

Estimación de la evolución dinámica espacio-temporal de tierras potenciales de reforestación y su capacidad de fijación de carbono

Estimation of spatial-temporal dynamic evolution of potential reforestation lands and their carbon sequestration capacity

Leonela Sebastiana Nugra Ruilova¹, Angely Giuliana Vásquez Santander¹,

Jaime Enrique Maza Maza²

¹Carrera de Ingeniería Ambiental, Universidad Técnica de Machala, Machala, Ecuador, 070205;

²Grupo de Investigación para la Conservación, Carrera de Ingeniería Ambiental, Universidad Técnica de Machala, Machala, Ecuador, 070205;

avasquez8@utmachala.edu.ec; jemaza@utmachala.edu.ec

*Correspondencia: lnugra1@utmachala.edu.ec

Citación: Nugra, L.; Vásquez, A. & Maza, J., (2026). Estimación de la evolución dinámica espacio-temporal de tierras potenciales de reforestación y su capacidad de fijación de carbono. *Novasinerгия*. 9(1). 59-78.

<https://doi.org/10.37135/ns.01.17.04>

Recibido: 18 marzo 2025

Aceptado: 15 julio 2025

Publicado: 08 enero 2026

Novasinerгия
ISSN: 2631-2654

Resumen: La reforestación se consolida como una estrategia clave de mitigación frente al cambio climático, debido a la capacidad de los ecosistemas forestales para actuar como sumideros de carbono al almacenar este elemento en su biomasa aérea. El objetivo del presente estudio fue estimar la evolución espacio-temporal del potencial de reforestación y la capacidad de captura de carbono en la provincia de El Oro, mediante la identificación de zonas óptimas según su calidad climática, factores biofísicos condicionantes y la proyección de reservas de carbono. La metodología integró datos climáticos de temperatura, precipitación y un análisis de tendencias, junto con variables como la sucesión y resiliencia de la vegetación, pendiente y distancia a vías. Estas variables fueron ponderadas mediante el enfoque jerárquico ponderado (WHA), utilizando el modelo Random Forest (RF) para asignar pesos relativos, y posteriormente se modeló la biomasa y el carbono capturado. Los resultados muestran una productividad climática de 1780 (g/m². a-1) en cantones de mayor altitud como Piñas, Portovelo, Zaruma, Chilla, Atahualpa y Balsas, identificando un total de 16529.85 ha con alto potencial de reforestación. Se estima que para el año 2090 la biomasa acumulada alcanzará 848458.79 Mg, equivalente a 424229 Mg C. En conclusión, se evidencia un crecimiento sostenido en la acumulación de biomasa y carbono hasta 2090, con mayor fijación en las fases intermedias del ciclo forestal y estabilidad en la densidad por hectárea. Los resultados resaltan la importancia de promover políticas de reforestación que potencien la captura de carbono y fortalezcan las estrategias de adaptación climática.

Palabras clave: Análisis espacial, Cambio climático, Captura de carbono, Reforestación, Zonas óptimas.

Abstract: Reforestation is established as a key strategy for mitigating climate change, due to the capacity of forest ecosystems to act as carbon sinks by storing this element in their above-ground biomass. This study aimed to estimate the spatial-temporal evolution of reforestation potential and carbon capture capacity in the province of El Oro by identifying optimal areas based on their climatic quality, biophysical conditioning factors, and projected carbon reserves. The methodology integrated climate data on temperature, precipitation, trend analysis, and variables such as vegetation succession and resilience, slope, and distance to roads. These variables were weighted using the weighted hierarchy approach (WHA) method, using the Random Forest (RF) model to assign relative weights, and subsequently modeled the biomass and carbon captured. The results show a climate productivity of 1780 (g/m². a-1) in higher altitude cantons such as Piñas, Portovelo, Zaruma, Chilla, Atahualpa, and Balsas, identifying a total of 16529.85 ha with high reforestation potential. By 2090, the accumulated biomass is estimated to reach 848458.79 Mg, equivalent to 424229 Mg C. In conclusion, there is evidence of sustained growth in biomass and carbon accumulation until 2090, with greater fixation in the intermediate phases of the forest cycle and stability in density per hectare. The results highlight the importance of promoting reforestation policies that enhance carbon capture and strengthen climate adaptation strategies.

Keywords: Spatial analysis, Carbon capture, Climate change, Reforestation, Optimal zones.



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

1. Introducción

El cambio climático, impulsado principalmente por el aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, constituye uno de los desafíos ambientales más críticos a nivel global. Entre las estrategias de mitigación, la reforestación representa un mecanismo clave, ya que los ecosistemas forestales actúan como sumideros de carbono al capturar CO₂ atmosférico a través de la fotosíntesis y almacenarlo en la biomasa viva, la necromasa y, especialmente, en el suelo en forma de carbono orgánico (COS) [1], [2]. Este carbono edáfico es esencial para el secuestro a largo plazo del CO₂, contribuyendo a la reducción del cambio climático. Se estima que los suelos almacenan alrededor de 1500 gigatoneladas (Gt) de carbono, superando en más del doble el contenido de carbono presente en la atmósfera y en la vegetación terrestre [3]. Además de su papel climático, el COS mejora la fertilidad edáfica, la retención hídrica y el suministro de nutrientes, fomentando la actividad microbiana y aumentando la resiliencia del suelo frente a sequías y eventos extremos.

A escala planetaria, la pérdida de cobertura forestal continúa agravando la crisis climática. Solo en 2023, se registró un aumento del 24 % en la pérdida global de cobertura arbórea, pasando de 22.8 a 28.3 millones de hectáreas en comparación con el año anterior [4]. En Ecuador, esta problemática es especialmente grave: entre 2016 y 2020, se estimó una deforestación promedio de 99417 hectáreas por año. A pesar de políticas como el programa “Socio Bosque”, orientadas a frenar la pérdida forestal, los resultados han sido limitados a nivel regional, particularmente en la zona costera sur de la provincia de El Oro, donde persisten importantes desafíos relacionados con el uso del suelo y la adaptación a escenarios climáticos futuros [5].

En esta provincia, la presión sobre los bosques secos y húmedos se ha intensificado debido al avance de la agricultura, la minería ilegal y la transformación del uso del suelo [6]. No obstante, la región cuenta con una notable diversidad de tipos de suelo, destacándose los Inceptisoles y Alfisoles por sus propiedades favorables para la reforestación. Los Inceptisoles, predominantes en zonas de relieve, presentan buen drenaje y fertilidad moderada, facilitando el establecimiento de especies nativas, aunque su baja retención de nutrientes limita el desarrollo a largo plazo, requiriendo enmiendas orgánicas [7]. Los Alfisoles, ricos en arcillas y con buena capacidad de retención de nutrientes, son también adecuados para programas de restauración, aunque su alta acidez y tendencia a la compactación pueden obstaculizar el desarrollo radicular si no se aplica cal. En contraste, los Entisoles son más susceptibles a procesos erosivos e inundaciones, dificultando la supervivencia de especies reforestadas, al igual que los Aridisoles presentes en zonas secas como Arenillas y Huaquillas, donde la baja disponibilidad hídrica representa una limitación adicional [8].

En este escenario, la reforestación se posiciona como una estrategia fundamental frente al cambio climático, pero su planificación debe considerar la dinámica espacio-temporal del territorio, así como su evolución bajo distintos escenarios climáticos. Dado que los beneficios ecosistémicos y de mitigación requieren largos períodos para manifestarse plenamente, es crucial evaluar la viabilidad a largo plazo de las intervenciones, integrando

el uso actual del suelo, las tendencias climáticas y la capacidad de los ecosistemas para fijar carbono. Evaluar áreas con alto potencial de reforestación no solo permite mitigar el cambio climático, sino también promover la restauración ecológica y fortalecer los servicios ecosistémicos. Estudios recientes en Ecuador, como el de [9], han demostrado el potencial de los sistemas agroforestales en los Andes para capturar carbono en suelos gestionados por pequeños productores. Sin embargo, aún existe una limitada comprensión sobre la evolución espacio-temporal de estas zonas, lo cual limita el diseño de estrategias eficientes. Abordar este vacío en regiones específicas como la provincia de El Oro permitirá diseñar políticas más eficaces que integren las características territoriales y las proyecciones climáticas, maximizando la capacidad de secuestro de carbono y la resiliencia de los ecosistemas.

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo estimar la evolución dinámica espacio-temporal de las tierras con potencial para reforestación en la provincia de El Oro, Ecuador, durante el periodo 2030 - 2090. Para ello, se considerará el análisis de variables climáticas proyectadas, los factores impulsores del cambio de uso del suelo y la cuantificación de la capacidad de fijación de carbono orgánico edáfico, con el fin de identificar zonas prioritarias y aportar a las estrategias de mitigación frente al cambio climático.

