

FACTIBILIDAD DE LA CREACIÓN DEL ÁREA PROTEGIDA BINACIONAL PUYANGO-TUMBES

FEASIBILITY OF THE CREATION OF THE BINATIONAL PROTECTED AREA PUYANGO-TUMBES

Cristian Robayo-Cabrera¹ y Fabián Rodríguez-Espinosa^{2*}

¹ Consultor Privado, Quito, Ecuador. cris.robayo24@gmail.com

² Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción, Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, Sangolquí, Ecuador. ffrodriguez3@espe.edu.ec

* Autor de correspondencia: Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, ffrodriguez3@espe.edu.ec

Recibido: 08 de mayo de 2025

/

Aceptado: 18 de junio de 2025

RESUMEN

Las áreas protegidas son zonas especialmente creadas para proteger la naturaleza y su biodiversidad. En el Ecuador existen varios tipos de áreas protegidas que van desde Parques Nacionales hasta Reservas Marinas. Existen también zonas de interés binacionales, como es el “Parque Binacional El Cóndor”. El presente estudio propone la creación de un área binacional que se llamaría “Parque Binacional Puyango-Tumbes”, esto respondiendo al hecho de que por la parte peruana ya existe la “Reserva Nacional de Tumbes”. El área del río Puyango tiene varios elementos de biodiversidad que se encuentran en peligro de extinción o muy vulnerables como las especies *Podocarpus oleifolius*, *Clusia* spp que se encuentran en peligro y *Crescentia cujete*, *Bursera graveolens* vulnerable. También hay especies de animales en peligro como el perico macareño *Forpus xanthops*, especie endémica. Lo cual representa un factor crucial para la creación de esta área protegida., El río Puyango está afectado por la extracción minera artesanal que arroja contaminantes tóxicos al río. Este estudio se demuestra que la zona de Puyango es factible para ser declarada como Parque Nacional y a su vez pueda ser anexada a su referente peruano creando el parque binacional. Las bases para sostener esta propuesta son que la zona de Puyango cumple con los índices planteados por el MAATE para creación de áreas protegidas y se sustenta en los beneficios económicos que generan como el almacenamiento de carbono y agua, los cuales superan a los beneficios que se puedan obtener de otras actividades económicas legales en esta zona.

Palabras clave: Área protegida, indicadores de conservación, bienes y servicios ambientales.

ABSTRACT

Protected areas are zones specially created to protect nature and its biodiversity. In Ecuador there are many types of protected areas ranging from National Parks to Marine Reserves. There are also areas of binational interest, such as the “El Cóndor Binational Park”. This study wished-for the creation of a binational area called “Puyango-Tumbes Binational Park” because the Peruvian side already has the “Tumbes National Reserve”. The Puyango River is affected by illegal artisanal mining. The Puyango River area boasts several endangered or highly vulnerable biodiversity species. These include the endangered plant species *Podocarpus oleifolius* and *Clusia* spp, as well as the vulnerable *Crescentia cujete* and *Bursera graveolens*. Additionally, there are endangered animal species such as the Pacific parrotlet (*Forpus xanthops*), which is an endemic for this region. This is a crucial factor for the creation of this protected area because the management of the Puyango River directly affects the performance of

the river as it becomes the Tumbes River. In terms of factors that generate problems in this area, the Tumbes River is contaminated by mining in the part of the river that belongs to Ecuador. Therefore, this study demonstrates that the Puyango area is feasible to be declared as a National Park and at the same time it could be annexed to its Peruvian counterpart. The basis for this proposal is that the Puyango area complies with by MAATE benchmarks for the creation of protected areas and it relies on the economic benefits generated by carbon and water storage that outweigh the benefits that could be obtained from any other legal economic activity in this area.

Key words: Protected area, key conservation indicators, environmental goods and services

INTRODUCCIÓN

Las áreas protegidas son territorios muy bien demarcados que buscan mantener el equilibrio ambiental, así como brindar un bienestar a las comunidades cercanas. Estos territorios pueden abarcar parques nacionales, reservas naturales, santuarios de vida silvestre y diversas categorías y su gestión tiene como objetivo evitar la explotación y degradación de los ecosistemas (Dudley, 2008).

Las áreas protegidas binacionales, también conocidas como áreas protegidas transfronterizas, surgieron como una iniciativa para fomentar la cooperación entre países vecinos en la conservación de ecosistemas que trascienden fronteras políticas (Sandwith *et al.*, 1998).

El primer parque protegido binacional que existe es el Parque Internacional de la Paz Waterton-Glacier, mismo que fue creado en 1932 mediante la unión de El Parque Nacional de los Lagos Waterton en Alberta, Canadá y el Parque Nacional Glaciar ubicado en Montana, EE.UU (Salisbury, 2010). El Parque Internacional de la Paz Waterton-Glacier representa el compromiso de dos naciones con la paz, la amistad y la conservación de su patrimonio natural y cultural, por tal motivo es una fuente de inspiración para futuras iniciativas de áreas protegidas que trasciendan fronteras. (Vasiljevic, 2015).

En Asia se encuentra la "Reserva de Biosfera de Tumen", la cual es un área protegida que comprende tres países: Corea de Norte, Rusia y China y que fue creada con el objetivo de conservar la biodiversidad en la cuenca del río Tumen, dando paso a un ecosistema que es de suma importancia para la supervivencia de especies que se encuentran en peligro de extinción, como es el caso del tigre de Siberia (*Panthera tigris altaica*) y el leopardo del Amur (*Panthera pardus orientalis*) y cuyas poblaciones se ha visto amenazadas por la caza furtiva y la fragmentación de su hábitat (UNEP, 2019).

Otro ejemplo de parques que trascienden fronteras es el parque Gran Limpopo que se encuentra en África y que es una iniciativa de conservación de las más importantes del continente, abarcando territorios de Sudáfrica, Mozambique y Zimbabue. Esta área protegida se estableció en el año 2002 con un área de 35,000 km² y tiene como objetivo principal el ser un corredor ecológico que proteja la biodiversidad de la zona, mejore la conectividad de los hábitats y promueva el ecoturismo entre las naciones (Piedra, 2024).

En Ecuador, el primer caso de creación de un área protegida que trasciende fronteras es el "Parque Binacional El Cóndor", establecido en 1999 como parte del acuerdo de paz entre Ecuador y Perú y su objetivo primordial es conservar la biodiversidad única de la Cordillera del Cóndor y fomentar la cooperación transfronteriza en la gestión de los recursos naturales (OIMT, 2009).

Ecuador y Perú desde hace décadas han tratado de llegar a acuerdos que les permitan que los recursos naturales que comparten sean manejados de manera sostenible y por tal motivo en el año de 1971 se impulsó la creación de un acuerdo binacional, que se llevó a cabo en el año de 1985 y que en el año de 1998 tuvo su aprobación, este acuerdo trata de la implementación de

proyectos de irrigación y reservorios en la región de Puyango-Tumbes y en el mismo se determinaron las bases para realizar una gestión integrada y sostenible de los recursos hídricos y naturales que las dos naciones comparten (Silva, 2022).

Han pasado décadas desde que se han identificado una gran cantidad de problemas en Puyango Tumbes, como la contaminación de la cuenca del Puyango por la minería ilegal, deforestación, especies vegetales y animales en peligro de extinción entre otros, mismos que no se han podido resolver por el costo que estos planes implican, de ahí que la creación del Área Protegida Puyango Tumbes surge de la necesidad de conservar uno de los ecosistemas más significativos y amenazados en el norte del Perú y el sur del Ecuador que es reconocida por su extraordinaria biodiversidad (Silva Mena et al., 2022; Mora et al., 2016; Guerra y Zaldumbide, 2010). Aquí se encuentran numerosas especies de flora y fauna endémicas, muchas de ellas en peligro de extinción. Además, sus paisajes son únicos y poseen un valor incalculable tanto desde una perspectiva ecológica como cultural (Jumbo Eras et al., 2021).

En Puyango-Tumbes se han identificado 32 especies de mamíferos, 181 especies de aves, 12 especies de reptiles, 10 especies de crustáceos de río y 46 especies de peces de río. También se conoce que en la cuenca existen 104 especies de peces marinos y 91 especies de invertebrados acuáticos (Puno, 2014). Asimismo, en Puyango se encuentra el Bosque Petrificado, uno de los principales atractivos de la región. Este lugar singular alberga uno de los mayores depósitos de madera petrificada del mundo, con árboles fosilizados que tienen alrededor de 100 millones de años (Morante-Carballo *et al.*, 2020).

El bosque de Puyango se ubica en la región sur de Ecuador, en el cantón Las Lajas de la provincia de El Oro, así como en el cantón-parroquia de Puyango-Alamor en la provincia de Loja. Esta vasta área se extiende por 2,658 hectáreas y fue descubierta en 1971 por un grupo de académicos de la escuela nocturna de Huaquillas, en 1973, fue declarado Patrimonio Cultural. El 9 de enero de 1987, mediante el Acuerdo Ministerial No. 22, se declaró el bosque y su vegetación como protegidos, gracias a las valiosas gestiones del Centro de Desarrollo Cultural El Oro y el Banco Central del Ecuador. Más adelante, en marzo de 1988, el bosque se integró al Patrimonio Natural del país (Morante-Carballo *et al.*, 2020).

El Guayacán es una de las especies más representativas de la región de Puyango, florece en Cazaderos y es un acontecimiento natural espectacular, por lo cual atrae a muchos científicos y turistas por año, este fenómeno se da con las primeras lluvias invernales y se puede apreciar como un sector totalmente árido se convierte en un colorido paisaje de flores amarillas y aunque dura un lapso corto de tiempo, esta especie se ha convertido en un emblema de los bosques secos tropicales de Puyango (MAATE, 2017).

Los bosques secos forman parte de la Reserva de Biosfera Transfronteriza Bosques de Paz, por tal motivo es importante precautelar estos ecosistemas, mismos que son valiosos no solo por su belleza sino también porque son el hogar de muchas especies de fauna y son hábitats de un gran número de especies de flora. (MAATE, 2018)

Esta área enfrenta graves problemas por minería, por deforestación, por expansión agrícola y por la misma contaminación del río Puyango que afecta directamente a las comunidades del lado peruano, este tipo de problemas comprometen el bienestar de los ecosistemas que existen en la región. De los problemas mencionados se considera que la minería es la de mayor peligro para la degradación de los ecosistemas que existen en Puyango-Tumbes.

La minería artesanal se ha consolidado en la parte más alta de la cuenca del río Puyango, específicamente en las localidades de Zaruma y Portovelo. El proceso de extracción de oro (Au) y plata (Ag) se lleva a cabo en dos fases. En la primera, se extrae el mineral en su estado bruto de las minas, mientras que, en la segunda fase, se procesa este mineral en las plantas de tratamiento (Oviedo-Anchundia *et al.*, 2017).

