANP, 2019). Y busca conocer la eficacia y eficiencia en la aplicación de los recursos humanos y financieros destinados a este propósito (CONANP, 2019).

Esta evaluación permite determinar qué tan bien administradas están las ANP y si están protegiendo de manera efectiva los valores naturales y culturales de la zona (CONANP, 2019). Mediante 48 indicadores, el Sistema i-efectividad produce un Índice Principal de Efectividad y cinco sub-índices (componentes) que facilitan la identificación de áreas de oportunidad (Figura 2).

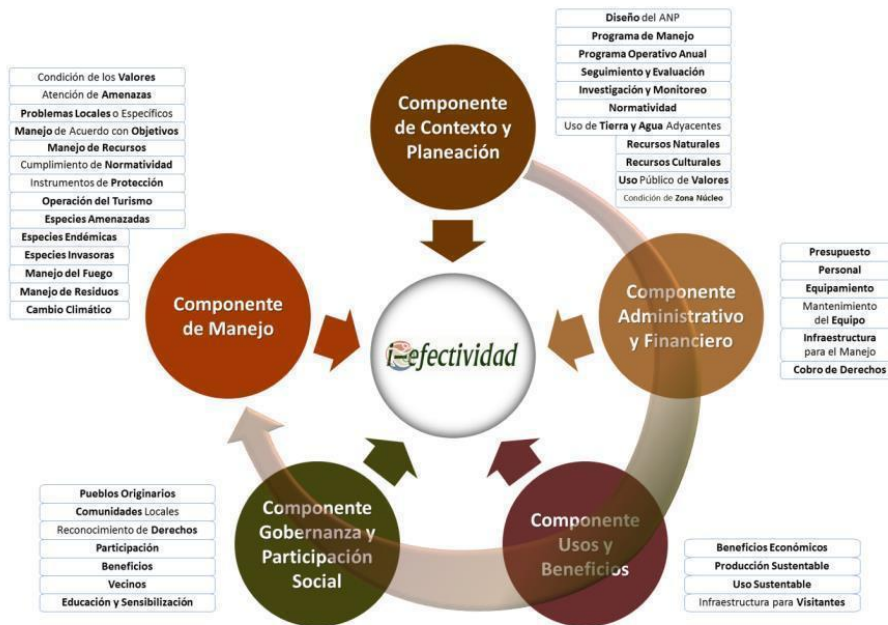


Figura 2. Esquema de los 48 indicadores del Sistema i-efectividad, CONANP (2019).

No obstante, se carece de un instrumento de monitoreo formal para evaluar las acciones de restauración para cada ANP. Por ejemplo, en la Reserva Estatal Sierra Monte Negro (RESMN) no se cuenta con indicadores establecidos para su monitoreo y carece de metodologías para su evaluación (Vázquez-Márquez, et al., 2020). Esto dificulta la medición del avance en las metas de conservación y, por tanto, la posible implementación de un plan de restauración. Es importante tener una forma de evaluar constantemente el estado de conservación que sea particular para cada sitio, ya que las condiciones son específicas para cada uno. A partir de lo cual, se puede pensar en proponer, ajustar y/o evaluar planes de restauración ecológica.

La evaluación integral de la política de conservación debe considerar: el diseño de los instrumentos de planificación, la efectividad de las actividades ejecutadas y el manejo de los recursos financieros asignados, así como, las repercusiones sociales derivadas de las acciones realizadas tanto dentro de las áreas protegidas como en sus áreas de influencia (Binnquist et al., 2017).



4.1. Reserva de la Biósfera Montes Azules

La Reserva de la Biósfera Montes Azules (REBIMA), fue decretada por el gobierno mexicano el 12 de enero de 1978, y un año después fue incluida en la Red Mundial de Reservas de la Biósfera por la Unesco (SEMARNAT, 2023).

Esta reserva se destaca por su excepcional biodiversidad biológica y cultural. Debido a que alberga una amplia gama de flora y fauna, incluidas especies en peligro de extinción, lo que la convierte en santuario vital para la conservación de la biodiversidad en México. Además, diversas comunidades indígenas dependen de la selva para su sustento y preservación cultural; factores que subrayan la importancia integral de esta zona. (Programa de Manejo, 2000).

La REBIMA enfrenta diversos desafíos, como la deforestación, la tala ilegal y la transformación de hábitats, que representan una amenaza para la biodiversidad en la región (Domínguez, 2019; González, s.f.). Además, la presencia de tierras agrícolas y los conflictos entre la conservación ecológica y la presencia humana complican la gestión y la conservación (González, s. f.).

Esta reserva cuenta con un Programa de Manejo elaborado en el año 2000 (CONANP, 2024d). Posteriormente, se llevaron a cabo dos informes que analizan la Tasa de Transformación del hábitat en la zona. El primero de ellos evalúa los años 1996 y 2000 (CONANP, 2003), mientras que el segundo abarca el período del 2000 al 2009 (FMCN-SEMARNAT, 2009). Estos informes proporcionan una perspectiva detallada sobre la evolución de la transformación del hábitat en la reserva. En la Tabla 1, se observa que la cantidad de hectáreas transformadas por año disminuyó en un 91% en el primer período (2000-2005) en comparación con el período de referencia (1996-2000). Mientras que en el segundo período (2005-2009), la cantidad de hectáreas transformadas por año experimentó un aumento del 265% en comparación con el primer período (2000-2005). A pesar de ello no se tiene registro de actividades de restauración en la zona.

Tabla 1. Elaboración propia con datos de los informes de la tasa de transformación 1996-2000 y 2000-2009.

Característica	Informe 1 (1996-2000)	Informe 2 (2000-2009)	
		1996-2000	2000-2005
Periodo de estudio	1996-2000	2000-2005	2005-2009
Tasa anual de transformación del hábitat	0.33%	0.03% anual	0.10% anual
Hectáreas transformadas por año	974 hectáreas/año	86 hectáreas/año	312 hectáreas/año
Causas principales de la transformación del hábitat	Agricultura, pastizales inducidos, asentamientos humanos	Agricultura, pastizales inducidos, asentamientos humanos	
Impacto principal	Bosques siempreverdes altos y medios	Análisis detallado por actividad	

Para el año 2009, la clase forestal ocupaba más del 90% de la superficie de la reserva, estaba representada en su mayoría por selva alta perennifolia con vegetación primaria y secundaria (85%), mientras que la superficie agrícola y los asentamientos humanos representaban cerca del 5.5 y 0.2%, respectivamente (FMCN-SEMARNAT, 2009).

En ambos estudios se determinó que las causas principales de la transformación del hábitat continúan siendo la agricultura, los pastizales inducidos y los asentamientos humanos, si bien el estudio proporciona un análisis más detallado sobre las áreas específicas afectadas por cada actividad, se destacan los puntos siguientes:

- Ambos estudios subrayan la importancia de conservar la Reserva de la Biósfera Montes Azules debido a su alta biodiversidad.
- Se hace hincapié en la importancia de considerar la escala temporal de cada estudio al comparar los resultados.

Respecto a la gestión de la reserva, de acuerdo con el Segundo Informe Regional Frontera Sur, Istmo y Pacífico Sur, La REBIMA presentó en la evaluación de la i-efectividad un Índice de Manejo con efectividad sobresaliente; de los cinco componentes evaluados cuatro presentaron la misma valoración, mientras que el Índice Administrativo y Financiero disminuyó presentando una efectividad media (CONANP, 2023). Este índice permite evaluar si el presupuesto y el personal son suficientes para el manejo adecuado de la ANP, si el personal está entrenado adecuadamente para llevar a cabo las actividades de manejo, además, contempla si se cuenta con el equipo suficiente e infraestructura para satisfacer las



necesidades de manejo, así como el mantenimiento adecuado del mismo y si el cobro de derechos¹ contribuye al manejo del ANP (CONANP, 2019).

De acuerdo con estos datos, La REBIMA enfrenta un desafío continuo en cuanto a la transformación del hábitat, a pesar de los esfuerzos de revegetación observados, la tasa de cambio sigue siendo motivo de preocupación. Además, la falta de informes de monitoreo y seguimiento de las actividades de restauración de los últimos años, se presentan como un desafío para conocer el estado de conservación de la región. La falta de personal y financiamiento son factores que limitan las áreas que pueden ser intervenidas. Esto resalta la importancia de actualizar y revisar continuamente las estrategias de conservación y manejo para enfrentar los desafíos emergentes en la región y garantizar la sostenibilidad a largo plazo (SEMARNAT, 2023). En este trabajo consideramos que implementar una herramienta que permita identificar de manera remota las áreas que requieren restauración, puede ayudar a simplificar los esfuerzos de vigilancia, reduciendo la necesidad de presencia física constante en campo y permitiendo un uso más eficiente del tiempo y los recursos económicos disponibles. En este sentido, este trabajo busca implementar una primera aproximación metodológica que sirva como herramienta para identificar áreas prioritarias para la restauración ecológica en la Reserva de la Biósfera Montes Azules (REBIMA), mediante el análisis espacio temporal basado en imágenes satelitales del 2023.

Además, estas herramientas permiten definir las áreas que deben ser monitoreadas. Lo que resulta fundamental en las ANP donde el personal y los recursos financieros son limitados para abordar la restauración de toda la zona.

5. Modelado geoespacial para la restauración ecológica

Los modelos se plantean como una manera práctica de comprender cómo se comporta un sistema y ayudan a formalizar esta comprensión operativa en un marco multivariado, que permite evaluar variables y factores múltiples (Urban, 2006). No obstante, también existen modelos dirigidos a la exploración, extrapolación o predicción de fenómenos que pueden ser

¹ En la mayoría de las áreas naturales protegidas (ANP) en México, se aplica una tarifa por su uso y disfrute, conocida técnicamente como "cobro de derechos". Palmeros, M. A. y Chacón G. I. (2023). Cuidar lo que importa. Las áreas naturales protegidas y el cobro de derechos: un análisis desde el noroeste de México. Sociedad de Historia Natural Niparáj, A. C. y Wildlands Network, Programa México.



integrados al marco conceptual para facilitar la comparación entre modelos de datos (Urban, 2006).

En el contexto de la restauración ecológica, un modelo es un marco o estructura que permite guiar o diseñar estrategias de restauración y que implica el uso de modelos conceptuales, matemáticos, estadísticos o computacionales; que pueden ser aplicados con fines diversos (Urban, 2006):

1. Servir como marco integrador que permita reunir y organizar diferentes componentes y procesos relacionados con la restauración ecológica.
2. Explorar las implicaciones de diversas decisiones de gestión o para explorar escenarios alternativos.
3. Diseñar esquemas de muestreo o seguimiento.
4. Extrapolar la comprensión a diferentes escalas espaciales o temporales.
5. Proporcionar previsiones (predicciones) de cómo podría evolucionar un ecosistema restaurado en el futuro.

Normalmente, las aplicaciones de modelos destinadas a la integración se desarrollan en una fase bastante temprana de un proyecto, mientras que las previsiones predictivas se realizan más adelante, después de que el modelo haya sido validado (Urban, 2006).

La integración de un modelo conceptual ecológico con datos satelitales permite evaluar aspectos de la degradación de los ecosistemas a partir de (Lee, et. al; 2021):

- Series de tiempo de índices únicos derivados de satélites (NDVI, para Identificar cambios en la productividad primaria).
- Resúmenes temporales de métricas para modelar cambios en la estructura física de los ecosistemas.
- Modelización cuantitativa de bandas espectrales de satélite.
- Modelos lineales generalizados para estimar la degradación de los ecosistemas.
- Combinación de mapas de amenazas con mapas derivados de satélites para identificar ecosistemas perturbados.

Existen diferentes metodologías para identificar áreas prioritarias para la conservación de ecosistemas naturales (Blumentrath, 2011), las cuales son de tipo cualitativas, a partir de análisis simples y la experiencia de expertos, y las cuantitativas basadas en modelos estadísticos y de optimización (Chávez et al., 2015).



Los métodos cualitativos se basan en el valor paisajístico, los fines recreativos, la existencia o no de explotación forestal, o la accesibilidad del terreno. Son más fáciles y rápidos de aplicar en comparación con los métodos cuantitativos, no obstante, son de carácter subjetivo, ya que se basan en el juicio de expertos para la definición de áreas prioritarias (Chávez et al., 2015). Lo que hace que sea difícil su replicabilidad y tengan un margen de error mayor (Chávez et al., 2015).

Mientras que los métodos cuantitativos utilizan aproximaciones estadísticas para reducir la incertidumbre y la inconsistencia en los resultados. Este método permite utilizar información biofísica de la zona de interés y mediante estadística espacial se pueden generar modelos predictivos de fenómenos a diferentes escalas espaciales y temporales (Chávez et al., 2015). También se puede integrar información a partir de la consulta ciudadana y de expertos (Chávez et al., 2015).

La selección de una metodología específica para identificar las áreas prioritarias dependerá del objetivo concreto de priorización, de los criterios y el tipo de información disponible para el análisis y de la escala utilizada (Chávez et al., 2015). Existen modelos informáticos que ayudan a identificar áreas prioritarias, los cuales asignan una puntuación a distintas zonas del terreno, considerando criterios ecológicos y/o socioeconómicos, a partir de un conjunto de datos de entrada bajo ciertas condiciones y objetivos específicos (Blumentrath, 2011).

Respecto al reconocimiento de áreas prioritarias para la restauración ecológica en México, se ha reportado que el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) integrados con técnicas de evaluación multicriterio sirven como una herramienta para determinar áreas prioritarias y pueden asistir en procesos de planificación (González, et al., 2016; Pequeño-Ledezma, et al. 2016). A partir de un conjunto de criterios ambientales se pueden determinar los sitios de referencia mediante la clasificación supervisada de imágenes de satélite (González, et al., 2016).



6. Planteamiento del problema

La Reserva de la Biósfera Montes Azules (REBIMA), al igual que otras ANP de México, enfrenta desafíos significativos como la deforestación, la tala ilegal y la pérdida de cobertura vegetal, factores que dificultan la conservación biológica y cultural de la zona (Domínguez, 2019; González, s.f.).

La importancia de estudiar y monitorear la REBIMA radica en comprender y evaluar el impacto de las acciones antropogénicas sobre los ecosistemas, identificar amenazas y adaptar estrategias según las necesidades reales del área protegida.

La identificación de áreas prioritarias para la restauración ecológica proporciona información esencial para evaluar la condición de los ecosistemas y su diversidad biológica, permitiendo así la ejecución de medidas dirigidas hacia un manejo adaptativo². A pesar de su reconocimiento internacional y promoción del desarrollo sostenible, las acciones de monitoreo en la zona, así como el reporte de actividades de restauración y mantenimiento, son escasos. Por ello, no se cuenta con información necesaria para hacer seguimiento de las acciones de conservación y sus avances en el mantenimiento y recuperación de los ecosistemas presentes en la REBIMA.

² Consiste en el diseño de una estrategia (muchas veces basado en el conocimiento científico), su implementación, monitoreo y adaptación para lograr un aprendizaje Pereira M., SF. Cumpliendo los sueños familiares y las metas productivas. Plan agropecuario.

7. Justificación

Las Áreas Naturales Protegidas (ANP) juegan un papel fundamental en la conservación de la biodiversidad y los ecosistemas en todo el mundo. Estas áreas son designadas y gestionadas con el propósito de preservar el capital biológico y cultural, asegurar el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales y mantener los servicios ecosistémicos.

A pesar de su importancia, muchas ANP enfrentan desafíos significativos en términos de monitoreo y planificación eficaz. La falta de estrategias de seguimiento y planificación adecuadas, así como de personal y presupuesto, dificultan la evaluación del estado de conservación de estas zonas, así como la implementación de medidas de manejo apropiadas.

Por lo que, crear herramientas de monitoreo específicas para las ANP es esencial para evaluar de manera periódica su estado de conservación e identificar amenazas y presiones sobre los ecosistemas, con el fin de diseñar estrategias de manejo adaptativas y efectivas.

Este trabajo busca implementar una primera aproximación metodológica que sirva como herramienta para identificar áreas prioritarias para la restauración ecológica en la Reserva de la Biósfera Montes Azules, Chiapas, con base en la erosión hídrica potencial, factores edáficos y del relieve, a partir del análisis de dichos elementos mediante percepción remota y el modelado espacio-temporal. Con el fin de mejorar la toma de decisiones y las estrategias de conservación en la zona.

8. Objetivos

8.1 Objetivo general

Implementar una primera aproximación a un modelo metodológico y computacional que ayude a identificar áreas prioritarias para la restauración ecológica en la Reserva de la Biósfera Montes Azules (REBIMA), Chiapas, mediante el análisis espacio temporal basado en imágenes satelitales del 2023.

8.2 Objetivos particulares

1. Identificar la cobertura y el uso del suelo a partir de la clasificación supervisada de imágenes satelitales para los años 2018 y 2023, con el fin de estimar la superficie correspondiente a cada categoría de uso de suelo en dichos años en la Reserva de la Biósfera Montes Azules.
2. Estimar la Tasa de Transformación del hábitat a partir de la tasa de cambio de la cobertura forestal y no forestal, para conocer el cambio en la cobertura vegetal entre los años 2018 y 2023 en la Reserva de la Biósfera Montes Azules.
3. Determinar la fragmentación del paisaje, la conectividad ecológica y la erosión hídrica potencial a partir del análisis de dichos elementos mediante percepción remota para realizar el diagnóstico de conservación de la Reserva de la Biósfera Montes Azules.
4. Determinar la capacidad de uso de los suelos a partir de la integración de la aptitud de las tierras y la erosión hídrica potencial, para identificar las zonas con limitaciones muy severas y mayor riesgo de deterioro en la Reserva de la Biósfera Montes Azules.
5. Desarrollar e implementar un modelo metodológico y computacional que ayude a identificar las zonas que requieren restauración ecológica dentro de la reserva a partir de la integración de los datos geoespaciales para identificar áreas prioritarias para la restauración ecológica.
6. Desarrollar un visualizador web que facilite la identificación de áreas prioritarias para la restauración ecológica en la Reserva de la Biósfera Montes Azules, permitiendo así focalizar los esfuerzos de restauración y los recursos; que pueda ser consultada por personas interesadas en la conservación y monitoreo de la zona para medir el impacto de las acciones de conservación y sus avances en esta ANP.



9. Pregunta de investigación

¿Es factible implementar un modelo metodológico basado en análisis espacio-temporal de imágenes satelitales para identificar áreas prioritarias para la restauración ecológica en la Reserva de la Biósfera Montes Azules (REBIMA), Chiapas, y contribuir a la preservación de la riqueza biológica en las zonas intervenidas?

10. Alcances

1. Este trabajo considerará como área de estudio la delimitación administrativa de la Reserva de la Biósfera Montes Azules (REBIMA) en el estado de Chiapas, a una escala de estudio de 1:450 000.
2. El análisis espacio temporal se basará en el procesamiento, clasificación y análisis de imágenes satelitales SENTINEL de los años 2018 y 2023 para identificar la cobertura y uso del suelo.
3. Este proyecto identificará áreas prioritarias para la restauración ecológica en la REBIMA a partir del análisis espacial del uso de suelo (2023), la aptitud de las tierras y la erosión hídrica potencial.
4. La propuesta metodológica sugerida permitirá analizar el estado actual de conservación y detectar las áreas prioritarias que requieren restauración en la REBIMA
5. Se generará un reporte técnico y una herramienta web interactiva para dar a conocer el modelo metodológico propuesto y los resultados del diagnóstico biofísico de la zona, así como las áreas que requieren atención.

11. Área de estudio

La Reserva de la Biósfera Montes Azules (REBIMA) se encuentra ubicada entre los paralelos 16° 57' 19" y 16° 5' 10" latitud norte y 90° 45' 4" y 91° 30' 18" longitud oeste dentro de la Selva Lacandona, en la porción este del estado de Chiapas, México (CONANP, 2024, Figura 3). Forma parte de la región Frontera Sur, Istmo y Pacífico Sur y tiene una superficie de 331,200 ha que comprenden los municipios de Ocosingo, Las Margaritas y Maravilla Tenejapa (CONANP, 2024).

