

MODELO DE BIOMASA PARA LA ESTIMACIÓN ECONÓMICA DEL SERVICIO DE REGULACIÓN DE GASES DEL ÁREA DE PROTECCIÓN TONCHIGÜE-MOMPICHE.

BIOMASS MODEL FOR THE ECONOMIC ESTIMATION OF THE GAS REGULATION SERVICE OF THE TONCHIGÜE-MOMPICHE PROTECTION AREA.

Andrés Sánchez-Peralta*, Juan David Ortiz-Encarnación

Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente, Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Av. General Rumiñahui s/n. Sangolquí, Ecuador. email: aasanchez17@espe.edu.ec; jdortiz7@espe.edu.ec

* Autor de correspondencia: aasanchez17s@espe.edu.ec

Recibido: 13 de octubre de 2022

/

Aceptado: 30 de mayo de 2023

RESUMEN

El área de Tonchigüe-Mompiche se encuentra ubicada en el Cantón Muisne, al sur de la provincia de Esmeraldas, Ecuador, es conocido por sus bellezas escénicas y paisajísticas, con una extensión relativamente amplia de playa, posee un área total de 45 000ha en donde encontramos flora y fauna de vegetación representativos del Chocó Ecuatoriano. El objetivo de la presente investigación fue evaluar el servicio ecosistémico de almacenamiento de carbono del área de conservación Tonchigüe-Mompiche a través del método de precios de mercado. Para obtener valores de almacenamiento de carbono partimos por estimar la biomasa de 4 estratos identificados en la zona (Bosque Siempreverde De Tierras Bajas del Chocó, Manglar, Bosque Seco Pluvioestacional, Pastizales), a través de ecuaciones o modelos alométricos aplicado a cuatro estratos de cobertura vegetal, las variables: Diámetro a la altura del pecho (DAP) y Altura comercial (HC), por cada estrato se obtuvieron a través de revisión bibliografía de estudios de inventario forestal cerca del área de estudio; los valores obtenidos fueron posteriormente ajustados con respecto al Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), para obtener un modelo de biomasa para toda el área de estudio, la biomasa total resultó de 8 794 399.53 Ton, para finalmente obtener un volumen de almacenamiento de CO₂ de 16 049 779.15 Ton. El valor económico del área de conservación fue de \$2.2 millones USD, tomando en cuenta el precio sugerido por el mercado de Certificados de Emisiones Reducidas (CER), \$0.14 USD/TonCO₂.

Palabras clave: NDVI, DAP, Biomasa, almacenamiento de carbono, servicio ecosistémico.

ABSTRACT

The Tonchigüe-Mompiche area is located in Muisne, south of the province of Esmeraldas, Ecuador, is known for its scenic and landscape beauties, with a relatively wide extension of beach, it has a total area of 45 000 ha where we found representative flora and fauna of the Ecuadorian Chocó. The objective of this research was to evaluate the carbon storage ecosystem service of the Tonchigüe-Mompiche conservation area through the market price method. To obtain carbon storage values, we start by

estimating the biomass of 4 strata identified in this area (Evergreen Forest of the Lowland of Chocó, Mangrove, Dry Rainforest, Grasslands), through equations or allometric models applied to the four coverage strata vegetation, the diameter at breast height (DBH) and HC variables, for each stratum, were obtained through a literature review of forest inventory studies near the study area; the values obtained were subsequently adjusted with respect to the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), to obtain a biomass model for the entire study area, the total biomass was 8,794,399.53 Ton, to finally obtain a storage volume of CO₂ of 16,049,779.15 Tons. The economic value of the conservation area was \$2.2 million USD, taking into account the price suggested by the market for Certificates of Reduced Emissions (CER), \$0.14 USD/TonCO₂.

Keywords: NDVI, DBH, Biomass, carbon storage, ecosystem service.

INTRODUCCIÓN

Las áreas protegidas son el pilar fundamental dentro la conservación in situ de la biodiversidad, su importancia radica en la conservación de la diversidad biológica, el almacenamiento de material genético, el suministro de servicios esenciales de los ecosistemas a favor del bienestar humano y la contribución al desarrollo sostenible (Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica, 2004). Según (Uribe, 2015) las áreas protegidas tienen como uno de sus servicios ecosistémicos almacenar y capturar los gases de efecto invernadero presentes en la atmosfera. Las áreas protegidas alrededor del mundo buscan proteger grandes hectáreas de bosques, se estima que los bosques del mundo contienen 340 Pg (picogramos) de CO₂ (1 Pg=10¹⁵ g) en vegetación y 620 Pg de CO₂ en el suelo. (Corredor, Fonseca, & Páez, 2012). La importancia de la protección de áreas como los sitios RAMSAR fue enmarcada Declaración de Cuiabá en el 2008 en donde se estableció que la conservación y la restauración de los humedales es necesaria para reducir los efectos de gases de efecto invernadero dado que los humedales intervienen en el ciclo del carbono. (Valencia et al., 2017). Los páramos son otro de ecosistemas que suelen protegerse, estos prestan un servicio ecosistémico importante al regular el nivel de CO₂ emitido a la atmosfera, al actuar como sumidero (Pinos, Morales, & Durán, 2021). De acuerdo con un estudio realizado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura determinó las cantidades de carbono que pueden almacenar diferentes tipos de suelos: zonas áridas capturan 4 kg/m²; regiones polares 21-24 kg/m²; zonas tropicales 8-10 kg/m² y páramos hasta 60 kg/m² (Ayala et al., 2014).

En el Ecuador existe el Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Ecuador (SNAP) que está conformado por parques nacionales, refugios de vida silvestre, reservas, entre otras zonas con su propia categoría de conservación y manejo (Wildlife Conservation Society - WCS, 2020). Ecuador es considerado dentro de los países mega biodiversos por la variedad de ecosistemas, flora y fauna. (Yáñez, 2014), por lo que el país pretende proteger toda esta biodiversidad no solo con el (SNAP), también siendo participe de programas como “Áreas Importantes para la Conservación de las Aves” (IBAs) que tiene como objetivo asegurar la conservación a largo plazo de los sitios que son de gran relevancia para las aves y la biodiversidad (BirdLife International - IBAs, 2005).

Desde la primera área de conservación en ingresar al SNAP, el Parque Nacional Galápagos en 1959 (Wildlife Conservation Society, 2020), hasta la actualidad, se han anexado 66 áreas protegidas a nivel nacional (2021) las cuales cubren una superficie total de 18 574 168.44 ha a nivel nacional, por lo tanto, se dice que el 13.77% del territorio nacional se encuentra conservado a través del SNAP (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, 2021). Para el manejo, control y monitoreo de cada área protegida del SNAP, el

estado ha dispuesto un presupuesto anual el cual se divide según los gastos sistémicos, y de personal para cada área protegida (Ministerio del Ambiente, 2019); sin embargo, la realidad es que los recursos asignados a cada área protegida son insuficientes para la administración, monitoreo y protección frente a todas las amenazas a las que están expuestas las áreas protegidas, como la deforestación de bosque nativo, expansión de la frontera agrícola, incendios, etc. Lo que generaría varios impactos en los ecosistemas protegidos causando pérdidas invalorables de biodiversidad.