En un estudio realizado por (Mora et al., 2016), se realizaron muestreos de minerales a lo largo de los ríos Calera, Amarillo, Pindo y Puyango, en este último tomando dos muestras, una en la cercanía de la población de Puyango (cuenca media) y otro en la zona baja de la cuenca, localizada en los bosques secos de la provincia de Loja (sector Gramadal-Las Vegas), obteniéndose los resultados que se pueden observar en la Tabla 1.

Tabla 1. Puntos de muestreo de los contaminantes por minerales en el río Puyango

Elemento (mg/kg)	Puntos de muestreo		Niveles normales	
	P1	P2	Am ¹	TULSMA ²
Mn	1706.00	2079.00	374	600,0
Zn	3595.00	3836.00	89,3	60,0
Pb	1174.00	1312.00	19,1	25,0
Cu	1390.00	1807.00	22,3	30,0
Ni	13.90	19.10	11,8	20,0
Co	19.20	22.10	5,8	10,0
Hg	2.25	2.96	0,03	0,1
Fe (%)	4.79	5.64	2,17	-
Al (%)	1.81	2.13	1,68	-

¹ Fuente: Mora et al., 2016; ² MAAPE, Anexo 2 TULSMA,

Los niveles de normales tomadas por Mora et al., (2016) de las muestras Am indica que el contenido de metales pesados en estos sedimentos en fuentes geológicas naturales. Los límites de calidad del suelo en el Anexo 2 del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente son comparados con los puntos de muestreo P1 y P2, y solo el níquel *Ni* se encontraría entre los niveles normales y permitidos. El resto de metales se encuentran muy por encima de los niveles normales y permitidos por la normativa del país (MAAPE, 2001)

Otra de las amenazas que enfrenta la región es la deforestación. Entre 1986 y 2002, se registró una intensa tala de árboles que alcanzó un 42.28%, lo que ha llevado a una drástica disminución de los relictos del bosque en la actualidad (Jumbo Eras *et al.* 2021). Según el portal Global Forest Watch en el año 2020, Zapotillo tenía 43,7 mil hectáreas de bosque natural, que representaba el 36% de la superficie terrestre. En 2023 se estima que perdió 48 hectáreas de bosque natural, lo que representa una pérdida del 0.11% de bosque, por otro lado, tenemos que en el cantón de Puyango para el año 2020 había 42 mil hectáreas de bosque natural, que representaban el 66% de la superficie terrestre, para 2023, se perdieron 236 ha de bosque, lo cual representa una disminución del 0,57% de bosque natural en esta zona.

La región Puyango-Tumbes es de una gran importancia ecosistémica y por tal motivo debería contar con un plan de manejo integral que permita la preservación de su biodiversidad y bellezas naturales para lo cual se propone la creación de un área protegida, ya que en la actualidad no cuenta que ningún sistema de protección. El objetivo de este estudio es determinar la viabilidad y los beneficios de la creación del área protegida binacional Puyango-Tumbes mediante el uso de herramientas geoespaciales.

METODOLOGÍA

ÁREA DE ESTUDIO

La región de Puyango-Tumbes, que se extiende por territorios de Ecuador y Perú, es célebre por su extraordinaria biodiversidad y la existencia de ecosistemas singulares, como los bosques secos tropicales y los manglares (Figura 1). Estos ecosistemas son extremadamente importantes como representación de biodiversidad, gracias a la elevada concentración de especies endémicas y en peligro de extinción habitan en los mismos (Myers et al., 2000). Sin embargo, esta biodiversidad se encuentra bajo amenaza a causa de actividades las actividades antrópicas como la deforestación, la expansión agrícola y la urbanización, lo que ha llevado a una severa alteración de los hábitats naturales, por cuanto surge la necesidad de establecer parámetros de conservación internacionales entre ambos países (Wright, 2005).

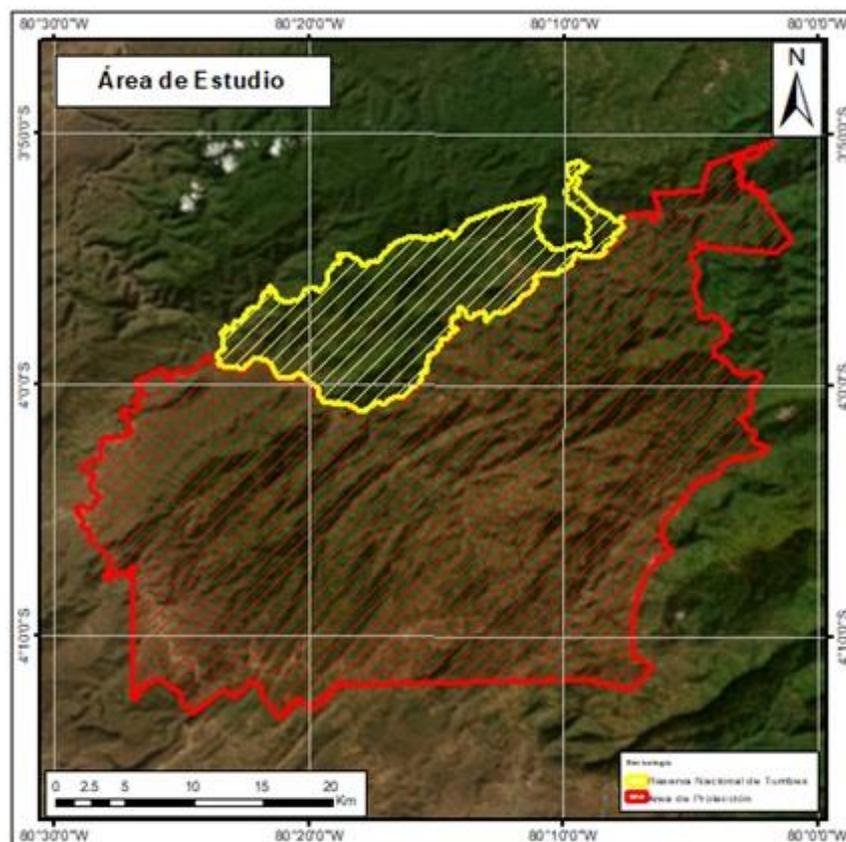


Figura 1. Área Protegida Puyango Tumbes.

Tipos de vegetación

La zona de Puyango-Tumbes tiene una gran variabilidad de tipos de vegetación que van desde los bosques secos tropicales hasta manglares en la zona baja. Muchas de las especies se encuentran vulnerables, amenazadas, o en peligro de extinción. La Tabla 2 muestra algunas de estas especies que se encuentran amenazadas por la deforestación (IUCN, 2021), minería ilegal y crecimiento urbano.

Tabla 2. Tipos de vegetación

Tipo de Vegetación	Ubicación en la Zona Puyango-Tumbes	Especies Endémicas	Estado de Conservación
Bosques Secos Tropicales	Principalmente en las zonas bajas y secas del área, especialmente en la región del Tumbes (Perú) y en la parte sur de Ecuador.	<i>Crescentia cujete</i> , <i>Bursera graveolens</i>	Vulnerable
Bosques Montanos Secos	En las zonas altas de las colinas del Puyango, especialmente en áreas cercanas a la frontera entre Ecuador y Perú.	<i>Quercus spp.</i> , <i>Anadenanthera colubrina</i>	Casi Amenazada
Bosques Húmedos Montanos	Localizados en las zonas más altas de la cuenca del río Puyango, donde la humedad es más constante.	<i>Podocarpus oleifolius</i> , <i>Clusia spp.</i>	En Peligro
Bosques de Pino	En zonas elevadas cercanas a la frontera sur de Ecuador y áreas cercanas a la región de Loja.	<i>Pinus radiata</i>	Bajo riesgo
Matorrales y Arbustos	En áreas de transición entre los bosques y las zonas secas, especialmente en las partes más áridas de la región.	<i>Encilia americana</i> , <i>Mimosa spp.</i>	No está en peligro
Manglares	En las zonas cercanas a la costa, especialmente en la región del río Tumbes y su desembocadura.	<i>Rhizophora mangle</i> , <i>Avicennia germinans</i>	Vulnerable

Fuente. Cristian Robayo, 2024

Tipos de fauna

Como lo indica la tabla 3, la conservación de la biodiversidad en Puyango Tumbes se ve amenazada y es crucial buscar opciones de protección para estas especies, muchas de las cuales están amenazadas por la deforestación y la caza furtiva (IUCN, 2021).

Tabla 3. Tipos de fauna.

Especie	Nombre científico	Estado de conservación
Perico Macareño	<i>Forpus xanthops</i>	Endémica vulnerable
Puma	<i>Puma concolor</i>	No endémica Preocupación Menor
Zorro de Sechura	<i>Lycalopex sechurae</i>	No endémica vulnerable
Guayaquil Squirrel	<i>Sciurus stramineus</i>	No endémica Preocupación Menor
Culpeo	<i>Lycalopex culpaeus</i>	No endémica Preocupación Menor
Gato Montés Andino	<i>Leopardus jacobita</i>	No endémica vulnerable
Venado Cola Blanca	<i>Odocoileus virginianus</i>	No endémica Preocupación Menor
Boa de las Sabanas	<i>Boa constrictor ortonii</i>	No endémica Preocupación Menor
Zorro de Sechura	<i>Lycalopex sechurae</i>	No endémica vulnerable
Venado Cola Blanca	<i>Odocoileus virginianus</i>	No endémica Preocupación Menor
Armadillo de Nueve Bandas	<i>Dasybus novemcinctus</i>	No endémica Preocupación Menor
Colibrí Amazilia	<i>Amazilia amazilia</i>	No endémica Preocupación Menor

Fuente. Cristian Robayo, 2024

Actividades económicas

La actividad agrícola en la región se distingue por el cultivo de productos esenciales, siendo el maíz duro uno de los más destacados (MAGAP, 2015). Para antes del 2010 el rendimiento de maíz era aproximadamente de 40 quintales por ha, ahora se obtiene un rendimiento de 160 – 200 quintales de maíz por hectárea. En Puyango, el café posee denominación de origen y representa un importante sector productivo, según (Robles, 2015) explora la evolución de la producción cafetera en Puyango, que ha experimentado variaciones notables en los últimos años. En el cantón Zapotillo, provincia de Loja, la actividad agrícola se distingue por el cultivo de arroz en las áreas más baja, además de cultivos de frutas como mango, frutos cítricos y banano también son significativos, ocupando una porción considerable de la superficie dedicada a la agricultura. (Sánchez, 2023).