2. Metodología

2.1. Área de estudio

La Provincia de El Oro se encuentra en la región suroccidental del Ecuador, limitando al norte con la Provincia del Guayas, al sur con Perú, al este con las Provincias de Azuay y Loja, y al oeste con el Océano Pacífico (Figura 1). Una pequeña proporción del territorio se ubica en las estribaciones de la Cordillera de los Andes, mientras que la mayor parte corresponde a la región costera [10]. Tiene una extensión de 5791.85 km² representa una diversidad de altitudinal que varía de 0 hasta los 3900 m.s.n.m. [11]. Su clima es variado con temperaturas que fluctúa entre 14 - 22 °C en la zona alta, y 18 - 30 °C en zona baja [12]. Las precipitaciones anuales oscilan entre 250 mm y 3000 mm, dependiendo de la zona. El Oro cuenta con 15 sistemas ecológicos vinculados a los biomas como manglares, bosques secos, bosque montano bajo, bosque montano alto y páramos [10]. En cuanto a los suelos, predominan tres tipos principales: Inceptisoles, Alfisoles y Entisoles [11]. De estos, el suelo que ocupa mayor superficie terrestre en la provincia es el Inceptisol. Las actividades económicas que se desarrollan en este territorio son la agricultura, ganadería, pesca, acuicultura y minería. El Oro es reconocida no solo por su riqueza natural, sino también por su variedad paisajística, histórica, arqueológica, gastronómica, étnica y cultural.

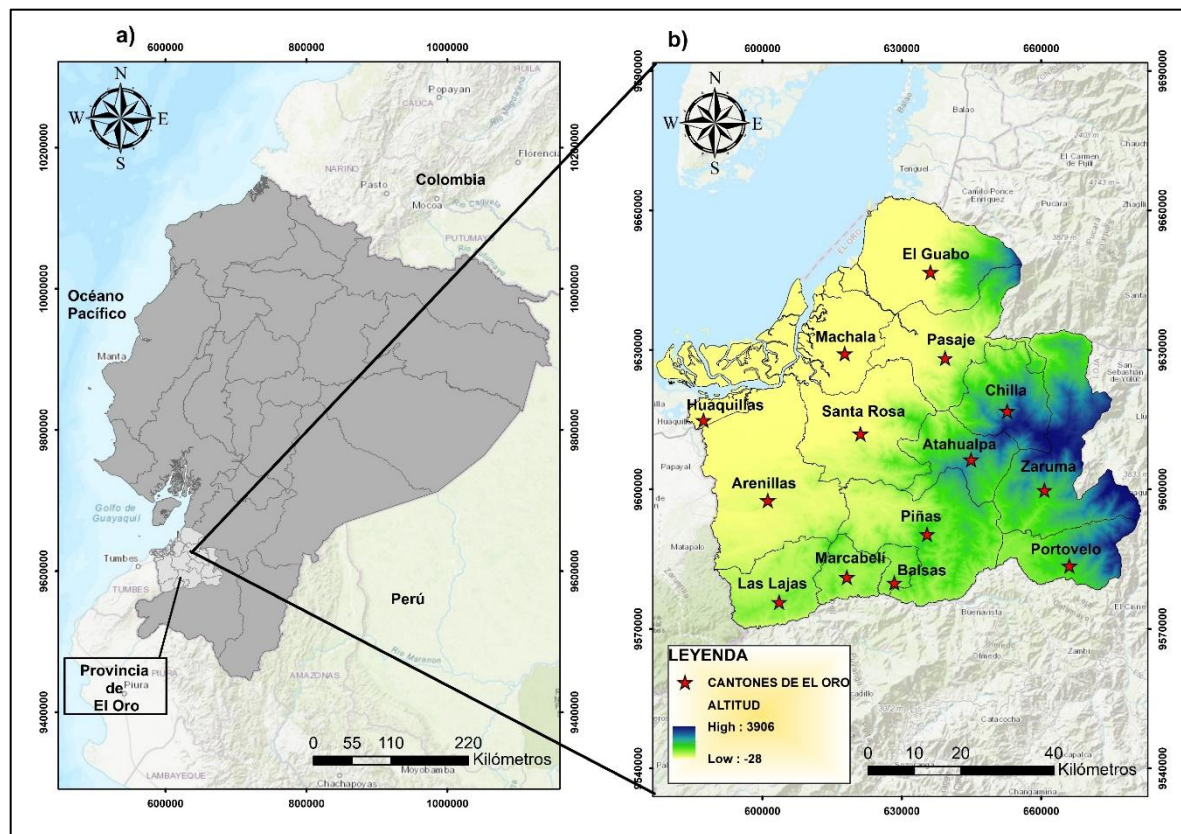


Figura 1. Ubicación del área de estudio: a) Ecuador, Provincia de El Oro y b) Cantones y altitud de la provincia de El Oro.

2.2. Recopilación de datos

En la Tabla 1 se resume la información empleada en este estudio. Se recopilieron datos climáticos mensuales futuros del modelo CMIP6 (Sexta Fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados), en formato GeoTIFF, provenientes de nueve modelos de circulación general (GCM) y cuatro escenarios socioeconómicos compartidos (SSP), para los periodos 2021 - 2040, 2041 - 2060, 2061 - 2080 y 2081 - 2100. Las variables analizadas fueron: temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación [13]. Adicionalmente, se utilizó el mapa de ombrotipos descargado del visor geográfico del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE) [14], el cual, junto con los datos climáticos, permitió generar el mapa de producción climática de la vegetación (PCV), considerado como un factor clave en la evaluación de tierras aptas para la reforestación. También se incorporó el factor de pendiente, obtenido a partir de Modelos Digitales de Elevación (DEM) de 2015 del satélite ALOS PALSAR, procesados en el software QGIS. Para analizar la sucesión de la vegetación, se emplearon los mapas de cobertura y uso del suelo de 1990 y 2022, extraídos del Sistema Nacional de Monitoreo de Bosques del visor del MAATE. En este análisis se consideraron las clases de cobertura: bosque, tierra agropecuaria y vegetación arbustiva/herbácea. La resiliencia de la vegetación fue evaluada mediante el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), siguiendo la metodología descrita por [15]. Para ello, se utilizaron imágenes Sentinel-2 (colección COPENICUS/S2_SR_HARMONIZED) en la plataforma Google Earth Engine (GEE), aplicando filtros espaciales y temporales entre el 1 de enero y el 30 de diciembre de 2024. A partir de estas imágenes se generó un NDVI promedio, delimitado al área de estudio.

Finalmente, se consideró la distancia a vías como factor de impacto, utilizando la capa de carreteras de primer orden obtenida del Geo portal del Instituto Geográfico Militar (IGM). Todas las capas ráster fueron proyectadas al sistema de coordenadas WGS_1984_UTM_Zone_17S, con una resolución espacial de 30 metros.

Tabla 1. Información geoespacial, vectorial y ráster del área de estudio

NOMBRE DE LOS DATOS	FUENTE DE LOS DATOS	AÑO	FORMATO Y RESOLUCIÓN
Datos de temperatura y precipitaciones	WorldClim – Future climate data ¹³	2021 - 2100	GeoTIFF (30m * 30m) 30s – SSP245 - ACCES-CM2
Índice Ombrotérmico Anual del Ecuador Continental	MAATE ¹⁴	2013	Shapefile
Datos de pendientes	Alaska Satellite Facility – Data Search – Vertex ¹⁶	2015	TIFF (30m*30m)
Cobertura y usos de la Tierra 1990 y 2020	MAATE ¹⁴	1990 - 2022	Shapefile
NDVI (Imágenes Sentinel 2)	Google Earth Engine ¹⁷	2024	TIFF (30m * 30m)
Datos de vías	Geoportal – Instituto Geográfico Militar ¹⁸	2021	Shapefile

Fuente: [13], [14], [16], [17], [18]

2.3. Enfoque metodológico

El estudio en su fase técnica se desarrolló en tres partes secuenciales: i) Clasificación dinámica de calidad de los factores de impacto climático, ii) Evaluación de ponderaciones de factores de impacto en la calidad de tierras para reforestación y iii) Evaluación espacio-temporal de la biomasa y el carbono almacenado en bosques plantados, tal como se explica en la Figura 2.

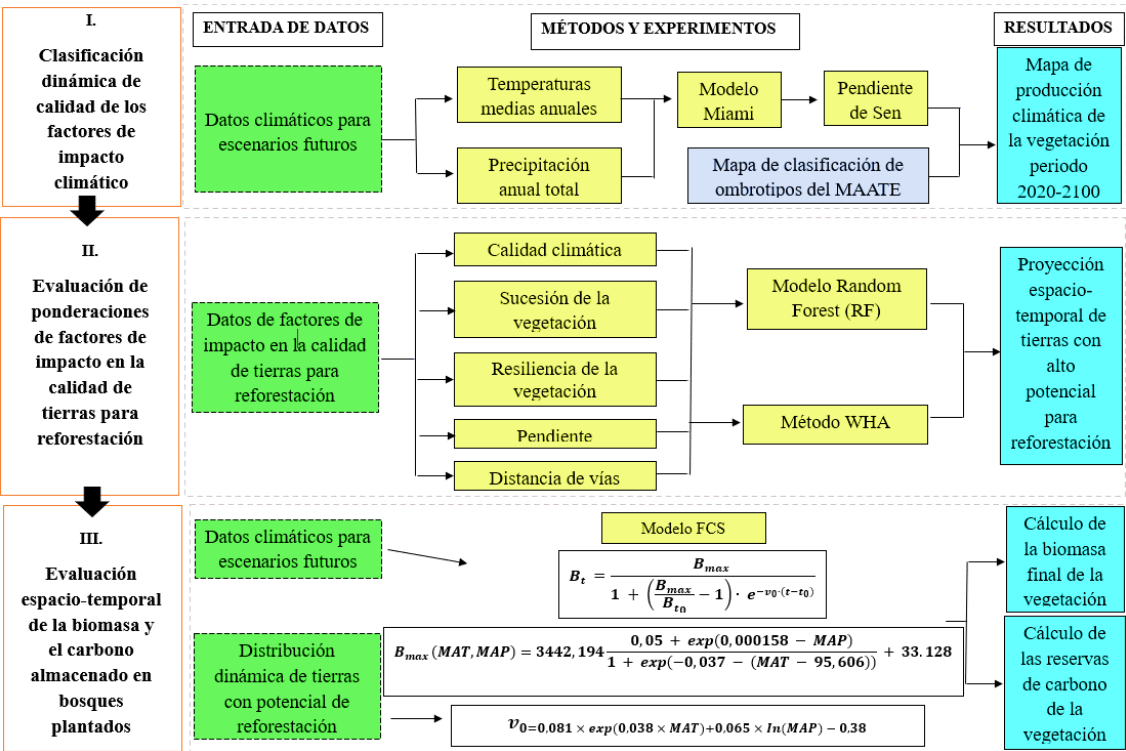


Figura 2. Diagrama de flujo metodológico aplicado a la investigación en el área de estudio