Esta ANP se encuentra dividida en cinco zonas en función del grado de conservación y representatividad de los ecosistemas que la conforman (Ver Figura 3, Ramírez, 2012).

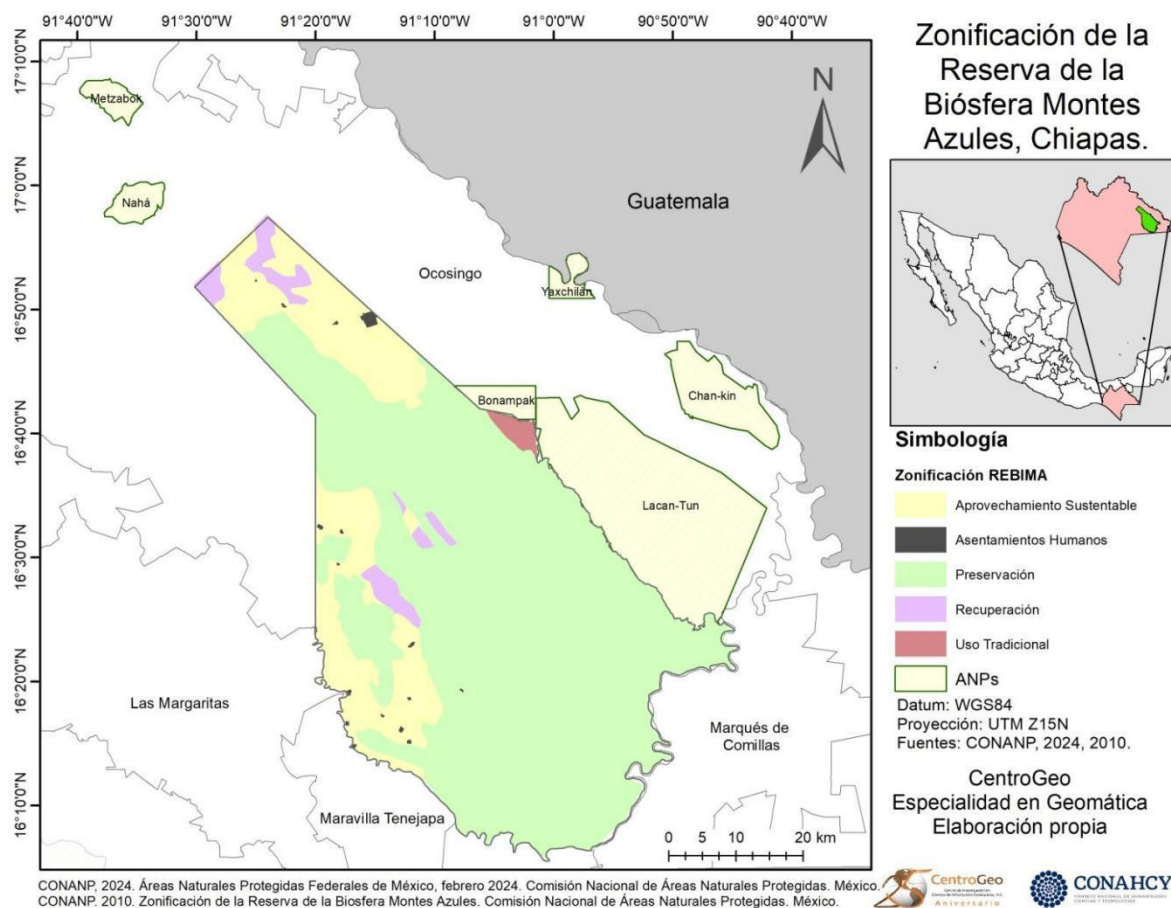


Figura 3. Zonificación de la Reserva de la Biósfera Montes Azules (REBIMA), elaboración propia con datos CONANP (2010).



11.1 Características biofísicas

Entendemos que la configuración de una región, tanto física como socialmente, está íntimamente ligada a la interacción entre sus componentes biofísicos y socioeconómicos y esta relación compleja al desarrollarse a lo largo del tiempo va determinando una identidad y el futuro de cada lugar.

La geología de una región, tal como lo indica (Strahler y Strahler, 2014), ejerce un papel fundamental en la definición de su relieve. Las características geológicas, como la composición del suelo, la estructura de las rocas y la historia tectónica, moldean el terreno, dando origen a montañas, valles, llanuras y otros accidentes geográficos. Este relieve, a su vez, define las cuencas hidrográficas, las cuales determinan la distribución y el curso de los ríos y arroyos que conforman el sistema de drenaje de la región (Leopold, 1964).

El sistema hidrográfico, junto con otros factores como el clima y la cobertura vegetal, establece las características únicas de cada región (National Geographic Society, 2021). Por ejemplo, el tipo de roca predominante en la geología puede influir en la composición química y física del suelo, lo que a su vez afecta la diversidad biológica y la distribución de especies vegetales y animales (Whittaker & Willis, 2002). Del mismo modo, el clima puede determinar la cantidad y distribución de la precipitación, lo que impacta directamente en la disponibilidad de agua y la biodiversidad presente en la región (Peel, et al., 2007).

Estos factores naturales, a su vez, influyen en las características socioeconómicas de la población local y en las actividades económicas desarrolladas en la región (Daily, et al., 1997). Por ejemplo, un entorno con abundante agua y biodiversidad puede promover la agricultura y el turismo ecológico (Groombridge y Jenkins, 2005), mientras que áreas con relieve accidentado pueden ser propicias para actividades como la minería o la generación de energía hidroeléctrica (World Energy Council, 2019).

Comprender la interacción entre estos elementos biofísicos y socioeconómicos es crucial para el diseño e implementación efectiva de proyectos de restauración ecológica que buscan mejorar la salud y la sostenibilidad de los ecosistemas locales (SER, 2020). Al considerar las complejas relaciones entre lo natural y lo social, se pueden desarrollar estrategias de restauración que no solo beneficien al medio ambiente, sino que también promuevan el bienestar y el desarrollo sostenible de las comunidades locales.

i. Hidrografía

Esta reserva se ubica en la cuenca del Río Lacantún (Región Hidrológico - Administrativa - XI. Frontera Sur. Región Hidrológica - 30. Grijalva - Usumacinta), los Ríos Lacantún, Jataté y Lacanjá son los límites naturales de la REBIMA (Figura 4).

Existen dos lagunas dentro de la REBIMA; Lagunas Miramar (7,906 ha) y Lacanjá (1,030 ha), se localizan al centro - oeste y noroeste de la REBIMA respectivamente. La superficie ocupada por estos cuerpos de agua es de 8,936 ha, lo que corresponde al 2.7% del total de la REBIMA (INE, 2000).

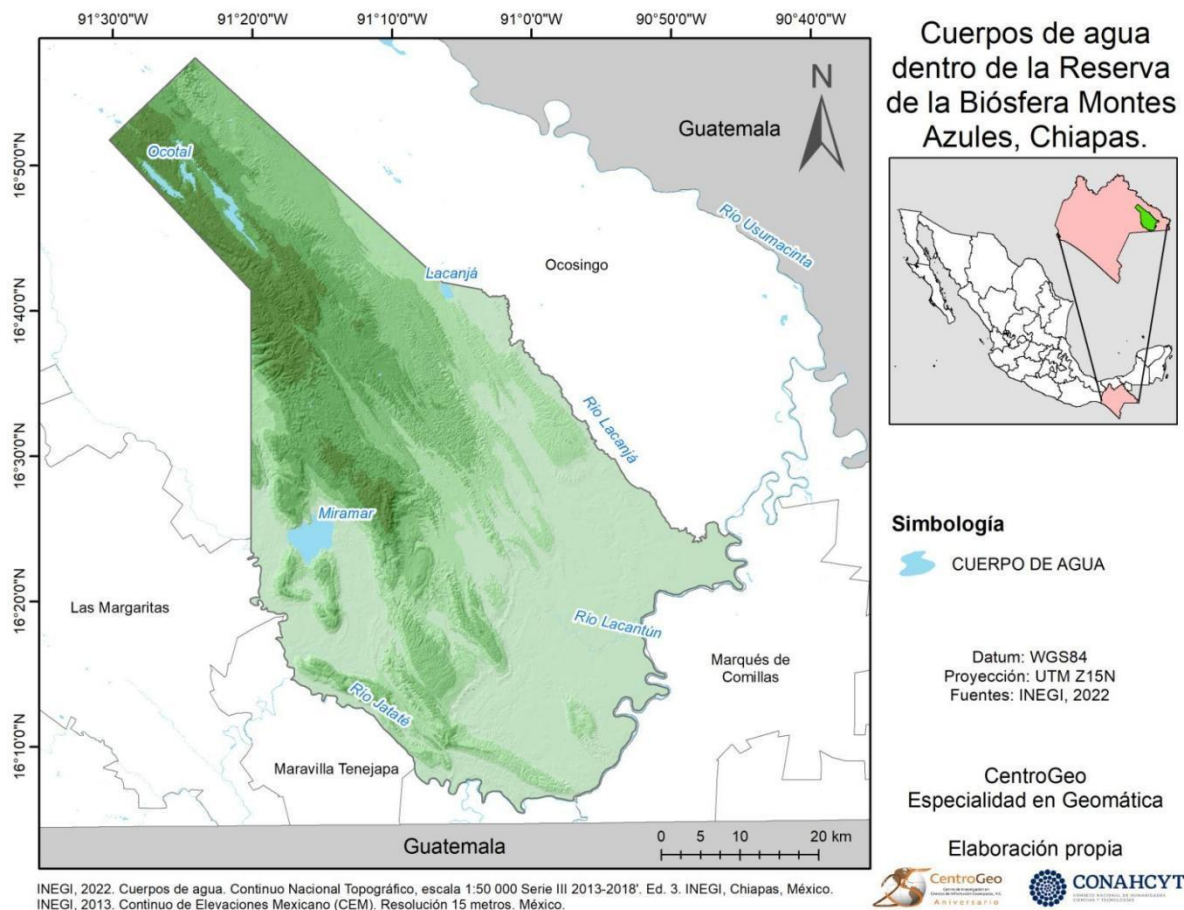


Figura 4. Cuerpos de agua dentro de la Reserva de la Biósfera Montes Azules (REBIMA), elaboración propia con datos del INEGI (2020).

ii. Clima

La REBIMA presenta un clima que varía del cálido húmedo (Am) a templado húmedo con lluvias en verano (A)C(m)), esta variación en las condiciones climáticas a lo largo del año contribuye a que exista una diversidad biológica alta en la reserva.

A continuación, se explica cada tipo de clima:

Am: Cálido húmedo, temperatura media anual mayor de 22 °C y temperatura del mes más frío mayor de 18 °C. Precipitación del mes más seco menor de 60 mm; lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal del 5% al 10.2% del total anual (García E., 1998).

(A)C(m): Semicálido húmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18 °C, temperatura del mes más frío menor de 18 °C, temperatura del mes más caliente mayor de 22 °C. Lluvias de verano, precipitación del mes más seco mayor de 40 mm; porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual. (Zona de transición climática; García E., 1998).

La precipitación media anual presenta un rango de entre 1890 y 4300 mm, según la altura. Los mayores valores se presentan en la zona suroeste. La distribución de las lluvias a lo largo del año tiene un patrón monomodal con una estación seca bien definida entre los meses de enero a abril y una estación húmeda que va de mayo a diciembre (Saavedra, López y Castellanos, 2015).

iii. Geología

En la REBIMA la presencia de rocas calizas, sus rupturas, fracturas, fallas y diaclasas son los elementos que controlan la posición de las formas cársticas. La presencia de los karst es el resultado de la disolución de la química de los carbonatos de calcio y magnesio de las calizas al estar en contacto con el agua; se encuentran cubiertas por vegetación, cabe considerar que en los últimos años dicha capa de vegetación ha sido alterada, propiciando con ello un aumento en el grado de erosión (INE, 2000; Figura 5).

iv. Relieve

De acuerdo con (CONANP, 2010), esta reserva se distingue por su relieve accidentado y diverso, el cual es el resultado de la interacción entre fuerzas geológicas y procesos erosivos a lo largo de millones de años.

El área se caracteriza por su topografía montañosa, con altitudes que varían entre los 200 y 1,500 m. s. n. m., se distinguen varios tipos de relieve, entre ellos las montañas, como la



Sierra del Lacandón, que es la cordillera principal con picos importantes como el Cerro Rabinal y el Cerro Derrumbe, y la Sierra del Aguacate, una cadena montañosa de menor altura. Además, se encuentran valles como el Valle del Lacantún y la Depresión del Usumacinta, así como llanuras como la llanura aluvial del Usumacinta y zonas kársticas, destacando la Zona Kárstica del Valle del Lacantún con abundantes cuevas, dolinas y cenotes, como la Cueva de Naj Tunich (Mora González, s. f.).

Los procesos que han moldeado este relieve incluyen elevación tectónica a lo largo de la historia geológica de la zona, erosión fluvial por parte de los ríos Lacantún y Usumacinta, y karstificación, que ha dado lugar a la formación de karst. Este relieve diversificado tiene un impacto significativo en la reserva, ya que crea una gran variedad de hábitats que favorecen una diversidad de plantas y animales, actúa como barrera natural que influye en la distribución de especies, y tiene un papel crucial en la hidrología, influyendo en el flujo de agua y la formación de ríos, lagos y humedales (CONANP, 2010).

v. Cobertura vegetal y uso de suelo

La REBIMA comprende alrededor del 27.6% de la superficie de la Selva Lacandona (CONAFOR, 2016). La Selva Lacandona es el remanente más grande de selva alta perennifolia en América del Norte y una de las regiones con mayor biodiversidad de México (Mendoza y Dirzo, 1999).

En esta zona se distinguen nueve tipos de vegetación de acuerdo con INEGI (Serie VII, 2016).

- Pastizal
- Sabana
- Bosque de Pino
- Bosque Mesófilo de Montaña
- Selva Alta Perennifolia
- Selva Baja Perennifolia
- Selva Mediana Subperennifolia
- Tular
- Vegetación Secundaria

Mientras que en el estudio realizado por López y Saavedra (2023), en la cuenca del Usumacinta, la reserva comprendía 19 tipos de vegetación (Figura 5).

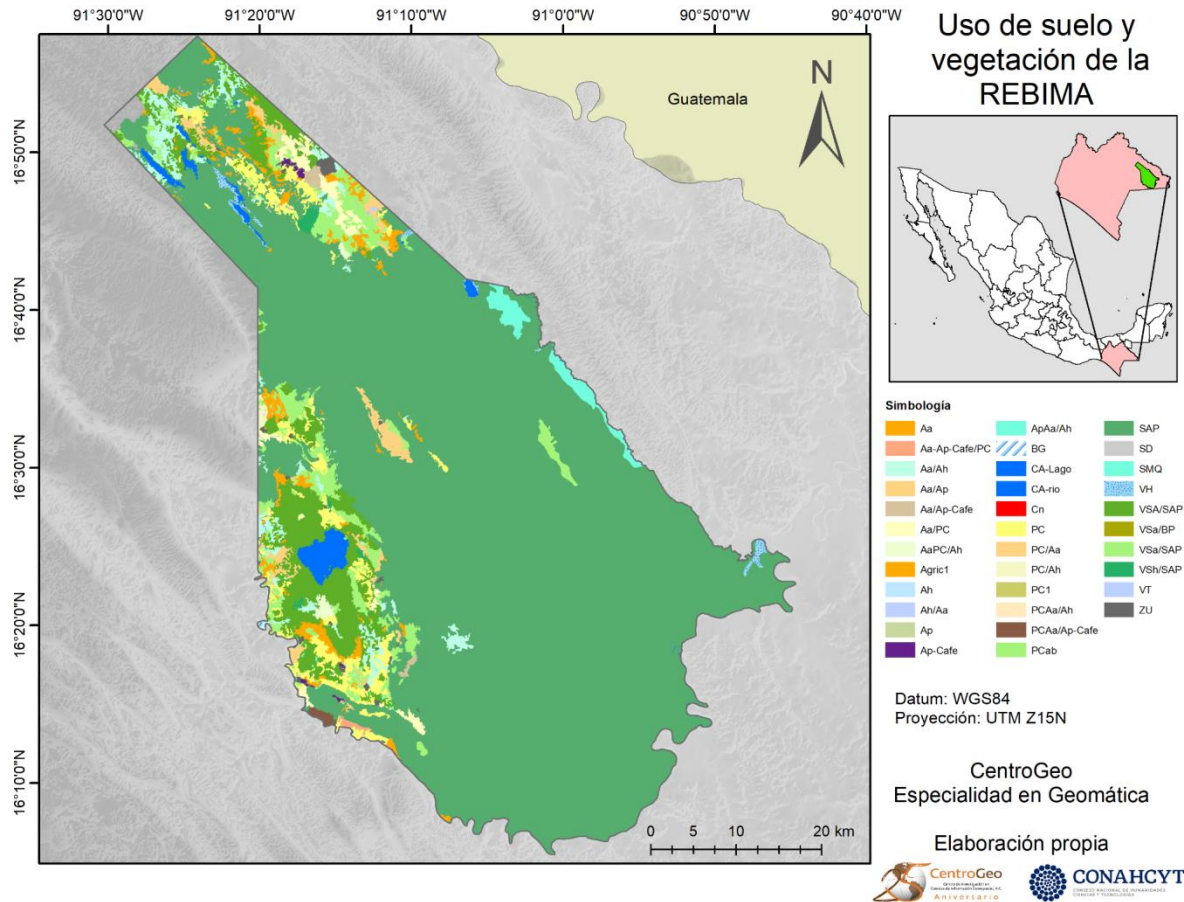


Figura 5. Vegetación y uso de suelo de la Reserva de la Biósfera Montes Azules (REBIMA). Elaboración propia a partir de los datos López y Saavedra (2023). **Aa:** Agricultura, **Ah:** Acahual, **Ap:** Agricultura permanente, **BG:** Bosque de galería, **Cn:** Cantera, **PC:** Pastizal, **PCab:** Pastizal arbolado; **SAP:** Selva alta perennifolia, **SMQ:** Selva mediana caducifolia; **VH:** Vegetación hidrófila, **VSA:** Vegetación secundaria arbórea, **VSa:** Vegetación secundaria arbustiva, **VSh:** Vegetación secundaria herbácea; **ZU:** Zona urbana.

Las especies representativas de la zona son: canshán (*Terminalia amazonia*), palo de lacandón (*Dialium guianense*), chicozapote (*Manilkara zapota*), caoba (*Swietenia macrophylla*), chaca o palo mulato (*Bursera simaruba*), magnolia (*Talauma mexicana*), pinos (*Pinus maximinoi* y *P. pseudostrobus*) y encinos (*Quercus peduncularis* y *Q. segoviensis*; CONANP, 2024b).

vi. Biodiversidad

Montes Azules cubre apenas el 0.16% del territorio nacional y alberga una biodiversidad que incluye el 20% de las especies vegetales a nivel nacional, el 30% de las aves, el 27% de los



mamíferos y el 17% de los peces de agua dulce (SEMARNAT, 2019). La diversidad de ecosistemas se manifiesta a través de la variedad de especies que estos albergan, se registran cerca de 4,270 especies de plantas vasculares, 103 especies de peces, 33 anfibios, 104 reptiles, 395 aves y 171 mamíferos (Velasco, 2009).

Dentro de las especies representativas de la reserva se encuentran: saraguato negro (*Alouatta palliata*), águila harpía (*Harpia harpyja*), mariposa (*Parides sesostris*), pecari de labios blancos (*Tayassu pecari*), mono araña (*Ateles geoffroyi*), oso hormiguero dorado (*Cyclopes didactylus*), murciélago orejas de embudo (*Natalus stramineus*), jaguar (*Panthera onca*), oso hormiguero (*Tamandua mexicana*), tapir (*Tapirus bairdii*), tepezcuintle (*Cuniculus paca*), sereque, guaunque (*Dasyprocta punctata*), guacamaya roja (*Ara macao*; CONANP, 2024b).

