



UTMACH

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**Análisis del costo-beneficio de la restauración ecológica en zonas con alta
susceptibilidad de erosión en la Subcuenca Casacay**

**VASQUEZ BRAVO MAYERLI KATIUSCA
INGENIERA AMBIENTAL**

**CARREÑO GRANDA PAULA DAYANA
INGENIERA AMBIENTAL**

**MACHALA
2024**



UTMACH

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**Análisis del costo-beneficio de la restauración ecológica en zonas
con alta susceptibilidad de erosión en la Subcuenca Casacay**

**VASQUEZ BRAVO MAYERLI KATIUSCA
INGENIERA AMBIENTAL**

**CARREÑO GRANDA PAULA DAYANA
INGENIERA AMBIENTAL**

**MACHALA
2024**



UTMACH

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN

**Análisis del costo-beneficio de la restauración ecológica en zonas
con alta susceptibilidad de erosión en la Subcuenca Casacay**

**VASQUEZ BRAVO MAYERLI KATIUSCA
INGENIERA AMBIENTAL**

**CARREÑO GRANDA PAULA DAYANA
INGENIERA AMBIENTAL**

VARGAS COLLAGUAZO LUIS ANGEL

**MACHALA
2024**

ANÁLISIS DEL COSTO- BENEFICIO DE LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA EN ZONAS CON ALTA SUSCEPTIBILIDAD DE EROSIÓN EN LA SUBCUENCA CASACAY

por Paula Carreño Mayerli Vásquez

Fecha de entrega: 05-ago-2024 03:39p.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2427821591

Nombre del archivo: CON_ALTA_SUSCEPTIBILIDAD_DE_EROSI_N_EN_LA_SUBCUENCA_CASACAY.docx
(6.26M)

Total de palabras: 31680

Total de caracteres: 171690

ANÁLISIS DEL COSTO-BENEFICIO DE LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA EN ZONAS CON ALTA SUSCEPTIBILIDAD DE EROSIÓN EN LA SUBCUENCA CASACAY

INFORME DE ORIGINALIDAD

5%

INDICE DE SIMILITUD

4%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

0%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	aneas.com.mx Fuente de Internet	1%
2	Santiago Izquierdo-Tort, Diego Restrepo-Zambrano, Suzanne Ozment, Natalia Acero et al. "Integrando Infraestructura Natural al Sistema de Abastecimiento de Agua de Bogotá", World Resources Institute, 2023 Publicación	1%
3	Submitted to Universidad Técnica de Machala Trabajo del estudiante	<1%
4	ongawa.org Fuente de Internet	<1%
5	hdl.handle.net Fuente de Internet	<1%
6	vdocuments.mx Fuente de Internet	<1%
7	rua.ua.es Fuente de Internet	<1%

<1 %

8

"Unasyuva 251", Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2019

Publicación

<1 %

9

"Guía para la gestión de los bosques y el agua", Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2022

Publicación

<1 %

10

creativecommons.org

Fuente de Internet

<1 %

11

pdffox.com

Fuente de Internet

<1 %

12

www.scribd.com

Fuente de Internet

<1 %

13

qdoc.tips

Fuente de Internet

<1 %

14

bibliotecadigital.udea.edu.co

Fuente de Internet

<1 %

15

agenciadecontrol.quito.gob.ec

Fuente de Internet

<1 %

16

zagan.unizar.es

Fuente de Internet

<1 %

libros.unad.edu.co

17

Fuente de Internet

<1 %

18

baixardoc.com

Fuente de Internet

<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 40 words

Excluir bibliografía

Activo

CLÁUSULA DE CESIÓN DE DERECHO DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL

Las que suscriben, VASQUEZ BRAVO MAYERLI KATIUSCA y CARREÑO GRANDA PAULA DAYANA, en calidad de autoras del siguiente trabajo escrito titulado Análisis del costo-beneficio de la restauración ecológica en zonas con alta susceptibilidad de erosión en la Subcuenca Casacay, otorgan a la Universidad Técnica de Machala, de forma gratuita y no exclusiva, los derechos de reproducción, distribución y comunicación pública de la obra, que constituye un trabajo de autoría propia, sobre la cual tienen potestad para otorgar los derechos contenidos en esta licencia.

Las autoras declaran que el contenido que se publicará es de carácter académico y se enmarca en las disposiciones definidas por la Universidad Técnica de Machala.

Se autoriza a transformar la obra, únicamente cuando sea necesario, y a realizar las adaptaciones pertinentes para permitir su preservación, distribución y publicación en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad Técnica de Machala.

Las autoras como garantes de la autoría de la obra y en relación a la misma, declaran que la universidad se encuentra libre de todo tipo de responsabilidad sobre el contenido de la obra y que asumen la responsabilidad frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros de manera exclusiva.

Aceptando esta licencia, se cede a la Universidad Técnica de Machala el derecho exclusivo de archivar, reproducir, convertir, comunicar y/o distribuir la obra mundialmente en formato electrónico y digital a través de su Repositorio Digital Institucional, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico.

VASQUEZ BRAVO MAYERLI KATIUSCA

0750312936

CARREÑO GRANDA PAULA DAYANA

0705850782

DEDICATORIA

A mis padres, Miriam y Jorge, y a mi hermano, Jordy, quienes me han apoyado arduamente durante mi formación académica con su amor y apoyo incondicionales que han sido y son el motor que me impulsa para alcanzar mis metas. A mi tío, Willy, quien siempre me ha alentado y motivado en cada etapa de mi vida y me ha apoyado con sus valiosos consejos. Y, especialmente, a mi abuelita, Olga, que fue, es y será un pilar imprescindible en mi vida, y a Alex, por su presencia incondicional y por ser un soporte emocional durante mi formación universitaria y durante todo mi proceso de titulación. Me siento sumamente agradecida por tener su compañía en los momentos más importantes y decisivos de mi vida, por ser y formar parte de mí.

Mayerli Vásquez Bravo

A Dios, por guiar cada uno de mis pasos y sostenerme durante momentos difíciles. A mis padres, Margarita y Pablo, por su apoyo, paciencia y amor incondicional durante toda mi formación. A mi hermano, Pablo Adrián, por su cariño y sentido del humor que me saca sonrisas cuando más lo necesito. A mis abuelitos, Cleopatra, Samuel, Abraham e Isabel, por ser mi motivación para seguir adelante. A mi tía Mercy, por su afecto y sus palabras de aliento. A Lianet y Annie, amigas que conservo desde mi etapa colegial, por ser ese oído presto que ocupé para compartir mis preocupaciones. A Jorge y Ambar, amistades que formé durante esta nueva etapa, por amenizar cada semestre y aligerar el estrés universitario. Mi gratitud eterna a cada uno de ustedes por formar parte de las distintas aristas de mi vida, por brindarme su apoyo y compartir mis logros como suyos.

Paula Carreño Granda

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a nuestro especialista y tutor, Luis Vargas Collaguazo, por su invaluable guía y apoyo durante nuestro proceso de titulación; de la misma manera, agradecer a los demás especialistas, Jesús Espinoza Correa y Hugo Añezco Loaiza, por su orientación y motivación. De manera especial, quiero agradecer a mis padres y a mi hermano por apoyarme y hacer posible esta meta que ha tomado alrededor de cinco años finalizarla. A mi compañera Paula, por ser un soporte fundamental para nuestra tesis y compartir conmigo este camino lleno de aprendizajes. Finalmente, quiero agradecer a la Universidad Técnica de Machala por brindar las herramientas y el espacio para desarrollar nuestra investigación.

Mayerli Vásquez Bravo

Me gustaría manifestar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que han contribuido a la realización de esta tesis. A nuestro tutor, Luis Vargas Collaguazo por su apoyo, predisposición y conocimientos que orientaron nuestro proyecto de titulación. A nuestros especialistas, Jesús Espinoza Correa y Hugo Añezco Loaiza por sus aportes y sugerencias. A mi papá, Pablo Carreño Astudillo por su buena voluntad y guía durante el análisis financiero del proyecto. A mi familia, especialmente mi mamá, por sus palabras de aliento. A la Mancomunidad “La Esperanza” por su amabilidad y facilitarnos la información pertinente. A mi compañera Mayerli, por su paciencia y dedicación durante todo momento desde que emprendimos esta ardua labor. A mi alma mater, Universidad Técnica de Machala, por ser el lugar donde he podido crecer tanto académica como profesionalmente.

Paula Carreño Granda

RESUMEN

La Subcuenca de Casacay es la principal fuente de provisión de agua para las comunidades de Machala, Pasaje y El guabo. El recurso hídrico ha sido afectado por los procesos erosivos de la subcuenca alta generados por los cambios en el uso de suelo y el arrastre de sedimentos. Esta investigación tiene por objetivo analizar el costo-beneficio de la restauración ecológica en las zonas con alta susceptibilidad de erosión en Subcuenca alta del río Casacay. Se aplicó la metodología *Green – Gray Assessment* de *World Resource Institute* considerando un horizonte de 30 años para determinar el análisis costo – beneficio relacionado a la carga de sedimentos y turbidez en las plantas de tratamiento de agua cruda y agua potable de la Mancomunidad “La Esperanza”. Los resultados revelaron que la subcuenca alta de Casacay tiene la capacidad de pérdida de suelo de hasta 60.000 ton/ha/año y, por tanto, con la planificación estratégica se determinó que las áreas prioritarias de intervención son los cauces inmersos en las zonas más susceptibles a erosionar. El proyecto de restauración ecológica pretende restaurar el ecosistema ripícola de dichos cauces con la especie *Buddleja coriácea*, en alrededor de 29,06 hectáreas y 123.505 plantas, con una eficiencia de retención de sedimentos de hasta el 90%. Este proyecto tiene una inversión total de \$ 1.243.062,22 USD con beneficios económicos de hasta \$ 11.523.731,65 USD, y una recuperación de la inversión inicial de 5 años 5 meses, siendo completamente viable y rentable, incluso si se consideran escenarios de alto y bajo riesgo.

Palabras clave: Subcuenca del río Casacay, Zonas con Alta Susceptibilidad de Erosión, Sedimentos, Análisis Costo-Beneficio, Green-Gray Assessment, Planificación estratégica, Restauración ecológica.

ABSTRACT

The Casacay Sub-Basin is the main source of water supply for the communities of Machala, Pasaje, and El Guabo. The water resource has been affected by erosion processes in the upper sub-basin generated by changes in land use and sediments transport. This research aims to analyze the cost-benefit of ecological restoration in areas with high erosion susceptibility in the upper sub-basin of the Casacay River. The Green-Gray Assessment methodology of the World Resource Institute was applied, considering a 30-year horizon, to determine the cost-benefit analysis related to the sediment load and turbidity in the raw and potable Water Treatment Plants of the "La Esperanza" Community Association. The results revealed that the Casacay upper sub-basin has a soil loss capacity of up to 60,000 tons/ha/year and, therefore, with strategic planning, it was determined that the priority areas for intervention are the channels immersed in the most susceptible areas to erosion. The ecological restoration project aims to restore the riparian ecosystem of these channels with the *Buddleja coriacea* specie, in around 29,06 hectares and 123.505 plants, with a sediment retention efficiency of up to 90%. This project has a total capital of \$1,243,062.22 USD with economic benefits of up to \$11,523,731.65 USD, and an initial capital recovery of 5 years and 5 months, making it completely viable and profitable, even considering high and low risk scenarios.

Key words: Casacay Sub-Basin, Areas with High Erosion Susceptibility, Sediments, Cost-Benefit Analysis, Green-Gray Assessment, Strategic Planning, Ecological Restoration.