2.4. Clasificación dinámica de calidad de los factores de impacto climático

La producción climática de la vegetación es la capacidad máxima de un ecosistema para generar biomasa vegetal bajo condiciones climáticas óptimas, determinada por factores como temperatura, precipitación y radiación solar, utilizada como referencia para evaluar el éxito de proyectos de restauración ecológica [19]. Para este proceso se analizó la geografía ecológica de la provincia de El Oro y se clasificó en 5 niveles, siendo el nivel 1 la productividad mínima y 5 productividad óptima. De acuerdo al mapa de ombrotipos las zonas secas, semiáridas y desérticas se clasificaron en nivel 1, las zonas sub húmedas en nivel 2 y las zonas húmedas e hiper húmedas como nivel 5. A través del modelo Miami se evaluó el potencial de producción climática de la vegetación (PCV) [20], se aplicó la pendiente de Sen para estimar las variaciones anuales en gramos sobre metros cuadrados por año (g/m². a-1) a lo largo del tiempo, usando una diferencia temporal de 41 años (2020 - 2061) [21].

A partir de las tendencias obtenidas, se identificaron las áreas con incrementos significativos de productividad climática, que fueron seleccionadas mediante operaciones condicionales y luego integradas en el mapa de PCV del periodo 2020 - 2100. Para evitar sobreestimaciones, se aplicó un umbral que limitó los valores máximos a 5 unidades, generando un mapa mejorado de PCV. De esta forma, el nivel de calidad climática se elevará a un nivel máximo de (5) para las zonas con potencial de producción de vegetación y se reducirá un nivel mínimo de (1) para las zonas con disminución crítica del potencial de producción.

El modelo Miami determina el potencial de producción climática (Y_{min}) realizando una comparación entre el mínimo del potencial de producción de luz-temperatura (Y_T) y el potencial de producción de precipitaciones (Y_P) que sirve para evaluar el impacto del clima en la productividad. A continuación, las ecuaciones básicas:

$$Y_T = \frac{3000}{(1 + e^{1.315 - 0.119T})} \quad (1)$$

$$Y_P = \frac{3000}{(1 - e^{-0.000664P})} \quad (2)$$

$$Y_{min} = \min(Y_T, Y_P) \quad (3)$$

La ecuación (1) delinea la PCV con restricciones de temperatura mediante la aplicación de una función sigmoidea, ilustrando que la productividad aumenta con la temperatura hasta alcanzar un máximo teórico de 3000 gramos por metros cuadrados por año. La ecuación (2) cuantifica la PCV limitado por la precipitación y muestra una respuesta asintótica en la que la productividad se amplifica con el aumento de las precipitaciones hasta que alcanza una meseta, con el valor máximo de 3000 gramos por metros cuadrados por año determinado mediante una función exponencial. En la última instancia, la ecuación (3) asume que el PPN real (Y_{min}) está limitado por el factor climático más limitante, específicamente el valor más bajo entre la productividad limitada por la temperatura y la productividad limitada por la precipitación.

2.5. Ponderaciones de factores de impacto en la calidad de tierras para reforestación

2.5.1. Factores influyentes en la sucesión de la vegetación

La sucesión de la vegetación es un proceso natural de cambio y evolución de las comunidades vegetales en un área determinada a lo largo del tiempo, que abarca desde la colonización inicial hasta la conformación de una comunidad ecológicamente estable. Este proceso puede ser de tipo primario (en zonas sin suelo previo) o secundario (en áreas previamente intervenidas) [22]. En este estudio se analizaron las transiciones entre coberturas de bosque, tierras agropecuarias y vegetación arbustiva-herbácea en un periodo de 1990 y 2022. Se identificaron tres coberturas sin cambio y seis transiciones, las cuales fueron clasificadas en cinco niveles graduales de calidad sucesional. Las zonas que evidenciaron una sucesión positiva hacia coberturas boscosas fueron categorizadas en los niveles 4 y 5, siendo el bosque inalterado el de mayor calidad sucesional. En contraste, las transiciones negativas hacia vegetación arbustiva o tierras agropecuarias se ubicaron en los niveles 3 a 1, respectivamente, según se detalla en la (Tabla 2).

Tabla 2. Niveles de sucesión ecológica en los principales cambios de vegetación

N	CAMBIO DE VEGETACIÓN/USO DEL SUELO	NIVEL DE SUCESIÓN ECOLÓGICA
1	Se mantiene bosque	5
2	De tierra agropecuaria a bosque	4
3	De vegetación arb/herb a bosque	4
4	De bosque a vegetación arb/herb	3
5	De tierra agropecuaria a vegetación arb/herb	3
6	Se mantiene vegetación arb/herb	3
7	De bosque a tierra agropecuaria	2
8	De vegetación arb/herb a tierra agropecuaria	2
9	Se mantiene tierra agropecuaria	1

2.5.2. Factores influyentes en la resiliencia de la vegetación

La resiliencia de la vegetación es la capacidad de las plantas y comunidades vegetales para mantener su estructura y función frente a condiciones adversas, como sequías o perturbaciones, sin sufrir cambios significativos [23]. En este análisis se usó el método de índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), siendo un indicador eficaz para evaluar la resiliencia de la vegetación, que permite detectar y medir cambios en su productividad a lo largo del tiempo, especialmente en respuesta a eventos perturbadores [24]. Se clasificó en seis niveles de coberturas principales: agua, áreas urbanas, tierras áridas, arbustos y praderas, vegetación escasa y vegetación densa, con rangos que van desde -1 a 1 según la clasificación planteada por [25]. Para la reclasificación de la resiliencia se estimaron cinco niveles; muy bajo (< 0.14), bajo (0.14 a 0.18), medio (0.18 a 0.27), alto (0.27 a 0.36) y muy alto (> 0.36).

2.5.3. Clasificación de la calidad de otros factores de impacto

Para evaluar factores que impactan indirectamente el crecimiento de la vegetación en zonas de reforestación, se consideraron la pendiente del terreno y la distancia a vías. La pendiente se analizó usando datos DEM del satélite ALOS PALSAR de resolución 30 metros, clasificando el terreno en cinco niveles según grados de inclinación, donde pendientes menores a 25° fueron las más aptas (nivel 5) y pendientes ($> 45^\circ$) la menos aptas. En cuanto a accesibilidad, se usaron datos del IGM para clasificar las distancias a vías principales y secundarias, categorizando áreas desde muy accesibles (0 - 1 km, nivel 5) hasta inaccesibles (>10 km, nivel 1), siguiendo el método de cuantiles descrito por [20].

2.5.4. Cálculo de ponderaciones de impacto

Se extrajeron 7237 puntos de entrenamiento en QGIS mediante la herramienta "Extract raster values to points", basados en mapas de proyección de cambios de cobertura y uso de suelo y zonas de reforestación futura descritas por [26], [27]. Estos puntos alimentaron el algoritmo de Bosques Aleatorios (RF), que asignó pesos a variables independientes como calidad climática, pendiente, sucesión vegetal, resiliencia del ecosistema y distancia a vías, estandarizadas de 1 (menos óptimo) a 5 (más óptimo). Luego, se aplicó el enfoque jerárquico ponderado (WHA), una técnica que combina jerarquías y ponderaciones para optimizar la toma de decisiones [28]. Este método permitió calcular un índice de calidad de reforestación a cada factor de impacto, clasificado en cinco niveles, desde muy bajo (1) hasta muy alto (5).

2.6. Evaluación espacio-temporal de la biomasa y el carbono almacenado en bosques plantados

2.6.1. Estimación de la biomasa de la vegetación

Con el crecimiento y desarrollo del bosque, la biomasa forestal tiende a alcanzar un estado de equilibrio relativamente constante. El modelo FCS aborda de manera integral la correlación entre la edad del bosque y la biomasa, lo que permite la incorporación de datos empíricos con fines de parametrización y validación, este modelo demuestra una capacidad superior para estimar el almacenamiento de carbono en el suelo [29]. Para el cálculo se aplicó la ecuación 4.

$$B_t = \frac{B_{max}}{1 + \left(\frac{B_{max}}{B_{t_0}} - 1 \right) \cdot e^{-v_0 \cdot (t-t_0)}} \quad (4)$$

Donde, B_t representa la Biomasa al tiempo t ($Mg\ ha^{-1}$), B_{t_0} es la biomasa en el primer año de reforestación, t_0 el año inicial y v_0 es la tasa de crecimiento máxima. Como año de inicio a la reforestación se eligió el 2025, y como año de interés t se escogió el año de la media del periodo de los datos climáticos futuros aplicados en la clasificación de la producción climática de la vegetación, es decir, para el 2030 se eligió la precipitación y temperatura del periodo 2021 - 2040, año 2050 del periodo 2041 - 2060, año 2070 del periodo 2061 - 2080 y año 2090 del periodo 2081 - 2100. Como biomasa inicial B_{t_0} se considero el valor de $0.1\ t\ C\ ha^{-1}$.