Tonchigüe-Mompiche en su totalidad no se encuentra dentro del SNAP y tampoco en ningún sistema de protección privada. Sin embargo, en el área existen algunas zonas de protección privada contenidas en Tonchigüe-Mompiche como la Reserva Monte Saíno, manejada por Eco Ciencia y la Reserva Integral Monte Caimito. También está la Estación Biológica El Congal, protegida y manejada por la Fundación Jatun Sacha, en acuerdo con sus propietarios (familia Quiroga). Existen 2 SNAP que se superponen con el área analizada que son el Refugio de Vida Silvestre Manglares Estuario del Río Muisne y la Reserva Marina Galera San Francisco. Además, algunas zonas de manglar están protegidas por la Fundación de Defensa Ecológica del Manglar, una organización local, en acuerdo con el Ministerio del Ambiente (BirdLife International - IBAs, 2005). En 2018 Eco Ciencia presentó una propuesta junto a la alcaldía de Muisne para determinar un área de corredor de conservación entre las reservas Estuario del Río Muisne y la Marina Galera San Francisco que contiene a toda la zona de Tonchigüe-Mompiche (Villacís, Carmen Josse, & Ortiz, 2018).

En la presente investigación se analizará el área de protección Tonchigüe-Mompiche, ubicada en el Cantón Muisne ubicado al sur de la provincia de Esmeraldas, es conocida por sus bellezas escénicas y paisajísticas, con una extensión relativamente amplia de playa que es una atracción turística concurrente; Existen algunas poblaciones en esta zona como: Tonchigüe, Quingue, Caimito, Tóngora, Tongorachí, Mompiche, entre otras (BirdLife International - IBAs, 2005).

El bosque húmedo tropical presente en Tonchigüe-Mompiche es de gran importancia para la regulación del clima, la conservación de la biodiversidad, conteniendo mucha diversidad de fauna y flora nativa, convirtiéndose en una prioridad la conservación hacia este ecosistema sobre todo por las amenazas, el área de conservación posee un área total de 45 000 ha. Según (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2018), el ecosistema Bosque siempre verde de Tierras Bajas del Chocó, existen 131 árboles con un DAP mayor a 20 cm por hectárea, y 289 árboles con un DAP menor a 20 cm por hectárea, siendo una cantidad considerable de árboles para el área total de la Reserva Tonchigüe-Mompiche. Este ecosistema está dominado por especies arbóreas como Myristicaceae, Moraceae, Fabaceae y Meliaceae, con árboles desde los 40 m a 60 m de alto; además se registran gran variedad de peces y anfibios raros, más de 600 especies de aves, 5 especies de felinos y 4 especies de monos. (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2013).

Todo este ecosistema se ha visto amenazado durante los últimos años por el aumento progresivo de actividades antrópicas, la población local se dedica principalmente a actividades de pesca, ganadería, comercio, y acuicultura, estas actividades están mayormente vinculadas al ecosistema manglar, el mismo que ha sido afectado por la tala indiscriminada del bosque para la construcción de piscinas camaroneras, que no trajeron ni desarrollo económico ni empleo para los pobladores, además de la expansión de la frontera agrícola y ganadera (Prefectura de Esmeraldas, 2018). Las amenazas más serias sobre esta región son la deforestación comercial, la expansión de la frontera agrícola y la tala de bosques para crear monocultivos de eucalipto con fines comerciales. En el área existe aún bastante madera de alto valor comercial, por lo que la extracción maderera es intensa. Asimismo, desde el norte se están extendiendo las plantaciones comerciales de eucalipto, industria que, a más de forestar áreas alteradas con esta especie exótica, también favorecen la deforestación de áreas de bosque primario que son

reemplazadas por plantaciones de eucalipto. Aunque la agricultura y ganadería no son muy intensivas, sí constituye una amenaza considerable, en especial en áreas planas y cercanas a vías de acceso a la costa a lo largo de ríos. Adicionalmente, la cacería furtiva es una actividad muy frecuente que resulta particularmente grave para aves grandes. La expansión del turismo masivo que se da en las poblaciones costeras del norte de Esmeraldas (Same, Súa, Atacames, Tonsupa) constituye una amenaza potencial sobre los ecosistemas costeros del área. También hay otro frente de expansión de este tipo de turismo hacia la parte sur de Mompiche (BirdLife International - IBAs, 2005).

La importancia de proteger el área de Tonchigüe-Mompiche se da por estudios de evaluación ecológicas como la de EcoCiencia en donde se determinaron 209 especies vegetales. Entre éstas se incluyen algunas especies endémicas del Chocó (Vázques , Freile , & Suárez, 2005). Según (BirdLife International - IBAs, 2005) en esta zona existen siete especies de mangle convirtiéndose en una de las áreas de manglar más importantes del Ecuador.

El presente estudio tiene como objetivo evaluar los bienes y servicios del área de conservación Tonchigüe-Mompiche, a través del método de precios de mercado como medio de valoración de los beneficios ambientales. El precio de mercado es una referencia que señala hasta cuanto es la disposición a pagar por el producto en cuestión y hasta desde qué cantidad de dinero los productores estarán dispuestos a recibir para comercializarlo (Cadena et al., 2019). Con esta metodología se valorará el servicio de captura de carbono mediante el análisis de imágenes satelitales LANSAT 8 y sus respectivas correcciones, con la finalidad de determinar la biomasa a través del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI).

Esta valoración económica contribuirá a comprender la importancia de la conservación de la reserva mediante la organización y planificación de los Gobiernos Autónomos Descentralizados, comunidades aledañas a la zona, asociaciones y organizaciones no gubernamentales. Además, incentivar a desarrollar un plan de manejo necesario para proteger Tonchigüe-Mompiche desde el punto de vista ecológico y socioeconómico de las diferentes comunidades que ahí residen.

MATERIALES Y MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDIO

El área de conservación Tonchigüe-Mompiche posee una extensión de 45 000ha, repartidos entre Muisne y Atacames, cantones de la provincia Esmeraldas. (Ministerio del Ambiente, 2018). El área de Tonchigüe-Mompiche se ubica al suroeste de la provincia de Esmeraldas, a lo largo de la costa del Pacífico e incluye áreas de la Península de San Francisco y Punta Galera. En esta zona, la costa forma una península bien definida entre la Bahía de Atacames al norte y la Bahía de Mompiche al sur. El río San Francisco es la cuenca hidrográfica más grande de la zona y la población de Cabo San Francisco, ubicada en la desembocadura del río, es el principal asentamiento humano al norte, mientras que la ciudad de Muisne, ubicada al sur, sobre la isla del mismo nombre, es la isla con mayor población de toda la región. También están los pueblos de Tonchigüe, Quingue, Caimito, Tóngora, Tongorachí, Mompiche, entre otros. (Bird Life International, 2022).