CONTENIDO GENERAL

RESUMEN	3
ABSTRACT	4
I. INTRODUCCIÓN	14
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
A. ANTECEDENTES.....	17
III. JUSTIFICACIÓN	22
IV. OBJETIVOS	24
A. Objetivo General	24
B. Objetivos Específicos	24
V. HIPÓTESIS	25
A. Hipótesis Nula.....	25
B. Hipótesis Alternativa.....	25
VI. MARCO TEÓRICO	26
A. Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN)	26
B. Soluciones Basadas en la Naturaleza con Enfoque Ecosistémico.....	27
C. Restauración Ecológica (RE)	28
D. Análisis Costo-Beneficio.....	29
E. La Erosión del Suelo en Cuencas Hidrográficas.....	30
VII. METODOLOGÍA	33
A. Delimitación del Área de Estudio	33
B. Variables, Instrumentos y Procedimientos.....	37
VIII. RESULTADOS	57
IX. DISCUSIÓN	105
X. CONCLUSIONES	111

XI. RECOMENDACIONES.....113

XII. REFERENCIAS114

ANEXOS131

CONTENIDO DE TABLAS

TABLA I TASAS DE TOLERANCIA A LA PÉRDIDA DE SUELO	40
TABLA II RANGO Y SIGNIFICANCIA DE LA EVALUACIÓN DEL IMF	41
TABLA III NIVEL DE EROSIVIDAD DE LA VARIABLE R	41
TABLA IV COEFICIENTES DEL FACTOR K SEGÚN LA CLASE TEXTURAL	42
TABLA V COEFICIENTE APLICADO A LAS VARIABLES LS SEGÚN LA PENDIENTE .	43
TABLA VI COEFICIENTE LS SEGÚN LA PENDIENTE DEL TERRENO	44
TABLA VII COEFICIENTES DEL FACTOR C SEGÚN EL TIPO DE USO DE SUELO	44
TABLA VIII COEFICIENTES DEL FACTOR C SEGÚN EL TIPO DE CULTIVO	45
TABLA IX COEFICIENTES DEL FACTOR C SEGÚN EL MÉTODO DE LABRANZA.....	45
TABLA X COEFICIENTE DEL FACTOR C APLICADOS EN LA SUBCUENCA ALTA.....	46
TABLA XI COEFICIENTES DEL FACTOR P.....	46
TABLA XII ACTIVIDADES Y SUMINISTROS PARA COSTOS INICIALES	48
TABLA XIII ACTIVIDADES Y SUMINISTROS PARA COSTOS OPERATIVOS	49
TABLA XIV REGISTRO NTU Y COSTO MENSUAL ASOCIADO.....	51
TABLA XV VARIABLES Y ESCENARIOS CONSIDERABLES	56
TABLA XVI LISTADO DE POBLADOS EN LA SUBCUENCA CASACAY	58
TABLA XVII TASA DE CAMBIO DE COBERTURA Y USO DE SUELO EN SUBCUENCA ALTA	60
TABLA XVIII TASA DE CAMBIO DE COBERTURA Y USO DE SUELO EN ZONAS EROSIONABLES.....	62
TABLA XIX ESTADO ACTUAL DEL ÁREA DE ESTUDIO - FACTORES BIÓTICOS	63
TABLA XX CARACTERÍSTICAS DEL VASO DE CAPTACIÓN	65
TABLA XXI COSTOS DE OPERACIÓN ANUALES DEL AÑO 2023.....	67
TABLA XXII SALARIOS DEL PERSONAL OPERATIVO DEL AÑO 2023	68
TABLA XXIII COSTOS DE MANTENIMIENTO ANUALES DEL AÑO 2023	68
TABLA XXIV COSTO ANUAL EN INSUMOS QUÍMICOS DEL AÑO 2023	69
TABLA XXV PRESUPUESTO MENSUAL ESTIMADO	69
TABLA XXVI CATEGORÍAS DE CONSERVACIÓN EN PASAJE	71
TABLA XXVII TIPOS DE ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN	74

TABLA XXVIII RESTAURACIÓN ECOLÓGICA CON UNA EFICIENCIA DEL 100%	78
TABLA XXIX RESTAURACIÓN ECOLÓGICA CON UNA EFICIENCIA DEL 85 %	79
TABLA XXX FASE 1 DE IMPLEMENTACIÓN O MONITOREO DE IMPLEMENTACIÓN	79
TABLA XXXI FASE 2 DE EFECTIVIDAD O MONITOREO DE EFECTIVIDAD	80
TABLA XXXII RESULTADOS DEL MODELO BIOFÍSICO.....	81
TABLA XXXIII RETENCIÓN DE SEDIMENTOS ESPERABLES	84
TABLA XXXIV INVERSIÓN TOTAL DEL PROYECTO	85
TABLA XXXV COSTOS DE INVERSIÓN: COMPRA DE SEMILLAS	87
TABLA XXXVI COSTOS DE INVERSIÓN: SEMILLEROS Y VOLUMEN REQUERIDOS .	88
TABLA XXXVII COSTOS DE INVERSIÓN: COMPRA DE SEMILLERO	88
TABLA XXXVIII COSTOS DE INVERSIÓN: CANTIDAD DE SUSTRATO REQUERIDA POR AÑO	89
TABLA XXXIX COSTO DE INVERSIÓN: PREPARACIÓN DE SUSTRATO.....	89
TABLA XL COSTOS DE INVERSIÓN: SUMINISTROS	90
TABLA XLI COSTOS DE INVERSIÓN: COSTOS LABORALES.....	90
TABLA XLII COSTOS DE INVERSIÓN: CUIDADO EN VIVERO	91
TABLA XLIII COSTOS DE INVERSIÓN: VEHÍCULO	91
TABLA XLIV COSTOS DE INVERSIÓN: COMBUSTIBLE	92
TABLA XLV COSTOS DE INVERSIÓN: MANTENIMIENTO DE VEHÍCULO	92
TABLA XLVI CANTIDADES REQUERIDAS PARA HACER UN CERCADO.....	93
TABLA XLVII COSTOS DE INVERSIÓN: ACTIVIDADES DE PROTECCIÓN.....	94
TABLA XLVIII COSTOS DE TRANSACCIÓN	94
TABLA XLIX COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTOS	95
TABLA L COSTOS DE OPORTUNIDAD.....	96
TABLA LI VALORACIÓN DE BENEFICIOS.....	97

CONTENIDO DE FIGURAS

Fig. 1. Metodología de la delimitación y caracterización de la subcuenca.....	33
Fig. 2. Mapa de ubicación geográfica de la Subcuenca del río Casacay.....	34
Fig. 3. Mapa de zonas con alta susceptibilidad de erosión en la Subcuenca del río Casacay.....	35
Fig. 4. Mapa de ecosistemas de la unidad hidrográfica cód. 139629.....	36
Fig. 5. Diagrama de flujo de la metodología <i>Green-Gray Assessment</i>	37
Fig. 6. Mapa de ubicación geográfica de la unidad hidrográfica cód. 139629.....	39
Fig. 7. Método de conversión de unidades para estimar costos evitados.....	50
Fig. 8. Gráfica de la relación entre turbidez y costos asociados a su tratamiento.....	52
Fig. 9. Cinta de opciones de la herramienta <i>Risk Simulator</i>	54
Fig. 10. Distribución del supuesto de entrada de un perfil de simulación.....	55
Fig. 11. Ventanas desplegadas durante la simulación para el análisis de sensibilidad.....	55
Fig. 12. Mapa de uso de suelo en la unidad hidrográfica cód. 139629.....	59
Fig. 13. Mapa de uso de suelo en zonas con alta susceptibilidad de erosión.....	61
Fig. 14. Relación entre la anchura y la eficiencia de captura en la zona de amortiguamiento.....	75
Fig. 15. Mapa de áreas prioritarias de intervención con infraestructura verde.....	76
Fig. 16. <i>Buddleja coriácea</i> o colle.....	80
Fig. 17. Mapa de los factores LS, K y C.....	82
Fig. 18. Capacidad de erosión de la Subcuenca alta del río Casacay.....	83
Fig. 19. Distribución de los desembolsos anuales del proyecto.....	86
Fig. 20. Resultados de la simulación del riesgo para la tasa de descuento (VAN).....	99
Fig. 21. Resultados de la simulación del riesgo para la tasa de descuento (TIR).....	99
Fig. 22. Resultados de la simulación del riesgo para la tasa de descuento (índice B/C).....	99
Fig. 23. Resultados de la simulación del riesgo para la tasa de descuento (Payback).....	100
Fig. 24. Resultados de la simulación del riesgo para la retención de sedimentos (VAN).....	101
Fig. 25. Resultados de la simulación del riesgo para la retención de sedimentos (TIR).....	101
Fig. 26. Resultados de la simulación del riesgo para la retención de sedimentos (B/C).....	101
Fig. 27. Resultados de la simulación del riesgo para la retención de sedimentos (Payback).....	102
Fig. 28. Resultados de la simulación del riesgo para los costos (VAN).....	103
Fig. 29. Resultados de la simulación del riesgo para los costos (TIR).....	103

Fig. 30. Resultados de la simulación del riesgo para los costos (B/C)	103
Fig. 31. Resultados de la simulación del riesgo para los costos (Payback)	104

CONTENIDO DE ECUACIONES

Ec. 1. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo	40
Ec. 2. Ecuación del índice modificado de Fournier	40
Ec. 3. Ecuación del Factor R	41
Ec. 4. Ecuación del Factor LS	43
Ec. 5. Ecuación del Factor LS aplicado en ArcGIS	43
Ec. 6. Ecuación del Factor C	44
Ec. 7. Ecuación para la conversión de Sed a SST	50
Ec. 8. Ecuación de la curva con ajuste logarítmico entre turbidez y costos de reducción	52
Ec. 9. Ecuación de estimación de costos asociados a la turbidez.....	52
Ec. 10. Ecuación del VAN	53
Ec. 11. Ecuación del índice de rentabilidad	53
Ec. 12. Ecuación del payback descontado.....	54
Ec. 13. Ecuación del TIR	54
Ec. 14. Ecuación para estimar el área a intervenir	77
Ec. 15. Ecuación de eficiencia de plantación	77
Ec. 16. Ecuación para estimar la cantidad de plantas requeridas	78
Ec. 17. Ecuación para la estimación de la cantidad de semillas requerida	87

CONTENIDO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Obreros de mantenimiento retirando sedimentos.....	64
Ilustración 2 Subcuenca alta de río Casacay	72
Ilustración 3 Plantación de pinos en la Subcuenca alta del río Casacay	72

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

BID	Banco Interamericano de Desarrollo
BM	Banco Mundial
ETA	Estación de Tratamiento de Agua
FONAG	Fondo de Protección del agua
FORAGUA	Fondo Regional de Agua
GAD	Gobierno autónomo descentralizado
GGA	<i>Green – Gray Assessment</i>
NTU	<i>Nephelometric Turbidity Unit</i>
PREDESUR	Programa Regional para el Desarrollo del Sur
PSA	Pagos por Servicios Ambientales
RE	Restauración ecológica
SbN	Soluciones Basadas en la Naturaleza
SENAGUA	Secretaría Nacional del Agua de Ecuador
TNC	<i>The Nature Conservancy</i>
UICN	Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza
WRI	<i>World Resource Institute</i>

I. INTRODUCCIÓN

El agua, principal componente de las cuencas, es un recurso sumamente importante y estratégico para el desarrollo económico de la sociedad [1]. La subcuenca del Río Casacay se ubica en una zona propensa a procesos naturales de erosión, producto de factores como la pendiente y las características físicas del suelo [2]. Las presiones antrópicas que se ejercen sobre el caudal potencian los procesos de erosión y el consecuente arrastre de sedimentos, comprometiendo seriamente la seguridad hídrica de la subcuenca en especial de la parte baja. La planificación y gestión de las unidades hidro-geográficas debe enfocarse desde la parte alta de la subcuenca, tramo donde se genera la producción de sedimentos. En este contexto, la implementación de soluciones basadas en la naturaleza emerge como una alternativa plausible para garantizar la calidad del recurso hídrico. La restauración ecológica es una de las formas en que se vienen aplicando las señaladas SbN, con la finalidad de mejorar el capital natural de los territorios que vertebran [3].

Los ecosistemas saludables y bien administrados constituyen soluciones rentables, multifuncionales y beneficiosas para todos [4]. En el caso de los ecosistemas fluviales, la infraestructura verde se fundamenta en utilizar de forma deliberada y consciente los servicios que puede ofrecer un ecosistema saludable y funcional para proporcionar beneficios primarios de gestión de agua [5]. La gestión adecuada de la cobertura vegetal proporciona una infraestructura verde de alto valor para mejorar la protección de la fuente de agua, regulando los caudales y manteniendo la calidad del recurso. La infraestructura verde es un complemento de las obras de infraestructura gris, permitiendo alargar la vida útil y mejorar la resiliencia de los sistemas convencionales de ingeniería. En el caso de la subcuenca del río Casacay, la sinergia entre la infraestructura verde y gris será aprovechada para reducir la producción de sedimentos y ahorrar costos de operación en el tratamiento del agua.

El presente estudio se centra en el análisis costo-beneficio de procesos de restauración ecológica en zonas con alta susceptibilidad de erosión en la subcuenca alta del río Casacay. El análisis costo-beneficio busca evaluar los costos de integrar la infraestructura verde a los sistemas de infraestructura de agua construidos, y los beneficios para los proveedores de agua. Para definir la combinación correcta entre la infraestructura verde y gris, se establece un escenario sin cambios o de línea base y otro alternativo que incluye a la restauración ecológica como infraestructura verde. La valoración costo-beneficio fue desarrollada siguiendo la metodología Green-Gray Assessment

(GGA) y tomando como ejemplo puntual el caso del sistema hídrico Guandú en Río de Janeiro. Al comprender y evaluar adecuadamente los costos y beneficios asociados con estas intervenciones, se pretende ofrecer información valiosa para la toma de decisiones informadas por parte de los actores clave y primarios en la subcuenca del río Casacay.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El recurso hídrico de la Subcuenca del río Casacay es la fuente de abastecimiento de consumo humano para las comunidades de Machala, Pasaje y El Guabo. El uso inadecuado del agua para las actividades antrópicas altera ciclo hidrológico de los bosques y la calidad de los cuerpos superficiales debido a la erosión y al arrastre de sedimentos [6].

La erosión del suelo, los cambios en la cobertura y el uso de suelo son problemas latentes para el recurso hídrico en la subcuenca del río Casacay. Las condiciones climáticas y físicas pueden aumentar la magnitud del impacto [2] y la reducción de la cobertura vegetal aumenta los efectos en la producción y el rendimiento hídrico [7] debido a la relación inversamente proporcional entre cobertura vegetal y carga de sedimentos [8]. La vegetación ripícola puede reducir significativamente la entrada de contaminantes, nutrientes y sedimentos a los cursos de agua ya que actúan como filtros para el agua mediante la estabilización del suelo y el apoyo microbiano [8].

Las cuencas hidrográficas deben estudiarse como una unidad física de planificación, gestión y desarrollo socioeconómico. El manejo integral y la planificación estratégica en las cuencas hidrográficas proporciona servicios ecosistémicos y disponibilidad del agua dulce [9]. La parte baja de la subcuenca recibe la mayor cantidad de sedimentos y compromete la disponibilidad del recurso hídrico; mientras que, en la parte alta se genera la producción de estos [10], por lo que la planificación y gestión de las unidades hidro-geográficas debe enfocarse desde cuenca arriba.