Se registran un total de 163 especies en alguna categoría de riesgo (NOM-059): el jaguar, ocelote (*Leopardus pardalis*), jaguarundi (*Herpailurus yagouaroundi*), puma (*Puma concolor*), puercoespín arborícola (*Sphiggurus mexicanus*), grisón (*Galictis vittata*), la tortuga blanca (*Dermatemys mawei*) y los cocodrilos (*Crocodylus acutus* y *C. moreletti*). Aves, tales como el pato real (*Cairina moschata*), zopilote rey (*Sarcoramphus papa*), el águila arpía, la guacamaya roja y el tucán real (*Ramphastos sulfuratus*). Los tres primates registrados en México, el mono aullador negro (*Alouatta pigra*), mono aullador de manto (*A. palliata*) y el mono araña de manos negras y los marsupiales, tlacuachillo acuático (*Chironectes minimus*), tlacuache lanudo o dorado (*Caluromys derbianus*; CONABIO, 2024; Gómez-Pompa y Dirzo, 1995; Velasco, 2009).

11.2 Características socioeconómicas

Dentro de la REBIMA se identificó en el Programa de Manejo (2000) una población total de 9,822 habitantes, sin especificar el número ni el nombre de las localidades que interactúan con la REBIMA. Mientras que Cervantes (2002) identifica que hay un total de 11,572 habitantes en 38 localidades. En contraste, para la misma región, según datos de CONAPO (2024) se estima una población de 19,921 habitantes. Esto indica que en la zona existe una tasa alta de crecimiento demográfico, resultado tanto de la inmigración como de la natalidad. Las condiciones de pobreza, desempleo y ausencia de crecimiento económico obstaculizan la implementación de políticas ambientales destinadas a la conservación en la reserva (Cervantes, 2002).

De acuerdo con el Instituto Nacional de Ecología (INE, 2000), la tenencia de la tierra en Montes Azules se distribuye de la siguiente manera: el 75% corresponde a bienes comunales



de la Comunidad Zona Lacandona, el 19% a terrenos ejidales, el 4.2% son terrenos nacionales y el 1.8% son de tenencia indeterminada.

El sector primario se desarrolla a través de los ejidatarios, los cuales tienen como actividad principal la producción de ganado bovino, quienes no reciben un salario fijo específico, y aquellos ingresos percibidos por su actividad productiva no estén considerados del todo en las estadísticas básicas (Iniciativa de Reducción de Emisiones [IRE], 2016).

En la región, destacan diversas localidades por su activa oferta turística, entre las cuales se incluyen Metzabok, San Javier, Frontera Corozal, Lacanjá Chansayab, Bethel, Crucero Bonampak y Plan de Ayutla, ubicadas en el municipio de Ocosingo. Además, se encuentran destinos como Las Nubes en Maravilla Tenejapa, así como Flor de Marqués, Galacia, El Pirú, Playón de la Gloria y Reforma Agraria en Marqués de Comillas (IRE, 2016).

A pesar del potencial turístico de estas áreas protegidas, existe una preocupante falta de cumplimiento por parte de los prestadores de servicios turísticos con respecto al programa de manejo establecido. Esta omisión se evidencia en la ausencia de información técnica sobre el entorno protegido, así como en la falta de claridad respecto a las normas de ingreso para los visitantes (Parkswatch, 2004).

Los municipios que colindan con la REBIMA, se destaca la economía agrícola a cielo abierto en Ocosingo, Maravilla Tenejapa y Las Margaritas, con cultivos principales como maíz, café, plátano y frijol, así como la relevancia de la ganadería, especialmente en la producción lechera. A pesar de los avances económicos en estos sectores, persisten desafíos significativos en términos de pobreza, subrayando la urgencia de implementar estrategias inclusivas para mejorar la distribución de recursos y oportunidades en la región (INEGI, 2022).

12. Modelos

Modelo geográfico

El modelo geográfico (Figura 6) presenta una serie de datos y variables que permiten identificar áreas prioritarias para la restauración ecológica en la región de REBIMA, Chiapas. Este modelo se compone de lo siguiente:

- **Delimitación administrativa:** Define los límites de las áreas de estudio, que en este caso corresponden a la Reserva de la Biósfera Maya (REBIMA), ubicada en el estado de Chiapas, México.
- **Escala del modelo:** Determina la resolución espacial de los datos utilizados. La escala de la cobertura del uso de suelo es de 1:15,000 y aptitud de las tierras 1:50,000, en su visualización dentro del software, aunque esta puede ser modificada según el formato de adquisición de los datos.
- **Proyección del modelo:** Define el sistema de referencia espacial utilizado para representar los datos. En este caso, la proyección es WGS 84 ya que es una proyección geográfica basada en latitud y longitud, ideal para estudios de áreas grandes o que requieren compatibilidad con datos globales.
- **Datum del modelo:** Especifica el sistema de referencia geodésico empleado para la representación de los datos, siendo UTM Z15 el datum utilizado.

El modelo se basa en la integración de datos espaciales adquiridos, que representan diferentes aspectos del medio ambiente, tales como: la edafología, la cobertura del suelo y el relieve (MDE, Modelo Digital de Elevación). Los datos utilizados se obtienen considerando el año más reciente de actualización y empleando la escala apropiada para su visualización y manejo.

Además, se incorporan fuentes de datos elaboradas que incluyen la tasa de transformación del hábitat, la erosión hídrica potencial, la zonificación de la aptitud de las tierras, la fragmentación simulada considerando áreas ya restauradas y el mapa de áreas prioritarias para la restauración ecológica.



Modelo cartográfico

El modelo cartográfico permite visualizar las entradas, representadas en color gris; las salidas, en color blanco; y los procesos necesarios para su obtención, indicados mediante rombos verdes (Figura 7).

Sigue la estructura característica del modelo en cascada, dividiéndose en diversas etapas desde la recopilación de datos hasta la identificación de áreas prioritarias para la restauración ecológica. Cada etapa depende de la conclusión de la anterior, lo que indica un flujo lineal de información que permite avanzar de manera ordenada en cada proceso (Barranco, 2001).

Las entradas del modelo se clasifican en datos espaciales y no espaciales. Los datos espaciales incluyen información geográfica y de características de la superficie terrestre, obtenida a partir de diversas fuentes como el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), imágenes satelitales de Sentinel y Google Earth, entre otros. Estos datos comprenden elevación, pendiente, drenaje, vegetación y uso del suelo. Por otro lado, los datos no espaciales abarcan variables como textura, fertilidad y otros indicadores de calidad del suelo.

Una vez recopiladas estas entradas, se llevan a cabo procesos de modelado y análisis espacial. Estos procesos incluyen el uso de modelos de erosión hídrica potencial a partir de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), la fragmentación y conectividad ecológica y la aptitud de la tierra.

Las salidas del modelo se concretan en la generación de mapas temáticos que muestran la distribución espacial de las variables analizadas y la identificación de áreas prioritarias para la restauración. Además, se calcula la tasa de cambio para evaluar la dinámica de los procesos de degradación y restauración en la zona de estudio. Estas salidas son fundamentales para el diagnóstico del estado actual y la planificación de intervenciones futuras.

Modelo computacional

El modelo computacional (Figura 8) se fundamenta en tres etapas esenciales: datos de entrada, procesamiento y datos de salida. La primera fase abarca la adquisición de imágenes satelitales, mapas digitales y la consulta de información geoespacial.

- Las imágenes satelitales abarcan los años 2018 y 2023 y provienen de SENTINEL-2 MSI, ofreciendo una resolución espacial de 10 y 20 metros, respectivamente.



- Los mapas digitales fueron adquiridos de los geoportales de CONABIO e INEGI, incluyendo datos como el Modelo Digital de Elevación (MDE), capas en formato shape de los polígonos administrativos de las Áreas Naturales Protegidas Federales, así como información sobre cobertura del suelo, edafología, perfiles de suelo y un mapa de zonificación de uso potencial de las tierras del año 2016.
- La información geoespacial se consultó a partir del portal de Google Earth para la visualización de datos.

En la segunda parte se indican los procesos mediante los cuales se manipulan y analizan los datos de entrada para generar resultados significativos. Comprende la aplicación de algoritmos específicos para clasificación de imágenes satelitales, la estimación de la erosión hídrica potencial (USLE), el análisis de fragmentación y la conectividad ecológica. La realización de cálculos matemáticos o estadísticos, para determinar la tasa de transformación de hábitat y la integración de los datos mediante la adaptación del modelo en cascada.

Mientras que los datos de salida comprenden la elaboración de mapas temáticos del cambio de uso de suelo, zonificación y aptitud de las tierras actualizado, fragmentación y conectividad ecológica y la fragmentación simulada considerando áreas ya restauradas. Por último, se espera, a partir de la primera aproximación metodológica, generar un modelo que permita identificar las áreas prioritarias para la restauración ecológica.

Se generarán tres entregables que incluyen: un cartel de divulgación, un reporte técnico y un visualizador web que permitirá a los usuarios visualizar los datos y mapas obtenidos a partir de este trabajo.

12.1 Modelo geográfico

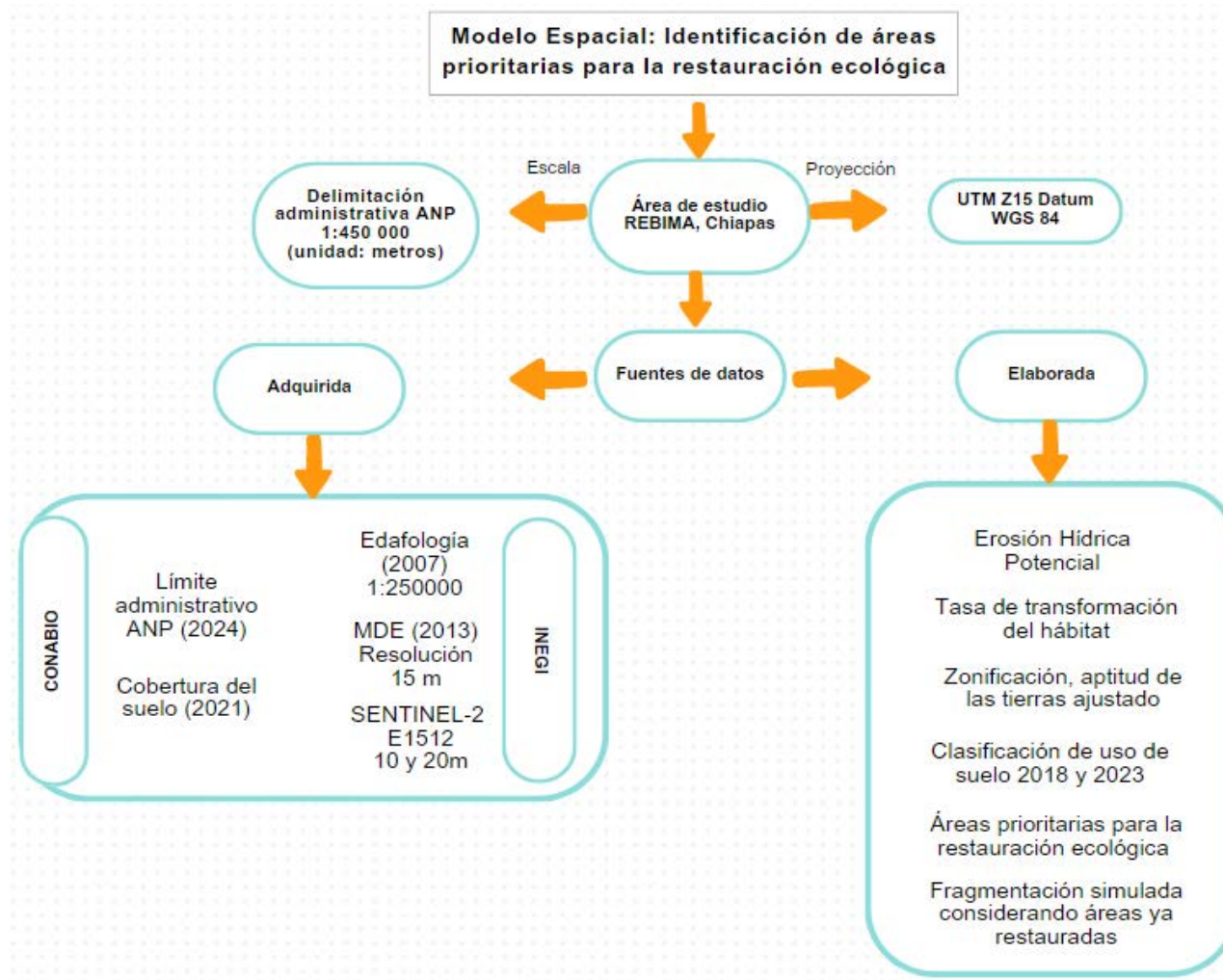


Figura 6. Modelo Geográfico

12.2 Modelo cartográfico

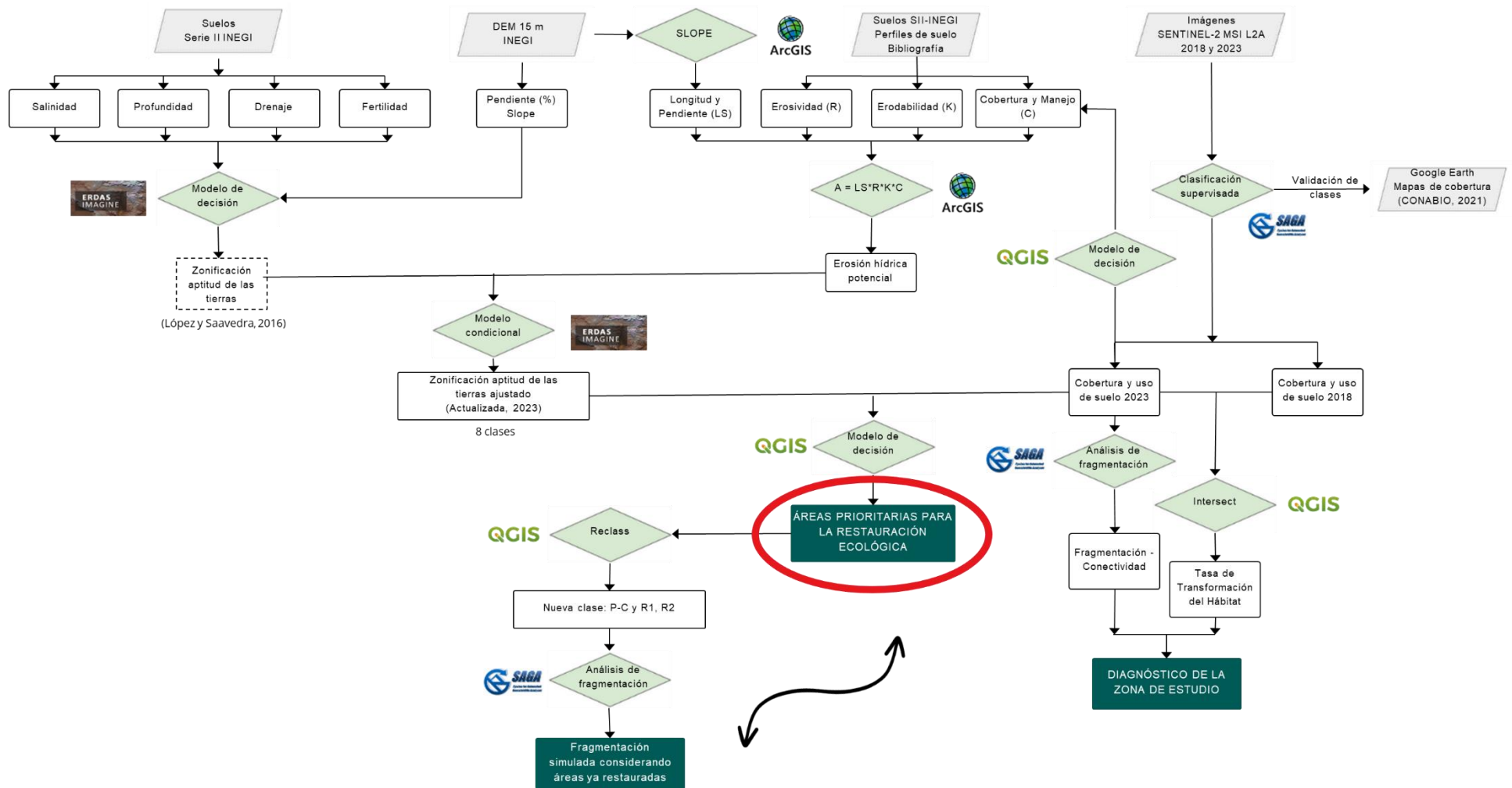


Figura 7. Modelo cartográfico.

12.3 Modelo computacional

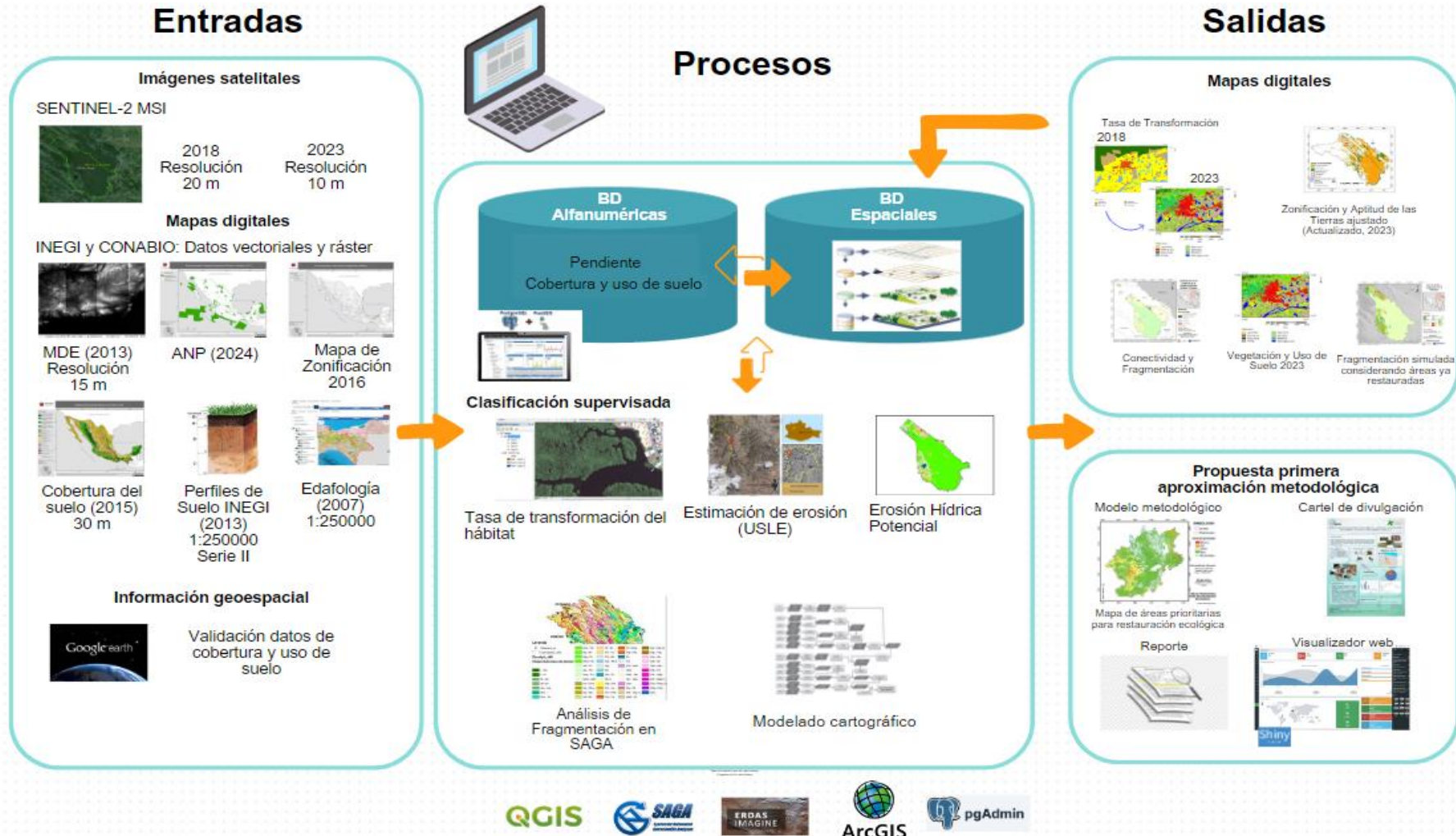


Figura 8. Modelo computacional



13. Metodología

13.1 Obtención de imágenes satelitales y pre-procesamiento

Se adquirieron imágenes SENTINEL-2 MSI para el año 2018 y 2023, con una resolución espacial de 10 y de 20 m, las cuales se descargaron del portal de Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA) con corrección atmosférica L2A.