La biomasa de los bosques maduros B_{max} fue calculada en función de la temperatura media anual (MAT) y la precipitación media anual (MAP), mediante la ecuación 5:

$$B_{max}(MAT, MAP) = 3442.194 * \frac{0.05 + \exp(0.000158 * MAP)}{1 + \exp(-0.037 * (MAT - 95.606))} + 33.128 \quad (5)$$

Donde, B_{max} es la biomasa máxima de la vegetación ($Mg\ ha^{-1}$), MAT es la temperatura media anual ($^{\circ}C$) y MAP es la precipitación media anual (mm).

Por su parte, (v_0) que representa el crecimiento sin limitaciones ambientales fue estimada con mayor precisión utilizando una forma modificada, representada en la ecuación 6.

$$v_0 = 0.081 * \exp(0.038 * MAT) + 0.065 * \ln(MAP) - 0.380 \quad (6)$$

2.6.2. Análisis estadístico

Para estimar la biomasa anual de la vegetación, se empleó la fórmula correspondiente al cálculo de biomasa vegetal (ecuación 4). Posteriormente, se calculó la densidad de carbono de la vegetación utilizando un coeficiente de conversión de 0.50, con el cual se transformó la biomasa en densidad de carbono.

Para analizar el almacenamiento futuro de carbono y la tasa de secuestro asociada a la reforestación, se empleó la ecuación (7) para calcular el secuestro total anual de carbono, y la ecuación (8) para estimar la tasa de secuestro de carbono de la vegetación. Las expresiones utilizadas se detallan a continuación:

$$CS = \sum_{i=1}^n Cd_i \times S \quad i = 1.2 \dots n \quad (7)$$

$$CSR = \Delta Cd_j \quad j = 1.2 \dots \quad (8)$$

Donde CS corresponde al valor de almacenamiento de carbono, Cd_i indica la densidad de carbono en el píxel i, S representa el área del píxel, CSR es la tasa de secuestro de carbono, j denota los distintos periodos de tiempo, y ΔCd_j se refiere a la variación en la densidad de carbono durante el periodo j.

2.7. Validación del modelo FCS

Se recopilieron dos conjuntos de datos públicos de biomasa aérea correspondientes al año 2020: el conjunto de biomasa y carbono de la NASA/ORNL y el mapa global de biomasa aérea forestal de la Iniciativa sobre el Cambio Climático de la Agencia Espacial Europea (ESA CCI). Sobre áreas de bosques nativos y zonas protegidas en la provincia de El Oro, se generaron 5000 puntos de muestreo.

A través de la herramienta Extract Values to Multi Points, se extrajeron los valores de biomasa aérea correspondientes a cada punto, tanto a partir de los datos satelitales como del modelo evaluado. Las estimaciones del modelo representaron la biomasa aérea de bosques maduros, calculadas a partir de datos climáticos (temperatura y precipitación) del año 2020, asumiendo una edad forestal de 60 años. Finalmente, se aplicó una regresión lineal entre los valores observados (datos satelitales) y los valores predichos por el modelo FCS.

Para la evaluación del ajuste se utilizaron el coeficiente de determinación (R^2) y el error cuadrático medio (RMSE) como métricas de validación.

3. Resultados

3.1. Producción climática de la vegetación periodo

El mapa de producción climática de la vegetación (PCV) en la región de El Oro (Figura 3), muestra una gradiente que va desde los 480 - 900 g/m². a-1 en las zonas costeras bajas, como Huaquillas, parte de Arenillas y Machala hasta los 1500 - 1780 g/m². a-1 en las áreas de mayor altitud, como Piñas, parte de Portovelo, Zaruma, Chilla, Atahualpa y Balsas, lo que indica una correlación positiva entre la altitud y la PCV, considerándose estas de zonas de mayor elevación con condiciones ecológicas favorables de mayor productividad. En cambio, los cantones costeros con altitudes más bajas representan zonas de menor productividad.

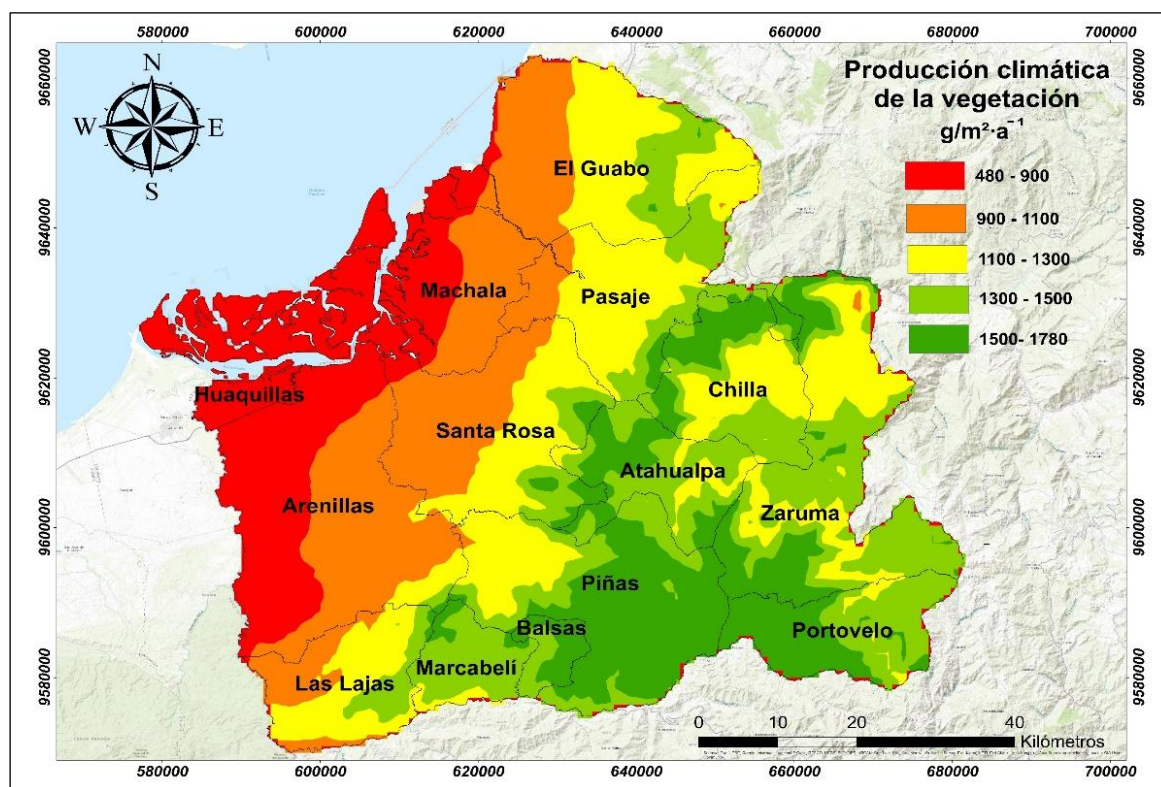


Figura 3. Mapa de producción climática de la vegetación por cantones de El Oro (2020 - 2100)

3.2. Proyección espacio-temporal de tierras con alto potencial para reforestación

El análisis espacial de los factores que determinan la calidad para la reforestación en la provincia de El Oro (Figura 4), evidencia una clara influencia altitudinal y territorial según los cantones. El mapa de calidad climática de vegetación (a) muestra condiciones favorables (calidad alta a muy alta) hacia los cantones de Piñas, Portovelo, Zaruma, Atahualpa y Chilla, donde predomina una mayor altitud, humedad y cobertura vegetal. En cambio, los cantones costeros como Machala, Santa Rosa y Arenillas presentan calidades bajas debido a su clima más seco y menor cobertura vegetal. En la distancia a vías (b), se

observa que las zonas más alejadas de las principales carreteras, especialmente en sectores interiores como Atahualpa y Zaruma presentan menor calidad para intervención por accesibilidad limitada, mientras que zonas con buena conectividad se ubican en el centro-oeste de Santa Rosa y Pasaje. La sucesión de la vegetación (c) muestra una baja calidad generalizada en la mayor parte de la provincia, especialmente en zonas degradadas o agrícolas del centro y oeste de Santa Rosa, Machala y Arenillas. En la resiliencia (d), se destaca una mayor calidad en zonas montañosas del este de Chilla, Atahualpa y Piñas, lo que indica una mayor capacidad de recuperación natural. Finalmente, el análisis de la pendiente (e) señala una alta calidad en las zonas andinas de Zaruma, Chilla y Portovelo, lo que se vincula con una mayor disponibilidad de microclimas y menor presión antrópica, mientras que en áreas planas del oeste predomina una calidad baja a intermedia.