La infraestructura tradicional no satisface por sí sola las necesidades básicas de la población como servicios de agua y energía limpia, la protección contra inundaciones y la resiliencia contra las sequías. Es por esto que se puede combinar con la infraestructura verde para que actúe como una herramienta para mejorar la calidad de agua, reducir costos de operación en su tratamiento, almacenar aguas pluviales, aumentar la retención de agua en el suelo y reducir la producción de sedimentos [11].

La acción de restaurar ecosistemas está asociada a la reducción de la carga de sedimentos, control y a los riesgos por inundaciones [12]. Las soluciones basadas en la naturaleza buscan reducir los problemas en la seguridad hídrica. La protección y/o restauración de los sistemas naturales permite reducir desafíos sociales proporcionando bienestar humano y beneficios para la biodiversidad. La adaptación y el uso conjunto de infraestructura tradicional y verde resulta como

un mecanismo que permite restaurar las funciones de las cuencas hidrográficas e impulsa el desarrollo y la vida útil de instalaciones como presas o plantas de tratamiento [12]. Por restauración ecológica se entiende como el proceso que impulsa la recuperación de un ecosistema destruido o degradado para restaurar la integridad y salud del sistema buscando un enfoque efectivo en cuanto a los costos [13].

The Nature Conservancy (TNC), una organización no gubernamental, desde las dos últimas décadas ha realizado esfuerzos para la restauración ecológica de lugares prioritarios y estratégicos para la producción de agua y la sustentabilidad agropecuaria [13], en alrededor de 26 países de Latinoamérica y El Caribe, incluyendo a Ecuador [14].

A pesar de la inestabilidad política y económica de Ecuador, a partir del año 2000, es sede de dos modelos pioneros para financiar la conservación de cuencas hidrográficas, los Pagos por Servicios Ambientales (PSA) de Pimampiro y el Fondo de Protección del Agua (FONAG). Actualmente, se ha creado el primer fondo regional de agua (FORAGUA) con una vigencia de 80 años que impulsa el pago de una tasa ambiental impuesta por el uso de agua (PSA) con la colaboración y la participación de actores clave como los consumidores de agua o actores primarios [15].

Es por eso por lo que la necesidad de reducir la alteración de la calidad del agua por el arrastre de sedimentos en la Subcuenca del río Casacay se convierte en un desafío para la planificación estratégica de la misma. Si bien, la restauración ecológica intensiva permite recuperar los servicios ecosistémicos en un período de tiempo relativamente corto; la inversión en estos proyectos impulsa la planificación estratégica y el análisis el costo-beneficio de su implementación permite visualizar los beneficios económicos y de conservación a largo plazo.

A. ANTECEDENTES

Las SbN promueven el uso sostenible de la biodiversidad, para generar beneficios y aliviar problemas socioambientales [16]. Las SbN se consideran alternativas de solución bastante modernas, puesto que su concepto o terminología similar surge alrededor de la década de los 90, siendo a partir de los 2000 cuando empieza a tomar relevancia internacional tanto en foros políticos como en la literatura técnica [17]. La conceptualización planteada por la Unión Internacional para

la Conservación de la Naturaleza (UICN) en 2016 es la más acotada y utilizada en la comunidad internacional [18].

Las SbN proponen un enfoque que se aleja de una visión antropogénica de la gestión de los recursos naturales hacia un paradigma en el que la naturaleza sustenta el desarrollo y bienestar social, aportando soluciones a los retos globales y convirtiendo estos retos en oportunidades [18]. La mitigación y adaptación al cambio climático es el eje transversal de estas soluciones con enfoque ecosistémico, cumpliendo con dos condiciones fundamentales: generar beneficios simultáneos para la biodiversidad y el bienestar humano [16].

La seguridad hídrica es un desafío que puede ser abordado bajo enfoques que van desde la conservación o restauración de los sistemas naturales existentes hasta la mejora o creación de procesos naturales en ecosistemas modificados o artificiales [19]. Las SbN contribuyen a la gestión mejorada del agua, tanto a micro como a macro-escala, al proponer el uso o en su defecto imitación de los procesos naturales propios de un sistema ecológico, esencialmente de la vegetación, los suelos y/o humedales [5].

Las SbN para la gestión de los recursos hídricos ofrecen propuestas integrales basadas en la gestión y conservación de los servicios ecosistémicos, para mejorar la disponibilidad y calidad del agua, reducir los riesgos de los desastres asociados a sequías o inundaciones y mejorar la adaptación al cambio climático [20]. La disponibilidad del agua se garantiza mediante el manejo de la interfaz suelo/vegetación al gestionar el almacenamiento, la infiltración y el transporte de las aguas pluviales [18]. El éxito de mantener o mejorar la disponibilidad del agua depende en gran medida del contexto, tipo de intervención y la escala espacial [19]. Por otro lado, la gestión de la calidad concentra sus esfuerzos en el control de sedimentos, contaminantes industriales, nutrientes, patógenos y toxinas presentes en las masas de agua [19].

Los humedales artificiales se encuentran entre las alternativas más utilizadas para el tratamiento de aguas residuales domésticas y paliar los contaminantes de amplia distribución en tierras agrícolas [5]. Sin embargo, aquellas de mayor impacto respecto a la mejora de la calidad del agua implican la protección de las fuentes de agua [18]. La cobertura vegetal reduce físicamente la velocidad del flujo superficial del agua y mantiene las condiciones físicas del suelo a través de su sistema radicular [19], lo que permite reducir en un 10% (o más) la presencia de sedimentos o nutrientes en las cuencas hidrográficas [5]. La implementación de SbN refuerza el desarrollo de la

seguridad hídrica en las cuencas hidrográficas, favoreciendo la obtención de agua apta para los diferentes usos antrópicos del agua.

La infraestructura verde implica un esfuerzo intencional y consciente en utilizar los servicios ecosistémicos para proporcionar beneficios primarios de gestión del agua, así como beneficios colaterales ambientales y socioeconómicos [5]. El término infraestructura verde, previamente denominada infraestructura ecológica en una reunión técnica sobre planificación urbana del Programa Hombre y la Biósfera (MAP), fue utilizado por primera vez en 2004 por la Comisión de Vías Verdes de Florida en un informe para describir la importancia de preservación y gestión de las áreas de conservación del estado [21].

La obtención de agua para las distintas actividades antrópicas tradicionalmente se ha manejado bajo infraestructura gris. La infraestructura gris se refiere a los sistemas convencionales de ingeniería que brindan servicios esenciales como suministro de agua, tratamiento de aguas residuales, transporte y energía [22]. Las intervenciones convencionales de infraestructura gris para solventar los riesgos relacionados con el agua son soluciones estáticas de elevada inversión y escasa capacidad de adaptación ante las necesidades de un mundo cambiante [19]. El cambio climático es un obstáculo sustancial para el diseño, operación y mantenimiento de la infraestructura gris, provocando fallas en el servicio, aumento de costos y reducción de la resiliencia [22].

Por el contrario, una infraestructura verde o resiliente al agua está alineado con el desarrollo sostenible, siendo descritas como más pequeñas, asequibles, flexibles y polivalentes que las intervenciones convencionales [19]. Suelen tener costos de mantenimiento más bajos que los métodos de ingeniería tradicionales y pueden mejorar la sostenibilidad a largo plazo de la gestión de los ríos [23]. Sin embargo, el enfoque holístico de las SbN no refiere a la implementación única de la infraestructura verde, sino el diseño y operación en armonía de infraestructura verde y gris conjuntamente para maximizar el rendimiento del sistema y lograr beneficios para las personas, la naturaleza y la economía [5]. La ingeniería tradicional ofrece servicios en los que no existen ecosistemas naturales equivalentes, por lo que la función de la infraestructura verde es complementar y aumentar potencialmente los beneficios de las intervenciones convencionales, asegurando así la rentabilidad de la inversión [20].

Un sistema hídrico con estas características se torna flexible y robusto, por lo que permitiría ahorrar el sobreprecio que paga la sociedad cuando se pierden estos activos basados en la naturaleza, expresándolos en el tratamiento del agua como en la expansión o construcción de

nuevas instalaciones de tratamiento. La degradación del suelo y el desarrollo de infraestructura en cuencas hidrográficas para el aprovisionamiento de agua ha aumentado en casi un 50% el costo por unidad de agua tratada en las grandes ciudades [24].

Además, para 2050 se prevé que el gasto mundial anual en obras de infraestructura convencional se triplique hasta alcanzar los 2.3 billones de dólares [25]. La degradación del medio ambiente perjudica los servicios hídricos que ofrece la cuenca, lo que se traduce en una mayor necesidad de inversión en infraestructura para hacer frente a problemas que ponen en riesgo la seguridad hídrica [20]. La restauración y gestión de ecosistemas es una forma rentable de resolver problemas ecológicos y socioeconómicos en la cuenca [26]. La infraestructura verde implementada para complementar, sustituir o proteger la infraestructura gris tradicional fomenta la eficiente prestación del servicio de suministro de agua y el ahorro de dinero para proveedores y consumidores de agua [24]. La mejora de la calidad del agua puede reducir los costes de tratamiento del agua, con una posible repercusión sobre las tarifas de servicio y la asequibilidad del mismo [18].

La metodología Green-Gray Assessment (GGA), originalmente desarrollada por la organización World Resources Institute (WRI) en 2013, es un proceso de seis pasos para valorar los costos y/o beneficios de integrar la infraestructura verde a los sistemas de suministro de agua existentes [24]. Como referencia de análisis financieros aplicando dicha metodología se destacan cuatro casos de estudio, tres en Brasil (San Pablo, Río de Janeiro y Vitória) para gestionar la calidad y disponibilidad del agua, y uno en México (Monterrey) para gestionar la recarga de acuíferos y control de inundaciones.

El caso del sistema hídrico Guandú en Río de Janeiro, Brasil tuvo como objetivo la evaluación del desempeño financiero de la restauración forestal de pastos como estructura de control de sedimentos. La restauración forestal de tres mil hectáreas de pastos con alto grado de erosión reduciría en un 33% el flujo de sedimentos y 32% la turbidez del agua, evitando así el uso de cuatro millones de toneladas de productos químicos y 260 mil MWh de energía eléctrica en la Estación de Tratamiento de Guandú (ETA Guandú) a lo largo de 30 años. La implementación de la infraestructura natural generaría ahorros en el tratamiento de agua, dragado y depreciación de equipos equivalentes a 781 millones de dólares [24].

Con todo lo expuesto, las SbN resultan atractivas para solventar los problemas que acarrea la erosión en la Subcuenca del río Casacay. En el río Casacay existen fuertes presiones sobre el

caudal, una de ellas es la captación de agua potable que abastece a las ciudades de Machala, Pasaje y El Guabo [27]. La falta de apoyo en la gestión integral del recurso hídrico de las ciudades que se benefician del servicio de suministro de agua ha provocado que los actores primarios inicien procesos de deforestación en la cuenca alta, atentando a la sostenibilidad del recurso hídrico. Ante la evidente necesidad de tomar medidas correctivas que beneficien tanto a los proveedores y consumidores de agua como a la naturaleza, la implementación de infraestructura verde para el control de sedimentos se desliza como una opción, cuya viabilidad económica se verá explayada utilizando la metodología GGA.

III. JUSTIFICACIÓN

La infraestructura verde es un área contemporánea de investigación en todo el mundo, y la implementación de sus hallazgos alivia problemas a nivel mundial [28]. Si bien la aplicación de las SbN en la gestión del agua no es un tema nuevo, puesto que el rol de los ecosistemas ha estado arraigado en las ciencias hidrológicas modernas durante décadas [5]. La evaluación de los costos y beneficios de integrar estas soluciones a sistemas de infraestructura convencional es una metodología reciente que aún no ha sido implementado en nuestro país. El análisis de costo/beneficio se emplea como método principal para la toma de decisiones de inversión, para minimizar la inversión y maximizar el beneficio [28]. Las intervenciones de restauración forestal en las cuencas hidrográficas en muchas ocasiones se ejecutan sin fijar un propósito a largo plazo, sino con la única consigna de restaurar la cobertura vegetal y recuperar la apariencia física del bosque. En tal contexto, resulta bastante improbable atraer inversión para proyectos de SbN y, en consiguiente, no alcanzan su pleno potencial. Las contribuciones anuales de entidades públicas y filantrópicas no alcanzan para financiar adecuadamente en estos proyectos [29]. La obtención de capital privado es una de las estrategias para cerrar esta brecha de financiamiento. Sin embargo, dicho capital necesita mecanismos que minuciosamente describan la inversión y generen confianza acerca de los retornos.

Los sistemas de captación de la subcuenca del río Casacay generan fuertes presiones sobre su caudal. Estas presiones han conseguido potenciar los procesos naturales de erosión y facilita el arrastre de sedimentos [2]. La seguridad hídrica de ciudades como Machala, Pasaje y el Guabo se ve comprometida ante tales efectos. El aporte principal que generará el presente estudio es el desglose de la viabilidad económica de implementar infraestructura verde en el río Casacay. Existe un creciente interés mundial de emplear SbN, como la reforestación para ayudar a reducir riesgos hídricos para las economías y la sociedad [12]. El establecimiento y comparación de dos escenarios: uno donde la cuenca se mantenga en las condiciones actuales de erosión y otro donde se ejecuten labores de restauración ecológica, permite vislumbrar los potenciales beneficios que la planta de captación será partícipe a largo plazo. Esta información será clave para la toma de decisiones importantes por parte de proveedores de agua, entes reguladores y organizaciones dedicadas a la conservación y restauración de los suelos [29]. El análisis costo/beneficio es

sumamente útil para atraer la inversión privada a estos proyectos de SbN, fomentando la diversificación del financiamiento a través del establecimiento de posibles fondos de dotación.