La selección de las imágenes satelitales se basó en la calidad de las imágenes disponibles en el periodo 01/01/2018 - 31/03/2018 y 01/01/2023 - 31/03/2023, con una cobertura de nubes menor al 10%.

El polígono de la REBIMA fue extraído de la base cartográfica que representa la cobertura de Áreas Naturales Protegidas Federales de México, febrero 2024, del Catálogo de metadatos geográficos de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). Con una proyección Cónica Conforme de Lambert y datum horizontal WGS8 (<http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/anpfb2024gw.html>).

Las imágenes seleccionadas para este trabajo (4 imágenes por año) se obtuvieron con base en el polígono de la ANP Montes Azules (CONANP, 2024c).

El Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) para el estado de Chiapas con una resolución de 15 metros se obtuvo de la página del INEGI (2013). Con datum ITRF92 época 1988.0, elipsoide GRS80, coordenadas geográficas (<https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>).

13.2 Clasificación de la cobertura vegetal

Para identificar las diferentes coberturas y usos de suelo se generaron representaciones en color verdadero RGB y 4,3,2 (rojo, verde y azul) y en falso color, 8,4,3 (infrarrojo cercano, rojo y verde) y 11, 8A, 2 (infrarrojo de onda corta, infrarrojo cercano y azul), con el fin de visualizar las diferentes coberturas en el área de estudio; destacando la vegetación en tonos rojos en la primera y las zonas agrícolas en tonos verdes en la segunda. Esto facilitó la interpretación



visual de las imágenes para identificar los sitios de entrenamiento de acuerdo con los diferentes tipos de cobertura y uso del suelo (FMCN – CONANP). Se determinaron 16 clases para el año 2018 y 17 para el 2023 con base en la cobertura de Uso de Suelo y Vegetación (Tabla 2; López, 2021). La selección de las muestras de entrenamiento se hizo a partir de la asesoría del Mtro. Daniel María López López que tiene conocimiento de la zona de estudio y la validación con imágenes de Google Earth. La segmentación se realizó con generalización de uno.

Se llevó a cabo una clasificación supervisada orientada a objetos, mediante el software SAGA v. 2.1.4 (Conrad, et al., 2015). La clasificación supervisada es el proceso más frecuentemente utilizado para análisis cuantitativos de datos de imágenes de teledetección (Rwanga y Ndambuki, 2017), mientras que la clasificación orientada a objetos toma en cuenta el contexto, como la forma, textura, tamaño y el contexto espacial derivado de la relación que existe entre los píxeles adyacentes, por lo que los objetos son definidos como una región continua de píxeles que tienen propiedades radiométricas uniformes respecto a los que están a su alrededor (Gao, 2009). Lo que ocasiona mayor continuidad entre los segmentos que corresponden a la misma clase y una disminución del efecto salt and pepper.

Una vez obtenidas las clasificaciones de ambas imágenes (2018 y 2023), se les realizó un postprocesamiento para corregir aquellos polígonos que no concuerdan con el límite del tipo de uso del suelo y vegetación. Para lo cual se procedió a disolver aquellas geometrías que pertenecían a la misma clase, posteriormente se determinó el área mínima de estudio a 0.5 ha para realizar una generalización de aquellos polígonos que tuvieran un área menor a el área mínima de estudio (0.5 ha). A partir de lo cual se reclasificaron y/o modificaron los límites de aquellos polígonos que su clave de clasificación era confusa respecto a la clase de cobertura y uso de suelo esperada.

Una vez que las imágenes fueron clasificadas y corregidas se elaboraron los mapas de cobertura y uso de suelo correspondientes a partir de los cuales se obtuvo la superficie total en hectáreas de cada uno de los tipos de vegetación por año.

Tabla 2. Tipos de vegetación y uso de suelo, identificados para la Reserva de la Biósfera Montes Azules 2018 y 2023.

Tipos de cobertura y uso de suelo	2018	2023
Agricultura	Aa	Aa
Agricultura/Acahual	Aa/Ah	Aa/Ah
Agricultura/Pastizal	AaPc	AaPc
Agricultura/Zona urbana	AaZu	AaZu
Agua	Agua	Agua
Acahuales	Ah	Ah
Agricultura permanente	Ap	Ap
Bosque Galería	BG	BG
Café	Cafe	Cafe
Cantera	Cn	Cn
Pastizal	Pc	Pc
Selva Alta Perennifolia	SAP	SAP
Vegetación hidrófila	VH	VH
Vegetación secundaria arbustiva	VSa	VSa
Vegetación secundaria arbórea	VSA	VSA
Zona urbana	ZU	ZU
Agricultura/Agricultura permanente/Café	NA	AaApcafe

Nota: Dentro del polígono de la REBIMA se identificó la presencia de selva mediana perennifolia, pero para fines prácticos de este trabajo se continuó en una única clase con selva alta perennifolia (SAP).



13.3 Tasa de transformación del hábitat

La tasa de transformación del hábitat (TTH) se refiere a la medida en la que el hábitat natural se está convirtiendo o transformando en otro tipo de uso de suelo o vegetación, ya sea debido a actividades humanas, desastres naturales u otros FAO (1996), como fue citado por Bocco et al. (2001).

A partir de los 17 tipos de vegetación del año 2023 y los 16 tipos del 2018 se agruparon en dos categorías: vegetación forestal y no forestal (ver Tabla 3) mediante el software QGIS v. 3.22. La vegetación forestal incluye plantas dominadas por especies arbóreas, arbustivas que de manera natural las cuales forman bosques, selvas, conforme a la definición establecida en la Ley Forestal de 1997. En contraste, la vegetación no forestal abarca los usos del suelo que resultan de actividades humanas y/o desastres naturales.

A partir de esta clasificación se calculó la TTH siguiendo la ecuación de la FAO (1996), como fue citado por Bocco et al. (2001):

$$\delta = 1 - \left[1 - \frac{S_1 - S_2}{S_1} \right]^{1/n}$$

Donde:

- δ representa la tasa de cambio o de transformación.
- S_1 es la superficie forestal al inicio del periodo.
- S_2 es la superficie forestal al final del periodo.
- n es el número de años entre las dos fechas.

Esta ecuación permite calcular la tasa de transformación del hábitat tomando como base la superficie forestal en el inicio, la superficie forestal al final del periodo de estudio, y el número de años transcurridos entre estas dos fechas, es decir, nos da una estimación del cambio de la superficie forestal en un período de tiempo determinado (CONANP, 2003).

Tabla 3. Tabla de clasificación forestal y no forestal para la reserva de la biosfera Montes Azules para los años de 2018 y 2023.

Tipos de cobertura y uso de suelo	Abreviatura	Reclasificación
Agricultura	Aa	No Forestal
Agricultura/Acahual	Aa/Ah	No Forestal
Agricultura/Pastizal	AaPc	No Forestal
Agricultura/Zona urbana	AaZu	No Forestal
Acahuales	Ah	No Forestal
Agricultura permanente	Ap	No Forestal
Bosque Galería	BG	Forestal
Café	Cafe	No Forestal
Cantera	Cn	No Forestal
Pastizal	Pc	No Forestal
Selva Alta Perennifolia	SAP	Forestal
Vegetación hidrófila	VH	Forestal
Vegetación secundaria arbustiva	VSa	No Forestal
Vegetación secundaria arbórea	VSA	Forestal
Zona urbana	ZU	No Forestal
Agricultura/Agricultura permanente/Café	AaApCafe	No Forestal

13.4 Índice de Erosión (USLE)

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) es un modelo que se utiliza para estimar la tasa promedio anual de erosión hídrica del suelo (toneladas por unidad de área) considerando una combinación de los siguientes factores: sistema de cultivo, práctica de manejo, tipo de suelo, patrón de lluvia y topografía (Benavidez, R., et al., 2018; Ramírez et. al, 2009).

La expresión matemática se ve de la siguiente manera:

$$A = R * K * L * S * C * P$$



Donde:

A: Pérdida media anual de suelo (toneladas métricas por hectárea por año)

R: Factor de erosividad por la lluvia o potencialidad de la lluvia para desprendimiento y dispersión de partículas del suelo.

K: Factor de la erodabilidad del suelo o susceptibilidad de éste a ser erosionado.

L: Longitud de la pendiente; distancia desde donde empieza el flujo de escorrentía hasta donde hay acumulación de sedimentos.

S: Factor de inclinación de la pendiente; relación entre las pérdidas de suelo para una determinada pendiente.

C: Factor de la cobertura y manejo; relación entre la erosión en un terreno cultivado en condiciones específicas.

P: Factor de prácticas de conservación del suelo; relación entre las pérdidas de suelo y las prácticas culturales de conservación.

El factor erosividad (R) es el resultado de la aplicación de ecuaciones para determinados regímenes de lluvias y/o condiciones climáticas similares y representa el efecto que tiene la lluvia sobre la erosión del suelo (Wischmeier y Smith, 1978). Para el presente trabajo se utilizó la ecuación utilizada para definir el factor R en las distintas regiones de la República Mexicana de Martínez, (2005).

$$R = 2.4619P + 0.006067P^2$$

Dónde:

P: Precipitación Anual

El factor de erodabilidad del suelo (K) representa el grado de resistencia natural que ofrece el suelo a ser erosionado, al actuar sobre éste los otros factores erosivos (Ramírez et. al, 2009).

El factor de longitud de pendiente (L) y el gradiente de la pendiente (S), en conjunto factor LS representa el efecto de la longitud y la pendiente sobre la erosión laminar, de surcos y entre surcos por el agua, es la relación entre la pérdida esperada de suelo contra una parcela unitaria (Wischmeier y Smith, 1978). Para obtener esta información se utilizó el DEM del estado de Chiapas, tomado del continuo de elevaciones de México del INEGI.

El factor de cobertura y manejo (C) se define como la relación entre la pérdida de suelo de un campo con una cobertura y manejo particular y la de un campo bajo "barbecho continuo con labranza limpia" (Wischmeier y Smith, 1978).



Finalmente, el factor de prácticas (P) representa las prácticas de manejo que afectan la erosión del suelo mediante la modificación del patrón de flujo, como curvas de nivel, cultivos en franjas o terrazas (Renard et al., 1997). Cuanto más eficaz sea la práctica de conservación para mitigar la erosión del suelo, menor será el factor P (Bagherzadeh, 2014). Al igual que el factor C, el valor del factor P puede tomarse de la literatura; si no se observan prácticas de apoyo, el factor P es 1 (Adornado et al., 2009).

Para calcular el factor LS, la capa ráster del MDE se proyectó al sistema de referencia universal transversal de Mercator (UTM), Zona 15 Norte, al datum horizontal WGS84. Se utilizó el algoritmo *Fill* de ArcMap para rellenar los sumideros y garantizar la delimitación correcta de cuencas y arroyos dentro del polígono de la REBIMA. Posteriormente se calculó la dirección de flujo la cual se utilizó como entrada para calcular la acumulación de flujo y la pendiente de cada celda en el DEM.

A partir de la capa de acumulación de flujo se realizó una reclasificación en dos clases con valor de 1 para todos los valores de acumulación de flujo entre cero y 10 píxeles (150 m) y valor de cero para aquellos mayores a 10. Y una segunda reclasificación con valor de cero para aquellas celdas con una acumulación de flujo menor de 10 píxeles y con valor de 10 aquellas celdas con un valor mayor a 10.

Se calculó nuevamente la acumulación de flujo a partir la primera capa acumulación de flujo y la suma de la reclasificación (A+B). Y con la calculadora ráster se obtuvo el factor LS a partir de la siguiente fórmula:

$$LS = \left(\frac{\text{acumulación} \times \text{tamaño de celda}}{22.13} \right)^{0.4} \times \left(\frac{\text{sen(pendiente)}}{0.0896} \right)^{1.3}$$

Moore y Burst (1986)

Dónde:

LS: Factor de longitud y pendiente.

Acumulación: Valor del ráster de acumulación de flujo.

Tamaño de celda: tamaño de la celda del ráster 10 píxeles (150 m).

Pendiente: ángulo de la pendiente en radianes.

Para calcular el factor K se realizó una agrupación de los tipos de suelos del conjunto de Datos Edafológicos Serie II de INEGI y de la capa de perfiles de suelo se determinó el tipo de textura y porcentaje de materia orgánica a partir del valor de carbono orgánico y se asignaron a cada tipo de suelo dentro del polígono de la REBIMA.

Para el factor C se utilizó el mapa de uso de suelo para definir los tipos de suelo dentro de la REBIMA y se asoció un valor C a partir de lo reportado en otros trabajos (Tabla 4):

Tabla 4. Factores C para tipos generales de cobertura terrestre compilados de diversas fuentes.

Cobertura	Factor C	Fuente
Selva virgen	0,001	FAO 1989
Bosque secundario	0,007	FAO 1989
Bosque degradado	0,037	Lianes 2009
Pastizal	0,01	FAO 1989
Café	0,09	FAO 1989
Cultivos perennes	0,079	FAO 1989
Cultivos anuales	0,495	FAO 1989
Suelo desnudo	0,05	Awmmaw et al. 2012
Zona urbana	0,05	Awmmaw et al. 2012
Cuerpo de agua	0	FAO 1989
humedal	0,01	Bewket y Teferi 2009

Nota: En el caso de la cantera se consideró un valor de 0.7 al ser un uso de suelo que no debería estar dentro de un área natural protegida, se le asignó un valor mayor a un área de suelo desnudo.

El valor para el factor R fue tomado de la presentación “Estimación de la erosión del suelo” del Dr. Mario Martínez Menéz de la entonces SAGARPA (2005). En el archivo anterior se divide el territorio mexicano por zonas y a cada zona se le asocia un valor de R, según una ecuación modificada para la zona, la REBIMA está dentro de la zona XII, para la cual el valor de R es de 0.96. Mientras que para el factor P se tomó el valor de 1, tal cual como lo menciona Rodríguez (2007) ya que no se requiere de visitas a campo para identificar las prácticas de manejo en la zona de estudio.



13.5 Zonificación de aptitud de las tierras

La aptitud de las tierras se utiliza para evaluar la idoneidad de un terreno para diversos usos, agropecuario, forestal, o la conservación ambiental (López y Saavedra, 2016a; Vargas y Ponce, 2008).

Este tipo de análisis considera múltiples factores, incluyendo la calidad del suelo, la topografía y el clima, para determinar cuál es el uso más eficiente y sostenible de la tierra. La información obtenida ayuda a tomar decisiones informadas que optimizan la producción, minimizan el impacto ambiental, y promueven el uso sostenible de los recursos naturales y algunas prácticas recomendadas (López y Saavedra, 2016a; Vargas y Ponce, 2008).

Se retomó la zonificación de aptitud de las tierras propuesta por López D. y Guerrero A. (2016a) para la región sureste de México que comprende la selva Lacandona. Este modelo considera aspectos edafológicos y de relieve para agrupar los suelos en tres categorías: clase, subclase y grupo de manejo. Identificando ocho clases, con números romanos, de acuerdo con la capacidad de uso de los suelos, agrupados conforme a la similitud de limitaciones o riesgos que afectan a los suelos y a los cultivos.

Las clases aumentan progresivamente conforme las limitaciones son mayores; así la clase I está conformada por aquellos suelos que reúnen las características y condiciones de la tierra óptima para cualquier explotación agrícola, con el menor riesgo de deterioro, mientras que la clase VIII considera a las tierras con limitaciones muy severas a extremadamente severas, no aptas para actividades agropecuarias, y deben destinarse exclusivamente a la conservación de los recursos naturales, la investigación, o actividades de recreación.

En cuanto a las subclases, están divididas en: (t) pendiente, (e) susceptibilidad a la erosión, (h) humedad – condiciones de drenaje (s) suelos y (c) clima; que se pueden presentar solas o en combinación, que indican las limitantes que presentan las distintas subclases de tierras (Tabla 5).

Este modelo se obtiene a partir del diseño de un algoritmo condicional implementado en ERDAS Imagine. Y la generación de clases y subclases de aptitud de las tierras se generan a partir de la agrupación mediante un modelo heurístico simple (López y Saavedra, 2016a).

Tabla 5. Clases de aptitud y grados de limitación de las tierra

Limitación	Susceptibilidad a la erosión (e)		Humedad Condición de Drenaje (h)	Suelos (s) Característica Física y Química	
	S. Erosión (k)	Topografía Pendiente (t) (%)	Drenaje Natural (h)	Profundidad Efectiva (p)	Fertilidad (f)
I	No hay	0 – 3	Bien Drenado Mod. Bien Drenado	Muy Profundo Profundo	Alta
II	No hay Ligera	0 – 3 3 – 7	Bien Drenado Mod. Bien Drenado; Imp. Drenado	Muy Profundo Profundo	Alta Media
III	No hay Ligera	0 – 3 3 – 7 7 – 12	Bien Drenado Mod. Bien Drenado; Imp. Drenado	Profundo Mod. Profundos	Alta Media Baja
IV	No hay Ligera Moderada	0 – 3 3 – 7 7 – 12 12 – 25	Mod. Excesivo Bien Drenado Mod. Bien Drenado; Imp. Drenado; Pobre. Drenado	Profundo Mod. Profundos Superficiales	Alta Media (m) Baja (b) Muy baja (mb)
V (no presente)	No hay	0 – 3 3 – 7	Bien Drenado Mod. Bien Drenado; Imp. Drenado, Pobre Drenado Muy pobre Dren.	Muy Profundo Profundo Mod. Profundos Superficiales Muy superficiales	Alta Media Baja Muy baja
VI	No hay Ligera Moderada	0 – 3 3 – 7 7 – 12 12 – 25 25 – 50	Mod. Excesivo Bien Drenado Mod. Bien Drenado; Imp. Drenado, Pobre Drenado Muy pobre Dren.	Muy Profundo Profundo Mod. Profundos Superficiales Muy superficiales	Alta Media Baja Muy baja
VII	No hay Ligera Moderada Severa	0 – 3 3 – 7 7 – 12 12 – 25 25 – 50 50 – 75	Excesivo Mod. Excesivo Bien Drenado Mod. Bien Drenado; Imp. Drenado, Pobre Drenado. Muy Pobre. D	Muy Profundo Profundo Mod. Profundos Superficiales Muy superficiales Ext. Superficiales	Alta Media Baja Muy baja
VIII Por tamaño se integró a la clase VII	No hay Ligera Moderada Severa Muy Severa	0 – 3 3 – 7 7 – 12 12 – 25 25 – 50 50 – 75 > 75	Excesivo Mod. Excesivo Bien Drenado Mod. Bien Drenado; Imp. Drenado, Pobre. Drenado Muy Pobre. Drenado	Muy Profundo Profundo Mod. Profundos Superficiales Muy superficiales Ext. Superficiales	Alta Media Baja Muy baja

Bien y moderadamente bien Drenado (IIh); Imperfectamente Drenado (IIIh); Pobre y muy pobremente drenado (IVh). Fertilidad moderada (fmod); fertilidad baja (fb); fertilidad muy baja (fmb); profundidad moderada por roca (pmod); profundidad moderada contacto abrupto –abruptico (pmoda); profundidad superficial por roca (ps); profundidad muy superficial por roca (pms); profundidad extremadamente superficial por roca (pes); profundidad superficial por fragmentos gruesos- esquelético(psf); profundidad muy superficial por fragmentos gruesos-pedregoso (pmsfr).