Esto concuerda con los pesos del modelo RF (Tabla 3), donde la calidad climática (0.42) domina, seguida por distancia a vías (0.22), sucesión de vegetación (0.16), resiliencia (0.14) y pendientes (0.06), con un área bajo la curva ROC de 0.81, indicando buena capacidad discriminativa.

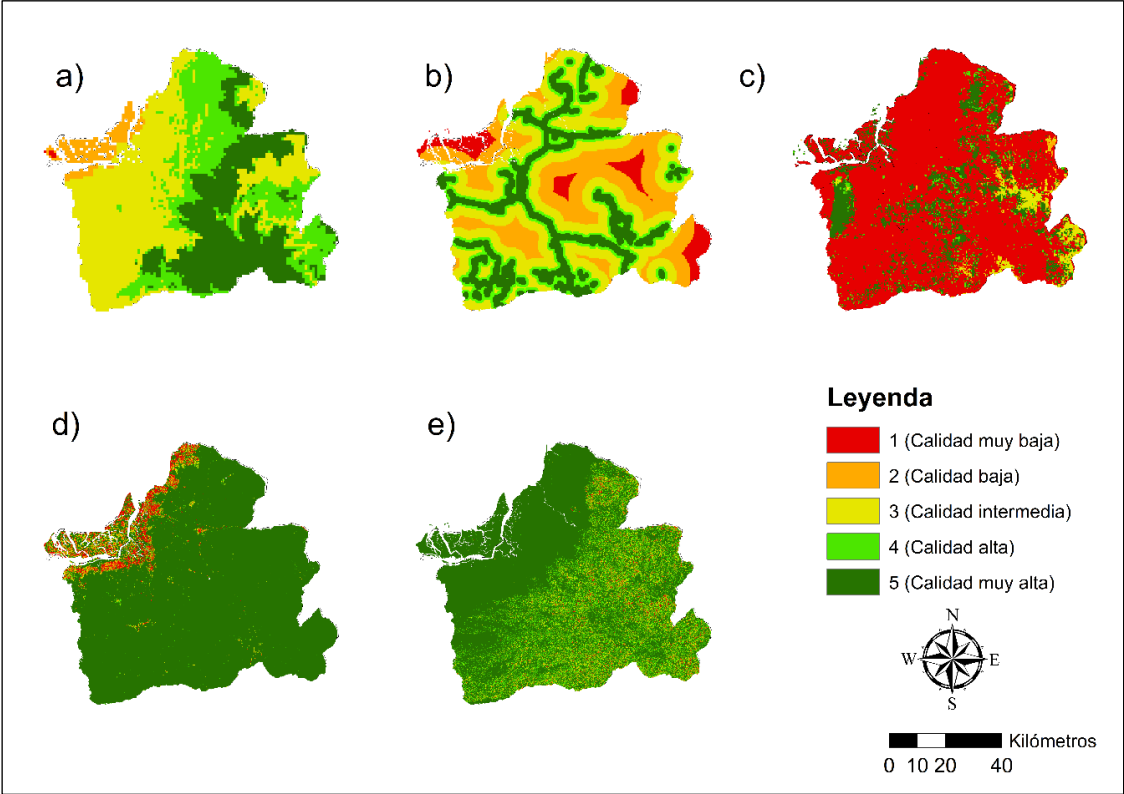


Figura 4. Índice de calidad de reforestación por factor de impacto: a) Mapa de calidad climática de vegetación. b) Distancia a vías. c) Sucesión de la vegetación. d) Resiliencia. e) Mapa de pendientes

Tabla 3. Ponderaciones de factores de impacto según Zhang et al. [20] y Modelo RF

VARIABLE	ZHANG ET AL. [6]	MODELO RF
Calidad climática	0.51	0.42
Distancia a vías	0.15	0.22
Sucesión	0.14	0.16
Resiliencia	0.12	0.14
Pendientes	0.08	0.06

En la Figura 5 según las zonas potenciales de reforestación bajo el enfoque ponderado WHA identificó 16529.85 ha óptimas para reforestación en 12 de los 14 cantones de la provincia, excluyendo a Huaquillas y Machala. Estas tierras se ubican principalmente en una franja de 11 km en la parte alta, con mayor concentración en el sur. Piñas destaca con 7132.05 ha, seguido de El Guabo con 1900.17 ha y Atahualpa con 1573.66 ha. También se hallaron áreas menores aptas por debajo de los 400 m de altitud, especialmente en Pasaje y El Guabo.

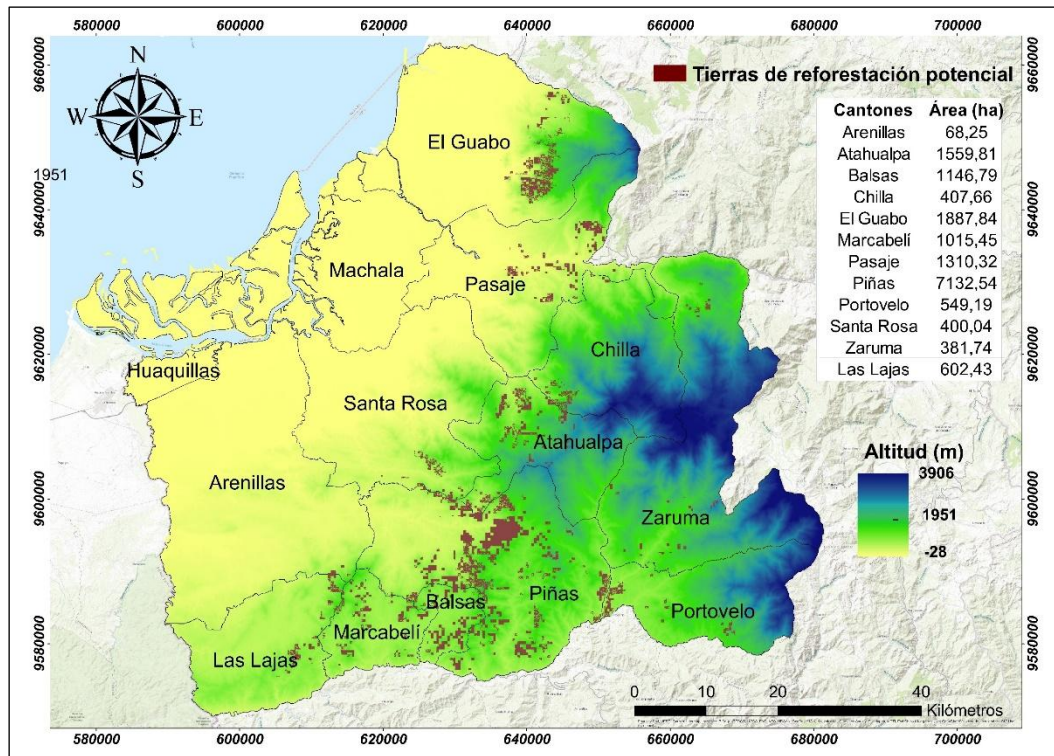


Figura 5. Zonificación de Tierras de Reforestación Potencial, Altitud y Áreas por cantón en hectáreas en la Provincia de El Oro, mediante el Modelo RF y WHA

3.3. Cálculo de la biomasa final y reservas de carbono de la vegetación

El modelo FCS estimó que la biomasa del bosque plantado crecerá exponencialmente empezando con 244574 Mg en el año 2030, 283625.12 Mg en el 2050, y llegando cerca de su máximo crecimiento en el 2070 con 842592.30 Mg, para el año 2090 se espera que la biomasa alcance un total de 848458.79 Mg. En la Tabla 4 se muestra la biomasa total estimada por cada cantón de El Oro al año 2090, y la densidad de su biomasa por hectárea según su temperatura y su precipitación.

En la Tabla 4 se indica la estimación de biomasa de la vegetación en regiones óptimas para el año 2090 en los cantones de la provincia de El Oro, teniendo en cuenta la densidad promedio de biomasa que varía entre 205.29 a 205.32 Mg. ha⁻¹ y la biomasa total acumulada, lo que revela una uniformidad en la productividad por hectárea, atribuible a condiciones ambientales análogas en las zonas designadas para reforestación, como el clima, tipo de suelo y cobertura vegetal. Sin embargo, la biomasa total presenta una significativa variación entre cantones, reflejando las disparidades de extensión de áreas óptimas; Piñas con 366086.77 Mg siendo un lugar destacado, seguida por los cantones El Guabo, Atahualpa y Pasaje, mientras que Arenillas, Zaruma y Santa Rosa presenta valores más bajos, indicando

una menor disponibilidad de tierra para reforestación. Los datos permiten determinar que, la productividad por área es constante, la capacidad de fijación de carbono está influenciada por el tamaño del territorio apto para reforestación.