La ganadería se basa en la crianza de ganado bovino destinado a la producción de carne y leche, donde se reconocieron tres tipos de bovinos criollos en la zona. En el cantón de

Zapotillo, la actividad económica principal es la crianza de caprinos, la crianza de cabras se ha vuelto un hábito común en esta zona, debido a la adaptación a las características del bosque seco tropical. La producción es extensiva, utilizando el pastoreo en zonas de bosque seco, particularmente durante la estación de lluvias. (Sánchez, 2023).

La actividad minera en la región brinda empleo a alrededor de 2,000 personas, la minería artesanal constituye el 70% de la actividad minera local, contando con 150 permisos vigentes para la extracción de oro aluvial y materiales de construcción. Además, la minería a pequeña escala se desarrolla en 20 concesiones registradas, dedicadas a la explotación de canteras y yacimientos metálicos (Rivera, 2014).

MÉTODOS

El enfoque metodológico de este estudio busca la conservación transfronteriza del bosque seco tropical en Puyango Tumbes, un ecosistema de notable importancia debido a su rareza y elevado nivel de endemismo. Este tipo de bosque, que se propaga por la costa pacífica de Ecuador y Perú, acoge una variedad única de flora y fauna que se ha adaptado a condiciones de sequía. Dentro de sus especies más emblemáticas sobresalen el algarrobo (*Prosopis pallida*) y el ceibo (*Ceiba trichistandra*), junto con una diversa fauna que incluye mamíferos, aves, reptiles y anfibios, todos indispensables para preservar la estabilidad de este hábitat (Wright, 2005).

En Puyango-Tumbes, los corredores ecológicos son esenciales para la preservación de la biodiversidad, puesto que vinculan partes de hábitats naturales que se encuentran aislados (Bennett, 2003). Los corredores ecológicos desempeñan un rol vital al simplificar la vinculación entre los bosques tropicales secos y los manglares. Este punto es particularmente relevante en una zona donde la división del hábitat ha sido significativa, debido a la deforestación y al crecimiento de la agricultura (Laurance et al., 2014).

Teledetección

Para este estudio se emplearon imágenes capturadas por el sensor Sentinel-2 que por sus propiedades técnicas son ideales para investigaciones de vegetación (Fletcher, 2012). Se utilizaron las siguientes bandas espectrales de Sentinel-2 MSI (MultiSpectral Instrument), seleccionadas por su relevancia en estudios de vegetación (ESA, 2013) y su capacidad para detectar variaciones en el contenido de clorofila, estructura del dosel y contenido de agua en la vegetación (Frampton, 2013).

Adicionalmente, se realizó la Corrección Atmosférica necesaria y utilizando SNAP Desktop desarrollado por la Agencia Espacial Europea (ESA), en combinación con la herramienta Sen2Cor Processor. Esta herramienta permite aplicar los algoritmos requeridos para convertir la reflectividad aparente (TOA) en reflectividad de la superficie terrestre (BOA) (Aguilar Arias, Mora Zamora, and Vargas Bolaños 2015). De acuerdo con Li et al. (2018) es posible representar la reflectividad aparente (TOA) de la siguiente manera:

$$\rho_{TOA}(\theta_S, \theta_V, \emptyset) = T_g^{OG}(\theta_S, \theta_V) T_g^{OZ}(\theta_S, \theta_V, C_{OZ}) * \left[\rho_R + (\rho_{R+A} - \rho_R) T_g^{WV}(\theta_S, \theta_V, 0.5 C_{WV}) + \frac{\rho_{BOA}}{1 - S_{R+A} \rho_{BOA}} T_{R+A}(\theta_S, \theta_V) T_g^{WV}(\theta_S, \theta_V, C_{WV}) \right] \quad (01)$$

Donde θ_S y θ_V son los ángulos solar y cenital, respectivamente, \emptyset es el ángulo relativo azimutal, definido como la diferencia entre los ángulos solar y azimutal observado, T_g designa la transmisión gaseosa por vapor de agua (WV), ozono y otros gases (OG), C_{WV} y C_{OZ} son los contenidos de WV y ozono, respectivamente, ρ_R representa la reflectancia de la atmósfera debido a la dispersión molecular Rayleigh, ρ_{R+A} representa la

reflectancia de la mezcla de moléculas y partículas de aerosol, T_{R+A} es la dispersión total de transmisión (hacia abajo y hacia arriba) debido a las moléculas y aerosoles, S_{R+A} es el albedo atmosférico esférico, ρ_{BOA} es la superficie de reflectancia a ser reparada por el procedimiento de corrección atmosférica (Li et al. 2018). La superficie de reflectancia puede ser obtenida de la reflectancia TOA como:

$$\rho_{BOA} = \frac{x_{ap} * \rho_{TOA} - x_b}{1 + x_c * (x_{ap} * \rho_{TOA} - x_b)} \quad (02)$$

Donde x_{ap} , x_b , y x_c son los coeficientes que omiten los ángulos geométricos y la salida del código 6SV. Usando estos coeficientes, la reflectancia en la superficie terrestre por píxel puede ser obtenida de la reflectancia TOA medida por el satélite (Li et al. 2018).

Índices Multiespectrales

El Índice de Vegetación Diferencial Normalizado NDVI se utilizó para determinar la cantidad de biomasa y se calcula generando una escala lineal que varía entre -1 y +1. A partir de estos valores, podemos determinar los niveles asociados a diferentes tipos de vegetación, según el valor obtenido (Tucker 1979). El índice está definido como:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (03)$$

Donde:

NIR = Banda Infrarrojo Cercano

RED = Banda del Visible Rojo

Los valores que se obtiene de este índice donde la vegetación está presente en el rango de 0.1 indican menor vigor y valores de hasta 1,0 indican mayor vigor.

Índice de Vegetación Mejorado (EVI)

El Índice de Vegetación Mejorado (EVI) fue desarrollado para corregir las limitaciones del NDVI, especialmente en áreas con alta densidad de vegetación, donde la saturación puede ser un problema. Este índice introduce un factor de corrección atmosférica y es menos sensible a los efectos del suelo y la atmósfera (Huete et al. 2011). El índice EVI está definido como:

$$VI = G \times \frac{(NIR - RED)}{(NIR + C_1 \times RED - C_2 \times BLUE + L)} \quad (04)$$

Donde, NIR es la Banda Infrarrojo Cercano, RED es la Banda del Visible Rojo, $BLUE$ es la Banda del Visible Azul, G es Factor de ganancia (generalmente 2.5), C_1 y C_2 son los Coeficientes de corrección atmosférica (6 y 7.5, respectivamente) y L es el Factor de corrección de suelo (1). Los valores más altos del EVI indican mayor densidad y productividad vegetal.

Índice de Clorofila Roja Extendido (IRECI)

El Índice de Clorofila Roja Extendido (IRECI) es un indicador utilizado para evaluar la cantidad de clorofila en la vegetación, lo que permite estimar el estado de salud y productividad de las plantas. Este índice ha demostrado ser útil en la detección temprana de estrés vegetal y en el monitoreo del crecimiento de cultivos (Delegido, et al., 2013). El RECI es definido como:

$$RECI = \frac{(NIR - RED_{EDGE1})}{(RED_{EDGE2} / RED)} \quad (05)$$

Donde, *NIR* es la Banda Infrarrojo Cercano, *RED_{EDGE1}* y *RED_{EDGE2}* son las Bandas del Borde Rojo y *RED* es la Banda Visible Rojo. Valores más altos de IRECI indican una mayor presencia de clorofila y, por lo tanto, mayor vigor y productividad vegetal.

Índice de Pigmentación de la Senescencia (SIPI)

El Índice de Pigmentación de la Senescencia (SIPI) es un indicador diseñado para evaluar la relación entre los carotenoides y la clorofila en la vegetación, proporcionando información sobre el estado de estrés o senescencia de las plantas (Peñuelas, 1995). El índice SIPI se define como:

$$SIPI = \frac{(NIR - BLUE)}{(NIR - RED)} \quad (06)$$

Donde, *NIR* es la banda de infrarrojo cercano, *BLUE* es la banda visible azul y *RED* es la banda visible rojo. Valores más altos de SIPI indican un mayor contenido de carotenoides en relación con la clorofila, lo que puede señalar estrés vegetal, envejecimiento o deficiencias nutricionales.

El proceso del tratamiento de las imágenes satelitales está definido en la Figura 2 y describe el uso de las imágenes satelitales utilizadas y los índices utilizados para determinar el estado de la vegetación del área propuesta

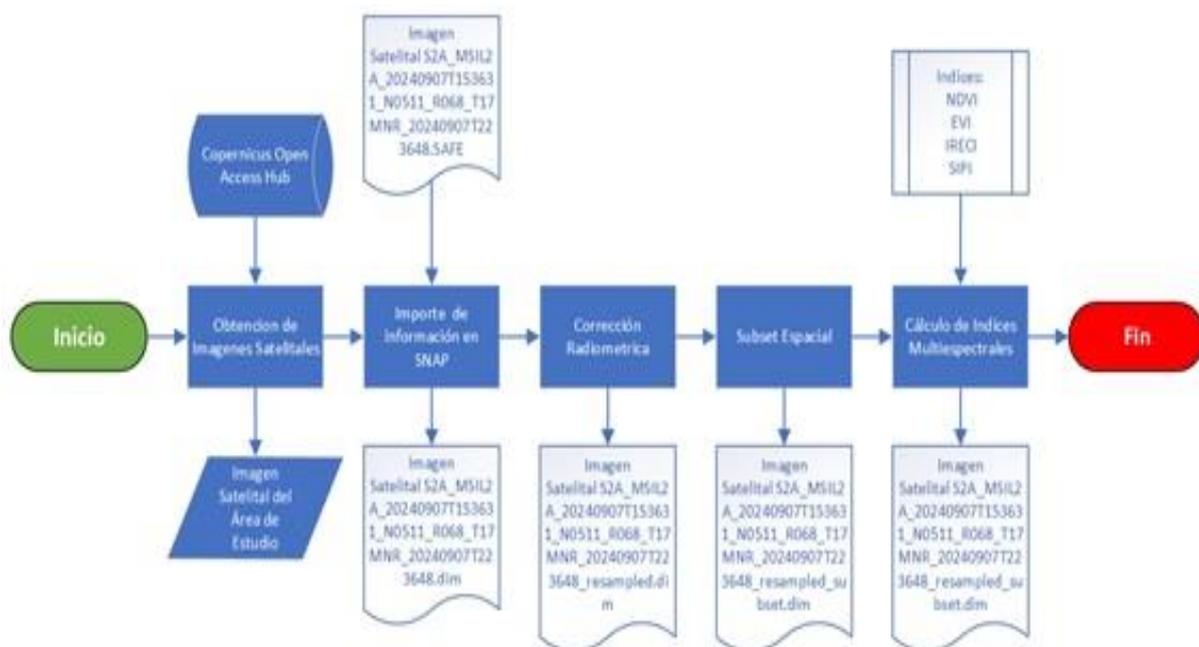


Figura 2. Procesamiento de imágenes satelitales.