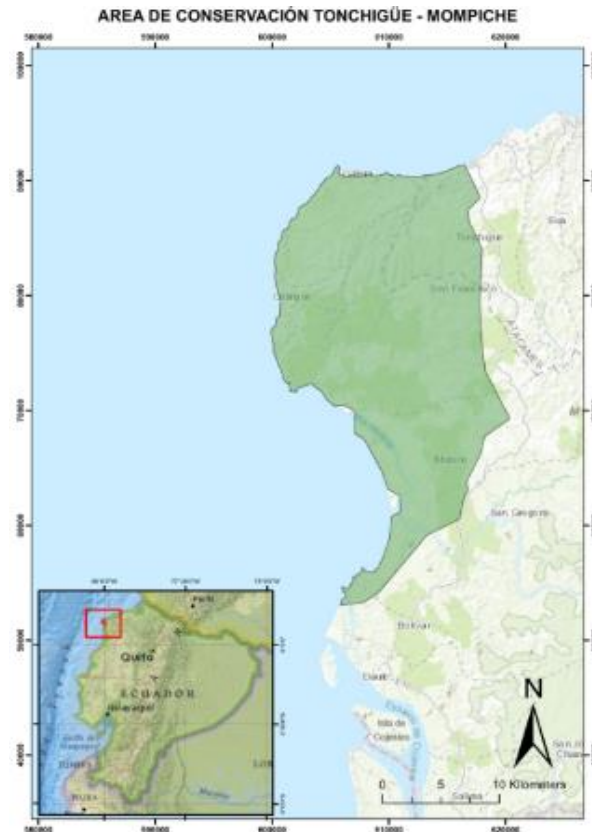


Figura 1. Área de Estudio

Tabla 1. Datos Geográficos de la Zona

Coordenadas:	Latitud: 0°49'48.5" N; 0°28'43.25" N; Longitud: 80°05' 56.5" W; 79°54' 56.86" W
Altitud:	0 – 300 msnm
Superficie:	45 000 ha

Fuente: (Bird Life International, 2022).

VALORACIÓN ECONÓMICA DEL SERVICIO AMBIENTAL DE REGULACIÓN DE GASES

El contenido de carbono hace referencia al carbono almacenado en la biomasa seca de los bosques. Las plantas capturan carbono de forma directa a través de la fotosíntesis y transforman el CO₂ en biomasa (García , Almeida , & Avila, 2019). La cantidad de carbono capturado en un sitio corresponde al balance a largo plazo entre las entradas y las salidas del carbono al ecosistema. Los árboles almacenan los componentes de carbono en su estructura por periodos prolongados, por lo que se consideran como reservas naturales de carbono (Acosta et al., 2002)

Imágenes Satelitales

Para la estimación del valor económico del servicio ambiental de almacenamiento de carbono del Área de Protección Tonchigüe-Mompiche a través del uso de imágenes satelitales se usó la plataforma Earth Explorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), de las cuales se descartaron varias imágenes revisadas por la presencia de nubes en el área de estudio. Finalmente se seleccionaron las imágenes: LC08_L1TP_011060 (03 de mayo del 2020); LC08_L1TP_011059 (19 de abril del 2021); LC08_L1TP_011060 (07 de junio del 2020); LC08_L1TP_011061 (03 de mayo del 2020). Para el procesamiento y corrección

correspondiente se usó el complemento “Semi-Automatic Classification Plugin (SCP)” en el software QGIS.

Tabla 2. Bandas – Landsat 8, usadas en la investigación.

Banda	Longitud de Onda (µm)	Resolución (m)
B2- Azul	0,452 – 0,512	30
B3- Verde	0,533 – 0,590	30
B4- Rojo	0,636 – 0,673	30
B5- Infrarrojo Cercano (NIR)	0,851 – 0,879	30

Fuente: (IGN, 2018)

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El índice NDVI demuestra las características de la vegetación, es un índice cuantitativo del funcionamiento de los ecosistemas, resulta del cociente entre bandas espectrales que al mostrar un claro contraste entre las bandas visibles y el infrarrojo cercano permiten identificar la vegetación de otras superficies; el índice varía entre -1 y 1, los valores altos revelan alta actividad fotosintética de la cubierta vegetal y una estrecha relación con la evapotranspiración, mientras que los valores bajos indican situaciones de escasa o nula cubierta vegetal y baja actividad fotosintética (Arboit & Maglione, 2018). Para la generación de los Índices de Vegetación se aplicó la siguiente ecuación:

$$NDVI = \frac{B_{NIR} - B_{RED}}{B_{NIR} + B_{RED}} \tag{1}$$

Para la obtención del índice NDVI en la zona de estudio se aplicó la Ecuación (1) en el Software QGIS con la herramienta Raster Calculator como se muestra en la siguiente expresión:

$$NDVI_{Zona\ de\ Estudio} = \frac{(RT_LC08_L1TP_011060_B5@1 - RT_LC08_L1TP_011060_B4@1)}{(RT_LC08_L1TP_011060_B5@1 + RT_LC08_L1TP_011060_B4@1)} \tag{2}$$

Mapas de Cobertura de Suelo

Para la generación del mapa de cobertura, fue necesario clasificar la imagen satelital, para lo cual se aplicó el método de clasificación supervisado, con un muestreo reflectancia de pixel para clasificar según el Catálogo Nacional de Objetos Geográficos (SENPLADES, 2013)

El muestreo se realizará con una densidad aproximada de 1 punto por cada 500 Ha, y se trabajara a una escala 1:250 000 por lo que finalmente se obtendrán aproximadamente 100 puntos de muestreo, los cuales servirán para clasificar la imagen satelital y obtener el área del recurso de interés.

Para la clasificación de las imágenes satelitales se usó la herramienta Maximum Likelihood Classification la cual se basa en el siguiente modelo matemático:

$$g_i(x) = 1np(\omega_i) - \frac{1}{2} \ln|\Sigma_i| - \frac{1}{2} (x - m_i)^T \Sigma_i^{-1} (x - m_i) \tag{3}$$

i = clase

x = n-datos dimensionales (donde n es el número de bandas)

p(ω_i) = probabilidad de que la clase ω_i aparezca en la imagen.

|Σ_i| = determinante de la matriz de covarianza de los datos en la clase ω_i

Σ_i⁻¹ = su matriz inversa

m_i = vector medio

Ecuaciones Alométricas - Estimación de la Biomasa por Cobertura Vegetal.