Tabla 4. Biomasa de la vegetación de las zonas óptimas al año 2090

CANTÓN	DENSIDAD DE BIOMASA PROMEDIO (MG. HA ⁻¹)	BIOMASA TOTAL (MG)
Las Lajas	205.31	30905.10
Marcabelí	205.31	52626.94
Balsas	205.32	59617.21
Portovelo	205.32	28180.35
Piñas	205.32	366086.77
Zaruma	205.29	19857.61
Atahualpa	205.30	80255.10
Chilla	205.30	21443.10
Pasaje	205.32	67484.19
Arenillas	205.32	3594.07
El Guabo	205.31	97532.08
Santa Rosa	205.32	20876.21

En la Figura 6 se observa la cantidad de carbono almacenado para cada año de estudio, donde la tasa de captura de carbono entre 2030 y 2050 es de 976.25 Mg. a-1 y permitiría alcanzar 141813 Mg C al 2050. Se estimó que la tasa aumentará entre 2050 y 2070, alcanzando los 13974.17 Mg. a-1, con un total de 421296 Mg C al 2070 para luego decrecer, alcanzando apenas 146.66 Mg. a-1 entre el 2070 y 2090, acumulando 424229 Mg C hasta el año 2090. De igual manera el carbono promedio almacenado por hectárea al año 2030 sería de 0.19 Mg C ha, 34.31 Mg C ha para el 2050, 101.94 Mg C ha para el 2070 y 102.66 Mg C ha para el 2090.

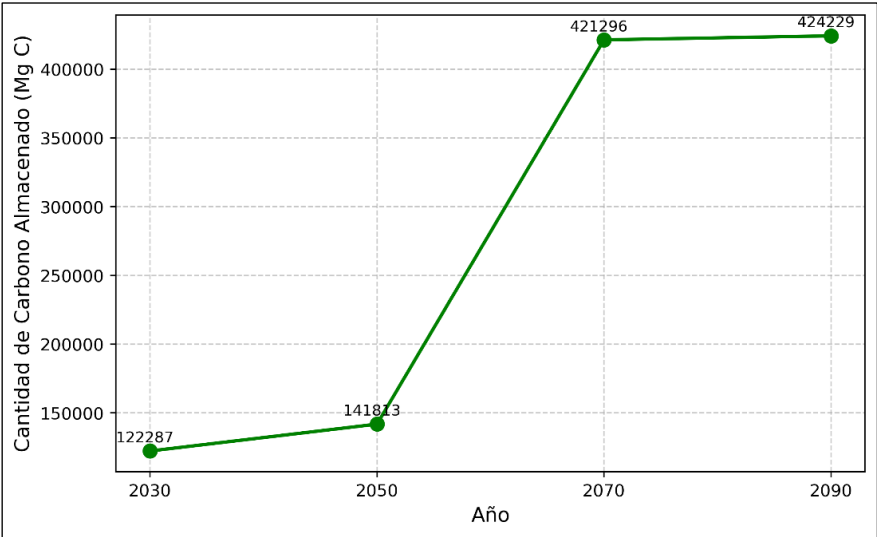


Figura 6. Carbono almacenado en biomasa para año de estudio

La proyección hasta 2090 proporciona una visión de largo plazo esencial para decisiones y acciones ambientales sostenibles, permitiendo identificar la dinámica de reforestación y

priorizar zonas con condiciones favorables pese al cambio climático, lo que es fundamental para diseñar normativas públicas resilientes.

3.4. Validación del modelo FCS

El modelo presentó un desempeño predictivo aceptable, con un coeficiente de correlación $R = 0.599$, que indica una relación moderadamente positiva entre los valores observados. El coeficiente de determinación ($R^2 = 0.359$) revela que el modelo explica el 35.9 % de la variabilidad en la variable dependiente, sin evidencia de sobreajuste, como lo confirma el R^2 ajustado. El error estándar de estimación fue de 28.49, valor dentro de lo esperable para datos ecológicos. Además, el modelo mostró una mejora significativa frente al modelo nulo, con un cambio en R^2 también del 35.9 % y una estadística $F = 13703.078$ altamente significativa ($p < 0.001$), lo que respalda la validez del modelo y la relevancia de los predictores utilizados.

Tabla 5. Métricas de la validación del modelo FCS

MODELO					ESTADÍSTICOS DE CAMBIO			
R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. Cambio en F
0.599	0.359	0.359	28.49	0.359	13703.078	3	73371	0.000

4. Discusión

El análisis espacial de la Producción Climática de la Vegetación (PCV) en la provincia de El Oro evidencia una marcada relación altitudinal, donde los cantones ubicados en zonas pie montañosas y montañosas como Piñas, Atahualpa, Zaruma, Portovelo y Chilla presentan los valores más altos de PCV ($1300 - 1780 \text{ g/m}^2 \cdot \text{a}^{-1}$), lo que indica condiciones climáticas óptimas para el desarrollo vegetal, particularmente en ambientes con mayor disponibilidad hídrica y temperaturas moderadas. En cambio, los cantones costeros como Huaquillas, Arenillas y Machala registran los niveles más bajos ($480 - 900 \text{ g/m}^2 \cdot \text{a}^{-1}$), característicos de un bioclima xérico donde la precipitación se establece como el principal factor limitante, según el modelo de Miami. Las mejoras observadas en la PCV en sectores de altitud intermedia, como Piñas y Atahualpa, pueden estar asociadas a un incremento en la precipitación o un ascenso térmico moderado, lo que reduce el efecto limitante de estas variables, favoreciendo la fijación de carbono por la vegetación [30]. Este fenómeno ha sido reportado en otros estudios que vinculan la expansión de la productividad vegetal con el cambio climático, especialmente en regiones tropicales de media montaña, donde el aumento gradual de la temperatura puede amplificar el ciclo fotosintético si no hay una reducción simultánea de la disponibilidad hídrica [31]. Sin embargo, es fundamental considerar que el modelo de Miami no incorpora aspectos edáficos ni la degradación inducida por actividades humanas intensivas, factores que, como han demostrado estudios recientes [32], pueden reducir significativamente la eficiencia de conversión energética de los ecosistemas incluso en condiciones climáticas aparentemente favorables. Por tanto, la implementación de enfoques complementarios que integren variables de uso de suelo y calidad del ecosistema sería

esencial para obtener una visión más robusta sobre la dinámica de la PCV en escenarios futuros.

La zonificación de tierras con potencial de reforestación en El Oro, basada en los modelos RF y WHA, señala que las zonas de altitud media y alta, como Piñas, El Guabo, Atahualpa, Pasaje y Marcabelí, presentan mayor aptitud para la reforestación debido a condiciones climáticas y edáficas favorables. Este patrón, asociado a ecosistemas montanos y menor presión antrópica, concuerda con hallazgos previos en gradientes altitudinales [33]. Por otra parte, cantones de baja altitud como Arenillas, Huaquillas y Santa Rosa muestran menor disponibilidad de tierras aptas, influenciadas por el clima seco y la expansión antrópica, significando la importancia de una planificación territorial diferenciada que considere factores biofísicos y socioeconómicos, en línea con las directrices de restauración de paisajes forestales [34].

Las ponderaciones de los factores de impacto, revelaron que la calidad climática es el factor más determinante para identificar tierras con potencial de reforestación, resultado que coincide con lo reportado por [20]. La ventaja de este factor indica que el uso de proyecciones climáticas futuras, en lugar de datos actuales, puede modificar significativamente la distribución espacial de áreas reforestadas, incidiendo directamente en las estimaciones de captura de carbono. La variable de distancia a vías también mostró una alta importancia, ya que determina la accesibilidad operativa, influyendo en los costos, la viabilidad y el mantenimiento de la vegetación [35]. Por su parte, la resiliencia de la vegetación representa la capacidad de los ecosistemas para resistir perturbaciones, siendo crucial en las fases iniciales de la siembra. En concordancia con lo señalado por el Ministerio de Recursos Naturales de China [36], áreas con alta fragilidad ecológica y baja resiliencia presentan limitaciones para procesos de reforestación. Adicionalmente, la sucesión vegetal actúa como un indicador de la estabilidad del ecosistema y su susceptibilidad al reemplazo por usos antrópicos o agrícolas. En este estudio, se utilizó para proyectar el éxito de la cobertura vegetal en el tiempo.

Como se indicó anteriormente, un componente que requiere mayor énfasis es el tipo de suelo y su estado de conservación, ya que condiciona el éxito de las plantaciones forestales. La provincia de El Oro presenta una amplia diversidad edáfica, y características como la fertilidad, capacidad de retención hídrica, estructura superficial y presencia de procesos erosivos o de compactación pueden limitar el desarrollo y supervivencia de especies reforestadas [37]. Estudios previos han evidenciado que la aptitud edáfica influye considerablemente en la eficiencia de los programas de reforestación, especialmente en contextos de alta degradación por presión antrópica [38]. En este sentido, [39] demostraron que la aplicación de enmiendas orgánicas en suelos degradados incrementa significativamente el desarrollo de especies forestales, al mejorar la actividad microbiana de la rizosfera y, en consecuencia, potenciar la captura de carbono en biomasa y suelo hasta en ocho veces. Estos resultados destacan la necesidad de integrar estrategias de mejora edáfica en los programas de reforestación para asegurar su efectividad ecológica y climática.