Clasificación de Imágenes Satelitales

El proceso de clasificación se desarrolló utilizando un conjunto de entrenamiento compuesto por polígonos de muestreo por clase, seleccionados mediante un muestreo manual visual según las clases correspondientes. Los datos de entrada incluyeron las bandas espectrales

B2-B8A de Sentinel-2 y los índices de vegetación calculados (NDVI, EVI, SIPI e IRECI), optimizando así la discriminación entre clases de cobertura vegetal.

Método de Clasificación Random Forest

El estudio utilizó algoritmo Random Forest (RF) que es un método de aprendizaje automático que se basa en árboles de decisión (Breiman, 2001). Este método forma parte del conjunto de modelos de ensamblado, en particular de los bosques aleatorios e implica la fusión de varios árboles de decisión, lo que incrementa tanto la exactitud como la disminución de la variabilidad del modelo. Cada árbol se elabora empleando un conjunto aleatorio de datos de entrenamiento, utilizando el método denominado bootstrap aggregating (bagging). Este procedimiento contribuye a reducir el sobreajuste y a incrementar la habilidad del modelo para generalizarse (Pal, 2005).

El proceso de clasificación supervisada utilizando Random Forest incluye la selección de muestras aleatorias, la construcción de árboles de decisión. En cada nodo del árbol, se escoge un subconjunto aleatorio de variables predictoras para identificar la mejor manera de dividir los datos. Se continúa con la votación de los árboles que se define como la emisión de una predicción de forma independiente y, para obtener el resultado final, se recurre a un proceso de votación mayoritaria en el caso de clasificación o al cálculo del promedio en el caso de regresión. Finalmente, se evalúa y valida el modelo utilizando diversas métricas, como la matriz de confusión, la exactitud general, el coeficiente Kappa y la importancia de las variables espectrales (Gislason, 2006). El modelo define que cada árbol en el bosque se entrena con un conjunto de datos de entrenamiento.

$$D = \{(x_i, y_i)\}_{i=1}^n \quad (07)$$

Donde x_i representa las características espectrales de cada píxel y y_i su clase. En cada nodo, se selecciona aleatoriamente un subconjunto de variables para determinar la mejor división según una métrica de partición, como el índice de Gini que se define como:

$$G(s) = 1 - \sum p_j^2 \quad (08)$$

Donde p_j es la proporción de muestras de la clase j en el nodo. La predicción final de un nuevo dato x se obtiene mediante votación por mayoría de los B árboles entrenados. La predicción final se define como:

$$\hat{y} = \text{modo}\{h_1(x), h_2(x), \dots, h_B(x)\} \quad (09)$$

Se configuraron el modelo con 100 árboles de decisión y una profundidad máxima de 20 niveles por árbol. La validación de la clasificación se realizó mediante una matriz de confusión, utilizando un conjunto independiente de datos para la validación mismo que representa el 30% de los puntos de muestreo.

Estimación de Biomasa

La biomasa aérea total es el peso seco del material vegetal presente en los árboles que tienen un diámetro a la altura del pecho (DAP) superior a 10 cm. Este valor corresponde a diversas partes del árbol, incluidos los troncos, la corteza, las ramas y las hojas. Para calcular la biomasa aérea de un bosque, es necesario aplicar una fórmula basada en un modelo alométrico, que utiliza datos del DAP igual o superior a 10 cm, así como la densidad de la madera. (Chave et al., 2014). El modelo de estimación de biomasa se define como:

$$BAT = \rho * \exp(-1,499 + 2,148 * \ln(\text{DAP}) + 0,207 * (\ln(\text{DAP}))^2 - 0,0281 * (\ln(\text{DAP}))^3) \quad (10)$$

Se utilizaron estudios realizados por la Universidad Nacional de Loja y la Universidad Técnica Particular de Loja de donde se obtuvieron nueve investigaciones que ofrecen información relevante acerca de biomasa referencial e inventarios forestales referenciales para el área de estudio. Se seleccionaron 13 estudios realizados entre 2013 y 2024 y en la elección de la información, se consideraron aspectos como la importancia de los datos aportados por cada estudio y la utilidad de sus hallazgos en el marco de esta investigación.

Se georreferenciaron las parcelas identificadas en la revisión bibliográfica utilizando las coordenadas reportadas en los estudios analizados, obteniendo un total de 26 parcelas útiles como muestra de biomasa. La biomasa promedio de las parcelas fue de 62,75 Ton/ha con un rango entre 3,24 a 185,78 Ton/ha.

Índices Multiespectrales por Parcela

Para obtener los índices multiespectrales por parcela, se desarrolló un código en la plataforma Code Editor de Google Earth Engine (GEE). Este código tiene el objetivo de procesar las imágenes satelitales de la colección L2A del satélite Sentinel-2 para calcular índices multiespectrales en un área específica delimitada por un polígono. Adicionalmente, se garantiza que las imágenes cubran completamente el área del polígono y que el porcentaje de nubosidad sea inferior al 30%, asegurando así la calidad de los datos utilizados. A partir de las imágenes, se extraen y calculan los índices multiespectrales. Estos índices se añaden como nuevas bandas a la imagen original, lo que permite un análisis más completo y detallado.

Posteriormente, se calculan estadísticas para cada uno de los índices y bandas dentro del área del polígono utilizando reductores de Google Earth Engine, que permiten calcular medidas como la media, la mediana y la desviación estándar a partir de las distribuciones espectrales de los píxeles.

Análisis de Correlación de Variables – Método Stepwise

Se utilizó el método de regresión stepwise y se desarrolló un código en lenguaje M que se ejecuta en MATLAB. Este código permitió la selección automática de los índices y bandas más relevantes para el ajuste del modelo final de estimación de biomasa. Aunque es útil para reducir la complejidad del modelo y mejorar su interpretabilidad, el método Stepwise puede ser sensible a la multicolinealidad y tender a sobreajustarse a los datos (Whittingham, 2006; Babyak, 2004).

$$X_i = \alpha_0 + \alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2 + \dots + \alpha_{i-1} X_{i-1} + \alpha_{i+1} X_{i+1} + \dots + \alpha_p X_p \quad (11)$$

Para evitar la multicolinealidad, se estimó el Factor de Inflación de Varianza (VIF) entre las variables predictoras. Para cada variable X_i , se ajusta un modelo de regresión lineal donde X_i , el modelo se expresa de la siguiente forma:

$$VIF_i = \frac{1}{1 - R_i^2} \quad (12)$$

Donde, R_i^2 es el coeficiente de determinación del modelo de regresión para X_i . Un VIF alto (mayor que 10) indica que X_i está altamente correlacionada con las demás variables predictoras, lo que puede afectar la estabilidad del modelo.

Modelo de Estimación de Biomasa

Se consideran dos modelos matemáticos principales que examinan la relación entre las variables predictoras y la biomasa. El primero de ellos es el análisis de correlación, que evalúa la relación lineal entre las variables. El segundo modelo es la regresión lineal múltiple, que se utiliza en la regresión paso a paso (stepwise regression) para seleccionar las variables más relevantes.

Se comparó varios métodos de regresión múltiple para determinar cual de ellos se ajusta mejor a los datos reales de campo incluyendo la regresión lineal, polinomial, sinusoidal y de Fourier, todos ellos con beneficios y restricciones dependiendo del tipo de datos. El método de Fourier fue el que mejor se ajustó al modelo y fue utilizado para la determinación de la biomasa. El modelo puede ser expresado como expresión de la biomasa en relación a otras variables predictivas.

$$= a_0 + \sum_{k=1}^N [a_k \cos(kx) + b_k \sin(kx)] + \dots \quad (13)$$

La regresión de Fourier es especialmente útil para representar datos con comportamiento periódico complejo y es común en el análisis espectral de series temporales (Brillinger, 2001). Para cada modelo, se modifica una regresión lineal mediante la función *fitlm*, se efectúan pronósticos y se determinan métricas de evaluación como el coeficiente de determinación R^2 , el error medio cuadrático (RMSE), el error medio absoluto (MAE) y el estándar de información de Akaike (AIC).

Valoración de la Captura de Carbono

La biomasa estimada se multiplica por un factor de conversión de carbono, generalmente asumido como el 50% del peso seco de la biomasa. El modelo de valoración puede ser expresado de la siguiente forma:

$$CBT = BT * 0,47 \quad (14)$$

Donde CBT es el carbono almacenado en la biomasa y BT es la biomasa total.

De acuerdo con Jumbo et al. (2018), el almacenamiento de una tonelada de carbono equivale a la captura de 3,67 toneladas de dióxido de carbono atmosférico (CO_2). La transformación a toneladas de CO_2 puede ser expresado como:

$$CO_{2eq} = CBT * 3,67 \quad (15)$$

Donde CO_{2eq} es el dióxido de carbono equivalente, CBT es el carbono almacenado en la biomasa y el factor de conversión de carbono a toneladas de CO_2 .

Balance Hídrico

El balance hídrico constituye un marco metodológico fundamental para la cuantificación y análisis de los flujos y reservas de agua en un sistema hidrológico definido. Para el cálculo del balance hídrico se utilizó el modelo utilizado por Cruz (2002).

$$Rec = Pp - (E + ETO) \quad (16)$$

Donde *Rec* es la recarga del acuífero de la cuenca medido en $m^3/año$; *Pp* es la precipitación anual de la cuenta ($m^3/año$); *E* es la escorrentía superficial anual de la cuenta ($m^3/año$), y *ETO* es la evapotranspiración real anual ($m^3/año$). Mediante el uso de la plataforma Google Earth Engine se obtuvieron los valores de Precipitación Anual Media y Temperatura Anual Media, usando los sensores CHIRPS Y MODIS

Para el cálculo de la precipitación anual total (Pp total) se requiere determinar el volumen total de precipitación de la zona de estudio, de acuerdo con los PDOT de los cantones pertenecientes a la zona de estudio (GAD-Pindal, 2023), los valores de precipitación media varían entre los 100 mm y 1500 mm.

$$Pp = V_{pt} * A \quad (17)$$

Donde, V_{pt} es el volumen total de la precipitación (mm) y A es el área de estudio (m^2).

Para determinar el volumen de escurrimiento es necesario conocer el factor de escurrimiento de la zona en estudio (Tabla 4) de acuerdo con las características topográficas del territorio.