La biomasa se puede estimar través de ecuaciones o modelos alométricos basados en análisis de regresión lineal o no lineal. Estos modelos utilizan variables medidas en el campo tales como: el diámetro a la altura del pecho (DAP), la altura comercial (Hc) y total (Ht), el crecimiento diamétrico, el área basal y la densidad específica de la madera (Chave, y otros, 2005).

A través de revisión cartográfica y bibliográfica de la Evaluación Nacional Forestal (2014), se determinaron cuatro estratos de cobertura vegetal en el área de estudio:

- Bosque Siempre Verde de Tierras Bajas del Choco (BSVTB)
- Bosque Seco Pluvioestacional (BSP)
- Manglar (M)
- Pastizales (P)

El Ecuador aún no cuenta con ecuaciones alométricas nacionales por tipo de bosque, por lo tanto, se utilizaron modelos desarrollados por Chave et al. (2005) para la estimación de la biomasa por cada estrato. Los modelos alométricos se basan en la ecuación (4), la cual se ajusta para cada tipo de bosque a través de la variación de los coeficientes (α , β , γ , ω). Para el valor de la densidad de madera (ρ) se utilizó el valor promedio de 0.645 g/cm³ Obtenido por Chave et al (2006). El modelo base es el siguiente:

$$\text{Biomasa} = (\rho * \exp(-\alpha + (\beta * \ln(\text{dap})) + (\gamma * (\ln(\text{dap}))^2) - \omega * (\ln(\text{dap}))^3)) \quad (4)$$

De la ecuación (4) se definen las siguientes ecuaciones para cada estrato de bosque:

Bosque Siempre Verde de Tierras Bajas del Chocó, ecuación (5):

$$\text{BA} = 0.645 * \exp(-1,499 + (2,148 * \ln(\text{dap})) + (0,207 * (\ln(\text{dap}))^2) - 0.0281 * (\ln(\text{dap}))^3) \quad (5)$$

Bosque Seco Pluvioestacional, ecuación (6):

$$\text{BA} = 0.645 * \exp(-0,667 + (1,784 * \ln(\text{dap})) + (0,207 * (\ln(\text{dap}))^2) - 0.0281 * (\ln(\text{dap}))^3) \quad (6)$$

Manglar, ecuación (7):

$$\text{BA} = 0.645 * \exp(-1,349 + (1,980 * \ln(\text{dap})) + (0,207 * (\ln(\text{dap}))^2) - 0.0281 * (\ln(\text{dap}))^3) \quad (7)$$

Para los pastizales se realiza la medición de la biomasa por peso, por lo que la biomasa para este estrato se obtuvo a partir de revisión bibliográficas de estudios realizados cerca del área de estudio.

Las variables DAP y HC, por cada estrato se obtuvieron a través de revisión bibliografía de estudios de inventario forestal cerca del área de estudio.

Para el cálculo de la Biomasa por hectárea de bosque se emplea la ecuación (8), a través de la cual se realiza la sumatoria de la biomasa de cada especie encontrada en cada parcela de muestreo (Rügnitz, Chacón, & Porro, 2006). Finalmente se multiplica el valor resultante por el total de individuos totales resultantes de cada una de las tres parcelas muestreadas por cada estrato de bosque.

$$BA \left(\frac{t}{ha} \right) = \left(\frac{\sum BA \left(\frac{kg}{\text{árbol}} \right)}{1000} \right) * \frac{10000}{\text{area de parcela (m}^2\text{)}} \quad (8)$$

Modelo de Biomasa en el Área de estudio.

Para obtener el NDVI por cada estrato se utilizó la herramienta *Zonal Statistics* del Software ArGIS, con esta herramienta se obtuvo el índice para cada parcela de estudio para posteriormente realizar el ajuste con respecto a la Biomasa.

El contenido de biomasa por cobertura, fue obtenido a través del ajuste de las variables NDVI y BA, representando la variabilidad de la Biomasa con respecto al NDVI, una vez obtenido el modelo de regresión, con la constante y (BA) y x (NDVI), se usó la herramienta *raster calculator* del software QGIS, para aplicar el modelo a la imagen NDVI.

El valor resultante del modelo brinda la información de Biomasa (T/Ha); sin embargo, para el cálculo de la biomasa contenida en la zona de estudio se calculó la información de biomasa por pixel, representando cada pixel un área de 900 m², (30m x 30m), para lo cual se hizo el cálculo pertinente para finalmente obtener un modelo de biomasa en (T/pixel). La suma del valor de biomasa de todos los píxeles de la cobertura vegetal determinará el valor total de BA para el área de estudio.

Cálculo del Volumen de Carbono Total (C) y Valoración del volumen Dióxido de Carbono (CO2)

Ya obtenida la biomasa aérea (BA) del área de estudio se calculó el contenido de carbono (C) el cual se obtiene mediante la ecuación (9) expresada a continuación:

$$C = BA * 0,5 \quad (9)$$

Finalmente se calculó el volumen de dióxido de carbono (CO2) a través de la ecuación (10) tomando en cuenta que una tonelada de carbono equivale al secuestro de 3.67 ton de CO2.

$$CO2 = C * 3.67 \quad (10)$$

Para la estimación de carbono se usó el mercado de Certificado de Emisiones Reducidas (CER), el precio según la media anual para el año 2021 es de 0.14 USD. Finalmente, para el valor de CO2 almacenado se usó la siguiente formula, donde el CO2 almacenado es la suma de la biomasa más el Carbono (C):

$$\text{Valor de CO2 almacenado} = \$0.14 * \text{CO2 almacenado} \quad (11)$$

RESULTADOS Y DISCUSIONES

MAPA DE COBERTURA DE SUELO

Según el mapa de cobertura de suelo se estima un área de 33 513,57 ha de cobertura vegetal, siendo el área total del área de estudio de 44 135,03 ha, representando, la cobertura vegetal, el 75 % del área de estudio. En la Figura 2, se observa la cobertura de suelo, tomándose en cuenta como cobertura vegetal: bosque y pastizales.

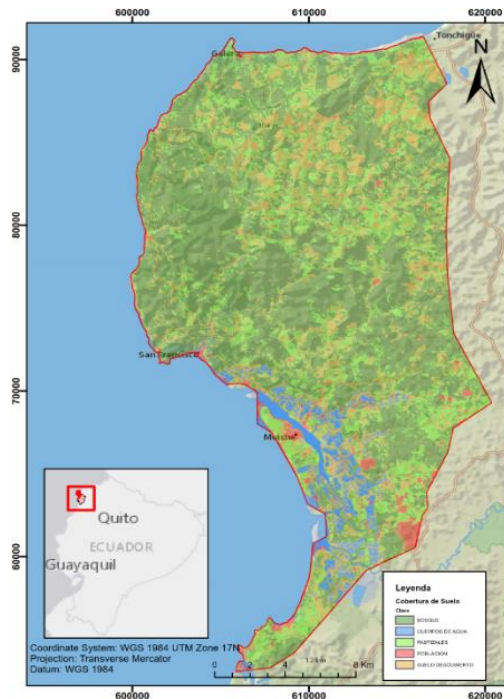


Figura 2. Mapa de Cobertura de suelo.

INDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI)

Para el índice se observan valores máximos de 0.92 y mínimos de -0.82, (Ver Figura 3) de los cuales los valores inferiores a 0 representan menos del 25% del área total de estudio. Se puede determinar que la mayor parte del bosque posee vegetaciones vigorosas, por el índice NDVI.

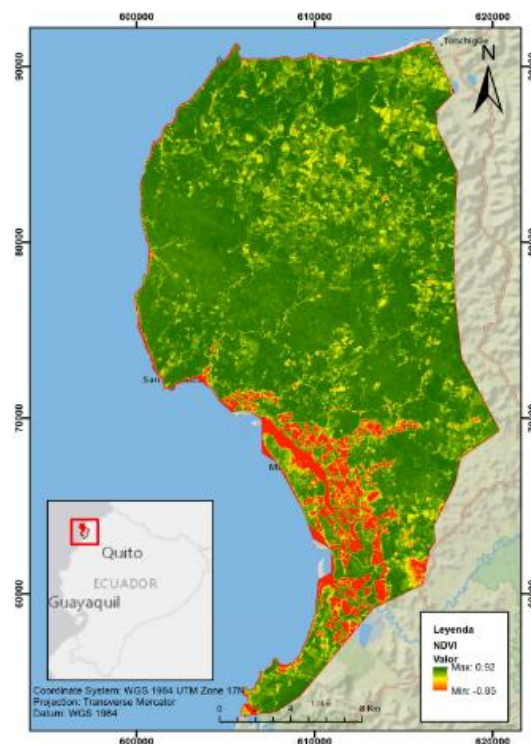


Figura 3. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA POR COBERTURA VEGETAL.

Para la aplicación del modelo alométrico generado para esta zona, se requirieron los datos de inventarios forestales para el ecosistema, a continuación, se muestran las parcelas y las especies con sus caracterizaciones por cada estrato.

Bosque Siempre verde de Tierras Bajas del Chocó

Tabla 3. Parcela 1/6. Inventario Forestal BSVTB

N°	ESPECIES	DAP (cm)	HT (m)	BIOMASA (Ton/árbol)
1	Balsa	32	28	0.92
2	Balsa	50	25	2.84
3	Balsa	42	30	1.84
4	Calade	70	34	6.44
5	Caucho	63	18	5.00
6	Colorado	21	24	0.31
7	Colorado	40	21	1.62
8	Chalviande	70	22	6.44
9	Chevin	30	27	0.78
10	Chevin	80	20	8.83
11	Dormilón	160	36	41.05
12	Dormilón	103	30	15.79
13	Guabillo	80	29	8.83
14	Guión	30	27	0.78
15	Guión	60	20	4.44
16	Guión	54	25	3.43
17	Guión	56	14	3.75
18	Guión	90	19	11.61
19	Jagua	19	25	0.24
20	Jigua	34	19	1.07
21	Jigua	67	24	5.80
22	Lagarto	20	22	0.27
23	Laurel	88	21	11.02
24	Licho	30	25	0.78
25	Limoncillo	150	10	35.86
26	Limoncillo	120	8	22.18
27	Mambla	65	27	5.39
28	Mambla	60	25	4.44
29	Moral bobo	20	35	0.27
30	Moral bobo	70	32	6.44
31	Moral bobo	50	28	2.84
32	Moral bobo	130	24	26.42
33	Moral bobo	103	30	15.79
34	Moral fino	42	16	1.84
35	Pela perro	70	20	6.44
36	Pela perro	90	28	11.61
37	Perdiz	37	25	1.33
38	Sandillo	39	25	1.52

Fuente: (Quintero, 2019)

De las 6 parcelas muestreadas resulto un total de 556.2848 (Ton/árbol). El área de estudio fue de 3 ha, por lo que se generó un valor de Biomasa de 185.428 (Ton /ha) siendo un valor característico para este estrato.

Manglares

Tabla 3. Parcela 1/10. Inventario Forestal M

N°	Especie	DAP (cm)	HT (m)	BIOMASA (Ton/Árbol)
1	Mangle Rojo <i>Rhizophora mangle</i>	13	1.5	0.07
2	Piñuelo Pelliciera <i>Rhizophorae</i>	13	4	0.07
3	Mangle Rojo <i>Rhizophora mangle</i>	33	12	0.65
4	Mangle Rojo <i>Rhizophora mangle</i>	33	8	0.65
5	Mangle Rojo <i>Rhizophora mangle</i>	35	14	0.75
6	Mangle Rojo <i>Rhizophora mangle</i>	6	4	0.01
7	Mangle Rojo <i>Rhizophora mangle</i>	38.8	10	0.96
8	Mangle Rojo <i>Rhizophora mangle</i>	1.4	18	0.00
9	Mangle Rojo <i>Rhizophora mangle</i>	21	16	0.22
10	Mangle Rojo <i>Rhizophora mangle</i>	25	15	0.33
11	Mangle Rojo <i>Rhizophora mangle</i>	20	12	0.19
12	Mangle Rojo <i>Rhizophora mangle</i>	12	7	0.05
13	Mangle Rojo <i>Rhizophora mangle</i>	20	7	0.19
14	Mangle Rojo <i>Rhizophora mangle</i>	13	4	0.07
15	Mangle Rojo <i>Rhizophora mangle</i>	14	6	0.08
16	Mangle Rojo <i>Rhizophora mangle</i>	16.5	4	0.12
17	Mangle Rojo <i>Rhizophora mangle</i>	17	5	0.13
18	Mangle Rojo <i>Rhizophora mangle</i>	25	6	0.33

Fuente: (Rodríguez, 2018)

De las 10 parcelas muestreadas resulto un total de 103.768 (Ton/árbol). El área de estudio fue de 4000 m², por lo que se generó un valor de Biomasa de 259.42 (Ton /ha) siendo un valor ligeramente superior al característico para este estrato.