La dinámica proyectada de la biomasa aérea y las reservas de carbono en la provincia de El Oro revela un patrón ascendente y espacialmente heterogéneo hacia 2090, en gran parte impulsado por la combinación de políticas ambientales efectivas, condiciones biofísicas

favorables y respuestas ecológicas propias del crecimiento forestal. La mayor concentración de carbono se localiza en cantones con superficies reforestables amplias y ecosistemas montaños, como Piñas y Atahualpa, lo que resalta la importancia del tamaño del área sobre la densidad de biomasa, la cual se mantiene estable en 205 Mg ha^{-1} , indicando uniformidad en condiciones edáficas y climáticas. El incremento sostenido entre 2050 y 2070 coincide con la fase de rápido crecimiento de las plantaciones, donde la eficiencia fotosintética y el cierre del dosel maximizan la fijación de carbono [40], [41]. Este proceso, respaldado por políticas como el Programa Socio Bosque y REDD+, así como la expansión del SNAP, ha promovido la regeneración natural y frenado la deforestación, generando condiciones propicias para la recuperación de la cobertura vegetal y el secuestro de carbono [42], [43]. Además, el efecto acumulativo de estas estrategias parece reflejarse en la aceleración de la acumulación de biomasa post-2050. Sin embargo, es necesario destacar que el modelo FCS considera únicamente la biomasa aérea, omitiendo el carbono del suelo, el cual representa entre el 30% y 60% del total del carbono ecosistémico, así como las interacciones rizosféricas que afectan significativamente la dinámica del carbono [44]. Por tanto, aunque los resultados validan el potencial de mitigación del cambio climático a través de la reforestación planificada, su precisión puede ser mejorada mediante la incorporación de componentes subterráneos y la consideración de escenarios climáticos extremos.

La incorporación de modelos de aptitud edáfica o variables específicas como el uso agrícola degradado contribuiría a una zonificación más robusta para la reforestación. En este sentido, enfoques como MaxEnt permiten optimizar la selección de especies forestales adaptadas a distintos pisos altitudinales [45], considerando variables como densidad de madera o contenido radicular, que mejoran la estimación de carbono fijado por especie [46]. Asimismo, un análisis más detallado del factor climático limitante en el modelo de Miami (temperatura vs. precipitación) permitiría comprender mejor la respuesta de la vegetación ante el cambio climático y mejorar las decisiones de manejo forestal en el territorio.

5. Conclusiones

El análisis de PCV en la provincia de El Oro, proyectado para el periodo 2020 - 2100 mediante el modelo de Miami, evidencia una clara influencia de la altitud sobre la productividad vegetal, destacando los ecosistemas montaños y pie montaños como zonas de mayor potencial fotosintético debido a condiciones climáticas más favorables. En cambio, los cantones costeros, caracterizados por un bioclima xérico, presentan bajos niveles de PCV, limitados principalmente por la escasa precipitación. Aunque se identificaron tendencias positivas en cantones de altitud intermedia, es fundamental reconocer las limitaciones del modelo empleado, el cual no contempla factores edáficos ni la presión antrópica, que pueden influir significativamente en la productividad real de los ecosistemas. Estos resultados resaltan la necesidad de integrar variables biofísicas adicionales y datos más específicos en futuras investigaciones para fortalecer las estrategias de planificación territorial y mitigación del cambio climático en regiones tropicales de montaña.

La proyección espacio-temporal de tierras con alto potencial para reforestación en la provincia de El Oro, basada en los modelos RF y WHA, demuestra que las zonas de altitud media y alta, como Piñas, Atahualpa y El Guabo, poseen condiciones climáticas, edáficas y

de resiliencia ecológica más favorables para el desarrollo exitoso de procesos de revegetación. La calidad climática fue el factor más determinante en la zonificación, resaltando la importancia de incorporar datos climáticos futuros para mejorar la precisión en la identificación de áreas aptas. La inclusión de variables como la resiliencia de la vegetación y la sucesión ecológica aporta solidez al modelo, reflejando la capacidad de recuperación de los ecosistemas y su estabilidad ante presiones antrópicas. Además, se destaca la necesidad de incorporar el estado de conservación del suelo en futuras evaluaciones, dada su influencia crítica en la supervivencia de las especies forestales y en la eficacia de la captura de carbono.

Los valores de la biomasa y reservas de carbono en la provincia de El Oro muestran un incremento sostenido hasta el año 2090, con mayor acumulación durante las fases medias del ciclo forestal. La estabilidad en la densidad de biomasa por hectárea indica condiciones biofísicas homogéneas en las zonas reforestadas, mientras que las diferencias entre cantones responden principalmente a la extensión del área disponible. Las políticas ambientales aplicadas han favorecido este proceso, sin embargo, la exclusión del carbono edáfico y otros componentes subterráneos limita la estimación total del secuestro de carbono. Se recomienda integrar variables adicionales que permitan una evaluación más precisa del potencial de mitigación y planificación de reforestación en función de las condiciones altitudinales y ecológicas.

Contribuciones de los autores

Conceptualización, V.A. y N.L.; metodología, V.A., N.L. y M.J.; software, N.L.; validación, V.A., N.L. y M.J.; análisis formal, V.A., N.L. y M.J.; investigación, V.A. y N.L.; recursos, V.A., N.L. y M.J.; curación de datos, V.A. y N.L.; redacción—preparación del borrador original, V.A. y N.L.; redacción—revisión y edición, V.A. y M.J.; visualización, V.A., N.L. y M.J.; supervisión, M.J.; administración del proyecto, V.A., N.L. y M.J.; adquisición de financiamiento, V.A. y N.L. Todos los autores han leído y aprobado la versión publicada del manuscrito.

Conflicto de Interés

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

Declaración sobre el uso de Inteligencia Artificial Generativa

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

Referencias

- [1] O. Cano-Flores, G. Vela-Correa, O. A. Acevedo-Sandoval, y M. Á. Valera-Pérez, "Concentraciones de carbono orgánico en el arbolado y suelos del área natural protegida El Faro en Tlalmanalco, Estado de México", *Terra Latinoamericana*, vol. 38, n. 4, pp. 895-905, oct. 2020, doi: 10.28940/terra.v38i4.757.
- [2] H. J. Andrade, M. A. Segura, y D. S. Canal-Daza, "Conservation of Soil Organic Carbon in the National Park Santuario de Fauna y Flora Iguaque, Boyacá-Colombia", *Forests*, vol. 13, n. 8, p. 1275, ago. 2022, doi: 10.3390/f13081275.

- [3] Food and Agriculture Organization of the United Nations. "Key messages: Global Symposium on Soil Organic Carbon," Accedido: 13, jun. 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/about/meetings/soil-organic-carbon-symposium/key-messages/en/>
- [4] E. Goldman, S. Carter, M. Sims, "Los incendios impulsaron una pérdida récord de bosques tropicales en el 2024," Accedido: 3, feb. 2025. [En línea]. Disponible en: <https://research.wri.org/es/gfr/latest-analysis-deforestation-trends>.
- [5] Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, "Programa Socio Bosque," Accedido: 3, feb. 2025.
- [6] M. A. Zaldumbide Verdezoto, "El impacto en el ambiente producido por la minería ilegal en el Ecuador," *RECIMUNDO*, vol. 7, n. 4, pp. 351-358, dic. 2023, doi: 10.26820/recimundo/7.(4).oct.2023.351-358.
- [7] Z. Calle, E. Murgueitio, J. Chará, C. Molina, A. Zuluaga, y A. Calle, "A Strategy for Scaling-Up Intensive Silvopastoral Systems in Colombia," *J. Sustain. For.*, vol. 32, n. 7, pp. 677-693, sep. 2013, doi: 10.1080/10549811.2013.817338.
- [8] I. D. Novillo Espinoza, M. D. Carrillo Zenteno, J. E. Cargua Chavez, V. Nabel Moreiral, K. E. Albán Solarte, y F. L. Morales Intriago, "Propiedades físicas del suelo en diferentes sistemas agrícolas en la provincia de Los Ríos, Ecuador," *Temas Agrarios*, vol. 23, n. 2, pp. 177-187, jun. 2018, doi: 10.21897/rta.v23i2.1301.
- [9] M. Añazco Romero y N. Fernández Gómez, "Fijación de carbono en sistemas agroforestales gestionados por pequeños productores de los Andes del Ecuador," *BLC*, vol. 11, n. 2, pp. 32-42, dic. 2021. Disponible en: <https://revistas.unl.edu.ec/index.php/bosques/article/view/1089>
- [10] Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de El Oro, *Plan De Desarrollo Y Ordenamiento Territorial De La Provincia De El Oro*, Accedido: 18, mar. 2025. [En línea]. Disponible en: <https://drive.google.com/file/d/1dnjMTebJUcdAM-AYvODAUj1NPASHIgU2/>
- [11] C. Garzón-Santomaro, F. Prieto-Albuja, J. Brito, J. Mena-Jaén, *Propuesta para el establecimiento del Subsistema de Áreas Naturales de Conservación y Diseño del Corredor Ecológico de la provincia de El Oro: Una guía para el desarrollo de estrategias del investigación, conservación y manejo de la biodiversidad oreense*. Accedido: 18 mar. 2025. [En línea]. Disponible en: <https://inabio.biodiversidad.gob.ec/wp-content/uploads/2020/10/Libro%20Propuesta%20ACP%20y%20Corredor%20Ecológico%20de%20la%20provincia%20de%20El%20Oro%202019.pdf>
- [12] J. Conde y L. Rivera-Intriago, "El riego en la provincia de El Oro," *EEC*, vol. 5, n. 1, sep. 2018, doi: 10.36331/revista.v5i1.57.
- [13] WorldClim, "Future climate data". WorldClim. Accedido: 13, jun. 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.worldclim.org/data/cmip6/cmip6climate.html>.
- [14] Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, "Mapa interactivo," Accedido: 13, jun. 2025. [En línea]. Disponible en: <http://ide.ambiente.gob.ec/mapainteractivo/>.
- [15] D. Revelo Luna, J. Mejía Manzano, B. Montoya-Bonilla, y J. Hoyos García, "Análisis de los índices de vegetación NDVI, GNDVI y NDRE para la caracterización del cultivo de café (*Coffea arabica*)," *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 38, n. 2, pp. 298-312, ago. 2020, doi: 10.14482/inde.38.2.628.
- [16] Alaska Satellite Facility, "EARTHDATA", ASF Data Search. Accedido: 20, jun. 2025. [En línea]. Disponible en: <https://search.asf.alaska.edu/#/>.
- [17] Earth Engine Data Catalog, "Climate and Weather," Earth Engine Data Catalogo. Accedido: 13, jun. 2025 [En línea]. Disponible en: <https://developers.google.com/earth-engine/datasets?hl=es-419>.
- [18] Geoportal IGM, "Capas de Información Geográfica básica del IGM de libre acceso," Accedido: 13 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.geoportaligm.gob.ec/portal/index.php/descargas/cartografia-de-libre-acceso/registro/>.
- [19] X. Xu, D. Zhang, Y. Zhang, S. Yao, y J. Zhang, "Evaluating the vegetation restoration potential achievement of ecological projects: A case study of Yan'an, China," *Land Use Policy*, vol. 90, p. 104293, ene. 2020, doi: 10.1016/j.landusepol.2019.104293.
- [20] Z. Zhang, Z. Wang, X. Zhang, y S. Yang, "Estimation of Spatial-Temporal Dynamic Evolution of Potential Afforestation Land and Its Carbon Sequestration Capacity in China", *Remote Sens.*, vol. 16, n. 16, P. 3098, ago. 2024, doi: 10.3390/rs16163098.