Tomado de:Lopez y Saavedra (2016a)



A partir de esta zonificación se realizó una actualización que considerará el modelo de erosión hídrica potencial. Para ello, se simplificó la información de este mapa que contiene todas las variables edafológicas y de relieve a clases generales, estas clases se tomaron similares a la de la capa original en números arábigos, a diferencia del mapa de aptitud que tiene las clases en números romanos, esto con la finalidad de simplificar la ejecución del modelado en ERDAS Imagine v. 2015. Las clases son: 1, 2, 3, 4, 6, 7 y 8. En algunos casos, en el modelo original de aptitud se consideraban dos diferentes clases, para conveniencia de este trabajo y realizar esta simplificación se consideró la clase más restrictiva, ya que la finalidad de esta simplificación es encontrar las áreas que son prioridad para restaurar dentro de la REBIMA. Una vez asignadas las nuevas clases se creó un campo para contenerlas, este proceso se realizó con ayuda del software ArcMap V.10.5.

Por otra parte, la otra variable que es el USLE (explicado previamente) se reclasificó mediante el software ArcMap V.10.5 asignando valores del 1 al 5, de la siguiente manera:

Tabla 6. Rango de la reclasificación de los valores de USLE

Valor	Rango (USLE)
1	0 - 10
2	10 - 50
3	50 - 100
4	100 - 500
5	> 500

Una vez realizadas estas dos reclasificaciones y ambas imágenes estaban en formato ráster, se desarrollaron las reglas para correr un modelo condicional en el software ERDAS 2015. La sintaxis del modelo es el siguiente:

```

CONDITIONAL {
($n1_aptima_reclass == 1 AND $n2_uslema15x15reclass <= 2) 1,
($n1_aptima_reclass == 2 AND $n2_uslema15x15reclass <= 2) 2,
($n1_aptima_reclass == 3 AND $n2_uslema15x15reclass <= 2) 3,
($n1_aptima_reclass >= 1 AND $n1_aptima_reclass <= 3
AND $n2_uslema15x15reclass == 3) 4,
($n1_aptima_reclass >= 1 AND $n1_aptima_reclass <= 3
AND $n2_uslema15x15reclass == 4) 7,
($n1_aptima_reclass == 4 AND $n2_uslema15x15reclass == 3) 4,
($n1_aptima_reclass == 4 AND $n2_uslema15x15reclass == 4) 7,
($n1_aptima_reclass == 4 AND $n2_uslema15x15reclass == 5) 8,
($n1_aptima_reclass == 6 AND $n2_uslema15x15reclass == 3) 6,
($n1_aptima_reclass == 6 AND $n2_uslema15x15reclass == 4) 7,
($n1_aptima_reclass == 6 AND $n2_uslema15x15reclass == 5) 8,
($n1_aptima_reclass == 7 AND $n2_uslema15x15reclass < 5) 7,
($n1_aptima_reclass == 7 AND $n2_uslema15x15reclass == 5) 8,
($n1_aptima_reclass > 0) $n1_aptima_reclass

```



Una vez que se corrió el modelo se obtuvo un archivo ráster con la actualización de la aptitud de las tierras, variable necesaria para el modelo final que identifica las áreas prioritarias para la restauración ecológica en la REBIMA.

13.6 Fragmentación del paisaje y conectividad ecológica

La fragmentación y conectividad ecológica se obtuvo mediante el software SAGA v.7.8.2, a partir de imagen clasificada del 2023, para este modelo se considera el análisis respecto a la clase de interés (vegetación conservada), sin embargo, como nuestra zona de interés está conformada por diferentes ecosistemas (SAP, VSA, BG y VH) de vegetación natural, previamente se hizo un proceso para unirlos y obtener como resultado una sola clase que incluya las cuatro. Hecho lo anterior, se procedió a correr el modelo respecto a esta nueva clase para obtener los mapas correspondientes (León-Alfaro, 2019).

13.6.1 Simulación Fragmentación del paisaje y conectividad ecológica

Adicionalmente se desarrolló un modelo de simulación para la fragmentación y conectividad considerando las zonas ya catalogadas como 'Protección - Conservación', 'R1' y 'R2', estas dos últimas se asumieron como zonas ya restauradas para finalidades de este modelo. Se eligieron R1 y R2, ya que son las más importantes en orden de prioridad de restauración debido al impacto que tiene realizar actividades agrícolas en estas zonas. Se buscó justificar la importancia de la restauración de las áreas prioritarias arrojadas por el modelo desarrollado en el presente trabajo con el impacto que esto tendría en la fragmentación del paisaje y la conectividad ecológica a futuro dentro de la reserva.

13.7 Modelo cascada

El modelo lineal o en cascada es un enfoque que se caracteriza por dividir el proceso de desarrollo en fases secuenciales estrictamente definidas, donde cada fase debe completarse antes de pasar a la siguiente. Según Barranco Jesús (2001), "El modelo lineal o en cascada



es un enfoque en el que cada etapa del desarrollo de software se completa en un orden secuencial, sin retrocesos a fases anteriores" (Barranco, 2001). Este método es adecuado para proyectos con requisitos bien definidos y cambios mínimos a lo largo del ciclo de vida del desarrollo. Royce (1997), citado en Inga Lindo y Dina Chela (2021), indica que "El método de cascada, como un proceso de desarrollo secuencial, se concibe como un conjunto de etapas que, al ejecutarse de manera ordenada, se posicionan una encima de otra, siguiendo un flujo de ejecución de arriba hacia abajo, como una cascada" (Inga y Chela, 2021).

En la creación del modelo metodológico para identificar áreas prioritarias de restauración en la Reserva de la Biósfera Montes Azules (REBIMA), se observó una fuerte relación con el enfoque secuencial del modelo en cascada. Este modelo se divide en etapas claramente diferenciadas, desde la recopilación de datos como drenaje, profundidad, pendiente, fertilidad, hasta la identificación de zonas prioritarias para la restauración, con cada etapa dependiendo de la conclusión de la anterior.

El modelo sugiere un flujo de información unidireccional desde los datos iniciales hasta los resultados finales, sin iteraciones significativas entre las etapas, lo cual es típico del modelo en cascada. Cada etapa tiene un objetivo específico y bien definido, alineándose con la idea de que cada fase debe tener un entregable claro.

El uso de tecnologías modernas como las imágenes Sentinel y Google Earth sugiere una adaptación del modelo en cascada a las tecnologías actuales de geoprocésamiento. Además, la inclusión de una etapa de validación mejora la calidad de los resultados, ajustando la rigidez del modelo tradicional.

Por tanto, aunque el modelo no se ajusta estrictamente al modelo en cascada, muestra una clara influencia de este enfoque secuencial, con división en fases, flujo lineal de información y objetivos claros en cada etapa.

Determinación áreas prioritarias para la restauración ecológica dentro de la REBIMA

Para la identificación de áreas prioritarias para la restauración ecológica se implementó un modelo en cascada a partir de la obtención de la erosión hídrica potencial (USLE) que considera una serie de factores relacionados con la influencia de diferentes propiedades del suelo en la susceptibilidad a ser erosionado, como la pendiente, la cobertura vegetal y el efecto de la lluvia (Wischmeier y Smith, 1978, Benavidez, R., et al., 2018). Y la zonificación de aptitud de las tierras contempla aspectos edáficos y de relieve, y la cobertura y uso de suelo, para agrupar diferentes zonas de acuerdo con la idoneidad del terreno para desarrollar actividades de conservación hasta agropecuarias (López y Saavedra, 2016a). La

determinación de las áreas prioritarias para la restauración ecológica, se basó en un proceso de ordenación ambiental, que en el presente estudio, se hizo con base en el “ACUERDO por el que se integra y organiza la Zonificación Forestal” de la Comisión Nacional Forestal, el cual ha sido adaptado y modificado según el Artículo 4, la estructura de la Zonificación Forestal distingue tres categorías: 1) zonas de conservación y aprovechamiento restringido o prohibido; 2) zonas de producción/aprovechamiento; 3) zonas de restauración (Lopez D. y Saavedra G., 2016b).

En un segundo nivel se consideró la aptitud de las tierras ajustada que involucra la incorporación de los modelos antes mencionados y a partir de este se realizó la priorización de zonas considerando las siguientes características:

Cuerpos de agua y zonas urbanas (zonas urbanas bien establecidas) se consideraron como clases independientes Agua y ZU, respectivamente. *Regulación* para las regiones donde se identifica la clase VH, que corresponde a la vegetación hidrófila, debido a su capacidad para ser zonas de regulación hídrica dentro del ecosistema, cabe resaltar que estas zonas deben ser preservadas por la misma razón. AR1, AR2 y AR3 para las áreas de aprovechamiento restringido, cada una de las cuales admite diferentes tipos de uso de suelo y vegetación dependiendo las condiciones del suelo y la potencialidad de erosión en el terreno. R1, R2, R3 para las áreas que son prioritarias para restauración, siendo R1 la de mayor importancia, y finalmente la clase *Protección-Conservación*, estas son regiones donde actualmente no se lleva a cabo ninguna actividad agropecuaria y se recomienda e invita a mantenerlo así, con la finalidad de que las áreas potenciales a restaurar, una vez restauradas se unan a esta clase mejorando así el estado de conservación de la REBIMA, además del impacto que esto generaría en la conectividad ecológica dentro de la reserva.

No se consideró la clase de cantera dentro de las restricciones porque estas zonas sin importar sus condiciones edáficas se consideraron como zonas que requieren ser restauradas al estar dentro de un área natural protegida.

Las clases SAP, VSA, BG y VH se designaron como zonas de protección y conservación debido a su vegetación preservada. Lo que las vuelve fundamentales para mantener la biodiversidad y los servicios ecosistémicos. Por lo que es necesario restringir su uso para otras actividades productivas a fin de prevenir la deforestación en estas áreas.

14. Resultados

14.1 Cobertura y uso de suelo

A partir de la clasificación supervisada de imágenes satelitales se identificaron 16 clases para el año 2018, y una clase adicional (AaApcafe) en 2023 debido a la heterogeneidad del paisaje (Tabla 7 y Figura 9). Las clases con mayor superficie para el año 2023 fueron la selva alta perennifolia (SAP) con 252,597.83 ha, la vegetación secundaria arbórea (VSA) con 30,322.82 hectáreas y con menor superficie las áreas de cantera con 22.9 ha. Y en el año 2018 se observó un patrón similar SAP con 259,573.33 ha, VSA con 23,480.40 y cantera con 11.50 ha.

Tabla 7. Área (ha) de los tipos de vegetación y uso de suelo, identificados en la Reserva de la Biósfera Montes Azules para el año 2023.

Tipos de vegetación y uso de suelo	Abreviación	Área (ha)
Agricultura	Aa	6,744.65
Agricultura/Acahual	Aa/Ah	3,666.33
Agricultura/Pastizal	AaPc	1,675.05
Agricultura/Zona urbana	AaZu	92.27
Agua	Agua	4,167.99
Acahuales	Ah	8,473.81
Agricultura permanente	Ap	602.91
Bosque Galería	BG	269.58
Café	Cafe	287.01
Cantera	Cn	22.9
Pastizal	Pc	8,903.17
Selva Alta Perennifolia	SAP	252,597.83
Vegetación hidrófila	VH	806.52
Vegetación secundaria arbustiva	VSa	7,005.9
Vegetación secundaria arbórea	VSA	30,322.82
Zona urbana	ZU	845.38
Agricultura/Agricultura permanente/Café	AaApcafe	1,156

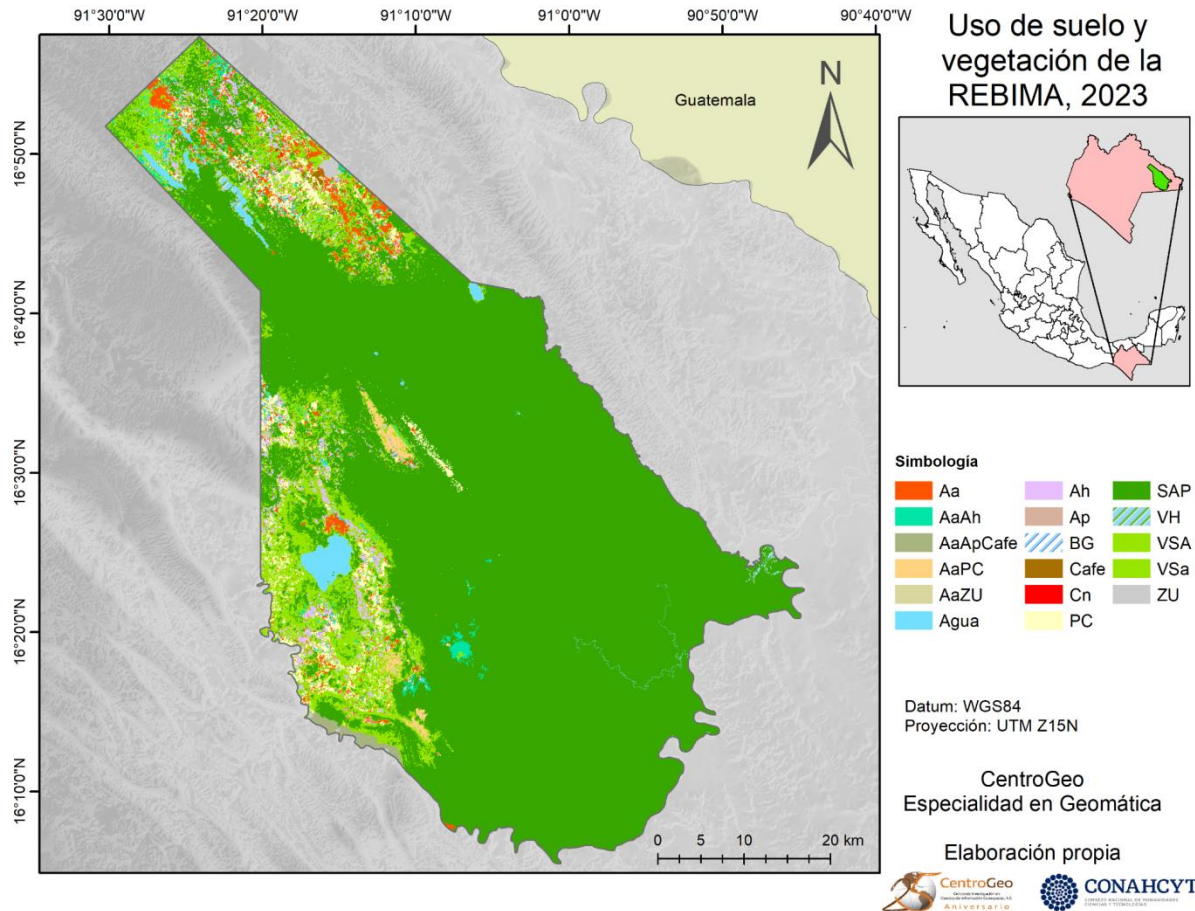


Figura 9. Cobertura y uso de suelo identificados en la Reserva de la Biósfera Montes Azules (REBIMA) para 2023. **Aa:** Agricultura, **Ah:** Acahual, **Ap:** Agricultura permanente, **BG:** Bosque de galería, **Cn:** Cantera, **PC:** Pastizal, **SAP:** Selva alta perennifolia, **VH:** Vegetación hidrófila, **VSA:** Vegetación secundaria arbustiva, **VSA:** Vegetación secundaria arbórea, **ZU:** Zona urbana.

14.2 Tasa de transformación del hábitat

Para el año 2018, la reserva presentó una superficie forestal de 284,310.90 ha (86.78% del área total de la superficie) predominando la selva alta mientras que para el año 2023, la superficie forestal fue de 283,996.76 ha (86.68% del área total de la superficie) lo que significa que entre estos años se transformaron 314.14 ha que representan el 0.09% de la superficie de la reserva.

Respecto a la superficie transformada, se observa que para el año 2018 esta correspondía a una superficie de 38,884.10 ha, que correspondía al 11.87% del área total, en donde el uso agrícola predominaba. Y para el año 2023, la superficie transformada fue de 39,475.40 ha (12.05% del área total de la superficie). Se observó un incremento de la superficie no forestal, el cual fue de 0.18% (Tabla 8).

Tabla 8. Superficie de cambio de acuerdo a la clasificación forestal y no forestal para la Reserva de la Biósfera Montes Azules para los años de 2018 y 2023.

	Área (ha) 2018	Área (ha) 2023
F	284,310.90	283,996.76
NF	38,884.10	39,475.40
TTH	0.022	

Respecto a la tasa de transformación del hábitat, resultó de 0.022% de cambio anual considerando 5 años que han transcurrido del 2018 a 2023 (Tabla 9). Comparado con el último reporte realizado en la zona, la tasa de transformación para el periodo 1996-2000, presentó una tasa anual del 0.33%, disminuyó a un 0.10% anual entre 2005-2009 (CONANP, 2003; FMCN-SEMARNAT, 2009) Para el periodo evaluado, la TTH disminuyó en 0.078% respecto al último informe, no obstante, representa una pérdida de más de 62 hectáreas de hábitat natural por año, lo que indica una tendencia en la degradación del hábitat, a pesar de haber disminuido respecto al último informe.

Tabla 9. Tasa de transformación del hábitat en la reserva de la biosfera Montes Azules para los años de 2018 y 2023.

Periodo	S1	S2	Años	Tasa de Cambio	Tasa de Cambio Anual	ha/año	Cambio acumulado (ha)
2018-2023	284,310.90	283,996.77	5	0.00022	0.022	62.83	314.14

14.3 Erosión hídrica potencial

En los resultados de la estimación del USLE se observan valores entre 0 y 87,328.67 para una mejor comprensión de los datos se realizó una reclasificación por rangos, de la siguiente manera: de 0 - 10 se considera una zona de bajo riesgo por erosión hídrica, de 10 - 50 se considera una zona con poco riesgo por erosión hídrica, de 50 - 100 para las zonas con riesgo medio a erosión hídrica, 100 - 500 donde el riesgo a erosión hídrica es alto y > 500 para las zonas con un riesgo muy alto por erosión hídrica.

Como se esperaba, las zonas con los valores más altos en el índice de USLE son aquellas donde se realizan actividades como agricultura y ganadería, cerca de los poblados más grandes al interior de la REBIMA. Esto es al norte y al suroeste del polígono que delimita a la reserva, además de pequeñas zonas aisladas donde se ha retirado la cobertura vegetal original para desarrollar estas actividades al interior de la selva (Figura 10).