Tabla 4. Características topográficas del área de estudio

Topografía/Vegetación	Textura del Suelo (mm)		
	Gruesa	Media	Fina
Bosque			
Plano (0-5% pendiente)	0,10	0,30	0,40
Ondulado (5-10% pendiente)	0,25	0,35	0,50
Escarpado (10-30% pendiente)	0,30	0,40	0,60
Muy escarpado (>30% pendiente)	0,32	0,42	0,63
Pastizal			
Plano (0-5% pendiente)	0,15	0,35	0,45
Ondulado (5-10% pendiente)	0,30	0,40	0,55
Escarpado (10-30% pendiente)	0,35	0,45	0,65
Muy escarpado (>30% pendiente)	0,37	0,47	0,68
Agricultura			
Plano (0-% pendiente)	0,30	0,40	0,50
Ondulado (5-10% pendiente)	0,50	0,6	0,70
Escarpado (10-30% pendiente)	0,50	0,53	0,70
Muy escarpado (>30% pendiente)	0,60	0,74	0,80

Fuente. Cristian Robayo, 2024

Según los PDOT (2023) de los cantones Puyango, Zapotillo y Pindal la mayor parte del área corresponde a suelos franco-limosos y franco arenosos, por lo tanto, la textura del suelo se ubica en una textura entre media y gruesa, además la topografía del terreno posee una pendiente media de 11.6% por lo que se determina que es un suelo escarpado, tal como se muestra en el perfil de elevación del área de estudio (Figura 3).

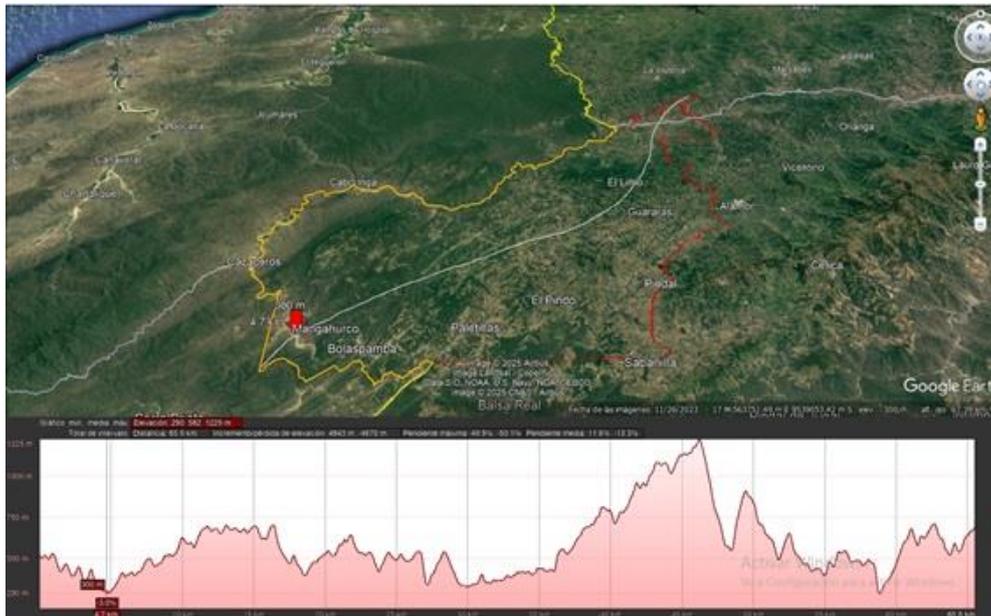


Figura 3. Perfil de elevación del área de estudio

Adicionalmente, siendo la agricultura la actividad económica principal y a su vez bosque la mayor cobertura de suelo se toma como factor de escorrentía el promedio para ambos usos de suelo, es decir 0,425 (Lemma et al., 2018), mismo que se reemplazará en la siguiente ecuación.

$$E = A * C * Pm \quad (18)$$

Donde, E es la escorrentía superficial (m^3), A es el área de interés (m^2), C es el coeficiente de escorrentía y Pm es la precipitación anual media (mm).

Finalmente se determinó el volumen de evapotranspiración media anual mediante el volumen de evapotranspiración media anual mediante la aplicación del modelo utilizado por Piñeda (2006).

$$ETO = \frac{p}{\sqrt{9 + \frac{p^2}{L^2}}} \quad (19)$$

Donde, ETO es la evapotranspiración real (mm), p es la precipitación media anual (mm), T es la temperatura media anual ($^{\circ}C$) y L es el factor de evaporación. El factor de evapotranspiración se obtiene a partir de :

$$L = 300 + 25 * T + 0,05 * T^3 \quad (20)$$

Donde T es la temperatura media anual en $^{\circ}C$. Finalmente, la evapotranspiración media anual se obtiene a partir de la diferencia entre la precipitación total anual y el escurrimiento multiplicado por el factor de evapotranspiración. Siendo el factor de evapotranspiración el resultado de la división entre la evapotranspiración real sobre la media de precipitación anual. Siendo el factor de evapotranspiración el resultado de la división entre la evapotranspiración real sobre la media de precipitación anual.

$$ETA = (Ppt - E) * L \quad (21)$$

De igual forma se determinó la zona de importancia hídrica ZIH que se obtiene a partir del uso y cobertura del suelo. De acuerdo con el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAG, 2020) se determinó el uso y cobertura del suelo en la zona de estudio (Tabla 5).

Tabla 5. Uso y cobertura de suelo del área de estudio

Uso y Cobertura	Área (Ha)	Porcentaje %
Cuerpo de agua	1224,26	1
Información no disponible	354,16	0
Cultivos y pastizales	42988,27	38
Tierra arbustiva y herbácea	5050,71	4
Bosque nativo	63958,83	56
Tierra sin cobertura vegetal	160,71	0
Zona antrópica	171,02	0

Fuente. Cristian Robayo, 2024

La cobertura y uso de suelo servirá para determinar el Índice de Protección Hidrológica como se observa en la Tabla 6.

Tabla 6. Índice de protección hidrológica

Nº	Tipo de cobertura vegetal / Uso actual del suelo	Índice de protección hidrológica (IPH)	Importancia para proveer el Servicio Ambiental Hídrico (SAH)
1	Zona Poblada (ZU)	0,00	Muy Baja / Nula
2	Zona Agrícola (C)	0,27	Baja
3	Pastizal (P)	0,39	
4	Pasto más matorral (P+Ma)	0,45	Media
5	Zona Agroforestal (Za)	0,49	
6	Plantación forestal (Pf)	0,70	Alta
7	Matorral (Ma)	0,80	
8	Bosque natural (Bn)	1,00	Muy Alta
9	Páramo arbustivo (Pa)	1,00	

Fuente. Cristian Robayo, 2024

Para determinar el Índice de Protección Hídrica se aplicará el siguiente modelo

$$IPH_{Total} = \sum_{i=1}^n IHP_i * \% Cobertura_i \quad (22)$$

Donde el IPH es el índice de protección hídrica total, IPH_i es el índice de protección hídrica para la cobertura i , y $\%Cobertura_i$ es el porcentaje de superficie de la cobertura i .

Adicionalmente es necesario determinar los costos de oportunidad de las actividades económicas que compiten con el ZIH. Según el PDOT de los cantones Zapotillo, Puyango y Pindal las actividades principales se basan en la agricultura, sobre todo en la producción de Café y Maíz y son tomados como costos de oportunidad.

Según el acuerdo ministerial 046 – 2023 del Ministerio de Agricultura y Ganadería se oficializa el precio del quintal de maíz valorándolo en \$16,5 por quintal de maíz, mientras que el quintal de café procesado en la zona de Puyango se está vendiendo entre los \$250 a \$300 (MAG, 2024).

Finalmente se puede obtener el valor de la productividad hídrica de la zona de importancia hídrica (ZIH) o costos de captación del agua a través del siguiente modelo de valoración:

$$VH = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\alpha_i B_i A_{b_i}}{O C_i} \right) \quad (23)$$

Donde, VH es el valor de captación hídrica de la zona de importancia hídrica (ZIH) en $\$/m^3$, α_i es la importancia de la cobertura de la ZIH en la cuenca i en función del recurso hídrico en porcentaje (%), B_i es el costo de oportunidad de la actividad que compite con la ZIH en la cuenca ($\$/ha/año$), A_{b_i} es el área de la ZIH en la cuenca, y OC_i es el volumen del agua captada por la ZIH de la cuenca. La determinación del valor del beneficio del servicio hídrico es la multiplicación Rec que es la recarga del acuífero por el valor de productividad hídrica (VH).

RESULTADOS

Los resultados del análisis realizado en el presente estudio muestran que la creación de un parque binacional en la región de Puyango-Tumbes es viable y necesario. El área seleccionada que apenas el 27% de la vegetación es todavía bosque nativo de un total de 113 mil hectáreas (Tabla 8).

El análisis de las imágenes satelitales Sentinel2 utilizando Random Forest, logró una precisión de predicción de 70,57%, con un RMSE de 1,507 y un coeficiente de 0,716, reflejando una precisión aceptable, pese a la complejidad del área. A nivel de clases, los afloramientos rocosos y suelos descubiertos alcanzaron las mayores precisiones (95,17% y 95,50%, respectivamente), mientras que el bosque y las áreas agrícolas lograron 90,60% y 89,00%. Las zonas urbanas, aunque con alta precisión (93,85%), mostraron la menor correlación (0,315), sugiriendo confusión en su clasificación debido a su heterogeneidad espectral.

Índice de conservación

El resultado de las imágenes satelitales permitió establecer el uso y cobertura de suelo (Tabla 7) y estos revelan que los terrenos desnudos o arbustivos son los que ocupan la mayor superficie, constituyendo el 36% del total del área examinada. Esto debido a que hay suelos con escasa vegetación o en proceso de regeneración. Adicionalmente, tanto las áreas forestales como las agrícolas constituyen el 27% de la superficie, cada categoría, lo que refleja un equilibrio entre la conservación de ecosistemas naturales y la utilización del terreno para actividades de producción agrícola. Los cuerpos acuáticos constituyen el 8% de la superficie. Finalmente, solo el 3% del total de la superficie corresponde al uso de terreno para zonas urbanas, lo que indica un grado de urbanización bajo en comparación con otras áreas de cobertura.