Bosque Seco Pluvioestacional

Tabla 4. Parcela de muestreo. Inventario Forestal BSP

ESPECIE	Frecuencia	DAP	BIOMASA (TON / árbol)
<i>Acacia macracantha</i> Humb. & Bonpl. ex Willd.	1	19.8	0.21
<i>Capparis petiolaris</i> Kunth in H. B. K.	9	21.5	0.25
<i>Ceiba trichistandra</i> (A. Gray) Bakh	10	82.08	4.39
<i>Cochlospermum vitifolium</i> (Willd.) Spreng.	2	24.6	0.34
<i>Cordia alliodora</i> (Ruiz & Pav.) Oken	10	29.79	0.52
<i>Cynophalla didymobotrys</i> (Ruiz & Pav. ex DC.) Cornejo & Iltis	4	13.07	0.08
<i>Delostoma</i> sp.	2	11.8	0.06
<i>Eriotheca ruizii</i> (K. Schum.) A. Robyns.	9	54.35	1.90
<i>Erythrina</i> sp	2	12.6	0.07
<i>Ficus</i> sp	1	14.15	0.10
<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	1	11	0.05
<i>Jacquinia sprucei</i> Mez	8	10.3	0.05
<i>Leucaena trichioides</i>	2	9.6	0.04
<i>Machaerium millei</i> Standl.	2	21.2	0.24
<i>Maclura tinctoria</i> (L.) Steud. subsp. <i>tinctoria</i>	1	15.37	0.12
<i>Pisonia aculeata</i> L.	5	17.64	0.16
<i>Prockia crucis</i> P. Browne ex L.	2	11.7	0.06
<i>Psidium</i> sp.	6	20.3	0.22
<i>Salacia</i> sp.	31	20.33	0.22
<i>Simira ecuadorensis</i> Standl.	4	18.28	0.17
Sp 1	6	12.4	0.07
Sp. 3	2	25.1	0.35
Sp. 4	3	14.2	0.10
Sp 2	3	12.3	0.07
<i>Tabebuia chrysantha</i> (Jacq.) G. Nicholson	5	22.5	0.28
<i>Trichilia</i> sp	12	14.7	0.10
<i>Xanthoxylum</i> sp.	1	12.4	0.07
<i>Ziziphus thyrsoiflora</i> Benth.	5	34.98	0.74

Fuente: (Solano & Vega, 2014)

De la parcela de muestro resultó un total de 88.84 (Ton/árbol). El área de estudio fue de 1.08 ha, por lo que se generó un valor de Biomasa de 82.26 (Ton /ha) siendo un característico para este estrato.

Pastizales

Para los pastizales se determinó la biomasa de la especie Pasto Saboya (*Megathyrsus Maximus*), este tipo de forraje es común en pastizales para la ganadería, actividad común en la zona de estudio. Según el estudio realizado por Cevallos & Olmedo (2021) la biomasa de los pastizales con Pasto Saboya es de 13.5 Ton/Ha

MODELO DE BIOMASA

De los resultados de Biomasa y NDVI se obtuvieron los resultados observados en la Tabla 5. Se puede observar que la pendiente de la curva en el transecto es positiva, es decir mientras mayor sea el índice mayor será la biomasa.

Tabla 5. Variables de Ajuste

<i>ESTRATO</i>	<i>NDVI</i>	<i>BIOMASA (TON / ha)</i>
PASTIZALES	0.36	13.5
BSP	0.52	82.26
BSVTBC	0.7	185.43
MANGLAR	0.87	259.42

Para el modelamiento se escogieron dos tipos de regresiones, polinómica y logarítmica, de las cuales la regresión polinómica dio un coeficiente de ajuste ligeramente mayor, por lo que se usara dicho modelo.

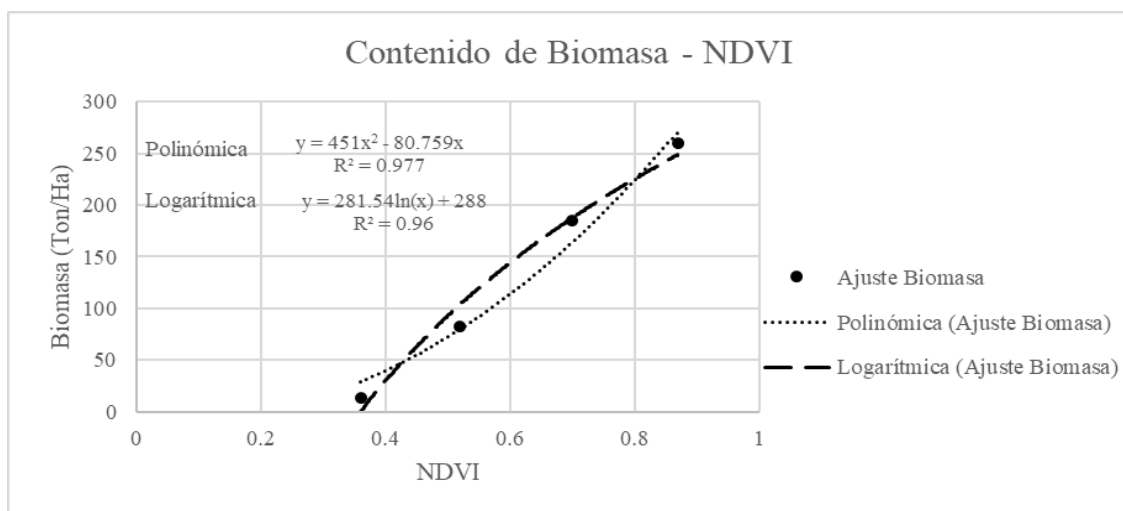


Gráfico 1. Curva de ajuste

El modelo para la estimación de biomasa total será:

$$BA = 451 * NDVI - 80.759 * NDVI \quad (12)$$

La aplicación de la ecuación (12) permitió generar el Modelo de Biomasa (Ton/ha) (Ver Figura 4), la información que brinda el modelo es una estimación del valor de toneladas de biomasa por Ha, sin embargo la imagen aun no es funcional para determinar el valor de biomasa total para el área de estudio, por lo tanto se calculó a partir del Modelo de Biomasa (Ton/ha), un nuevo Modelo de Biomasa (Ton/Pixel) (Ver Figura 5), para así con el valor de todos los

píxeles obtener un valor de biomasa total para toda el área de estudio.

Se pueden observar en la Figura 4, valores máximos de 310.97 (Ton/ha) de biomasa, y valores mínimos de 49.8 (Ton/ha) de biomasa, estos valores son diferentes a los observados en la Figura 5, cuyos valores máximos son de 27.99 (Ton/píxel) de biomasa y valores mínimos de 4.48 (Ton/píxel) de biomasa.