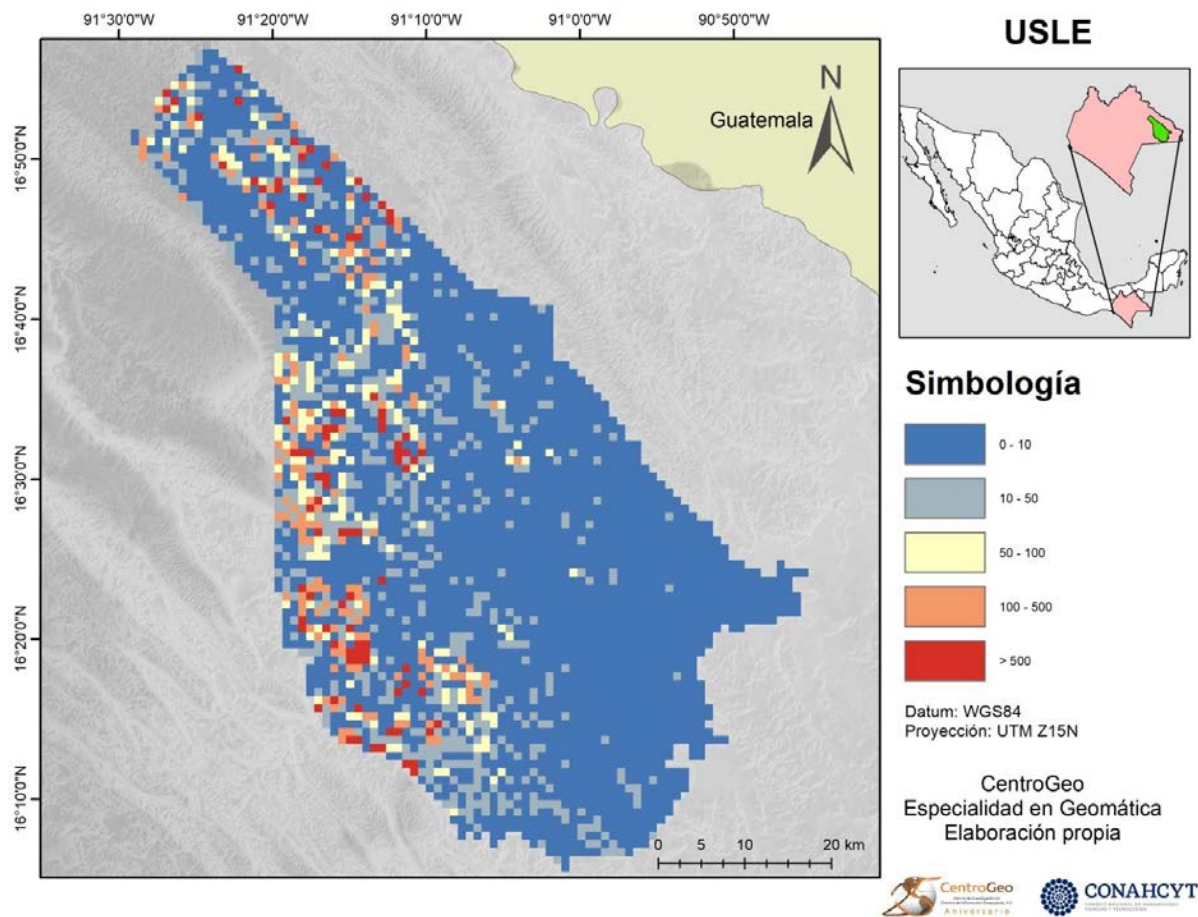


Figura 10. Erosión hídrica potencial en la reserva de la Biósfera Montes Azules para el año 2023.



14.4 Fragmentación del paisaje y conectividad ecológica

Se identificaron seis categorías de fragmentación (interior, perforado, borde, transicional, parche e indeterminado) a partir de la cobertura vegetal presente en la REBIMA. Las zonas de hábitat sin fragmentar (núcleo) corresponden al 79.35% de la superficie de la reserva, mientras los parches corresponden a áreas relativamente continuas de selva que están rodeadas por áreas con algún uso de suelo diferente, comprende el 3.75% de la superficie. Respecto a la clase de borde, que representa aquellas zonas ubicadas en la frontera o límite entre diferentes fragmentos de hábitats o tipos de uso de suelo, abarca el 6.22% de la superficie. Estas zonas marcan los límites entre el hábitat y las zonas fragmentadas, y en estas áreas hay una mayor susceptibilidad a perturbaciones, ya que son áreas que combinan condiciones de los hábitats adyacentes (León-Alfaro, 2019).

Al ser un área natural protegida, la zona núcleo es mayor que el resto, tal como se esperaba (Figura 11). Mientras que las zonas de transición y parches son más comunes en la región norte y oeste de la reserva que corresponde con las zonas intervenidas por actividades antropogénicas. Se observa que las zonas perforadas (rojo), aquellas que presentan huecos en el hábitat, a menudo debido a actividades humanas como la agricultura son mínimas (0.05%). Finalmente, las áreas en color gris no presentan ninguna conectividad con el ecosistema, son las zonas en donde se realizan actividades humanas, tales como asentamientos y zonas agrícolas (Williams et. al., 2006).

El análisis de la fragmentación permite identificar como el cambio en la cobertura vegetal genera más bordes al dividir grandes áreas de vegetación conservada en fragmentos más pequeños, intensificando la exposición a riesgos como la erosión y la degradación, lo que puede afectar negativamente la estabilidad y calidad del ecosistema (CONABIO, 2020).

En lo que se refiere al análisis de conectividad ecológica dentro de la REBIMA (Figura 12), se observa que la conectividad está directamente relacionada con los espacios dedicados a la protección y conservación, es en estas zonas donde se favorecen los procesos ecológicos (León Y., 2019), conocer el estado de conectividad resulta importante para establecer planes de acción para el cuidado, preservación y protección de la biodiversidad dentro de un área natural protegida.

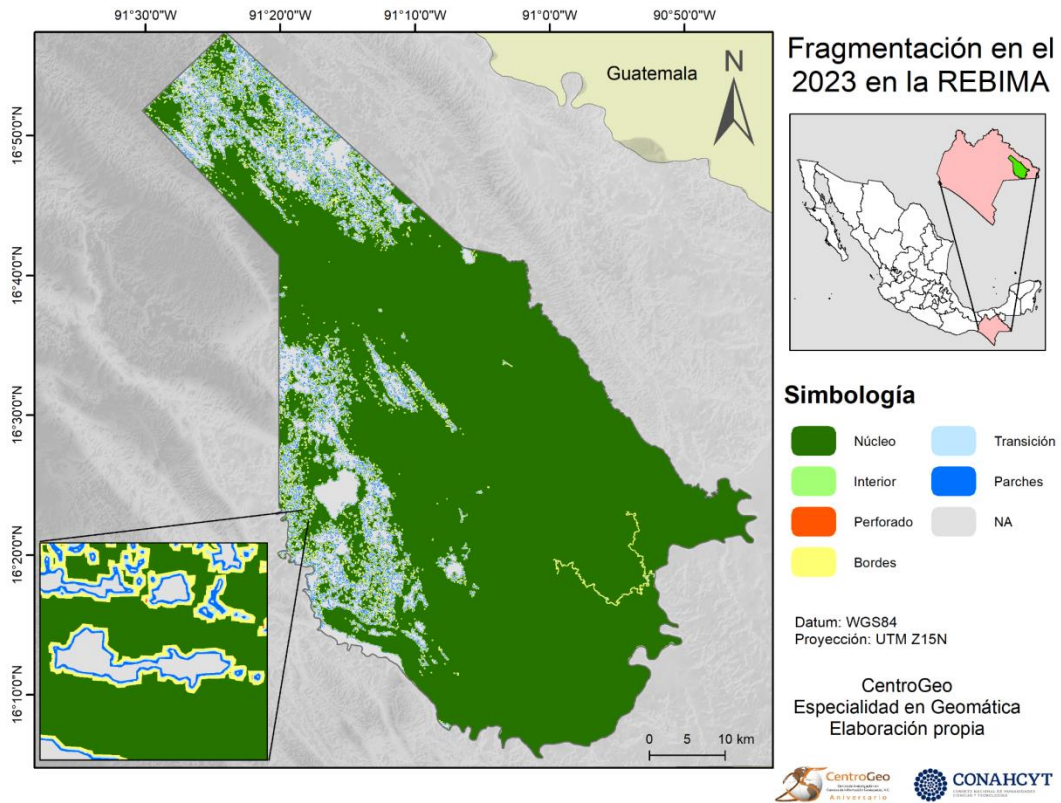


Figura 11. Fragmentación del paisaje en la reserva de la Biósfera Montes Azules para el año 2023.

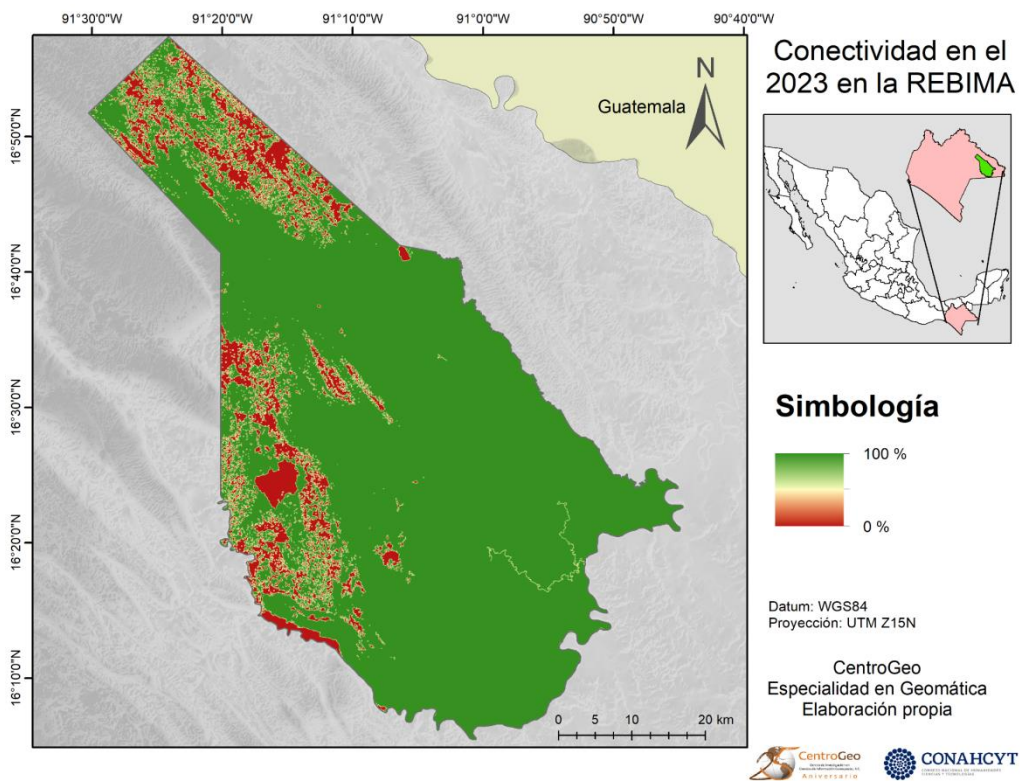


Figura 12. Conectividad ecológica en la reserva de la Biósfera Montes Azules para el año 2023.

14.5 Modelo de simulación

(Fragmentación y conectividad con R1 y R2 restauradas)

Este modelo permite conocer el impacto que tendrían las áreas R1 y R2 una vez restauradas en la fragmentación y conectividad al interior de la REBIMA (Figura 13 y 14). Los resultados de la fragmentación arrojan que la zona núcleo pasa de tener un 79.35% de superficie de la REBIMA a 85% restaurando las áreas R1 y R2. y los parches se reducen a 2.61%, los valores de cada clase de fragmentación se muestran en la Tabla 10. La conectividad también incrementa considerablemente en el modelo de simulación dejando espacios para flujos en el ecosistema.

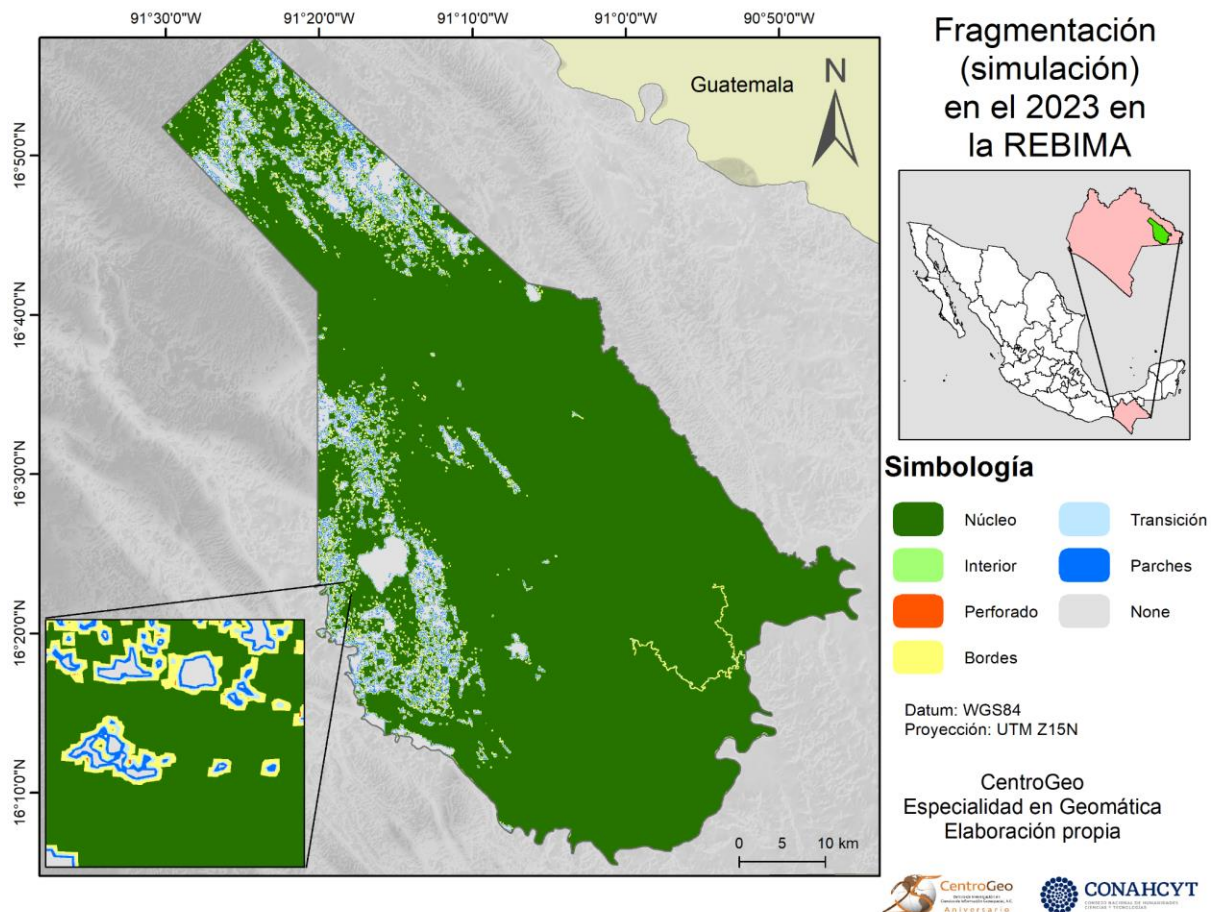


Figura 13. Fragmentación del paisaje simulado en la reserva de la Biósfera Montes Azules considerando las zonas R1 y R2.

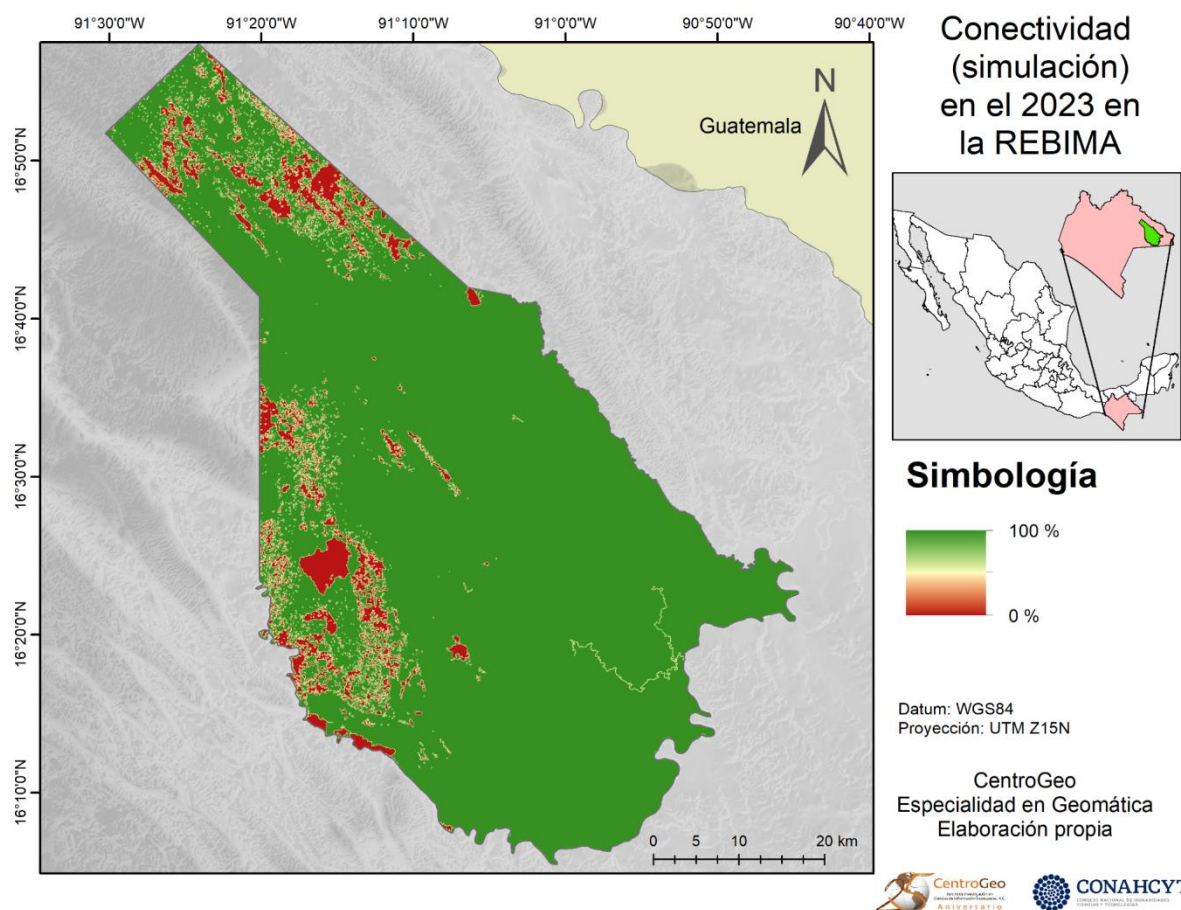
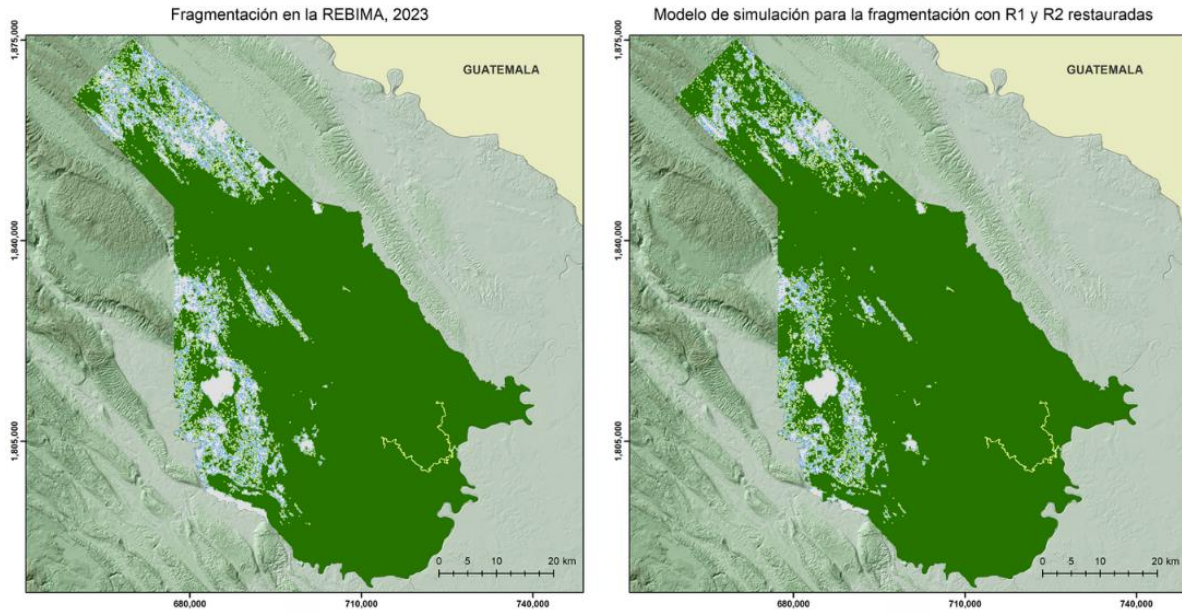


Figura 14. Conectividad ecológica simulada en la reserva de la Biósfera Montes Azules considerando las zonas R1 y R2.