Tabla 7. Coberturas del suelo

Cobertura	Área (Ha)	Porcentaje (%)
Suelo Desnudo / Arbustivo	40866,26	36
Bosque	30729,81	27
Cuerpos de Agua	8982,42	8
Suelo Agrícola	30412,38	27
Urbano	2917,08	3
Área de Protección	113907,95	100

Fuente: Cristian Robayo, 2024

La degradación de los bosques y ecosistemas naturales se lo puede apreciar en la Figura 4 mostrando ya solo remanentes de bosques nativos y parches de bosques rodeados de parcelas de producción agrícola

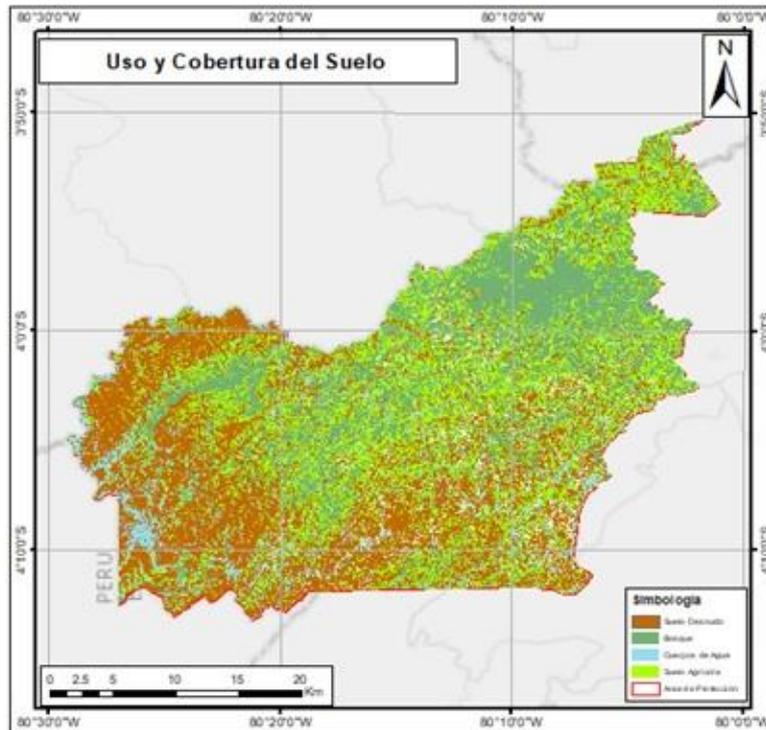


Figura 4. Clasificación de la imagen satelital (Uso y Cobertura de suelo)

Los ecosistemas forestales del sur del Ecuador representan una notable diversidad de formaciones vegetales que se distribuyen a lo largo de diferentes pisos altitudinales y condiciones bioclimáticas, estas formaciones vegetales (Figura 5), que van desde bosques bajos y arbustales hasta bosques siempreverdes, forman un mosaico ecológico único caracterizado por diferentes características como precipitación, fenología y composición florística y su recuperación es crítica. La tabla 8 presenta una caracterización detallada de cinco ecosistemas forestales principales, destacando sus características distintivas y patrones ecológicos.

Tabla 8. Ecosistemas en el área de estudio

Ecosistema	Área (Ha)	Porcentaje %
Bosque bajo y arbustal deciduo de tierras bajas del jama-zapotillo	167,99	0,15
Bosque deciduo de tierras bajas del jama-zapotillo	17907,06	15,77
Bosque deciduo piemontano del catamayo-alamor	18295,24	16,11
Bosque semideciduo piemontano del catamayo-alamor	19624,42	17,28
Bosque siempreverde estacional piemontano del catamayo-alamor	11673,03	10,28
No identificado	45897,17	40,41
Total	113564,9	100,00

Fuente: Cristian Robayo, 2024

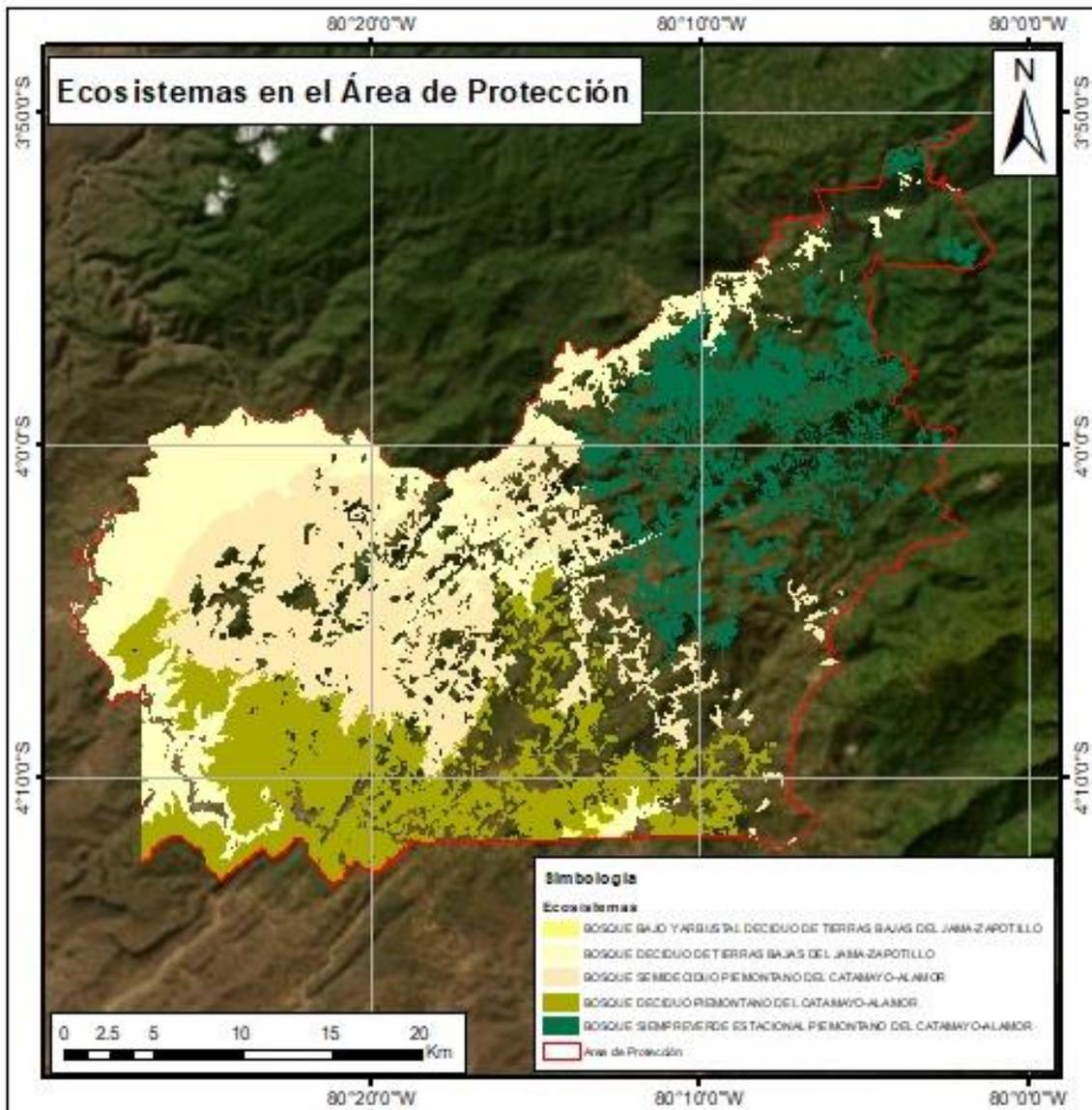


Figura 5. Ecosistemas existentes en el área de estudio

Los ecosistemas fragmentados secos del área propuesta para la creación del parque binacional Puyango-Tumbes presentan especies de animales y plantas en peligro de extinción o vulnerables. La creación del área protegida en la parte ecuatoriana permitirá conservar a muchas especies de biodiversidad y recuperar a las especies más vulnerables y endémicas de estos ecosistemas.

El área propuesta cumple con los indicadores de conservación en aspectos como la biodiversidad, la conectividad ecológica, la cobertura forestal, y los servicios ecosistémicos, entre otros (Tabla 9).

Tabla 9. Tabla de índices de conservación

INDICADORES NACIONALES		Cumple	Cumple parcialmente	No cumple
Localización geográfica, límites y superficie del área de conservación propuesto.		X		
Aspectos Físicos	Caracterización del recurso suelo.	X		
	Caracterización del recurso agua.	X		
	Caracterización del recurso aire.	X		
Aspectos Biológicos	Descripción del estado de los ecosistemas.	X		
	Descripción del estado de la cobertura vegetal y uso del suelo.	X		
	Descripción del estado de la flora y fauna.	X		
	Identificación de valores de conservación.	X		
	Identificación de servicios ambientales.	X		
Aspectos Socioeconómicos	Descripción de la situación de la población local (aspectos demográficos).	X		
	Enfoque de género e interculturalidad.	X		
	Enfoque económico y acceso a servicios básicos.	X		
	Sistemas productivos.	X		
Anexos	Mapas, fotografías, encuestas, convenios y actas de compromiso	X		

Fuente: Cristian Robayo, 2024

Balance Hídrico

El análisis de los aspectos socioeconómicos mostró que la actividad principal es la agricultura en la zona y por ende su dependencia de agua. Los bosques deciduos característicos del área propuesta tienen precipitaciones entre 500 y 1800 mm de precipitación anual,

mostrando un déficit hídrico significativo. Toda el área propuesta tiene un promedio de precipitación de 2380,06 mm al año con una temperatura promedio de 23,8 °C.

Los datos meteorológicos fueron obtenidos del Satélite Chirps y NOAA y se pudo obtener la cantidad de agua almacenada en el suelo. El procedimiento descrito en la metodología se inició con la estimación de la precipitación total anual convirtiendo el valor de la precipitación anual media a metros, y a partir de este valor de 2,38 m. se estimó valor de precipitación anual total en m³ con un volumen de 2.702.912.700.6 m³ de agua. Para el coeficiente de escorrentía se determinó un valor de 0,425, dato obtenido de la Tabla (8) según las características de cobertura y topografía del terreno, al aplicarlo a la ecuación (19) se obtuvo un valor total de 1.152.208.025,89 m³ como escurrimiento medio anual.

Para determinar la evapotranspiración se obtuvo primero el factor de evapotranspiración tomando en cuenta la temperatura media anual del año 2024 y fue de 1569,06, factor que permitió estimar el volumen de evapotranspiración de 707,99 m³ y la evapotranspiración anual de 463.717.625,1 m³/año. Finalmente, al reemplazar todos los valores en modelo descrito en la metodología se obtiene una oferta hídrica de 1.095.152.056,98 m³/año para el área de estudio.

Costos de oportunidad

La captación de agua en este estudio proviene de la precipitación existente en el páramo andino. Debido a la baja evapotranspiración y a la estructura abierta y porosa del suelo, la capacidad de retención de agua es elevada. Para calcular este valor, se consideró el índice de protección hidrológica (IPH), el cual se determina en función de las características de la cobertura vegetal y el uso actual del suelo. En este caso, Bosque Nativo, seguido por Cultivos y Pastizales, por lo que presentan un IPH de 0,72.