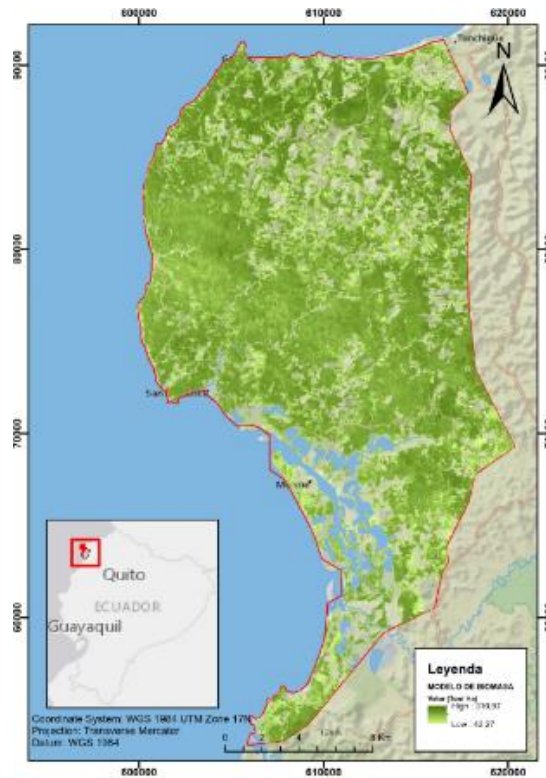


Figura 4. Modelo de Biomasa (Ton/Ha)

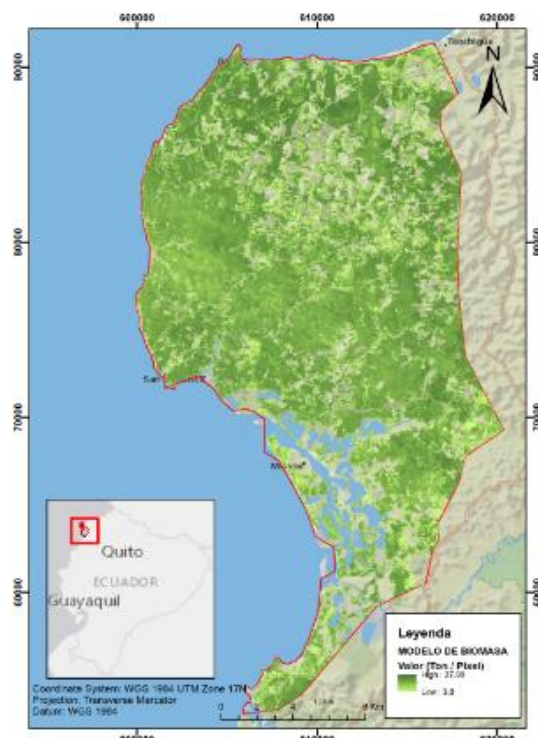


Figura 5. Modelo de Biomasa (Ton/píxel)

Se calculó con la capa de cobertura vegetal (Bosque y Pastizales) la suma total de la biomasa para finalmente obtener los siguientes resultados.

Tabla 6. Resultados de Estimación de Parámetros

Parámetro	Valor (Ton)
Biomasa	8794399.53
Carbono (C)	4397199.766
Vol. Secuestro de CO2	16049779.15

VALORACIÓN ECONÓMICA

A partir el volumen de secuestro de CO₂, se estimó el valor de \$0.14 USD. por Ton de CO₂ almacenado, según el mercado de carbono tomando en cuenta la media anual del 2021 para Certificados de Emisiones de Reducidas (CER). El valor del servicio ambiental de almacenamiento de carbono de \$2 246 969.08 USD.

CONCLUSIONES

Los inventarios forestales de las zonas cercanas al área de estudio fueron fundamentales para la estimación de la biomasa; sin embargo, las ecuaciones alométricas sugeridas y utilizadas en el Inventario Nacional Forestal, toman en cuenta solamente el DAP, esto sugiere que la estimación de la biomasa fuera más precisa si se usaran modelos alométricos que tomen en cuenta la altura del árbol.

El índice NDVI fue fundamental para la determinación de la biomasa total del área de estudio, puesto que permiten relacionar el estrato de bosque, con la biomasa; pero resultó imposible definir cada estrato a través de las imágenes satelitales por la baja resolución de estas. En comparación con otros estudios aparte del NDVI se analiza el NEP (productividad neta de los ecosistemas), precipitación, temperatura y excluyendo zonas de cambio del uso de suelo con el objetivo de mejorar el método de simulación de una fuente de carbono en un ecosistema terrestre en China (Chuai, y otros, 2022). Se debe recalcar que el cálculo biomasa por el índice de NDVI es aproximado, el crecimiento vegetal y el secuestro del carbono es afectado por el cambio climático y la actividad humana, estas variables son difíciles de percibir mediante el índice de NDVI (Wang, y otros, 2022). Otros estudios realizados en Taiwan ha mejorado el cálculo de biomasa utilizando imágenes satelitales con menor resolución espacial de los satélites SPOT 4-5 y analizando el Índice de Profundidad del Suelo (TWI) y el Modelo de Altura del Dosel (CHM) (Lin, Kuo, Chen, Wu, & Tseng, 2022).

La valoración económica del área de protección Tonchigüe-Mompiche para el servicio ecosistémico de almacenamiento de carbono fue de \$2 246 969.08 USD lo que equivale a \$50.91 USD / Ha; a pesar de que esta estimación se basa solamente con respecto a un mercado de carbono, (CER), debido a que es un mercado aplicable para Dentro del área estudiada se encuentra Punta Galera en donde una investigación realizó la valoración económica de 20 466 hectáreas, llegando a un precio de \$150 USD / Ha (EcoCiencia, 2005), en esta región existe un mayor interés turístico, agrícola y ganadero, que junto con la inflación y el método de valoración por encuestas que se le realizó al 10% del totalidad de familias del sector pueden elevar el precio en comparación al área de Tonchigüe-Mompiche. Los servicios ecosistémicos del sector analizado son amplios, según (Cadena, Echeverría, Romero, Vargas, & Rodríguez,

2019) Los beneficios por producción pesquera en la reserva marina Galera-San Francisco alcanzaron el valor de \$76.427.007,48

El estudio del almacenamiento de carbono en distintos estratos de bosque ha sido estudiado de forma extensa; en la presente investigación solo tomo en cuenta valores de biomasa aérea, sin embargo, para el almacenamiento de carbono existen muchas otras variables, como el carbono almacenado en el suelo, biomasa total, etc., por lo que se supone que el valor por el servicio ecosistémico incrementaría con los estudios de campo pertinentes.