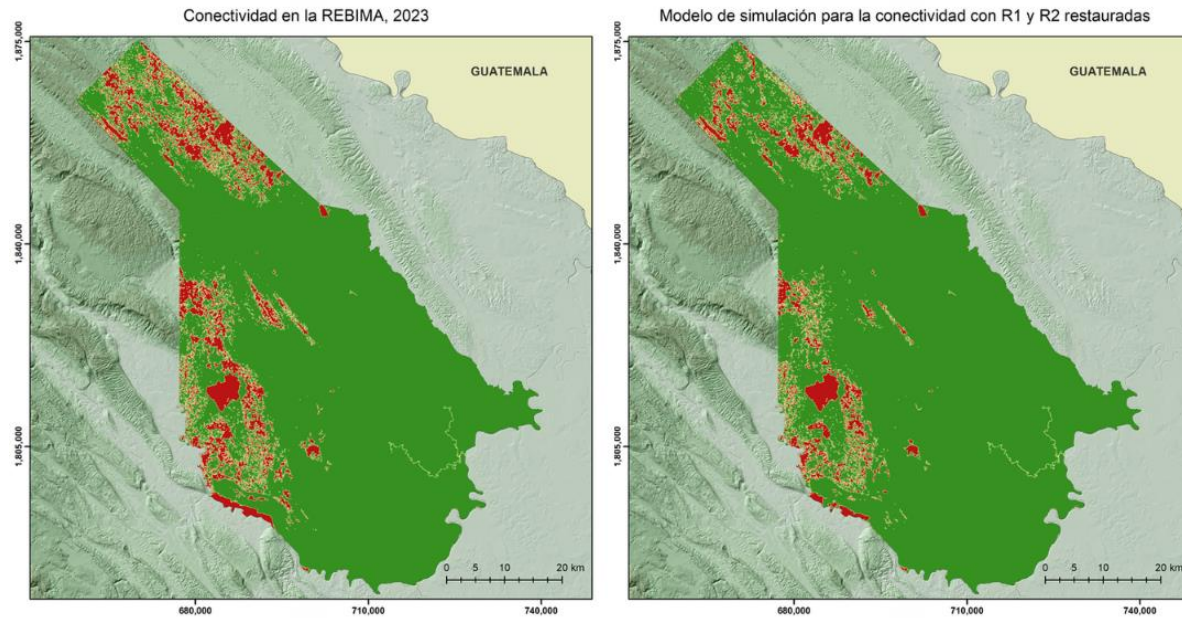
Tabla 10. Cambios entre la fragmentación real y fragmentación simulada

Ordena	Fragmentación real (ha)	Fragmentación simulada (ha)
Núcleo	259,951.53 (79.35 %)	278,400.40 (84.99 %)
Indeterminado	0.04 (0.00001 %)	0.04 (0.00001 %)
Perforado	153.63 (0.05 %)	131.50 (0.04 %)
Borde	20,378.30 (6.22 %)	17,048.82 (5.20 %)
Transición	8,037.77 (2.45 %)	6,283.23 (1.92 %)
Parche	12,284.20 (3.75 %)	8,552.44 (2.61 %)
NA	26,782.20 (8.17 %)	17,136.55 (5.23 %)
Total	327,587.63	327,587.63

Figura 14. Comparación de la fragmentación (a) y conectividad ecológica (b), tanto real como simulada en la reserva de la Biósfera Montes Azules considerando las zonas R1 y R2.



a) Comparación de la fragmentación en la REBIMA.



b) Comparación de la fragmentación en la REBIMA.



14.7 Áreas prioritarias para la restauración ecológica

La superficie identificada como zonas prioritarias para la restauración corresponde con una superficie de 19,514.56 ha, que representa cerca del 6% de la superficie total de la REBIMA (Tabla 11). Estas zonas se ubican principalmente en la parte norte y oeste de la reserva, que corresponde con zonas intervenidas (Figura 15). De esta superficie, 6,860.44 ha son zonas de máxima prioridad (R1), donde se realizan actividades agrícolas que ponen el riesgo la integridad del ecosistema debido a que en estas regiones el terreno presenta pendientes mayores a 50%, suelos muy superficiales con drenaje deficiente y baja fertilidad, por lo que tienen susceptibilidad a la erosión severa. Por lo que es necesario implementar medidas de restauración que permitan recuperar los suelos degradados para facilitar los procesos de sucesión ecológica y recuperar la cobertura vegetal (González, et al., 2016). De esta manera reincorporar estas áreas a la clase de *Protección - Conservación*.

En el caso de las clases R2 y R3, la situación es similar pero considera la reconversión a cultivos sostenibles como puede ser el café de sombra, ya que este cultivo en México se realiza en espacios arbolados como vegetación secundaria arbórea o algunas zonas en la periferia de la selva alta perennifolia, además de ser un cultivo permanente anual, es decir, permanece todo el año por lo que nunca deja suelo descubierto (Arguedas, 2022). Esto permite a los pobladores realizar actividades productivas de menor impacto, que al mismo tiempo favorecen la conservación de los suelos y la cobertura vegetal (Arguedas, 2022).

Respecto al aprovechamiento restringido la superficie corresponde a 19,111.24 ha (5.8%), AR1 es suelos con pendientes menores al 12%, tierras bien drenadas, suelo profundo y generalmente fértiles, por tanto presenta una susceptibilidad a la erosión ligera. Esto permite realizar actividades productivas más diversas debido a que el suelo tiene menor riesgo de degradación.

Mientras que AR2 y AR3 presentan condiciones de mayor pendiente respecto a AR1, lo que limita las actividades que se pueden realizar. En este sentido para evitar la erosión del suelo y disminuir el daño en el ecosistema se restringen las actividades: Aa, AaZU, AaAh, AaPC, AaApCafe, Ah, esto debido a que estas actividades tienen un mayor impacto en el ecosistema debido a la naturaleza de su dinámica, ya que se suele dejar el suelo desnudo en periodos de tiempo, poca cobertura vegetal respecto a la cobertura arbórea, además del uso de fertilizantes para los cultivos (Cruz, 2017), lo que provoca que estos espacios sean más susceptibles a los factores ambientales, particularmente a la erosión hídrica.

Respecto a la clase de Protección-Conservación, esta corresponde al 83.43% de la superficie de la reserva. Esta clase considera las áreas de vegetación natural, que al estar dentro de un área natural protegida deberían ser conservadas para preservar la biodiversidad en el ecosistema y los servicios ecosistémicos. Estas áreas son consideradas como sitios de referencia³ para llevar a cabo acciones de restauración en las zonas que se necesitan (SER, 2004).

Idealmente no debería haber actividades agropecuarias al interior de la reserva para tener el mayor porcentaje de biodiversidad conservada evitando cortes y limitaciones en el hábitat, sin embargo, hay algunas actividades humanas que sustentan a comunidades y a los asentamientos humanos cercanos a la ANP, por lo que en el modelo también se considera la reconversión de algunos sitios a actividades productivas alternativas.

Se observa que las zonas identificadas para restauración (R1, R2, R3) coinciden con zonas fragmentadas y con baja conectividad, por lo que centrar los esfuerzos de restauración mejoraría el estado de conectividad de la reserva y disminuiría la fragmentación al interior de la misma.

Tabla 11. Superficie (ha) para las clases definidas en el modelo para la identificación de áreas prioritarias para la restauración ecológica en la reserva de la Biósfera Montes Azules.

Clase	Área (ha)
R1	6,860.44
R2	7,049.11
R3	5,605.01
AR1	10,143.43
AR2	8,893.9
AR3	73.91
Protección/Conservación	283,153.58
Cuerpos de agua	4,164.56
Zonas urbanas	845.01
Regulación	806.34

³ Un ecosistema de referencia puede servir de modelo para la planificación de un proyecto de restauración ecológica y posteriormente, servir en la evaluación de ese proyecto. SER, 2004. Principios de Restauración Ecológica. Tucson, Arizona.

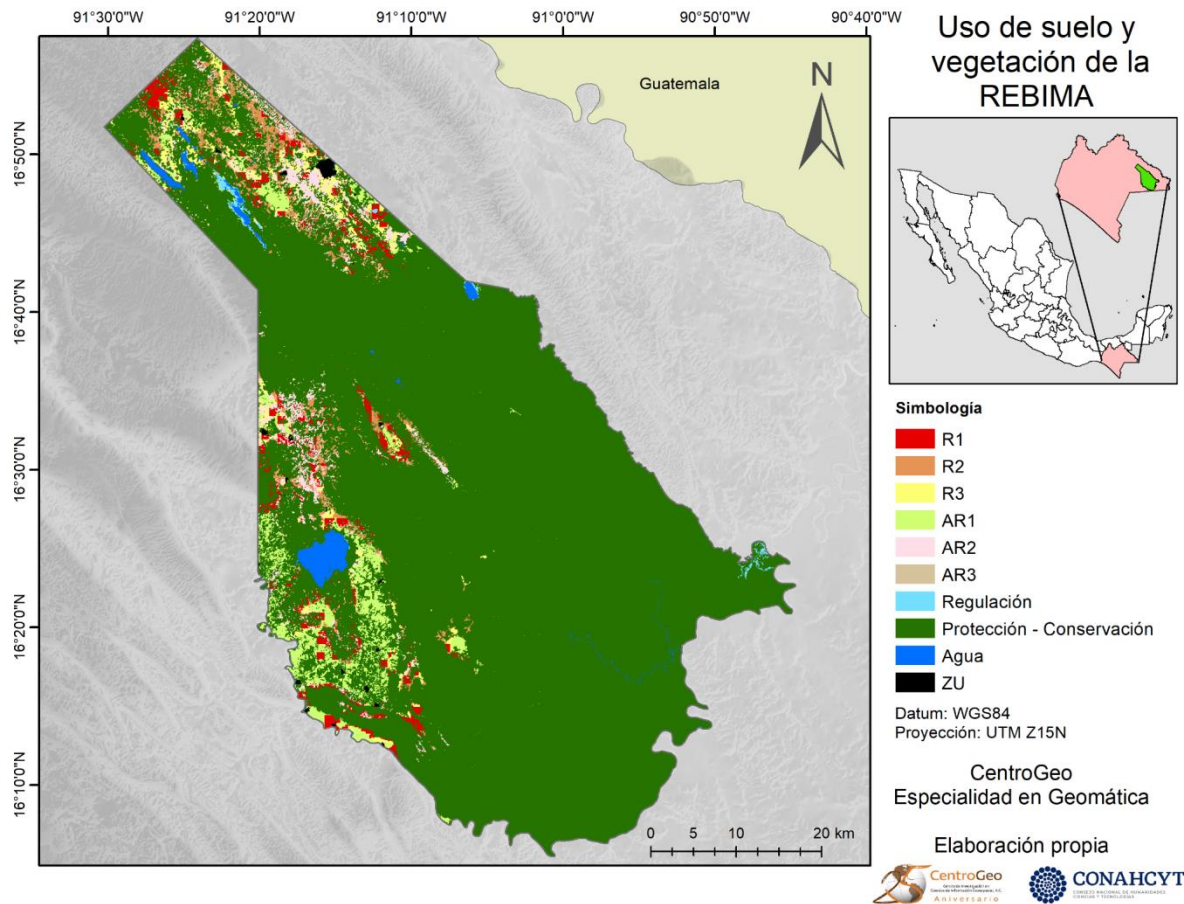


Figura 15. Áreas prioritarias para la restauración ecológica en la reserva de la Biósfera Montes Azules.

Clases definidas en el modelo para la identificación de áreas prioritarias para la restauración ecológica en la reserva de la Biósfera Montes Azules:

R1: Son las zonas de máxima prioridad para restaurar dadas sus condiciones evaluadas en las variables consideradas en el modelo.

R2: En estas zonas es necesario realizar prácticas de restauración, también se permite una reconversión productiva a la agricultura de café.

R3: Son las zonas como tercera prioridad a restaurar dónde también se permite una reconversión a café, siempre y cuando se haya restaurado y cambiado las prácticas y manejo en estas zonas.

AR1: Zonas de Aprovechamiento Restringido 1, son aquellas en las que las variables evaluadas, entre las que destaca una pendiente muy poco inclinada y por lo tanto, permiten actividades como agricultura, café, pastizales y vegetación secundaria (Aa, AaZu, AaAh, AaPC, AaApCafe, PC, Ah, Ap, Cafe y VSa).

AR2: Las clases en las zonas de aprovechamiento restringido 2 se reducen drásticamente a Agricultura permanente, vegetación secundaria arbustiva y pastizales (Ap, Cafe, VSa y PC).

AR3: En estas zonas solo se admite Ap y Cafe, ya que estos son cultivos permanentes durante todo el año.

Protección - Conservación: Zonas que no se tocan y no se permite ninguna actividad, es necesario establecer políticas para proteger, preservar y conservar estas zonas.

Regulación: Zonas de regulación hídrica al interior de la REBIMA.

Agua: Cuerpos de agua dentro de la REBIMA.

ZU: Zonas urbanas bien establecidas dentro del polígono de la REBIMA.

En un trabajo previo realizado por CONABIO (2021) para identificar los sitios prioritarios para la restauración en la parte continental de México, se tomaron en cuenta factores como la importancia biológica (cobertura vegetal primaria y secundaria) y la factibilidad de restauración, considerando aspectos como la erosión, el uso del suelo, la fragmentación, las zonas altimétricas y la evaporación potencial. En comparación con el presente estudio, se han considerado las siguientes variables: prioridades para la conservación, vegetación primaria, vegetación secundaria, erosión del suelo y uso del suelo. La evapotranspiración potencial y las zonas altimétricas se abordaron indirectamente a través del factor R del USLE y procesos realizados con el DEM (15 m), respectivamente. La única variable que no se incorporó fue la fragmentación del hábitat, que solo se utilizó para el diagnóstico de conservación de la reserva.

Incluir la fragmentación del hábitat en la metodología del modelo actual sería una mejora significativa, ya que la fragmentación puede afectar profundamente la viabilidad y conectividad de los ecosistemas. Además, realizar visitas de campo para validar los resultados del modelo permitirá ajustar y corroborar las conclusiones obtenidas. También es crucial integrar variables sociales en el modelo para reflejar de manera más precisa las realidades y necesidades locales, evitando así un sesgo que se enfoque exclusivamente en la preservación de la biodiversidad sin considerar aspectos humanos y socioeconómicos que también influyen en la conservación.

Implementar este modelo metodológico permite identificar de manera remota las áreas que requieren restauración en la Reserva de la Biósfera Montes Azules, lo que puede ayudar a simplificar los esfuerzos de vigilancia en la zona, reduciendo la necesidad de presencia física constante en campo y permitiendo un uso más eficiente del tiempo y los recursos económicos disponibles. Se centra en las áreas más degradadas y donde los usos actuales no son los adecuados para el tipo de suelo que allí se encuentra.

14.8 Visualizador web: Áreas prioritarias para la restauración ecológica

Adicionalmente se realizó un visualizador web en el que se puede interactuar con la capa de áreas prioritarias para la restauración ecológica, resultante del modelo, esto permite abrir el trabajo más allá de las aulas y sobre todo cumple con la misión de socializar los resultados obtenidos en este trabajo.

Este visualizador se concibe como una herramienta para optimizar las acciones de restauración en la Reserva de la Biósfera Montes Azules. Su función principal es permitir a los usuarios identificar las áreas prioritarias que requieren intervención, basándose en datos de relieve, variables edáficas y erosión hídrica potencial. El visualizador facilita la identificación de estas áreas, no sólo para asignar de forma más eficiente los recursos, sino también para focalizar los esfuerzos de restauración en estas zonas.

La herramienta, al estar disponible para investigadores, estudiantes y público en general facilita que todos los involucrados en la conservación de esta reserva puedan colaborar más fácilmente.

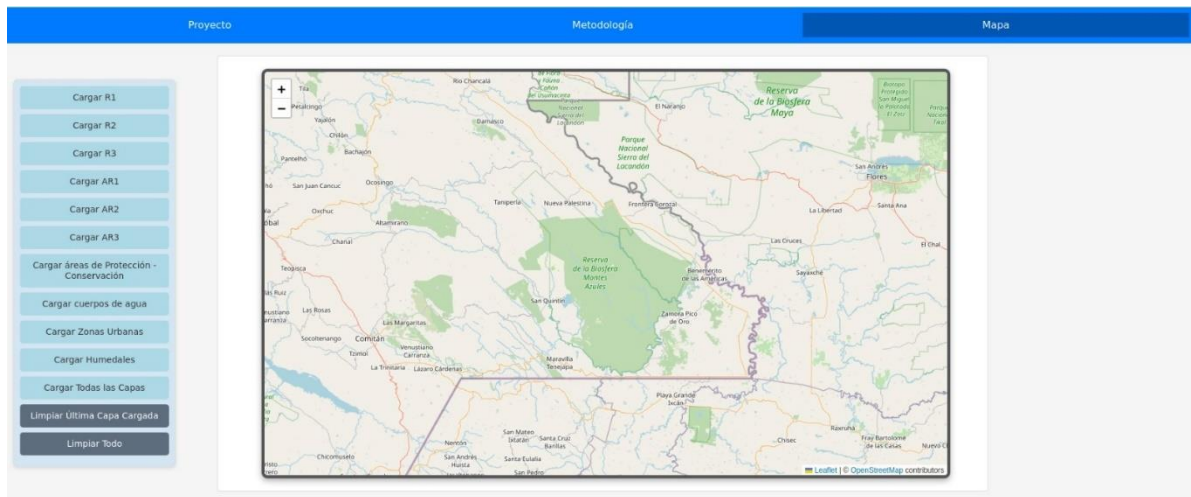


Figura 16. Visualizador web

15. Conclusiones

La REBIMA presenta paisaje con matriz preponderantemente de selva con parches de acahual, pastizal y cultivos los cuales se encuentran agregados y creciendo de forma uniforme y continúa en la zona norte y oeste del polígono. El paisaje de la REBIMA presenta una heterogeneidad espacial, compuesta por un mosaico de diferentes fragmentos entre los que destacan la selva alta perennifolia, vegetación secundaria y uso agrícola. Entre 2018 y 2023, experimentó una reducción significativa en su superficie forestal; la TTH disminuyó en 0.078% respecto al último informe, no obstante, representa una pérdida de más de 62 hectáreas de hábitat natural por año. La tasa de transformación del hábitat durante este periodo fue de 0.022%, con una pérdida total de 314.14 hectáreas de cobertura forestal.

La propuesta metodológica sirve como una primera aproximación para identificar zonas prioritarias para la restauración en la Reserva de la Biósfera Montes Azules, permitiendo realizar una identificación más detallada a nivel local, lo que mejora la identificación puntual de estas áreas. No obstante, aún se necesita mejorar el modelo considerando diversificar las variables que lo constituyen, una de las más importantes son las sociales, además de incluir también al análisis de fragmentación dentro del flujo metodológico del modelo. El porcentaje de conectividad es relativamente alto al casi ser del 79%, sin embargo, tan solo restaurando R1 y R2 se llegaría casi al 85% como lo mostró el modelo de simulación.