IV. OBJETIVOS

A. Objetivo General

Analizar el costo-beneficio de la restauración ecológica en zonas con alta susceptibilidad de erosión en la subcuenca alta del río Casacay utilizando la metodología Green-Gray Assessment de World Resources Institute para el control de sedimentos en el sistema de suministro de agua.

B. Objetivos Específicos

- Definir el objeto de inversión y los escenarios considerables para la restauración ecológica.
- Determinar la tasa de producción de sedimentos del bosque mediante la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, USLE.
- Estimar el costo de tratamiento de agua en los escenarios mediante la evaluación de desempeño del escenario con restauración ecológica.
- Establecer la sensibilidad de los resultados con respecto al objeto de análisis mediante el método de Monte Carlo.

V. HIPÓTESIS

A. *Hipótesis Nula*

La restauración ecológica en zonas con alta susceptibilidad de erosión en la subcuenca del río Casacay no tiene un impacto positivo en la relación costo – beneficio en su implementación para la reducción de sedimentos y la minimización de los costos generados en las plantas de captación “La Danesa” y de tratamiento “La Esperanza”.

B. *Hipótesis Alternativa*

La restauración ecológica en zonas con alta susceptibilidad de erosión en la subcuenca del río Casacay tiene un impacto positivo en la relación costo – beneficio en su implementación para la reducción de sedimentos y la minimización de los costos generados en las plantas de captación “La Danesa” y de tratamiento “La Esperanza”.

VI. MARCO TEÓRICO

A. Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN)

Las SbN son un proceso de transición del uso de los servicios ecosistémicos desde un modelo de usos intensivos hacia uno más eficiente [30], [31]. Promueven el mantenimiento, la mejora y la restauración de ecosistemas [32], defienden el manejo integrado de la tierra, el agua y el uso de los recursos [31] mediante el co-diseño, el cofinanciamiento y la coevaluación [33].

Los proyectos o programas que usen a las SbN están estrechamente conectados con las partes interesadas o *stakeholders*. Además, se debe considerar que la aceptación social se rige por las condiciones socio políticas, la comunidad y el mercado financiero [33], [34], por lo que requiere inversión intelectual y económica [30]. Los actores primarios y los *stakeholders* tienen implicaciones y beneficios directos [34], mediante la implementación de técnicas convencionales y basadas en la naturaleza que impulsen a la mejora de la sostenibilidad ecológica, de la comunidad y de la productividad a largo plazo [30].

Las SbN explotan los recursos naturales generando soluciones en base a la ingeniería y tecnología [35]; de tal forma que contrarrestan problemas socioeconómicos y ambientales [36] que deben ser abordados estratégicamente [30]. Por tanto, resultan en una alternativa que impulsa el desarrollo y la actualización de la infraestructura [37] promoviendo la sostenibilidad y la resiliencia urbana [33], [35].

Para aplicar las SbN, [37] detalla siete lecciones aprendidas, las cuales establecen que las SbN:

1. Deben ser atractivas para los actores primarios
2. Deben crear nuevos bienes naturales comunes
3. Requieren y generan confianza entre el proyecto y los actores primarios
4. Requiere de foros para cocrear SbN que incluyan la innovación social urbana
5. Requieren de una gobernanza colaborativa
6. Puede fortalecer la conexión con otras ciudades o estados
7. Necesitan ser diseñadas de tal forma que pueda replicarse en otros lugares

La aplicación de las SbN demuestra una contribución potencial de adaptación y resiliencia ante cambios en el clima y en el entorno [35] y los beneficios a la economía, a la sociedad y a los

sistemas ecológicos resultan atractivos [37]. Los beneficios a corto plazo están ligados a la recuperación de los servicios ecosistémicos como la regulación de la calidad del agua [30], [35], el control de la erosión [30], el control de sedimentos e inundaciones en cuencas hidrográficas [38]; mientras que, a mediano plazo, se reduce el costo de mantenimiento de los ecosistemas [30]. Además, mejoran la salud humana [32], [35], reducen riegos de inundaciones y olas de calor [33], [35], entre otros beneficios sociales, económicos y ambientales.

B. Soluciones Basadas en la Naturaleza con Enfoque Ecosistémico

SbN es un término utilizado para los esfuerzos de la adaptación basada en ecosistemas, la restauración de bosques y paisajes [39], [40] y el uso de la infraestructura verde [39]-[41].

La infraestructura verde es la base para la prevención y mitigación de desastres naturales desde un enfoque protector y crítico que garantiza los servicios ecosistémicos de regulación y provisión según el Marco de Sendai [42]. En términos simples, es un espacio verde, en zonas urbanas o rurales, que mejora la calidad de vida y los beneficios ambientales para una comunidad [42] y se considera como una de las medidas exitosas para la planificación estratégica con resultados en el control de inundaciones y la prevención de la erosión del suelo [42].

La infraestructura verde como enfoque complementario de las SbN [32], [43] aborda desafíos sociales, económicos y naturales [44], se centra en el grado de afectación al ecosistema y propone acciones para la protección y restauración del ecosistema [41]. Los desafíos más comunes están vinculados a la seguridad alimentaria e hídrica [44] y se trabajan desde los servicios de provisión, regulación, cultural o soporte.

El enfoque en los ecosistemas aumenta la resiliencia del entorno [42] especialmente a través del servicio ecosistémico de provisión [44] y, además, a través de la participación activa de las partes interesadas fomentan la gobernanza en la comunidad [44].

La planificación resiliente tiene un enfoque reflexivo, fluido, conectado, multifacético e inclusivo que promueve la integración de la ecología conjunta [44] que incluye a la infraestructura verde [31]. Cabe mencionar que la infraestructura verde y las SbN son potencialmente más resilientes y rentables que la infraestructura gris, la cual está asociada a la inflexibilidad y a los altos costos [44].

Los esfuerzos de la infraestructura gris no parecen ser suficientes para sobrellevar desastres naturales y antrópicos [32], [38]. Como ejemplo de esto, desde el año 2000 hasta el 2019, se registraron alrededor de 7 348 desastres con una pérdida económica global aproximada de 2.97 billones de dólares americanos [38]. Por esto, la Unión Europea reconoce que el uso de las SbN y de la infraestructura verde son cruciales para fomentar la resiliencia urbana y de los ecosistemas, la eficiencia y el manejo integrado de sus recursos, y los concibe como instrumentos financieros imprescindibles [31] para proyectos de restauración de ecosistemas terrestres y acuáticos [34], [45].

La participación de los actores primarios, beneficiarios o consumidores del agua facilita las inversiones públicas estratégicas en la implementación de infraestructura verde [46]. La transición hacia una economía verde requiere de la participación de inversores privados y de los responsables de políticas públicas [34]. Con la disponibilidad económica de los mercados financieros, estos pueden encargarse de la ejecución de los proyectos que incluyen SbN [34].

Debido a la regulación y el autogobierno relacionados a la planificación y gestión del suelo, la gobernanza presenta restricciones [43]. Para reducir estas restricciones se replican casos de éxito, conociendo que los proyectos de restauración ecológica en ríos trabajan a través de instituciones, el conocimiento y el poder [47] y que, bajo un enfoque policéntrico, la gobernanza puede ser flexible para el manejo de los recursos naturales, la infraestructura verde y los sistemas socio-ecológicos [48], [49] basados en el potencial de restaurar dinámicas naturales y recuperar hábitats degradados como estrategia de manejo [42], [49].

C. Restauración Ecológica (RE)

La cobertura vegetal minimiza la erosión del suelo y el arrastre de sedimentos mientras protegen a los cuerpos de agua de la escorrentía agrícola [8]. El tipo de uso de suelo permite evaluar la calidad ecológica y ambiental a través de la conversión de tierras agrícolas a bosques y su restauración [49]. Conociendo esto es fácil visionar la planificación estratégica del territorio y se puede implementar la restauración ecológica como mecanismo de prevención de la erosión [42].

La restauración ecológica es un proceso costoso que construye una civilización ecológica brindando estabilidad y sostenibilidad a un ecosistema a largo plazo [50]. Según [41] indica que existen aspectos a considerar para la implementación de RE y de las SbN, tales como:

1. Infraestructura: Conectividad de la infraestructura verde y los corredores y/o la infraestructura gris enverdeciendo.
2. Ecosistemas: Implementar soluciones de restauración ecológica basadas en la naturaleza.
3. Desafíos sociales: Incluye a la seguridad hídrica, desastres naturales, recuperación ecológica, etc.

El éxito de la aplicación de la restauración ecológica y la gobernanza se basa en que los proyectos deben tener la presencia de opciones para experimentar, el uso correcto de las estrategias de comunicación, el apoyo suficiente para el proyecto, un rol proactivo de los actores clave y la integración activa de los stakeholders y sus conocimientos [51].

D. Análisis Costo-Beneficio

Los productos que ofrece la restauración ecológica se centran en la transformación de los recursos naturales a capital natural [50]. La implementación de medidas de restauración ecológica (RE) permite reducir la erosión del suelo y aumentar la cobertura forestal y el valor de los servicios ecosistémicos generados naturalmente [52]. Los proyectos de RE obtienen mejores resultados cuando se trata de un ecosistema seleccionado estratégicamente [53]. Si bien son costosos ya que un proyecto típico cuesta entre \$ 100 y \$ 1000 dólares americanos por hectárea [50], estos se ejecutan bajo un análisis integral de costo-beneficio como un requisito administrativo y financiero que incluye a los insumos y los resultados [50].

Los beneficios que proporcionan los ecosistemas superan el valor de sus servicios ecosistémicos ya que proporcionan productos que también generan beneficios [54]. Debido al impulso de proteger el ambiente y reducir las amenazas para el desarrollo, la calidad de vida y la seguridad humana, varios países como China, han invertido en programas intensivos de restauración ecológica [54]. El financiamiento de estos proyectos se basa en los incentivos económicos que fomentan la inversión privada para la infraestructura verde como la cofinanciación, bonos verdes, banca de crédito, entre otros [55].

El análisis costo-beneficio de los proyectos de restauración ecológica se basa en asignar un valor monetario a los servicios y bienes ecosistémicos que no se comercializan en el mercado para poder generar una política basada en el análisis de transferencia de los beneficios [50].

De acuerdo con [50] afirma que no existe un método estándar para la valoración de los servicios ecosistémicos. Varios países y organismos internacionales han desarrollado guías y metodologías basándose en los siguientes enfoques:

1. Pagos por servicios ambientales (PSA) de Constanza: Permite evaluar los servicios de ecosistema otorgando un valor por unidad de área para internalizar las externalidades de los servicios ecosistémicos [50].
2. Método de Transferencia de Beneficios (BTM): Permite usar información de un lugar en específico y la transfiere a otro para estimar los servicios y bienes ambientales similares al lugar original [50]. Es un método simple, de bajo costo y replicable a través del tiempo y el espacio [50].

El principal reto del análisis costo-beneficio es que puede existir un error de generalización en los valores económicos o en la política del lugar de estudio [50]. Sin embargo, su implementación permite evitar errores de elevado costo por elegir un método de restauración inadecuado [52] y permite evaluar políticas públicas sobre el agua por la provisión de bienes públicos y los efectos de la sociedad sobre este recurso [56].

Según [54] sostiene que la valoración de los servicios ecosistémicos tiene un enfoque sobre los beneficios sociales, el manejo de los ecosistemas y los costos de la restauración ecológica. A pesar de los beneficios sociales en la comunidad, la aceptación social de la restauración ecológica en ecosistemas degradados tiende a ser más alta en grupos jóvenes [53].

Si bien, el análisis costo-beneficio es un método aplicado para comparar el nivel de inversión económica y el valor resultante de la ejecución del proyecto [57]; en el estudio de [57] los mejores resultados se reflejan en la conservación de los bosques naturales y la restauración de cuencas hidrográficas.

E. La Erosión del Suelo en Cuencas Hidrográficas

La erosión del suelo genera pérdidas ecológicas y económicas [58]. Por un lado, se conoce que la erosión del suelo ocasiona la degradación de la tierra y el deterioro de los recursos hídricos en una cuenca hidrográfica [59]. En cambio, la erosión hídrica es un proceso natural que comprende la compactación, desintegración, transporte y deposición de sedimentos en los cursos de agua [60].

Las pendientes altas, las lluvias intensas y las actividades agrícolas intensivas son los factores propicios para la erosión del suelo [59], [61]. Los factores que alteran la erodabilidad son las actividades antrópicas, el tipo de vegetación, la cantidad e intensidad de las precipitaciones, las propiedades fisicoquímicas y la topografía del terreno [59]-[60]-[62]; mientras que, la degradación de la calidad del suelo y la sedimentación en cursos de agua superficial son efectos de la erosión hídrica que comprometen a la seguridad alimentaria e hídrica y alteran la ecología de un ecosistema [60].

La erosión en las zonas ribereñas de los ríos es la principal fuente para la carga de sedimentos en los cuerpos de agua superficial [63]. Las actividades agrícolas son la fuente de carbono, nitrógeno y fósforo para los ecosistemas ripícolas y los ríos [63]. Las tasas de producción de erosión suelen ser altas en las temporadas de invierno debido al aumento de la velocidad de la escorrentía superficial [63]. Los cambios de uso de suelo de cobertura vegetal a tierras agrícolas son la fuente principal de sedimentos [63]. La cobertura vegetal reduce la erosión y conserva el suelo en las cuencas hidrográficas; este tipo de cobertura mitiga el impacto de la precipitación sobre el terreno, previene la erosión eólica en los suelos, reduce la velocidad de la escorrentía superficial y aumenta la percolación del suelo [61].