- [21] F. Aswad, A. Yousif, y S. Ibrahim, "Trend Analysis Using Mann-kendall And Sen's Slope Estimator Test for Annual And Monthly Rainfall for Sinjar District, Iraq," *J. Duhok Univ.*, vol. 23, n. 2, pp. 501-508, dic. 2020, doi: 10.26682/csjuod.2020.23.2.41.
- [22] M. Mendoza-García y H. Godínez-Alvarez, "Spontaneous vegetation succession and recovery of ecosystem structure and function in a 40-year abandoned stone quarry in a Mexican tropical dryland," *Bot. Sci.*, vol. 100, n. 1, pp. 86-92, mar. 2022, doi: 10.17129/botsoci.2880.
- [23] M. Liang, R. Cao, K. Di, D. Han, y Z. Hu, "Vegetation resistance and resilience to a decade-long dry period in the temperate grasslands in China," *Ecol. Evol.*, vol. 11, n. 15, pp. 10582-10589, jul. 2021, doi: 10.1002/ece3.7866.
- [24] E. Gong, Z. Ma, Z. Wang, y J. Zhang, "Spatiotemporal Dynamics of Vegetation Productivity and Its Response to Meteorological Factors in China," *Atmosphere*, vol. 15, n. 4, abr. 2024, doi: 10.3390/atmos15040491.
- [25] B. Oyinna y K. Okedu, "Geo-spatial Assessment of Small Hydro Potential in Abia State, South-Eastern Nigeria," *Int. J. Smart grid*, vol. 7, n. 4, pp. 235-242, dic. 2023, doi: 10.20508/ijsmartgrid.v7i4.316.g310.
- [26] P. S. A. Márquez, B. L. G. Pucha, J. E. M. Maza, y A. D. L. Florin, "Análisis multitemporal del cambio de uso del suelo en la cuenca del río Zarumilla: Proyecciones al 2040," *Novasinergia*, vol. 7, n. 2, pp. 73-86, jul. 2024, doi: 10.37135/ns.01.14.05.
- [27] D. X. Astudillo Román, J. E. Maza - Maza y P. S. Amaya-Márquez, "Proyección y análisis multitemporal del cambio de cobertura y uso de suelo del BP-Tahuín mediante modelos MARKOV-MOLA y Perceptrón Multi-capas," *Green World J.*, vol. 7, n. 2, pp. 164-164, ago. 2024, doi: 10.53313/gwj72164.
- [28] T. Nukui y A. Onogi, "An R package for ensemble learning stacking," *Bioinforma. Adv.*, vol. 3, n. 1, sep. 2023, doi: 10.1093/bioadv/vbad139.
- [29] D. Guan, J. Nie, L. Zhou, Q. Chang, y J. Cao, "How to Simulate Carbon Sequestration Potential of Forest Vegetation? A Forest Carbon Sequestration Model across a Typical Mountain City in China," *Remote Sens.*, vol. 15, n. 21, p. 5096, oct. 2023, doi: 10.3390/rs15215096.
- [30] H. Murga-Orrillo, M. F. Coronado Jorge, C. Abanto-Rodríguez, y F. D. Almeida Lobo, "Gradiente altitudinal y su influencia en las características edafoclimáticas de los bosques tropicales," *Madera y Bosques*, vol. 27, n. 3, p. e2732271, dic. 2021, doi: 10.21829/myb.2021.2732271.
- [31] F. Zhao, X. Wang, Y. Wu, B. Sivakumar, y S. Liu, "Enhanced Dependence of China's Vegetation Activity on Soil Moisture Under Drier Climate Conditions," *J. Geophys. Res. Biogeosciences*, vol. 128, n. 5, abr. 2023, doi: 10.1029/2022JG007300.
- [32] M. Maialetti et al., "Climate-Driven vs Human-Driven Land Degradation? The Role of Urbanization and Agricultural Intensification in Italy, 1960–2030," *Sustainability*, vol. 16, n. 20, pp. 8938, oct. 2024, doi: 10.3390/su16208938.
- [33] R. Chazdon y M. Guariguata, "Natural regeneration as a tool for large-scale forest restoration in the tropics: prospects and challenges," *Biotropica*, vol. 48, n. 6, pp. 716-730, nov. 2016, doi: 10.1111/btp.12381.
- [34] R. Russo, "Restauración funcional de la ecología de paisajes: una revisión reflexiva," *Difusiones*, vol. 19, n. 19, pp. 65-73, dic. 2020. [En línea]. Disponible en: <http://revistas.ucse.edu.ar/ojsucse/index.php/difusiones/article/view/85>
- [35] E. Bugday y H. B. Özel, "Utilizing a fuzzy inference system (FIS) and modified analytical hierarchical analysis for forest road network planning in afforested lands," *Pol. J. Environ. Stud.*, vol. 28, n. 3, pp. 1579-1589, feb. 2019, doi: 10.15244/pjoes/89611.
- [36] National Development and Reform Commission, y Ministry of Natural Resources of China, "Master Plan for Major National Programs to Protect and Restore Important Ecosystems (2021–2035)," jun. 2020. pp. 10-11. [En línea]. Disponible en: https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-06/12/content_5518982.htm
- [37] C. Wang, W. Zhang, X. Li, y J. Wu, "A global meta-analysis of the impacts of tree plantations on biodiversity," *Glob. Ecol. Biogeogr.*, vol. 31, n. 3, pp. 576-587, dic. 2021, doi: 10.1111/geb.13440.
- [38] J. Wang et al., "Remote sensing of soil degradation: Progress and perspective," *Int. Soil Water Conserv. Res.*, vol. 11, n. 3, pp. 429-454, sep. 2023, doi: 10.1016/j.iswcr.2023.03.002.
- [39] A. Freitas et al., "Amazonian dark earths enhance the establishment of tree species in forest ecological restoration," *Front. Soil Sci.*, vol. 3, may 2023, doi: 10.3389/fsoil.2023.1161627.

- [40] Y. Pan et al., "A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests," *Science*, vol. 333, n. 6045, pp. 988-93, ago. 2011, doi: 10.1126/science.1201609.
- [41] B. Bond-Lamberty y A. Thomson, "Temperature-associated increases in the global soil respiration record," *Nature*, vol. 464, n. 7288, pp. 579-582, mar. 2010, doi: 10.1038/nature08930.
- [42] Ministerio del Ambiente, "El Ministerio del Ambiente presentó Plan de Acción REDD+: Bosques para el Buen Vivir, la estrategia nacional para la conservación de los bosques," Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. Accedido: 27, jun. 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ambiente.gob.ec/el-ministerio-del-ambiente-presento-plan-de-accion-redd-bosques-para-el-buen-vivir-la-estrategia-nacional-para-la-conservacion-de-los-bosques/>
- [43] R. Luck et al., "Forests caught between climate protection and resource provision," *Naturschutz und Landschaftsplanung*, vol. 57, n. 5, pp. 16-27, may. 2025, doi: 10.1399/nul.127969.
- [44] G. Y. K. Moinet, R. Hijbeek, D. P. van Vuuren, y K. E. Giller, "Carbon for soils, not soils for carbon," *Glob. Change Biol.*, vol. 29, n. 9, pp. 2384-2398, ene. 2023, doi: 10.1111/gcb.16570.
- [45] S. J. Phillips, R. P. Anderson, y R. E. Schapire, "Maximum entropy modeling of species geographic distributions," *Ecol. Model.*, vol. 190, n. 3-4, pp. 231-259, ene. 2006, doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026.
- [46] F. Noulèkoun et al., "Both the selection and complementarity effects underpin the effect of structural diversity on aboveground biomass in tropical forests," *Glob. Ecol. Biogeogr.*, vol. 33, n. 2, pp. 325-340, dic. 2023, doi: 10.1111/geb.13800.