16. Literatura citada

1. Abburu, S., y Golla, S. B. (2015). Satellite image classification methods and techniques: A review. *International Journal of Computer Applications*, 119: 20–25. DOI: 10.5120/21088-3779.
2. Arguedas. (2022). Propuesta Metodológica para identificar sitios prioritarios para restaurar ecosistemas con fines de protección del recurso hídrico; estudio de caso de la microcuenca del río cacao, atenas, alajuela. Universidad de Costa Rica Sistema de estudio de Posgrado. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/373923783_Propuesta_metodologica_para_identificar_sitios_prioritarios_para_restaurar_ecosistemas_con_fines_de_proteccion_del_recurso_hidrico_estudio_de_caso_de_la_microcuenca_del_Rio_Cacao_Atenas_Alajuela
3. Barbosa.(1997). Álgebra de mapas y sus aplicaciones en Geoprocesamiento de Sensores Remotos. Muestrado en Sensoriamento Remoto. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Disponible en: <https://www.scrip.org/reference/referencespapers?referenceid=1303182>
4. Benegas, L. y J. León. (2009). Criterios para priorizar áreas de intervención en cuencas hidrográficas: la experiencia del programa Focuencias II. Serie Técnica. Informe Técnico No. 378. Turrialba, Costa Rica: CATIE. Disponible en: https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/1036/Criterios_para_priorizar_areas.pdf?sequence=1&isAllowed=y
5. Binnqüist, C. G. S., Chávez, C. M. M., y Colín, C. G. (2017). Evaluación del programa de conservación y manejo del Parque Nacional de Huatulco. *Política y Cultura*, 47: 167-199.
6. Blumentrath, S. (2011). Site prioritization models and their suitability for assessing and designing policy mixes for biodiversity conservation and ecosystem services provision: A comparison of software packages. Technical briefs, Issue No. 4. Disponible en: <https://www.nina.no/archive/nina/PppBasePdf/Rapporter%20til%20oppdragsgiver/2013/Blumentrath%20Site%20prioritisation%20POLICYMIX%20technical%20brief%2004%202013.pdf>
7. Calva-Soto, K. y N. Pavón. (2018). La restauración ecológica en México: una disciplina emergente en un país deteriorado. *Madera y Bosques* 24(1): e2411135. DOI: 10.21829/myb.2018.2411135
8. Carabias Lillo, J., Enrique Provencio, Javier de la Maza Elvira, David Gutiérrez Carbonell, Mario Gómez Cruz, y Alejandro López Portillo U. (2000). Programa de Manejo Reserva de la Biosfera Montes Azules (1a edición). Instituto Nacional de Ecología. https://simec.conanp.gob.mx/pdf_libro_pm/172_libro_pm.pdf
9. CAMADDS. (2012). Plan Microrregional de Maravilla Tenejapa. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Convenio de Colaboración Secretaría de Agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación (Sagarpa), s.l.: s.n.



10. Cervantes Salas, M. P. (2002). Situación agraria, socioeconómica y demográfica en la Reserva de la Biosfera Montes Azules, Chiapas: una aproximación a la relación población recursos. Colegio de México, A.C.
11. Chávez G., H. (2014). Áreas prioritarias mediante escenarios de deforestación y servicios ambientales en la Sierra Norte de Puebla. Tesis de maestría no publicada, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México. Disponible en: http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/bitstream/handle/10521/2248/Chavez_Gonzalez_H_MC_Forestal_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y
12. Chávez, H., González, M. y Hernández, P. (2015). Metodologías para identificar áreas prioritarias para conservación de ecosistemas naturales. Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 6(27), 8-23. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-11322015000100002&script=sci_arttext
13. CONABIO. (2020). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Fragmentación. Disponible en: <https://www.biodiversidad.gob.mx/region/fragmentacion>
14. CONABIO. (2024). Enciclovida. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Consultado el: 18/03/2024. Disponible en: <https://enciclovida.mx/>
15. CONAFOR. (2016). Iniciativa de Reducción de Emisiones (IRE) Programa de Inversión Región Lacandona, Chiapas. CONAFOR, Secretaría de Medio Ambiente e Historia natural, CONABIO, Natura Mexica. Disponible en: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/35/0IRE%20Programa%20de%20Inversio%CC%81n%20Selva%20Lacandona.pdf>
16. CONANP. (2010). Zonificación de la Reserva de la Biosfera Montes Azules. Escala 1: 320 000. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Depto. de Sistema Regional de Información Geográfica, Región Frontera Sur. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. Extraído del proyecto DQ014: 'Elaboración de Programas de Conservación y Manejo para la Región Frontera Sur'. El proyecto fue financiado por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). México. Disponible en: http://www.conabio.gob.mx/institucion/proyectos/resultados/DQ014_Cartografia.pdf
17. CONANP. (2010). Identificación de cambios en el uso del suelo y vegetación, y cálculo de la tasa de transformación del hábitat en el periodo 2000-2010. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, Región Planicie Costera y Golfo de México. Disponible en: https://simec.conanp.gob.mx/TTH/Usumacinta/Usumacinta_TTH_2000_2010.pdf
18. CONANP (2023). Áreas naturales protegidas. Gobierno de México. Consultado el 17 de marzo, 2024. Disponible de: <https://www.gob.mx/conanp/documentos/areas-naturales-protegidas-278226>
19. CONANP. (2024a). Información Espacial de las Áreas Naturales Protegidas. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Consultado en: http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/info_shape.htm
20. CONANP. (2024b). Fichas SIMEC. Reserva de la Biosfera Montes Azules. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, Sistema de Información, Monitoreo y Evaluación para la Conservación. Consultado en: <https://simec.conanp.gob.mx/ficha.php?anp=172&req=8>



21. CONANP, (2024c). Áreas Naturales Protegidas Federales de México, febrero 2024, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Ciudad de México. Disponible en: <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/anpfb2024gw.html>
22. CONANP, (2024d). Programas de Manejo de las Áreas Naturales Protegidas de México, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Ciudad de México. Disponible en: <https://www.gob.mx/conanp/acciones-y-programas/programas-de-manejo>
23. Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V., y Böhner, J. (2015): System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4, Geosci. Model Dev., 8, 1991-2007. DOI: 10.5194/gmd-8-1991-2015.
24. Cruz, G. (2017). Áreas prioritarias de conservación de la cuenca del río Usumacinta, bajo un enfoque multicriterio. El Colegio de la Frontera Sur. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112018000300004
25. Daily, Gretchen and Alexander, S. (1997). Ecosystem services: Valuing nature's support for human society. Ecological Economics, 21(1), 1-15. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/200032845_Ecosystem_Services_Benefits_Supplied_to_Human_Societies_by_Natural_Ecosystems
26. Da Silva, X. J., Ribeiro, M. (2001). Índices de geodiversidade: aplicações de SGI em estudos de biodiversidade. En: Garay, I., Dias, B.F.S. (Orgs.). Conservação da biodiversidade em ecossistemas tropicais: avanços conceituais e revisão novas metodologias de avaliação e monitoramento. Rio de Janeiro, Vozes, 299–316.
27. De Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2023. Montes Azules, una de las zonas con mayor diversidad genética de M. . . gob.mx. Consultado el 20 de marzo, 2024 de <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/montes-azules-una-de-las-zonas-con-mayor-diversidad-genetica-de-mexico-y-del-continente-americano>
28. De Medio Ambiente y Recursos Naturales, S. 2019. Reserva de la Biósfera Montes Azules. gob.mx. Consultado el 26 de marzo, 2024 de <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/reserva-de-la-biosfera-montes-azules-Selva-lancandona-chiapas?idiom=es>
29. Domínguez, A. (2019, 19 septiembre). “Montes Azules será historia”, alertan habitantes ante problemáticas ambientales y efectos del cambio climático. Chiapasparalelo. Consultado el 31 de marzo, 2024 de <https://www.chiapasparalelo.com/noticias/chiapas/2019/09/montes-azules-sera-historia-alertan-habitantes-ante-problematicas-ambientales-y-efectos-del-cambio-climatico/>
30. FMCN – CONANP (2009). Reserva de la Biosfera Montes Azules. Estimación y Actualización de la Tasa de Transformación del Hábitat de las Áreas Naturales Protegidas SINAP I y SINAP II del FANP. CONTRATO No. 017-08-002. Disponible en: <https://simec.conanp.gob.mx/ficha.php?anp=172®=8>
31. Gann, G. D., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, C.R., Jonson, J., Hallett, J. G., Eisenberg, C., Guariguata, M. R., Liu, J., Hua, F., Echeverría, C., Gonzales, E., Shaw, N., Decler, K., Dixon, K. W. (2019). International principles and standards for the practice of ecological restoration. Second edition. Restoration Ecology S1-S46.
32. Gao, J. (2009). Digital analysis of remotely sensed imagery. McGrawHill. Nueva Zelanda.



33. García Jiménez, J. (2016). Selva Lacandona, marginación y alternativas de desarrollo. *El Economista*, Consultado el 18 de marzo de 2024.
34. Gómez-Pompa, A. y Dirzo, R. (1995). Consideraciones sobre la historia de las áreas naturales protegidas y la conservación de la naturaleza en México. In: INE – SEMARNAT (Eds.), *Reservas de la biosfera y otras áreas naturales protegidas de México*. Instituto Nacional de Ecología (INE), México.
35. González-García, F. (1993). Avifauna de la Reserva de la Biosfera "Montes Azules", Selva Lacandona, Chiapas, México. *Acta Zoológica Mexicana* 55: 1-86.
36. Grigio, A. M., Castro, A. F. De, Souto, M. V. S., Amaro, V. E., Vital, H., Diodato, M. A. (2004). Use of remote sensing and geographical information system in the determination of the natural and environmental vulnerability of the Guamaré municipal district – Rio Grande do Norte – northeast of Brazil. *J. Coastal Res.*, SI 39, pg – pg. Itajaí, SC – Brazil, ISSN 07490208.
37. Groombridge, B., y Jenkins, M. (2005). *Biodiversity and tourism: Impacts and management*. IUCN.
38. INE. (2000). Programa de Manejo Reserva de la Biosfera Montes Azules, Secretaría de Recursos Naturales y Pesca. Instituto Nacional de Ecología. Consultado el 18 de marzo de 2024. Disponible en: https://simec.conanp.gob.mx/pdf_libro_pm/172_libro_pm.pdf
39. INEGI. (2022). Mapa Digital de México en línea. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Censo Agropecuario. Consultado el 05 de junio de 2024. Disponible en: <https://gaia.inegi.org.mx/mdm6/?v=bGF00JlzLjMyMDA4LGxvbjotMTAxLjUwMDAwLHo6MSxsOmNhMjAyMg==>
40. INECC. (2020). Catálogo y revisión de metodologías de análisis económico para la adaptación al cambio climático. Documento de trabajo. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, México.
41. IRE. (2016). Programa de Inversión, Región Lacandona, Chiapas, CONAFOR. Iniciativa de Reducción de Emisiones. Consultado el 18 de marzo de 2024. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/459592/06_Iniciativa_de_Reducción_de_Emisiones.pdf
42. Instituto Nacional de los Pueblos Indígenas. (2015). Chiapas Impulsa CDI el desarrollo sustentable de la Reserva de la Biosfera Montes Azules. Gobierno de México. Consultado el 31 de marzo, 2024 de: <https://www.gob.mx/inpi/prensa/chiapas-impulsa-cdi-el-desarrollo-sustentable-de-la-reserva-de-la-biosfera-montes-azules>
43. León-Alfaro (2019). Análisis de fragmentación y conectividad del bosque en la subcuenca del río Tapezco, Costa Rica: Conectando el bosque para proteger el agua. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 28(1), 102–120. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v28n1.67969>
44. Leopold, L. B. (1964). *Hydrology for engineers and planners*. McGraw-Hill.
45. López, L. D. y Saavedra, G. A. (2023). Detailed Land Cover and Land Use Mapping, New Approach: Case Study, Usumacinta Watershed, Mexico. *European Journal of Applied Sciences*, 11:1.



46. Lopez L. D. y Saavedra G. A.. (2016b). Proyecto Chiapas: Estudios de preinversión para la restauración ambiental de la cuenca Grijalva-Usumacinta para reducir los impactos de eventos climáticos extremos Zonificación-Ordenación con énfasis en sistemas forestales y Agroforestales. CentroGeo, México, 2015-2016
47. Lopez L. D. y Saavedra G.A. (2016a). Proyecto CONABO-Chiapas: Análisis de los factores de transformación territorial en los corredores biológicos de Chiapas Norte. Diseño, desarrollo y aplicación de un modelo geoespacial para la zonificación del uso potencial de las tierras. Cartografía de la vegetación y uso del suelo mediante procesamiento de imágenes SPOT. CentroGeo, México, 2015-2016
48. Medellín, R. (1996). Reserva de la Biósfera Montes Azules. Gaceta Ecológica (México: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). Consultado el 12 de marzo de 2024.
49. Méndez-Toribio M, Martínez-Garza C, Cecon E y Guariguata MR. (2018). La restauración de ecosistemas terrestres en México: Estado actual, necesidades y oportunidades. Documentos Ocasionales 185. Bogor, Indonesia: CIFOR.
50. Montes Azules, gran diversidad genética de México y del continente americano. (2024). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales | Gobierno | Gob.mx. (s. f.). Disponible en: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/montes-azules-gran-diversidad-genetica-de-mexico-y-del-continente-americano#:~:text=Montes%20Azules%20abarca%20331%20mil,vasculares%20y%20hasta%207%2C000%20%C3%A1rboles>.
51. National Geographic Society. (2021). Watershed. Consultado el 16 de abril de 2024. <https://www.nationalgeographic.org/society/>
52. Parkswatch, (2004). Perfil de Parque – México, Reserva de la Biosfera Montes Azules. pp. 1-27. Consultado el 12 de marzo de 2024.
53. Pérez, H. M. J. (2015). Fragmentación del paisaje y coberturas de la tierra en el norte de la Selva Lacandona, Chiapas. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados, Estado de México, México.
54. UNEP (s. f.). - UN Environment programme. United Nations Environment Programme. UNEP - UN Environment Programme. Disponible en: <https://www.unep.org/es>
55. Mendoza, E. y R. Dirzo. (1999). Deforestation in Lacandonia (southeast Mexico): evidence for the declaration of the northernmost tropical hot-spot. *Biodiversity and Conservation* 8: 1621-1641.
56. Peel, M. C. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 89(4), 59-72.
57. Pequeño-Ledezma, M; Alanís-Rodríguez, E; Jiménez-Pérez, J; Aguirre-Calderón, O; González-Tagle, M. y Molina-Guerra, V. (2016). Criterios a considerar para desarrollar proyectos de restauración ecológica. *Revista Iberoamericana de Ciencias*.
58. Gloria Carreño. (2012). Elaboración de Programas de Conservación y Manejo para la Región Frontera Sur ANPs de carácter federal. Ecobiosfera El Triunfo S. C. Informe final SNIB-CONABIO, proyecto No. DQ014. México, D.F. Disponible en: <http://www.conabio.gob.mx/institucion/proyectos/resultados/InfDQ014.pdf>
59. Relaciones Exteriores. (s. f.). Montes Azules, la fantasía de la selva hecha realidad. Gobierno de México. Disponible en:



<https://embamex.sre.gob.mx/republicadominicana/index.php/comunicados/395-montes-azules-la-fantasia-de-la-selva-hecha-realidad>

60. Ramirez-Ortiz F., Hincapié-Gómez E., Sadeghian-Khalajabadi S., 2009. Erodabilidad de los Suelos de la zona central cafetera del departamento de caldas. *Cenicafé* 60 (1) 58-71. Disponible en: [https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/157/1/arc060\(01\)58-71.pdf](https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/157/1/arc060(01)58-71.pdf)
61. Renard Kenneth G., 1997. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service. Consultado el 16 de abril del 2024. Disponible en: [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=cQEUAAYAAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=\(Renard+et+al.+1997\)&ots=HDKirgcvO9&sig=gyTqyMjQApv9oJarX6vsbUElvrE#v=onepage&q=\(Renard%20et%20al.%201997\)&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=cQEUAAYAAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=(Renard+et+al.+1997)&ots=HDKirgcvO9&sig=gyTqyMjQApv9oJarX6vsbUElvrE#v=onepage&q=(Renard%20et%20al.%201997)&f=false).
62. Rwanga, S. S. y Ndambuki, J. M. (2017). Accuracy assessment of land use/land cover classification using remote sensing and GIS. *International Journal of Geosciences*. 8:611.
63. Strahler, A. N., y Strahler, A. H. (2014). *Elements of physical geography*. John Wiley & Sons.
64. SER (2020). *Primer on Ecological Restoration*. Society for Ecological Restoration. Consultado el 16 de abril de 2024. Disponible en: <https://www.ser.org/>
65. SER. (2004). *International, Grupo de trabajo sobre ciencia y políticas. Principios de SER International sobre la restauración ecológica*. Society for Ecological Restoration. Disponible en: www.ser.org
66. SEMARNAT. (2019). *Reserva de la Biósfera Montes Azules*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Consultado: 13/03/2024. Disponible en: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/reserva-de-la-biosfera-montes-azules-selva-lacandona-chiapas?idiom=es#:~:text=Aunque%20ocupa%20solamente%20el%200.16,vasculares%20y%20hasta%207%2C000%20%C3%A1rboles>.
67. Saavedra, G. A., López, L. D. M. y Castellanos, F. L. A. (2015). Descripción del medio físico de la cuenca media del río Usumacinta en México. En: Carabias, J., De la Maza, J. y Cadena, R. 2015. *Conservación y desarrollo sustentable en la Selva Lacandona. 25 años de actividades y experiencias*, México, *Natura y Ecosistemas Mexicanos*, Pp. 19-33.
68. Mora, G. R. (s. f.). *Conflicto en el espacio geográfico: Caso de la Reserva de la Biosfera Montes Azules, Chiapas*. Universidad Nacional Autónoma de México Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia. Disponible en: https://www.academia.edu/40351815/La_Reserva_de_la_Biosfera_Montes_Azules_Chiapas_M%C3%A9xico_como_escenario_de_conflictos_ambientales
69. UNESCO. (2018). *Montes Azules Biosphere Reserve, Mexico*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. Consultado: 13/03/2024. Disponible en: <https://en.unesco.org/biosphere/lac/montes-azules>
70. Vázquez-Márquez, Gustavo Emmanuel; Ramírez-García, Adán Guillermo; Palacios-Rangel, María Isabel; Monterroso-Rivas, Alejandro Ismael. 2020. Conceptualización, manejo y monitoreo de áreas naturales protegidas en México: Caso Reserva Estatal Sierra Monte Negro, Morelos *Investigación y Ciencia*, vol. 28, núm. 79, pp. 24-35 Universidad Autónoma de Aguascalientes México, Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/674/67462875003/67462875003.pdf>



71. Whittaker, R. J., y Willis, K. J. (2002). Ecological diversity: Patterns, causes and conservation. Chapman and Hall.
72. Wischmeier, W. H., y Smith, D. D. (1978). Predicting Rainfall Erosion Losses. A Guide to Conservation Planning. United States Department of Agriculture. Supersedes Agriculture Handbook No. 282. Consultado el día 15 de abril en: <https://www.researchgate.net/profile/Heriansyah-Putra-2/post/Which-formula-is-correct/attachment/59d64d4e79197b80779a6e2c/AS%3A487650378424321%401493276318482/download/USLE.pdf>
73. Tricart E. (1977). Revista Brasileira de Geomorfologia. 8(2).
74. World Energy Council. (2019). World Hydropower Review 2019. https://www.worldenergy.org/assets/images/imported/2013/10/WER_2013_5_Hydro.pdf
75. Williams, Nicholas S. G., John W. Morgan, Michael A. McCarthy, y Mark J. McDonnell. 2006. "Local Extinction of Grassland Plants: The Landscape Matrix is More Important than Patch Attributes." *Ecology* 87 (12): 3000-3006. doi: 10.1890/0012-9658(2006)87[3000:leogpt]2.0.co;2.