La canalización de ríos y la construcción de presas, las tierras agrícolas y de pastoreo desestabilizan el suelo y aumentan las tasas de erosión [63]; esto, a su vez, destruye la cobertura vegetal en cuencas hidrográficas [61]; sin embargo, la implementación de proyectos de restauración ecológica reduce rápidamente las tasas de producción de sedimentos y mejora el rendimiento hídrico [62]. De forma complementaria, estos proyectos pueden tener medidas sobre el manejo adecuado de las tierras agrícolas y la transformación de tierras degradadas a cobertura vegetal lo que permite controlar la erosión del suelo [62].

El control de los sedimentos en la fuente de producción establece que mantener el suelo en su lugar es menos costoso que dragarlo en las masas de agua [64]. El transporte de sedimentos es una fuente difusa de contaminación hacia cuerpos de agua superficiales debido al potencial de adsorción de las partículas y a la alta probabilidad de la carga de contaminantes [64]. El transporte de sedimentos hacia cuerpos de agua superficiales genera una alta tasa de deposición y altera la calidad y cantidad del agua en las cuencas hidrográficas [59], [64], y por tanto, un aumento en los costos de tratamiento.

Por otra parte, los fondos de agua buscan fortalecer el suministro de agua limpia y segura y reducir los impactos de los sedimentos mediante la restauración ecológica de ecosistemas degradados [65]. Los proyectos que reúnen las características de minimizar los costos de tratamiento del agua, reducir las tasas de producción de sedimentos, conservar áreas naturales mediante la planificación estratégica de una cuenca hidrográfica conllevan un análisis costo-beneficio de la restauración ecológica previo a su implementación. Por tanto, GGA permite valorar la restauración ecológica y sus beneficios en escenarios hipotéticos considerando la implementación de infraestructura verde y gris [24].

VII. METODOLOGÍA

A. Delimitación del Área de Estudio

Para delimitar el área de estudio se utilizó la aplicación de ArcGIS versión 10.3 y un modelo digital de elevación (DEM) obtenido desde la plataforma Alaska Satellite Facility y el conjunto de datos de ALOS PALSAR. Y, para el procesamiento y caracterización de la información se requirió de la aplicación Microsoft Excel (**Fig. 1**).

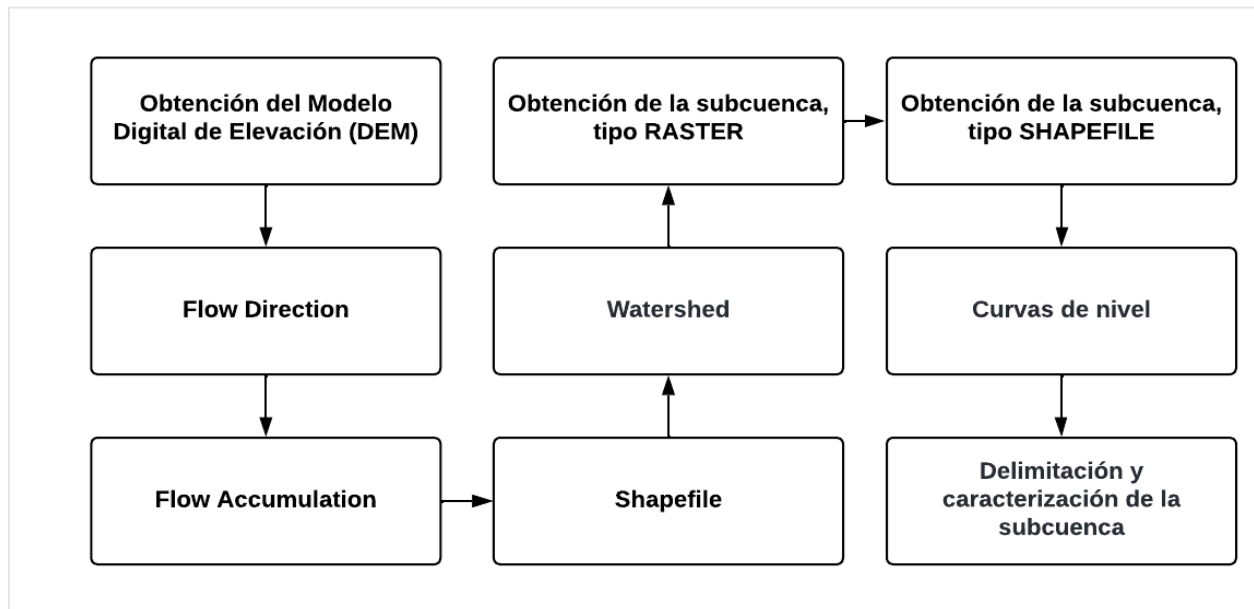


Fig. 1. Metodología de la delimitación y caracterización de la subcuenca

La Subcuenca hidrográfica del río Casacay se sitúa en la provincia de El Oro, al suroeste de la Costa Ecuatoriana (**Fig. 2**). Con una superficie de aproximadamente 121,5 km² [66] es parte del territorio de los cantones de Machala, Pasaje y El Guabo [6]. Posee una altitud que varía entre 79 a 3333 m.s.n.m., con un desnivel altitudinal de 3254 m.s.n.m. y una pendiente media de la cuenca de 44,62 %, lo que la convierte en un espacio de diversos pisos climáticos.

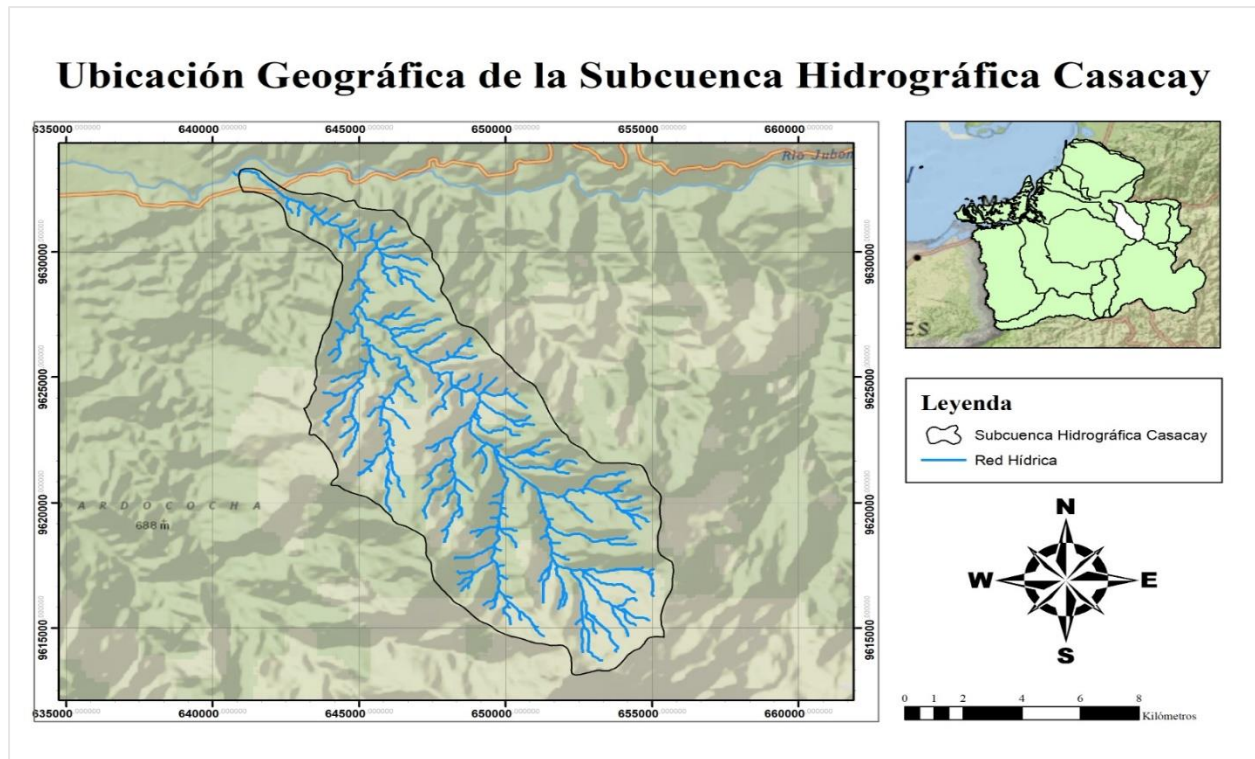


Fig. 2. Mapa de ubicación geográfica de la Subcuenca del río Casacay

Esta subcuenca es considerada como un área de protección hídrica debido a su ubicación geográfica en la zona media del Corredor Ecológico de la provincia de El Oro y por la vegetación remanente con funciones para la provisión de recursos hídricos, especialmente situada en el territorio ocupado en los cantones de Chilla y Pasaje [66]. En el trabajo de [67] se identificó la superficie susceptible a procesos de erosión, la cual corresponde a 277,18 ha distribuidas en la subcuenca alta (Ver **Fig. 3**). Para gestionar la problemática de la susceptibilidad del suelo a erosionar, [67] plantea la rehabilitación forestal con especies diagnóstico que disminuirán el riesgo de erosión y, por ende, el arrastre de sedimentos a largo plazo.

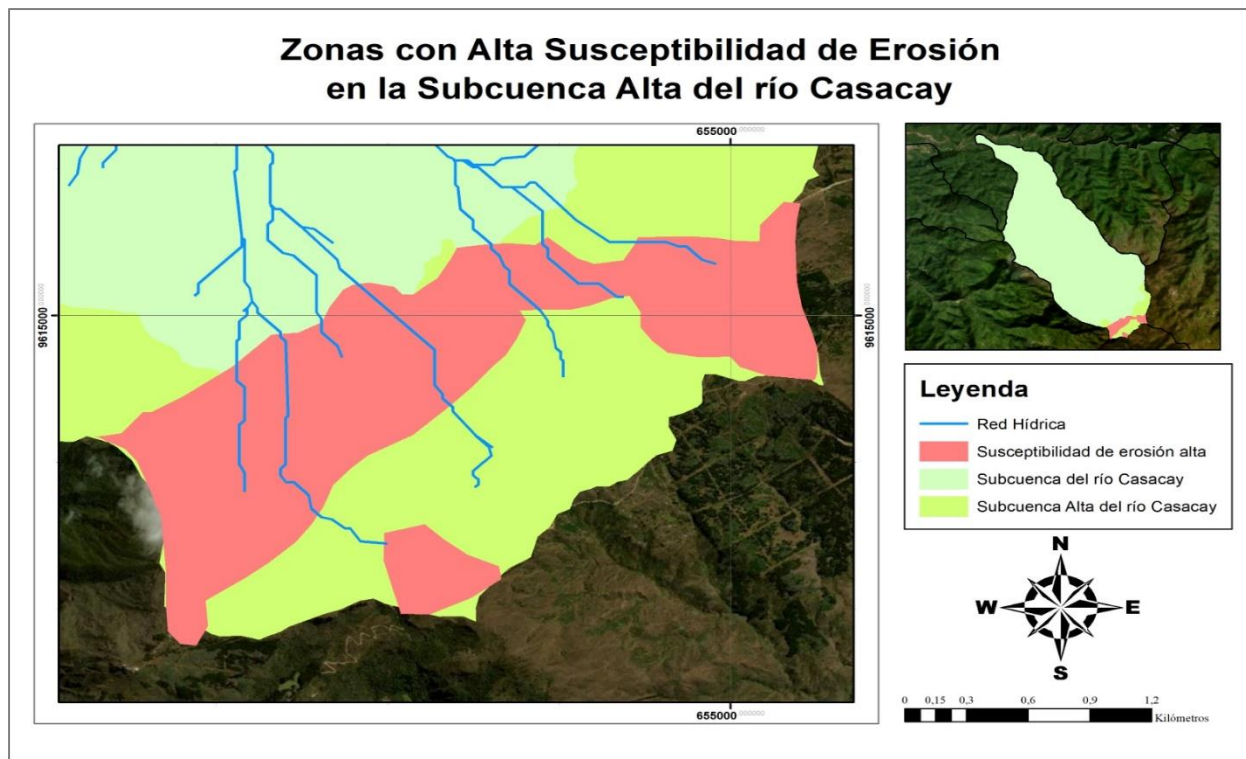


Fig. 3. Mapa de zonas con alta susceptibilidad de erosión en la Subcuenca del río Casacay

De acuerdo con la información proporcionada por [68], dentro del área de la subcuenca del río Casacay se encuentran seis ecosistemas (Ver **Fig. 4**); entre los cuales destacan:

a) *BeTC-02 o Bosque siempreverde estacional de tierras bajas del Jama – Zapotillo*

Está conformado por bosques estratificados que durante todo el año se mantienen con hojas verdes y se desarrollan en terrazas y relieves colinados de hasta 400 m.s.n.m. [68].

b) *BePn-02 o Bosque siempreverde estacional pie montano del Catamayo – Alamor*

En este ecosistema convergen recursos florísticos en tanto de los bosques siempreverdes como de los bosques semidecíduos y deciduos formando bosques multiestratificados [68].

c) *BsBn-05 o Bosque siempreverde montano bajo del Catamayo – Alamor*

Al igual que BePn-02 está conformado por bosques multiestratificados, pero la vegetación herbácea suele ser más densa que los arbustos y árboles [68].

d) *BsAn-04 o Bosque siempreverde montano alto del Catamayo – Alamor*

Es la zona de transición entre dos ecosistemas; el bosque montano y el páramo. Si bien, este ecosistema se sitúa sobre pendientes fuertes, suelo pedregoso y un clima con neblina recurrente, especialmente en época de lluvias, el sotobosque es denso y achaparrado [68].

e) *AsSn-01 o Arbustal siempreverde y herbazal de páramo*

En la zona altitudinal más baja de este ecosistema se caracteriza por el incremento de la riqueza de especies, el número de arbolitos y el promedio de la altura de arbustos [68].