REFERENCIAS

- Acosta, M., Vargas, H., Velázquez, M., & Etchevers, B. (2002). Estimación De La Biomasa Aérea Mediante El Uso De Relaciones Alométricas En Seis Especies Arbóreas En Oaxaca, México. *Agrociencia*, 725-736. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30236610>
- Arboit, M., & Maglione, D. (2018). Análisis Multitemporal Y Multiespacial Del Índice De Vegetación De Diferencia Normalizada (Ndvi) Y Del Índice De Vegetación Ajustado Al Suelo (Savi) En Centros Urbanos Forestados Y Oasis Irrigados, Con Climas Secos. *Boletín de Estudios Geográficos*, 109(6), 13-60. Obtenido de <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/87643>
- Ayala, L., Villa, M., Aguirre, Z., & Aguirre, N. (2014). Cuantificación Del Carbono En Los Páramos Del Parque Nacional Yasuni, Provincias De Loja Y Zamora Chinchipe, Ecuador. Loja: Universidad Nacional de Loja.
- BirdLife International - IBAs. (2005). Important Bird Areas Factsheet: Tonchigüe-Mompiche. BirdLife International Quito, Ecuador. Obtenido de BirdLife International : <http://www.birdlife.org>
- BirdLife International - IBAs. (2005). SUMMARY - TONCHIGÜE-MOMPICHE. BirdLife International Quito, Ecuador. Obtenido de Data Zone: <http://datazone.birdlife.org/site/factsheet/tonchig%C3%BCe-mompiche-iba-ecuador>
- Cadena, A., Echeverría, D., Romero, L., Vargas, K., & Rodríguez, F. (2019). Precios De Mercado Como Medio De Valoración De Los Beneficios Ambientales De Las Reservas Marino Costeras Del Ecuador. Quito: *Revista GEOESPACIAL* (15), 60-78. doi:<https://doi.org/10.24133/geoespacial.v15i1.1267>
- Cevallos, J., & Olmedo, V. (2021). Análisis De Biomasa Forrajera Del Pasto Saboya Megathyrus Maximus A Los 25, 35 Y 45 Días De Rebrote. *Tesis De Grado De La Escuela Superior Politécnica Agropecuaria De Manabí Manuel Félix López*. Calceta: Repositorio EPAMMFL.
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M., Chambers, J., Eamus, . . . Nelson, B. (2005). Tree Allometry And Improved Estimation Of Carbon Stocks And Balance In Tropical Forests. *Oecologia* 145, 87-89. doi:<https://doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x>
- Chuai, X., Xia, M., Xiang, I., Miao, L., Zhao, R., & Zuo, T. (2022). Cobertura Vegetal Y Cambios En El Secuestro De Carbono En El Área De Proyectos Forestales De China. *Global Ecology and Conservation*.
- Corredor, E., Fonseca, J., & Páez, E. (2012). Los Servicios Ecosistémicos De Regulación: Tendencias E Impacto En El Bienestar Humano. Tunja: Universidad Nacional Abierta y a Distancia.
- EcoCiencia. (2005). Biodiversidad En El Suroccidente De La Provincia De Esmeraldas. Quito: EcoCiencia y MAE.
- García, I., Almeida, L., & Avila, V. (2019). Estimación Del Almacenamiento De Carbono Y La Percepción Social De Los Servicios Ecosistémicos Que Brinda El Bosque De Abies Religiosa De La Cuenca Presa Guadalupe, Estado De México. *Teoría y Praxis*, 65-93. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=456146535005>
- Lin, C., Kuo, L., Chen, T., Wu, S., & Tseng, C. (2022). Estimación Y Aplicación De La Distribución Espacial Del Almacenamiento De Carbono En La Cuenca Del Embalse De Wushe Basada En Indicadores Ambientales En Taiwán. Taichung: Universidad Nacional Chung Hsing.
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2013). Sistema De Clasificación De Los Ecosistemas Del Ecuador Continental. Quito: Subsecretaría de Patrimonio Natural.

- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2018). Sistema De Clasificación De Los Ecosistemas Del Ecuador Continental. Quito: Subsecretaría de Patrimonio Natural.
- Ministerio del Ambiente. (2019). Apoyo Al Sistema Nacional De Areas Protegidas. Quito, Ecuador: Ministerio del Ambiente.
- Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. (2021). Reporte Sistema Nacional De Áreas Protegidas - SNAP. Quito, Ecuador: Dirección de Información Ambiental y del Agua.
- Prefectura de Esmeraldas. (2018). Actividades Productivas Cantón Muisne. Prefectura de Esmeraldas, Esmeraldas. Obtenido de Muisne - Prefectura de Esmeraldas: <https://prefecturadeesmeraldas.gob.ec/index.php/muisne/>
- Quintero, N. (2019). Caracterización Florística Del Bosque Húmedo Tropical De La Parroquia De Chontaduro Sector Iluve, Cantón Río Verde, Provincia De Esmeraldas. Esmeraldas: Repositorio PUCE.
- Rodríguez, A. (2018). Inventario Florístico Del Ecosistema De Manglar En El Sector Ostional, Cantón Muisne. Jipijapa: Universidad Estatal del Sur de Manabí.
- Rügnitz, M., Chacón, M., & Porro, R. (2006). Guía Para La Determinación De Carbono En Pequeñas Propiedades Rurales. Lima: Centro Mundial Agroforestal.
- Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica. (2004). Programa De Trabajo Sobre Áreas Protegidas. Montreal: Secretaría Del Convenio Sobre La Diversidad Biológica. Montreal, Canada: Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica.
- SENPLADES. (2013). Catálogo Nacional De Objetos Geográficos. Quito: SENPLADES.
- Solano, D., & Vega, C. (2014). Generación De Modelos Alométricos Para Determinar Biomasa Aérea A Nivel De Especies, Mediante El Método Destructivo De Baja Intensidad Para El Estrato Bosque Seco Pluviestacional Del Ecuador. Loja: Repositorio UNL.
- Uribe, E. (2015). El Cambio Climático Y Sus Efectos En La Biodiversidad En América Latina. Santiago de Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe CEPAL.
- Valencia, J., Rodríguez, J., Arias, J., & Castaño, J. (2017). Valoración De Los Servicios Ecosistémicos De Investigación Y Educación Como Insumo Para La Toma De Decisiones Desde La Perspectiva De La Gestión Del Riesgo Y El Cambio Climático. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Vázquez, M., Freile, J., & Suárez, L. (2005). Biodiversidad En El Suroccidente De La Provincia De Esmeraldas: Un Reporte De Las Evaluaciones Ecológicas Y Socioeconómicas Rápidas. Quito: EcoCiencia y MAE.
- Villacís, S., Carmen Josse, B., & Ortiz, M. (2018). Oportunidades Y Desafíos En El Manejo De Los Bosques Y Sus Servicios Ambientales En El Cantón Muisne, Esmeraldas. Quito: EcoCiencia.
- Wang, Q., Liu, S., Wang, F., Liu, H., Liu, Y., Yu, L., . . . Dong, Y. (2022). Quantifying Carbon Sequestration Service Flow Associated With Human Activities Based On Network Model On The Qinghai-Tibetan Plateau. Beijing: Beijing Normal University.
- Wildlife Conservation Society - WCS. (18 de Julio de 2020). El Sistema Nacional De Áreas Protegidas En Ecuador. Nueva York: Wildlife Conservation Society - WCS. Obtenido de Noticias: <https://ecuador.wcs.org/es-es/Recursos/Noticias/articleType/ArticleView/articleId/14605/El-Sistema-Nacional-de-Areas-Protegidas-en-Ecuador.aspx>
- Yáñez, P. (2014). Ecología Y Biodiversidad: Un Enfoque Desde El Neotrópico. Quito: UNIBE/UIDE.