Para la obtención de los costos de oportunidad del uso del suelo, se utilizó información del PDOT de Puyango. En el área de estudio existen un total de 1124,45 ha dedicadas a la producción de café, además de 21527,68 ha dedicadas a la producción de maíz, con una producción de aproximadamente 43 quintales por hectárea para café y 60 quintales por hectárea de maíz (PDOT-PUYANGO, 2021). Los costos de oportunidad se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10. Costo de oportunidad

Cultivo	Ha	Rendimiento (qq/Ha/ año)	Valor unitario (\$/qq)	Valor total
Café	1.124,5	43	250,97	\$12.087.879,75
Maíz	21.527,7	60	16,50	\$21.312.406,66
Total				\$33.400.286,41

Fuente: Cristian Robayo, 2024

De modo que el costo de oportunidad de la actividad que compite con la ZIH en la cuenca por año es: \$1.474,49 por hectárea por año.

Valor de la productividad hídrica de la zona de importancia hídrica (ZIH)

El valor de productividad hídrica se determinó reemplazando los valores en la ecuación (23) de modo que:

$$VH = \frac{0,72 * \$1474,49/Ha * 22652,14 Ha}{1095152056,98 m^3}$$

Por lo tanto, el valor por m³ de captación de agua es de VH= US\$ 0,02. La determinación del valor del beneficio del servicio hídrico es:

$$B = 1095152056,98 \text{ m}^3 * 0,02195 \frac{\text{US\$}}{\text{Ha}}$$

$$B = 24.038.587,65 \text{ US\$}$$

Valoración del Servicio de Almacenamiento de Carbono

Tomando en cuenta el valor de la Media Anual para el precio de Carbono, tomando en cuenta resultado de la aplicación de la ecuación 13, para la estimación de Carbono almacenado en la Biomasa, ecuación 15 para el cálculo del Dióxido de Carbono Equivalente, y la ecuación 14 para la valoración económica de la captación de carbono en el área de estudio, tomando en cuenta como valor referencial el precio de 74.96 US\$ por Tonelada almacenada, según el valor de la Media Anual de SEDECO2.

Tabla 11. Valoración del servicio de almacenamiento de carbono.

Biomasa Estimada	Carbono (Ton)	CO2 (Ton)	Valor (US\$)
1685359,79	792119,101	2907077,102	\$217.914.499,57

Por lo tanto, se considera que el valor para la captación de carbono en el área de estudio es de más de 217 millones de dólares americanos US\$ (Tabla 11), siendo el valor unitario por hectárea de 2064.16 US\$ / Ha.

Valor económico total de los BSA

Estimación final del valor económico de los bienes y servicios ambientales de almacenamiento de carbono y agua del área de estudio (Tabla 12).

Tabla 12. Valores económicos del almacenamiento de Carbono y Agua.

Valor económico por almacenamiento de carbono US\$	Valor económico por almacenamiento de agua (US\$)	Valor económico total (US\$)
\$217.914.499,57	\$ 24.038.587.65	\$241.953.087.22

DISCUSIÓN

La aplicación del algoritmo Random Forest para la categorización de las coberturas terrestres ha demostrado un rendimiento sobresaliente, alcanzando una exactitud global del 70,57%, con un RMSE de 1,507 y un coeficiente de 0,716. Los resultados indican una notable precisión en la detección de erupciones rocosas, con un 95,17%, así como en el mapeo de terrenos, que alcanzó el 95,50%. Esto respalda la eficacia del método para describir el territorio de manera confiable.

El análisis multitemporal de índices espectrales reveló que el SIPI surgió como el predictor más relevante, obteniendo un valor de 0,209, seguido por el EVI con 0,160 y el NDVI

con 0,125. Estos hallazgos subrayan la importancia clave de estos índices en la identificación de coberturas vegetales, proporcionando una sólida base para futuras investigaciones sobre el seguimiento de la vegetación en la zona.

El análisis del reparto espacial de las coberturas terrestres reveló un patrón significativo. Predominan los terrenos desnudos o arbustivos, que abarcan el 36% del área total, seguidos de una distribución equilibrada entre bosques y terrenos agrícolas, cada uno representando el 27%. Esta configuración territorial sugiere un delicado equilibrio entre la conservación de ecosistemas naturales y el impulso de actividades productivas.

El estudio de la correlación entre variables espectrales y biomasa mostró que la banda B11 presenta la relación más destacada, con un valor de 0,45986, seguida por la banda B5 (0,38667) y la banda B7 (0,35304). Este hallazgo es especialmente relevante para el cálculo de la biomasa en ecosistemas similares, ofreciendo una base metodológica para futuras investigaciones sobre la cuantificación del carbono.

Finalmente, la comparación de modelos para el cálculo de la biomasa evidenció que el modelo de Fourier proporcionó el ajuste más afinado, con un R^2 de 0,999, estimando una biomasa total de 1.685.359,79 toneladas. Aunque este resultado plantea un riesgo de sobreajuste, establece un punto de referencia crucial para la valoración de los servicios ecosistémicos en la región.

La estimación económica del servicio de captura de carbono, que asciende a US\$235 millones, junto con el valor del servicio de agua de US\$24 millones, destaca la significativa contribución económica de los servicios ecosistémicos en la región. Esta valoración proporciona argumentos sólidos para la implementación de políticas de conservación y gestión sostenible.

El equilibrio hídrico del área analizada, caracterizado por una precipitación media anual de 2.380,06 mm y una provisión de agua de 1.095 millones de m^3 , resalta la importancia del territorio como un área crucial para la retención de agua. Además, el índice de escorrentía de 0,425 indica una capacidad moderada del sistema para almacenar agua.

Los niveles de conservación evaluados muestran un cumplimiento favorable de los criterios nacionales en diversas áreas físicas, biológicas y socioeconómicas, lo que refuerza la relevancia ecológica de la zona y su potencial para la preservación a largo plazo.

Por otro lado, el costo de oportunidad calculado de \$1.474,49 por hectárea anualmente, considerando la producción de café y maíz, se presenta como un indicador económico fundamental para el diseño de estrategias de conservación y para la compensación por servicios ambientales.

Asimismo, la productividad hídrica, fijada en US\$0,02 por m^3 de agua recolectada, se convierte en un elemento esencial para la gestión sostenible de este recurso y para la implementación de sistemas de remuneración por servicios ambientales.

La combinación de tecnologías de teledetección con estudios económico-ambientales ha demostrado ser un enfoque efectivo para una evaluación integral de los servicios ecosistémicos, proporcionando una base científica robusta que respalda la toma de decisiones en la gestión del territorio.

Finalmente, la investigación ofrece un marco metodológico que permite la evaluación de servicios ecosistémicos en ecosistemas similares, integrando de manera efectiva el análisis de imágenes satelitales, el modelado estadístico y la evaluación económica del medio ambiente.

CONCLUSIONES

La región de Puyango Tumbes tiene varios elementos de biodiversidad que se encuentran en peligro de extinción o muy vulnerables como las especies *Podocarpus oleifolius*, *Clusia* spp que se encuentran en peligro y *Crescentia cujete*, *Bursera graveolens* vulnerable. También hay

especies de animales en peligro como el perico macareño *Forpus xanthops*, especie endémica. Desde el punto de vista del índice de conservación, la región abarca varios tipos de bosque desde el bosque siempreverde piemontano hasta el bosque bajo y arbustivo decidual, ecosistemas muy críticos y susceptibles de transición de zonas húmedas a zonas secas y desérticas, especialmente porque están fragmentados. Razón por la cual, la creación del área protegida en la parte ecuatoriana permitirá conservar a muchas especies de biodiversidad y recuperar a las especies más vulnerables y endémicas de estos ecosistemas.

Los argumentos presentados en los resultados sustentan la creación del área de protección, se conservaría 1.09 hectómetros cúbicos de agua, y sus bosques almacenaría 792 mil toneladas de carbono. El valor económico de estos servicios ambientales alcanzaría un poco más de US\$ 241 millones, tomando en cuenta el precio promedio del carbono para el 2024 y el valor del agua en base a los costos de oportunidad de la región. En definitiva, la creación del área protegida se justifica desde el punto de vista ambiental y se sustenta en los valores de los servicios ambientales más importantes.

REFERENCIAS

- Bass M. S., Finer M., Jenkins C. N., Kreft H., Cisneros-Heredia D. F., McCracken S. F., Nigel C.A. Pitman, Englioh P. H., Swing K., Villa G., Di Fiori A., Voigt C. C. and Kunz T. (2010). Global Conservation Significance of Ecuador's Yasuní National Park. *PLoS ONE* 5(1): e8767. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0008767>.
- Bennett, A.F. (1998, 2003). Linkages in the Landscape: The Role of Corridors and Connectivity in Wildlife Conservation. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK. xiv + 254 pp. <https://doi.org/10.2305/iucn.ch.2004.fr.1.en>.
- Bongaarts J. (2019). IPBES, 2019. Summary for Policymakers of the Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. *Population and Development Review* 45 (3): 680–81. <https://doi.org/10.1111/padr.12283>.
- Boyd, J. and Banzhaf S. (2007). What Are Ecosystem Services? The Need for Standardized Environmental Accounting Units. *Ecological Economics* 63 (2–3): 616–26. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.01.002>.
- Breiman, L. (2001). Bosques aleatorios. *Aprendizaje automático*, (45), 5–32. doi:<https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>.
- Buytaert, W. and De Bièvre B. (2012). Water for Cities: The Impact of Climate Change and Demographic Growth in the Tropical Andes. *Water Resources Research* 48 (8): W08503. <https://doi.org/10.1029/2011WR011755>.
- Chape, S., Harrison J., Spalding M. and Lysenko I. (2005). Measuring the Extent and Effectiveness of Protected Areas as an Indicator for Meeting Global Biodiversity Targets. In *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 360: 443–455. Royal Society. <https://doi.org/10.1098/rstb.2004.1592>.
- CISPDR. (2016). PLAN NACIONAL DE LA GESTIÓN INTEGRADA E INTEGRAL DE LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LAS CUENCAS Y MICROCUENCAS HIDROGRÁFICAS DE ECUADOR. Changjiang Institute of Survey Planning Design and Research, Ecuador. https://suia.ambiente.gob.ec/files/MEMORIA%20PLAN%20NACIONAL%20DEL%20AGUA.pdf?utm_source.
- Crespo Nuñez X. L., Monge Amores L. E. and Sancho Zurita J. V. (2023). Uso de La Teledetección Para Calcular El Carbono Secuestrado Por El Bosque Municipal Protegido -Quito. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar* 7 (6): 2333–2346. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i6.8858.
- Cruz S. (2002). Valoración económica del recurso hídrico para determinar el pago por servicios ambientales en la cuenca del río Calán, Siguatepeque, Honduras. *Revista de Biología Tropical*, 3(50): 1051-1062.
- ESA. (2013). Sentinel-2 User Handbook. ESA Standard Document, European Space Agency. https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook

- GAD-Pindal. (2023). Actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial 2023 – 2027. Mancomunidad de Municipalidades del Sur. Pindal. Ecuador. Obtenido de https://www.bing.com/search?q=pdot+pindal&cvid=0b8c7103982947a6b50d87a99c07ef16&gs_lcrp=EgRIZGdlKgYIABBFgDkyBggAEEUYOTIGCAEQABhAMgYIAhAAGEAyCAgDEOkHGpXV0gEINzQ5NGowajSoAgCwAgA&FORM=ANAB01&PC=NMTS
- GAD-Puyango (2023). Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de Puyango, GAD-Puyango, Ecuador.
- GAD-Zapotillo (2023). Actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de GAD Zapotillo, GAD-Zapotillo, Ecuador.
- Gislason, P. (2006). Random Forests for land cover classification. *Pattern Recognition Letters*, 4(27): 294-300.
- Goh E. (2023). Walking Off-Trail in National Parks: Monkey See Monkey Do, *Leisure Sciences*, 45(1): 1-23. <https://doi.org/10.1080/01490400.2020.1755750>.
- Gómez-S. R., Chaves, M. E., Ramírez, W., Santamaría, M., Andrade, G., Solano, C. y Aranguren S. (Eds.). (2021). Evaluación Nacional de Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo y el Centro Mundial de Monitoreo para la Conservación del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Ministerio Federal de Medio Ambiente, Conservación de la Naturaleza y Seguridad Nuclear de la República Federal de Alemania. Bogotá, D. C., Colombia.
- Guerra, M. y Zaldumbide, D. (2010). La agonía del Puyango: agua, minería y contaminación. *Letras Verdes* 7: 35-37.
- IUCN. (2004). 'How Much is an ECOSYSTEM Worth?' ASSESSING THE ECONOMIC VALUE OF CONSERVATION. Washington. DC. <https://lib.icimod.org/record/11714>.
- Jumbo Eras, E., Herrera-Feijoo, R. J., Avila-Andrade, A., Chicaiza-Ortiz, Á., Morocho-Cuenca, M., y Chicaiza-Ortiz, C. (2021). Evaluación de la biodiversidad, amenazas y estatus de conservación de la flora y fauna del Bosque Petrificado Puyango. *Green World Journal*, 4(2): 2-4. <https://doi.org/10.53313/gwj42018>.
- Kaltmeier, O. (2021). National Parks from North to South: An Entangled History of Conservation and Colonization in Argentina. *Inter-American Studies* 34. Trier; New Orleans: WVT Wissenschaftlicher Verlag Trier; University of New Orleans Press.
- Kleemann, J., Zamora, C., Villacis-Chiluisa, A. B., Cuenca, P., Koo, H., Noh, J. K., Fürst, C., & Thiel, M. (2022). Deforestation in Continental Ecuador with a Focus on Protected Areas. *Land*, 11(2): 3.10.3390/land11020268 <https://doi.org/10.3390/land11020268>.
- Laurance, W. F., Clements, G. R., Sloan, S., O'Connell, C. S., Mueller, N. D., Goosem, M., Venter, O., Edwards, D. P., Phalan, B., Balmford, A., Van Der Ree, R., & Arrea, I. B. (2014). A global strategy for road building. *Nature*, 513(7517): 229–232. <https://doi.org/10.1038/nature13717>.
- Lemma, T. M., Gessesse, G. D., Kassa, A. K. and Edossa, D. C. (2018). Effect of spatial scale on runoff coefficient: Evidence from the Ethiopian highlands. *International Soil and Water Conservation Research*, 6: 289-296. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.08.002>.
- Li, Y., Chen, J., Ma, Q., Zhang, H. K., & Liu, J. (2018). Evaluation of Sentinel-2A Surface Reflectance Derived Using Sen2Cor in North America. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(6): 1997–2021. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2835823>.
- MAATE. (2017a). Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica. Reserva de Biosfera Transfronteriza Bosques de la Paz, un hito ambiental de integración regional. Quito-Ecuador. <https://www.ambiente.gob.ec/reserva-de-biosfera-transfronteriza-bosques-de-la-paz-un-hito-ambiental-de-integracion-regional/>
- MAATE. (2017b). Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica. El florecimiento de los guayacanes pinta de amarillo los bosques de Zapotillo. Quito-Ecuador. <https://www.ambiente.gob.ec/el-florecimiento-de-los-guayacanes-pinta-de-amarillo-los-bosques-de-zapotillo/>
- Mason, N., Ward, M., Watson, J. E. M., Venter, O., and Runting, R. K. (2020). Global opportunities and challenges for transboundary conservation. *Nature Ecology and Evolution*, 4(5): 694–701. <https://doi.org/10.1038/s41559-020-1160-3>.

- Metcalf, C. J. E., Graham A. L., Huijben S., Barclay V. C., Long G. H., Grenfell B. T., Read A. F. and Bjørnstad O. N. (2011). Partitioning Regulatory Mechanisms of Within-Host Malaria Dynamics Using the Effective Propagation Number. *Science* 333 (6045): 984–88. <https://doi.org/10.1126/science.1204588>.
- Mora, A., Jumbo-Flores, D., González-Merizalde, M., y Bermeo-Flores, S. A. (2016). Niveles de metales pesados en sedimentos de la cuenca del río puyango, Ecuador. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32(4): 385–397. <https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.04.02>.
- Morante-Carballo, F., Herrera-Narváez, G., Jiménez-Orellana, N., & Carrión-Mero, P. (2020). Puyango, Ecuador petrified forest, a geological heritage of the cretaceous albian-middle, and its relevance for the sustainable development of geotourism. *Sustainability*, 12(16): 6579. <https://doi.org/10.3390/su12166579>.
- Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., Da Fonseca, G. A. B. and Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 3(403): 853-858. <https://doi.org/10.1038/35002501>
- Oviedo-Anchundia, R., Moína-Quimí, E., Naranjo-Morán, J., & Barcos-Arias, M. (2017). Contamination by heavy metals in the south of Ecuador associated to the mining activity. *Bionatura*, 2(4): 437–441. <https://doi.org/10.21931/RB/2017.02.04.5>.
- Pal M. (2005). Clasificador forestal aleatorio para la clasificación por teledetección. *Revista Internacional de Teledetección*, 1: 217-222.
- ParksWatch. (2003). Perfil de Área Protegida – Perú Zona Reservada de Tumbes. Tumbes-Perú. https://www.parkswatch.org/parkprofiles/pdf/turz_spa.pdf?utm_source
- Peñuelas J. (1995). Índices semiempíricos para evaluar la relación carotenoides/clorofila-a a partir de la reflectancia espectral de las hojas. *Photosynthetica*, 2(31), 221-230.
- Puno N. (2014). Environmental management of the puyango-tumbes river basin in Ecuador and Peru. In *Securing Water and Wastewater Systems: Global Experiences* (pp. 161–187). https://doi.org/10.1007/978-3-319-01092-2_8
- Robles K. (2015). FORTALECIMIENTO DE LA CADENA PRODUCTIVA Y DE VALOR DEL CAFÉ EN EL CANTÓN PUYANGO, PROVINCIA DE LOJA, AÑO 2015. Tesis de Grado. UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA. <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/10157/1/Kelly%20Mar%C3%ADa%20Robles%20C.pdf>
- Sánchez D. (2023). ESTIMACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS HÍDRICOS DE LOS CULTIVOS DEL SISTEMA DE RIEGO ZAPOTILLO, PROVINCIA DE LOJA. Universidad Nacional de Loja; Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables; Tesis de Grado, Carrera de Ingeniería Agrícola. <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/26014/1/Diego%20Alcivar%20Sanchez%20Alejandro.pdf>
- Shepherd, Robert P., Simsovic D. and Latourelle A. (2022). Managing Canada’s National Parks: Integrating Sustainability, Protection, and Enjoyment. in Evert Lindquist, and others (eds), *Policy Success in Canada: Cases, Lessons, Challenges*, Oxford Academic. <https://doi.org/10.1093/oso/9780192897046.003.0017>, accessed 3 Apr. 2025.
- Silva Mena, C. J. (2022). Análisis del convenio internacional de la cuenca hidrográfica del río Puyango-Tumbes y el desarrollo de la población de la zona. *TecnoHumanismo, Revista Científica*, 2(7): 7-10.
- Silva Mena, C. J., Merino Velásquez, J. y Dios Espinoza, D. M. (2022). Análisis del convenio internacional de la cuenca hidrográfica del río Puyango-Tumbes bajo una mirada socio-económica. *TecnoHumanismo, Revista Científica*, 2(8): 1-14.
- Tucker, C. J. (1979). Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 2(8), 127-150.
- Vári, Á., Podschun, S. A., Erős, T., Hein, T., Pataki, B., Iojă, I. C., Adamescu, C. M., Gerhardt, A., Gruber, T., Dedić, A., Ćirić, M., Gavrilović, B., & Báldi, A. (2022). Freshwater systems and ecosystem services: Challenges and chances for cross-fertilization of disciplines. *Ambio*, 51(1): 135–151. <https://doi.org/10.1007/s13280-021-01556-4>.

- Watson, J. E. M., Evans T., Venter O., Williams B., Tulloch A., Stewart C., Thompson I., Ray J. C., Murray K., Salazar A., McAlpine C., Potapov P., Walston J., Robinson J. G., Painter M., Wilkie D., Filardi C., Laurance W. F., Houghton R. A., Maxwell S., Grantham H., Samper C., Wang S., Laestadius L., Runtang R. K., Silva-Chávez G. A., Ervin J. and Lindenmayer D. (2018). The Exceptional Value of Intact Forest Ecosystems. *Nature Ecology and Evolution*, 2: 599-610. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0490-x>.
- Whittingham, M. (2006). Why do we still use stepwise modelling in ecology and behaviour? *Journal of Animal Ecology*, 5(75), 1182-1189. https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2656.2006.01141.x?utm_source.
- Woodley S., MacKinnon K., McCanny S., Pither R., Prior K., Salafsky N., and Lindenmayer D. (2019). “Gestión y Manejo de Áreas Protegidas Para La Diversidad Biológica y Las Funciones Del Ecosistema.” In *Gobernanza y Gestión de Áreas Protegidas*. ANU Press. <https://doi.org/10.22459/ggap.2019.21>.
- Wright, S. J. (2005). Tropical forests in a changing environment. *Trends in Ecology and Evolution*, 20(10): 553–560. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.07.009>.
- Zepeda, A. C., Heuvelink E. and Marcelis L. F. M. (2023). Carbon Storage in Plants: A Buffer for Temporal Light and Temperature Fluctuations.” *Silico Plants* 5 (1): diac020. <https://doi.org/10.1093/insilicoplants/diac020>.