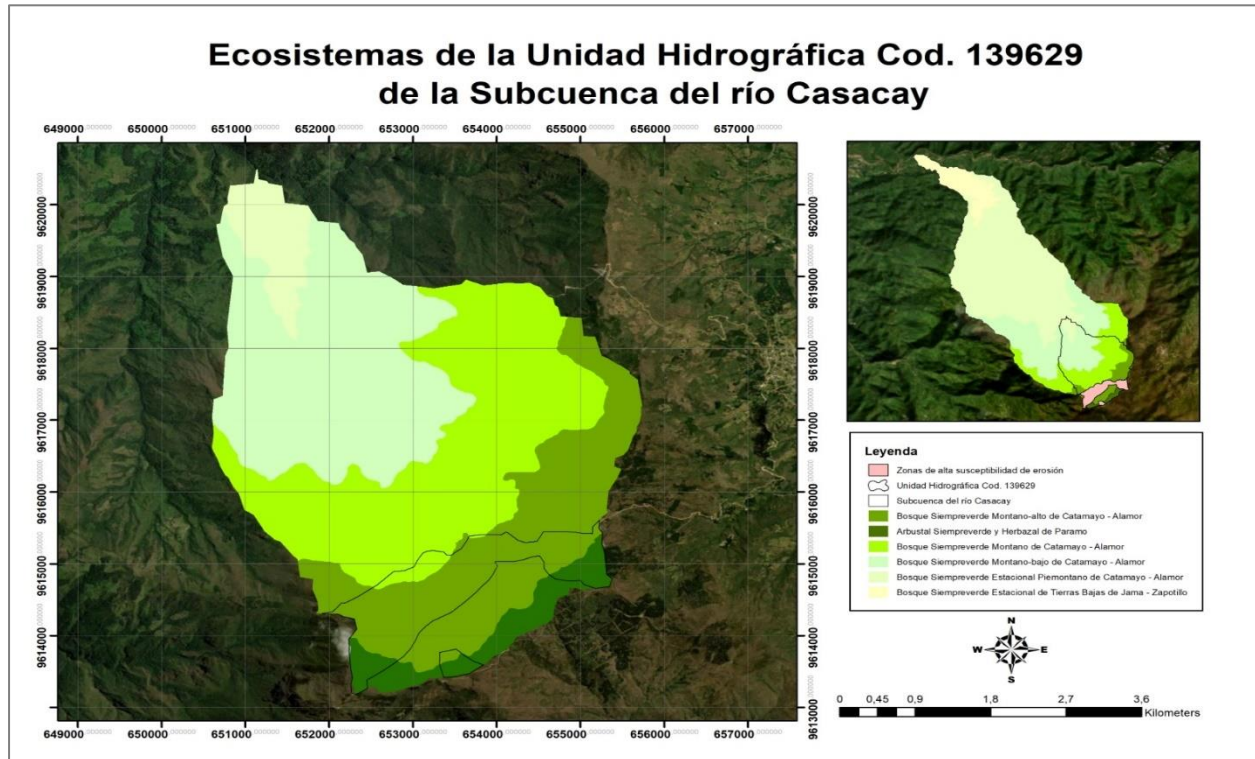


Fig. 4. Mapa de ecosistemas de la unidad hidrográfica cód. 139629

Los ecosistemas han sido intervenidos progresivamente con el paso del tiempo que, a nivel de subcuenca hidrográfica, es común encontrar los siguientes usos:

- Bosque nativo;
- Páramo;
- Vegetación arbustiva y herbácea;
- Plantación forestal de pinos;
- Pastizales; y,
- Mosaicos agropecuarios.

El cambio del uso del suelo se convirtió en la principal problemática en la subcuenca hidrográfica debido al deterioro del suelo y al fácil desprendimiento de la tierra, lo que genera mayor arrastre de sedimentos [2].

B. Variables, Instrumentos y Procedimientos

Green-Gray Assessment de WRI se basa en la teoría de inversión financiera y económica tradicional respondiendo cuántos son los costos estimados por la implementación de infraestructura verde a los sistemas hídricos y lo compara con los beneficios para operadores, proveedores de agua y los escenarios considerados [24]. Esta metodología consta de seis pasos descritos en el diagrama de flujo visualizado en (Fig. 5).

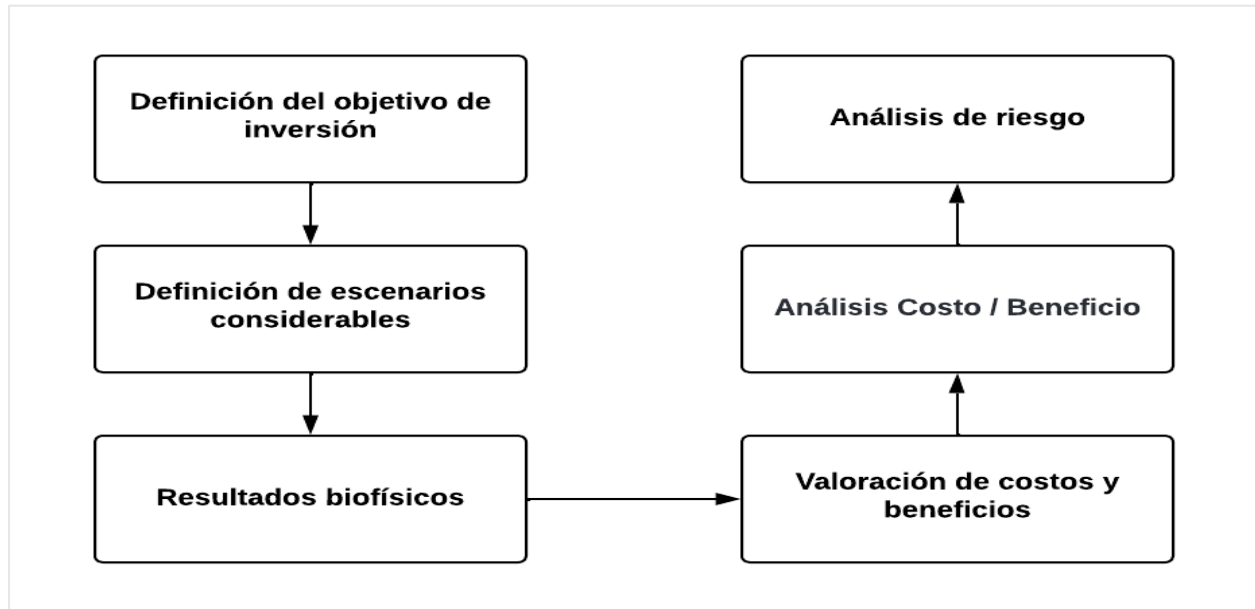


Fig. 5. Diagrama de flujo de la metodología *Green-Gray Assessment*

Fuente: [24]

En cada uno de los pasos de GGA se determinan resultados esperables con metodologías específicas para cada caso. A continuación, se redactan los resultados esperables, métodos, herramientas, variables y fórmulas según corresponda cada paso de la metodología.

Green – Gray Assessment

1. Definición del objetivo de inversión

Para establecer el objetivo de inversión y los resultados ambientales esperables se realizó una revisión bibliográfica considerando los antecedentes y la problemática actual sobre el suministro de agua y la operación de la planta de tratamiento de agua cruda. Adicionalmente, se realizó una entrevista al personal técnico para estimar el volumen de sedimentos que llega a la

planta, y estos datos fueron corroborados con el modelo empírico de la ecuación de pérdida de suelo, *USLE*.

2. Definición de escenarios o portafolios de inversión

Se consideró el estudio de dos portafolios de inversión; el escenario actual o de infraestructura gris y el escenario alternativo o de infraestructura verde-gris.

Por un lado, para el escenario actual se identificaron los ecosistemas presentes y el uso y cobertura del suelo mediante ArcGIS versión 10.3 con información temática del mapa interactivo obtenido desde el portal del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. Se estableció el estado actual y la descripción del área de estudio, los componentes de la infraestructura de abastecimiento de agua, la vida útil y los costos de operación, mantenimiento y capital de la planta de tratamiento de agua potable a través de una entrevista con el personal técnico de la misma.

Según [69] el Banco Interamericano de Desarrollo para los análisis costo – beneficio en proyectos de infraestructura verde-gris para aguas recomienda trabajar con un horizonte de 30 años; simultáneamente, en Brasil y México recomiendan un estimativo de entre 20 a 30 años cuando son inversiones significativas. Por tanto, en este estudio se determinó que el horizonte temporal será de 30 años para la restauración ecológica.

Por otra parte, para el escenario alternativo se identificaron los factores que alteran la planificación del uso suelo mediante el análisis de los datos obtenidos del procesamiento de información anterior y en conjunto de una revisión bibliográfica exhaustiva. Adicionalmente, los componentes individuales de la infraestructura, la priorización de dichos componentes, la secuencia de la ejecución del proyecto y la vida útil del mismo se establecieron mediante una revisión bibliográfica secundaria orientada hacia proyectos de restauración ecológica para el control de sedimentos.

3. Resultados biofísicos

Se estableció el modelo biofísico para la estimación de la tasa de producción de sedimentos en unidades hidrográficas. Según la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo o *Universal Soil Loss Equation*, *USLE*, es el método más usado para predecir la tasa media de erosión en un espacio determinado a largo plazo [70] [71]. Además, *USLE* se basa en el patrón de las precipitaciones, tipo de suelo, topografía, sistemas de cultivo y prácticas de conservación. *USLE* permite calcular

la cantidad de suelo perdida de la erosión laminar en pendiente y considera la erosión por viento o labranza por sí solos.

Si bien, *USLE* permite calcular la cantidad de suelo perdido de la erosión laminar en pendiente, no considera la erosión por viento o por labranza [70]. Por tanto, el método es idóneo para este trabajo debido a su dinamismo de aplicación tanto en tierras agrícolas como en bosques [70] que se adecúan a la situación de la Subcuenca del río Casacay.

Considerando que el proyecto de restauración ecológica iniciará en las zonas con altas susceptibilidad de erosión establecidas por [2] y [67]. La estimación de la producción de tasa de sedimentos se calculó en la unidad hidrográfica correspondiente al área de implementación del proyecto.

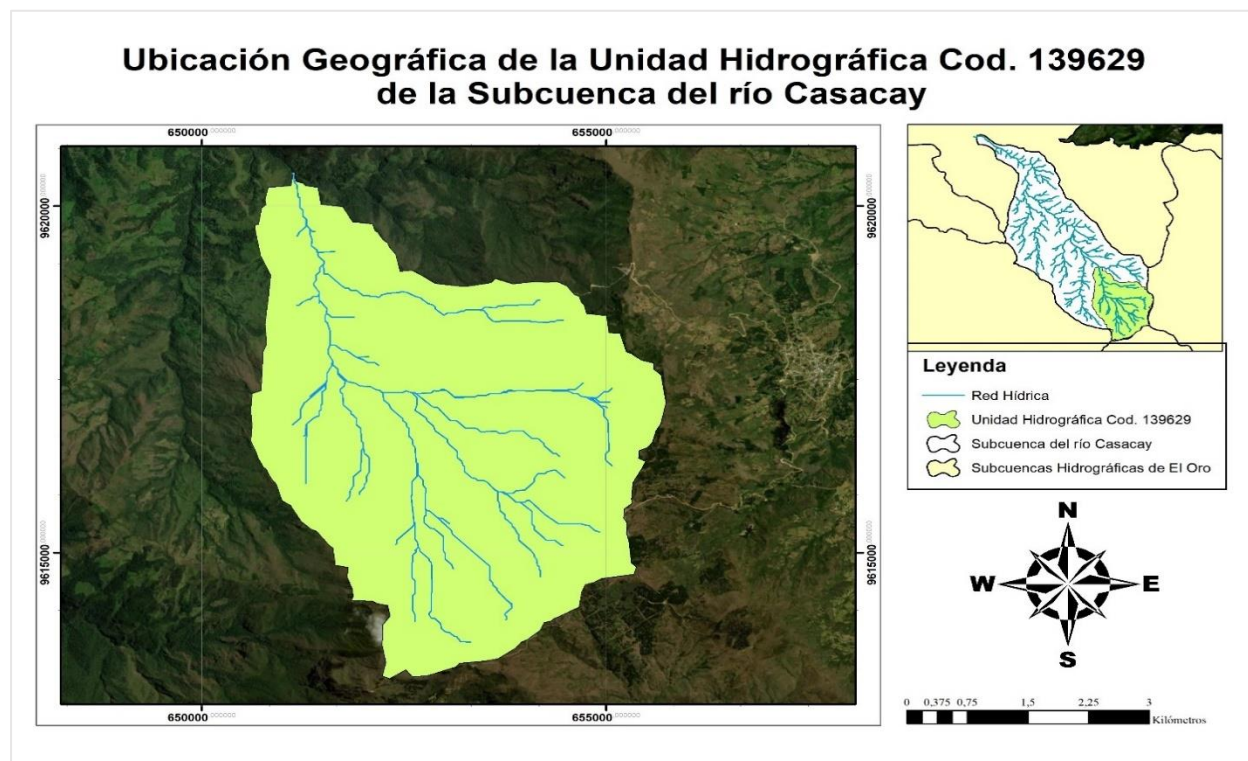


Fig. 6. Mapa de ubicación geográfica de la unidad hidrográfica cód. 139629

La SENAGUA, codificó a la Subcuenca del río Casacay con el número 13962 [67]. Por otra parte, [67] codificó las unidades hidrográficas que están dentro de la subcuenca, siendo así que, en la subcuenca alta, agrupó cuatro unidades hidrográficas de nivel 6. De las cuatro unidades hidrográficas, la unidad seleccionada para estimar la tasa de producción de sedimentos tiene alrededor de 2339,73 hectáreas y está representada por el código 139629.

a. Ecuación universal de pérdida de suelo (USLE)

USLE es una ecuación empírica de regresión múltiple que incorpora variables biofísicas que influyen en la erosión [71]. La misma se expresa en la siguiente ecuación:

$$A = R * K * LS * C * P$$

Ec. 1. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo

b. Descripción de las variables

“A” representa el potencial promedio anual a largo plazo de la pérdida de suelo y puede presentarse en toneladas / hectáreas / año o toneladas / acre / año [70]. El resultado se compara con los siguientes límites tolerables de pérdida de suelo.

TABLA I

TASAS DE TOLERANCIA A LA PÉRDIDA DE SUELO

Clase de erosión de suelo	Pérdida de suelo potencial
Muy baja (Tolerable)	Menor a 6.7 ton/ha/año
Baja	6.7 a 11.2 ton/ha/año
Moderada	11.2 a 22.4 ton/ha/año
Alta	22.4 a 33.6 ton/ha/año
Severa	Mayor a 33.6 ton/ha/año

“R” o factor R de lluvia y escorrentía por ubicación geográfica representa la influencia de la erosión hídrica en un espacio geográfico bajo la premisa de que mientras mayor sea la intensidad y duración de la lluvia, el factor R aumentará y, por tanto, el potencial de erosión será mayor [70].

De acuerdo con [72] afirma que el valor de R es relativamente consistente en cada lugar. Sin embargo, [73] menciona que esta variable no es capaz de reflejar por completo la influencia de las variaciones locales en los patrones de la lluvia sobre la erosión del suelo.

Siendo así, para la estimación del Factor R, se usó la ecuación del Índice Modificado de Fournier – IMF desarrollada por Arnoldus en 1980. Esta ecuación considera la precipitación mensual de todos los meses en un año determinado [74] y está expresada por la siguiente ecuación:

$$IMF = \sum_{i=1}^{12} \frac{Pi^2}{Pt}$$

Ec. 2. Ecuación del índice modificado de Fournier

Dónde;

- Pi representa la precipitación de cada mes y

- Pt es la precipitación media anual del área,

Ambas variables expresadas en mm. [75]. El rango de evaluación del IMF oscila entre 0 hasta > 160, siendo agresividad climática muy baja hasta agresividad climática muy alta [75], expresada en la siguiente tabla.

TABLA II
RANGO Y SIGNIFICANCIA DE LA EVALUACIÓN DEL IMF

IMF	Agresividad climática
0 – 60	Muy baja
60 – 90	Baja
90 – 120	Moderado
120 – 160	Alta
>160	Muy alta

Fuente: [75]

Una vez obtenido el valor IMF para cada uno de los meses en un año específico, se calculó el Factor R, con unidades MJ/(ha*h) determinado por la siguiente ecuación:

$$R = \sum_{i=1}^{12} 38,4 * IMF * 28,3$$

Ec. 3. Ecuación del Factor R

Previo a la estimación con las ecuaciones 2 y 3, se ejecutó un *script* en lenguaje de programación Java para *Google Earth Engine* con los Datos GPM, específicamente *Monthly Global Precipitation Measurement V6* [75], y se obtuvieron los datos pluviométricos mensuales del año 2019.

TABLA III
NIVEL DE EROSIVIDAD DE LA VARIABLE R

Rango de R	Nivel de erosividad
Menor o igual a 2452	Bajo
2452 – 4905	Media
4905 – 7357	Media – Fuerte
7357 – 9810	Fuerte
Mayor a 9810	Muy fuerte

Fuente: [76]

“K” o factor K representa la susceptibilidad de las partículas del suelo a ser desprendidas y transportadas por la lluvia. Debido a esto, la textura es un elemento primordial para determinar el grado de susceptibilidad del terreno a erosionarse por la lluvia [70]. Este factor representa la

influencia combinada de diversas propiedades del suelo que impactan significativamente en la susceptibilidad a la erosión por lluvia y escorrentía en ausencia de protección [73].

El factor K se determinó mediante sistemas de información geográfica, ArcGIS 10.3 y la capa temática de textura de suelos del Instituto Geográfico Militar. Con esta información, se generó información sobre la textura del suelo en el área del terreno considerando los coeficientes de K establecidos por [70] y que se evidencian en la **TABLA IV**.

TABLA IV
COEFICIENTES DEL FACTOR K SEGÚN LA CLASE TEXTURAL

Textural Class	Clase Textural	OMC Promedio	OMC < 2%	OMC > 2%
Clay	Arcilla	0,49	0,54	0,47
Clay loam	Franco arcilloso	0,67	0,74	0,63
Coarse Sandy loam	Franco arenoso grueso	0,16	0,00	0,16
Fine sand	Arena fina	0,18	0,20	0,13
Fine sandy loam	Franco arenoso fino	0,40	0,49	0,38
Heavy clay	Arcilla pesada	0,38	0,43	0,34
Loam	Franco	0,67	0,76	0,58
Loam fine sand	Arena fina limosa	0,25	0,34	0,20
Loamy sand	Arena limosa	0,09	0,11	0,09
Loamy very fine sand	Arena muy fina limosa	0,87	0,99	0,56
Sand	Arena	0,04	0,07	0,02
Sand clay loam	Franco arenoso arcilloso	0,45	0,00	0,45
Sandy loam	Franco arenoso	0,29	0,31	0,27
Silt loam	Franco limoso	0,85	0,92	0,83
Silty clay	Arcilla limosa	0,58	0,61	0,58
Silty clay loam	Franco arcillo limoso	0,72	0,79	0,67
Very fine sand	Arena muy fina	0,96	1,03	0,83
Very fine sandy loam	Franco arenoso muy fino	0,79	0,92	0,74

Nota: Los coeficientes están expresados para representar las siguientes unidades: ton/ha/año

Mediante la herramienta *Geostatistical Analyst* se interpolaron los valores del factor K asignados para cada clase textural existente en el área de estudio. Se debe considerar que entre mayor sea el coeficiente, mayor susceptibilidad de erosión representará.

“LS” o factor de longitud – gradiente de la pendiente representa la pérdida considerando la pendiente estándar del 9% y la longitud de la pendiente de aprox 22,13 metros [70] [72]. La relación entre las variables se basa en que cuánto más pronunciada y larga sea la pendiente, el riesgo por la

erosión aumentará en el lugar [72] [77]. Para estimar el valor de LS, [77] establece la siguiente ecuación:

$$LS = 0.065 + 0.0456 * \text{pendiente } \% + 0.006541 * (\text{pendiente } \%)^2 * (\text{longitud de pendiente} / 22.1 \text{ m})^{NN}$$

Ec. 4. Ecuación del Factor LS

Donde, “NN” es el valor asignado según el porcentaje de la pendiente y se establece en la siguiente tabla:

TABLA V
COEFICIENTE APLICADO A LAS VARIABLES LS SEGÚN LA PENDIENTE

Pendiente % (P%)	P% < 1	1 ≤ P% < 3	3 ≤ P% < 5	P% ≥ 5
NN	0,2	0,3	0,4	0,5

La unidad hidrográfica posee pendientes iguales y mayores que 5 %, por tanto, en la ecuación se usó el coeficiente NN = 0,5.

El factor LS se determinó mediante sistemas de información geográfica, ArcGIS 10.3, y un modelo digital de elevación (DEM) de 12,5 m de la unidad hidrográfica 139629. En ArcGIS 10.3 se usó la herramienta *ArcHydro Tools* para obtener la pendiente, la dirección del flujo y la acumulación del flujo. En *Raster Calculator*, la **Ecuación 4** se ejecutó considerando los elementos obtenidos en *ArcHydro Tools*, quedando así la expresión de la **Ecuación 5**:

$$LS = (Fac * \frac{Tdem}{22.1})^{0.5} * (0.065 + 0.045 * \text{Pendiente } \% + 0.0065 * (\text{Pendiente } \%)^2)$$

Ec. 5. Ecuación del Factor LS aplicado en ArcGIS

Nota: La separación de decimales en ArcGIS es (.)

Donde, Tdem es el tamaño de los píxeles del modelo digital de elevación equivalente a 12,5 m para este trabajo. Si bien, el valor de LS puede variar debido a las especificaciones del terreno, [78] relaciona el porcentaje de la pendiente y le asigna la ponderación correspondiente a la variable, esto se expresa en la **TABLA VI**.

TABLA VI
COEFICIENTE LS SEGÚN LA PENDIENTE DEL TERRENO

Pendiente (%)	LS
0 – 3	0,3
3 – 12	1,5
12 – 18	3,4
18 – 24	5,6
24 – 30	8,7
> 30	14,6

Nota: Fuente [78]

Entre mayor sea la pendiente, mayor será el factor LS y aumentará la susceptibilidad de erosión del terreno.

“C” o factor C representa la práctica o manejo de cultivos y la eficacia relativa de estos sistemas de cultivo y los manejos del suelo para el control de la pérdida de suelo. Compara la pérdida de suelo bajo un escenario de un sistema de cultivo y labranza específico [70]. A continuación, en **TABLA VII** se expresan los valores de C asignados según el uso de suelo:

TABLA VII
COEFICIENTES DEL FACTOR C SEGÚN EL TIPO DE USO DE SUELO

<i>Land use</i>	Uso de suelo	C Factor
Water	Agua	0
Dense forest	Bosque espeso	0,05
Open forest	Bosque abierto	0,10
Plantation	Plantación	0,13
Matorral	Matorral	0,20
Pasture	Pastizal	0,30
Agriculture	Agricultura	0,60
Bad lands	Suelos desnudos	1,00

Por otra parte, [73] afirma que para analizar el factor C es imprescindible evaluar los efectos de la cobertura y la gestión o manejo de la misma de forma conjunta ya que su efecto combinado influye sobre la erosión del terreno. Considerando esto, [70] propone el cálculo del factor C basado en el tipo de cultivo y el método de labranza, expresado en la **Ecuación 6**:

$$C = \text{Factor de tipo de cultivo} * \text{Factor del método de labranza}$$

Ec. 6. Ecuación del Factor C

Para la implementación de la **Ecuación 6**, se debe considerar los coeficientes asignados para cada tipo de cultivo, ver **TABLA VIII**, y para el método de labranza considerados, ver **TABLA IX**.

TABLA VIII
COEFICIENTES DEL FACTOR C SEGÚN EL TIPO DE CULTIVO

<i>Crop Type</i>	Tipo de Cultivo	Factor
Grain corn	Maíz en grano	0,40
Silage corn, beans & canola	Ensilaje de maíz, frijol y canola	0,50
Cereals (Spring & Winter)	Cereales (primavera e invierno)	0,35
Seasonal horticultural crops	Cultivos hortícolas estacionales	0,50
Fruit trees	Árboles frutales	0,10
Hay and pasture	Heno y pasto	0,02

TABLA IX
COEFICIENTES DEL FACTOR C SEGÚN EL MÉTODO DE LABRANZA

<i>Tillage Method</i>	Método de labranza	Factor
Fall plow	Arado de otoño	1,0
Spring plow	Arado de primavera	0,90
Mulch tillage	Labranza con mantillo	0,60
Ridge tillage	Labranza de crestas	0,35
Zone tillage	Labranza de zona	0,25
No-till	No labranza	0,25

Según la información temática, la unidad hidrográfica 139629 se conforma por coberturas y uso de suelo como páramo, vegetación arbustiva y herbácea, bosque nativo, pastizales, mosaico agropecuario y plantación forestal. En una visita *in situ* realizada el 18 de mayo del 2024, se determinó que las áreas de mosaico agropecuarios están vinculadas a los pastizales por la crianza de ganado para la producción de leche y que las áreas de plantaciones forestales corresponden a pinos (*Pinnus patula*), una especie no nativa.

El factor C para la plantación de pinos, utilizando la **Ecuación 6**, es de 0,35 considerando que es un árbol frutal y no tiene método de labranza. Con estos antecedentes, se determina simplificación de las siguientes coberturas para la estimación del factor C en la **TABLA X**.

TABLA X
COEFICIENTE DEL FACTOR C APLICADOS EN LA SUBCUENCA ALTA

Cobertura y uso de suelo	Área	C Factor
Páramo		
Vegetación arbustiva y herbácea	Bosque	0,05
Bosque nativo		
Mosaico agropecuario	Pastizal	0,30
Pastizal		
Plantación forestal	Plantación de pinos	0,35

Entre mayor sea el coeficiente del factor C o más se acerque a 1, el área será más susceptible a erosionar.

“P” o factor de práctica de conservación representa los efectos de las prácticas de conservación que reducen la cantidad y la tasa de escurrimiento de agua y, por tanto, reducir potencialmente la cantidad de erosión [70]. [70] establece los valores del factor P asignado según la práctica de conservación, expresados en la siguiente tabla.

TABLA XI
COEFICIENTES DEL FACTOR P

<i>Support Practice</i>	Practica de conservación	P Factor
Up and down slope	Pendiente arriba y abajo	1,0
Cross slope	Pendiente transversal	0,75
Contour farming	Agricultura de contorno	0,50
Strip cropping, cross slope	Cultivo en franjas, pendiente transversal	0,37
Strip cropping, contour	Recorte de tiras, contorno	0,25

[73] afirma que siempre que se vaya a cultivar un suelo en pendiente y exponerlo a lluvias erosivas, la protección del suelo debe estar respaldada por prácticas que ralenticen el escurrimiento del agua para así reducir el transporte de tierra y, a su vez, de sedimentos hacia los cursos de agua.

Considerando esto, se determinó que la unidad hidrográfica 139629 no posee prácticas de apoyo que mitiguen la erosión del suelo, por tanto, para la estimación de la producción de sedimentos, el factor P equivale a 1,0, siendo que, mientras el coeficiente sea más alto, la probabilidad de erosionar aumentará.

4. Valoración de costos y beneficios

El cuarto paso constituye la monetización de los costos y beneficios anuales de los portafolios de inversión.

4.1. Valoración de costos

Para el cálculo de los costos totales del escenario alternativo se contempló cinco componentes: inversión inicial, costos de transacción, la operación y el mantenimiento del proyecto y los costos de oportunidad.

4.1.1. Costos de inversión

Los costos de inversión incluyen el capital inicial, los gastos en materiales y los costos de mano de obra necesarios para implementar las actividades de infraestructura verde durante el horizonte de inversión [24]. Para fines prácticos se decidió separar este costo en dos fases: inversión inicial e implementación.

El colle (*Buddleja coriácea*), es una especie cuyas semillas necesitan especial cuidado para su germinación, por lo que se recomienda establecerlas en almácigos [79]. Las semillas de la familia *Buddlejaceae* se caracterizan por ser pequeñas [80] por lo que apenas tiene nutrientes y energía acumulada para su germinación [81]. El tamaño de la semilla es una variable determinante para escoger la estrategia adecuada para efectuar la restauración ecológica. De acuerdo con [82] las plantas con semillas grandes son más adecuadas para la siembra directa al presentar una probabilidad de germinación dos veces mayor que aquellas con semillas pequeñas. El vivero se presenta como la estrategia más adecuada para la restauración de páramos al proteger a las plantas de las condiciones estresantes de este ecosistema durante la etapa más crítica y vulnerable de su ciclo de vida [83].

De esta forma, se establecen los costos considerando que la propagación del colle amerita el establecimiento de un vivero. Las actividades y suministros necesarios para el cálculo del costo de producción de plantas en viveros se basaron en [84]. Los costos se determinaron mediante revisión bibliográfica y el desglose de los ítems se presentan en la **TABLA XII**.

TABLA XII
ACTIVIDADES Y SUMINISTROS PARA COSTOS INICIALES

Restauración asistida	Actividades / Suministros
Compra de semilla	Semilla de colle
Preparación de sustrato	Semillero (Almácigo)
	Ensamblaje de componentes y sustratos
Suministros	Hoyadoras
Siembra en vivero	Costos laborales de siembra y trasplante
	Costos laborales del coordinador del proyecto
	Costos laborales del asistente del coordinador del proyecto
	Costos laborales del guardaparque
Cuidado en vivero	Control de malezas
	Poda
Otros	Vehículo
	Combustible
	Mantenimiento
Actividades de protección	Diseño de vivero
	Construcción y adecuación de vivero
	Cercado

4.1.2. Costos de transacción

Son los gastos previstos para llevar a cabo las inversiones, como la divulgación y la participación de los titulares de tierras [24]. Se consideró que, estos costos ascienden al 17% del coste anual invertido, basándose en el referente nacional de Pimampiro, proyecto pionero de los esquemas financiero-económicos para la provisión de servicios ambientales hidrológicos en América [85].

4.1.3. Costos de operación y mantenimiento

Los costos recurrentes de operación y mantenimiento incluyen todas las actividades e insumos necesarios para mantener a través del tiempo los componentes de la infraestructura verde [86]. Las actividades y suministros necesarios para la operación y mantenimiento del proyecto se presentan en la **TABLA XIII**, basado en la información proporcionada por [84].

TABLA XIII
ACTIVIDADES Y SUMINISTROS PARA COSTOS OPERATIVOS

Restauración asistida	Actividades/Suministros
Operación y mantenimiento	Control de malezas
	Poda
	Reparación de cercado

4.1.4. Costos de oportunidad

Son los beneficios potenciales a los que se renuncia por participar en actividades de infraestructura natural [24]. En casos de éxito realizados en Río de Janeiro y Sao Paulo, los costos de oportunidad están asociados al valor del uso alternativo de la tierra al que se renuncia mediante las intervenciones de conservación. El estimativo de estos costos está determinado por el uso más común o la categoría de uso de la tierra más rentable y/o productiva que habría ocurrido sin la intervención de conservación. Los datos necesarios para el cálculo de los costos oportunidad se obtuvieron mediante revisión bibliográfica.

4.2. Valoración de beneficios

Por otro lado, los beneficios fueron expresados en función de los costos evitados en el tratamiento del agua (a que parte de la operación).

4.2.1. Costos evitados en el tratamiento del agua

El tratamiento del agua en un escenario con excesiva presencia de sedimentos implica incurrir en gastos como la cantidad de productos químicos usados para tratar la turbiedad del agua, mano de obra para la limpieza y remoción de sedimentos y costos varios de mantenimiento asociados al alquiler de maquinaria para limpieza de sedimentos y el mantenimiento y/o reparaciones de la tubería de la línea de conducción. Los costos evitados se estimaron mediante el desarrollo de curvas de costos en función de la cantidad de sedimentos y niveles de turbiedad. Se utilizó un método de conversión de unidades, siguiendo cuatro pasos para contabilizar los costos evitados del tratamiento del agua debido a la turbidez (Ver **Fig. 7**).

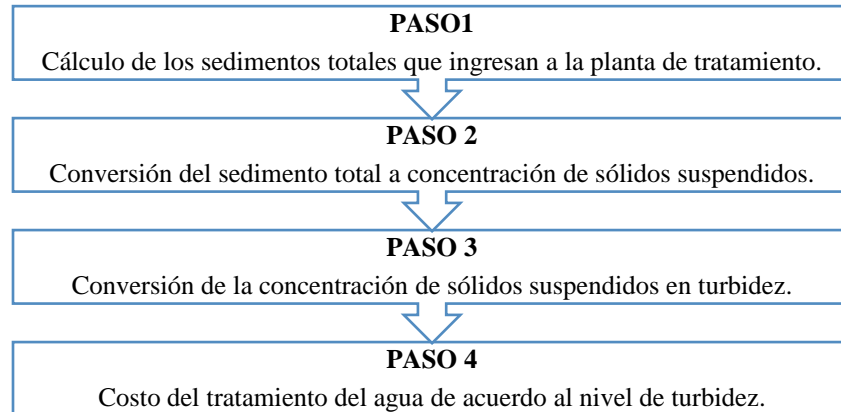


Fig. 7. Método de conversión de unidades para estimar costos evitados

Paso 1: Cálculo de los sedimentos totales que ingresan a la planta de tratamiento.

Es la cantidad de sedimentos que recibe la planta de tratamiento en el escenario actual. Este dato será proporcionado por la Mancomunidad “La Esperanza” mediante entrevista directa.

Paso 2: Conversión del sedimento total a concentración de sólidos suspendidos.

Se utilizó la ecuación general propuesta por [87], utilizada en los trabajos referenciales efectuados en Sao Paulo y Río de Janeiro.

$$SS_t = \frac{S_{ed}}{Q * 0,0864}$$

Ec. 7. Ecuación para la conversión de Sed a SST

Donde:

- SS es la concentración de sólidos suspendidos totales en el año t expresados en mg/l.
- S_{ed} es el sedimento total que llega a la planta de tratamiento en ton/día.
- Q es el caudal medio de la Subcuenca Casacay en m^3/seg .
- 0,0864 es el factor de conversión entre sedimentos diarios y sólidos en suspensión [87].

Paso 3: Conversión de la concentración de sólidos suspendidos en turbidez.

Es la cantidad de turbidez expresada en NTU, *Nephelometric Turbidity Unit*, que registra la planta de tratamiento durante los monitoreos de calidad en el escenario actual. Este dato fue proporcionado por la Mancomunidad La Esperanza mediante entrevista directa.

Paso 4: Costo del tratamiento del agua de acuerdo con el nivel de turbidez.

Los costos del tratamiento por metro cúbico de agua tratada se expresaron en función de los costos de los productos químicos utilizados para tratar la turbiedad. Se utilizó una ecuación de costos, sugerida por [88], que ajusta logarítmicamente la relación entre la variable turbidez y sus costos de reducción de acuerdo a datos proporcionados por la Mancomunidad La Esperanza detallados en la **TABLA XIV**.

TABLA XIV
REGISTRO NTU Y COSTO MENSUAL ASOCIADO

Período 2023	Turbidez (NTU)	Costo mensual del Al₂(SO₄)₃ en USD
Enero	3.545,00	14.129,00
Febrero	350,00	6.461,00
Marzo	5.800,00	13.419,00
Abril	5.732,00	12.034,50
Mayo	1.490,00	7.987,50
Junio	45,60	994,00
Julio	22,80	1.491,00
Agosto	380,00	994,00
Septiembre	97,70	497,00
Octubre	59,70	994,00
Noviembre	11,50	497,00
Diciembre	88,40	4.970,00
PROMEDIO	1.468,56	5.372,33

En la **Figura 8** se presenta la ecuación que relaciona las variables previamente mencionadas.

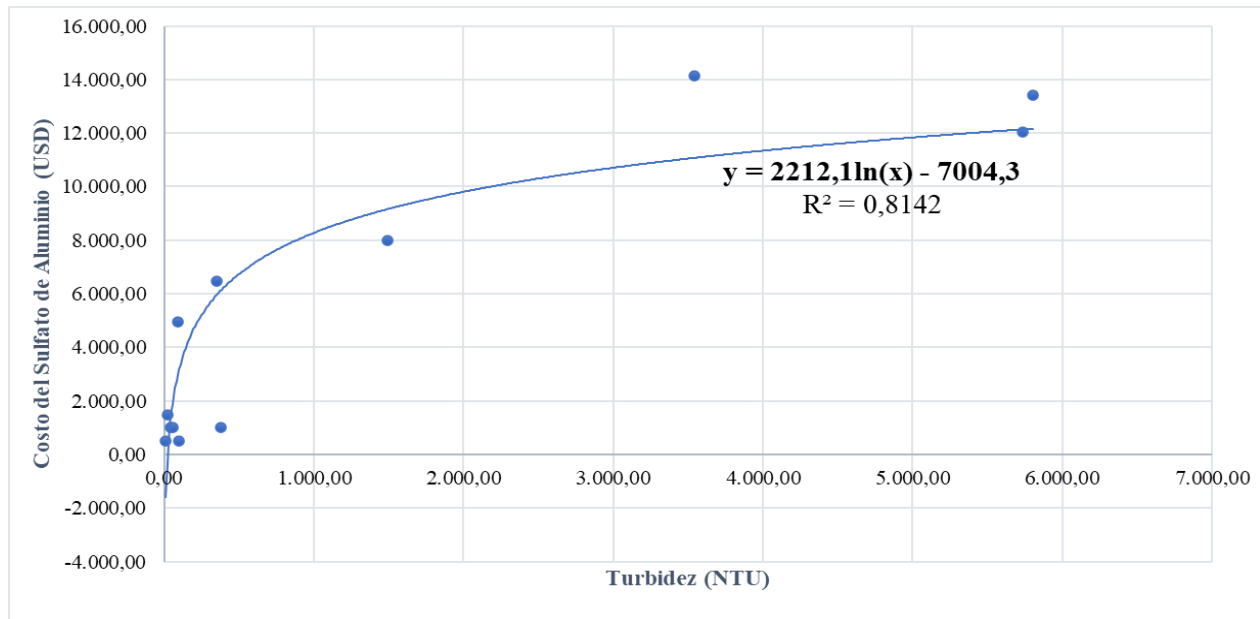


Fig. 8. Gráfica de la relación entre turbidez y costos asociados a su tratamiento

$$C = 2212,1 * \ln(TU) - 7004,3$$

Ec. 8. Ecuación de la curva con ajuste logarítmico entre turbidez y costos de reducción

Donde:

- C es el costo de los insumos químicos para el tratamiento de la turbidez en USD.
- TU es el nivel de turbidez en NTU

Los otros costos directamente relacionados con la turbidez, como mano de obra y los costos de mantenimiento de la planta, se consideraron proporcionales a la cantidad de sedimento que llega a la unidad a través de sólidos suspendidos, expresándose de acuerdo con [69] de la siguiente forma:

$$C_{otros} = (OC * SS_t) / SS$$

Ec. 9. Ecuación de estimación de costos asociados a la turbidez

Donde:

- C_{otros} representa otros costos relacionados con la turbidez en el año t expresados en USD.
- OC representa los otros costos relacionados con la turbidez en el escenario actual expresados en USD.
- SS_t es la concentración de sólidos suspendidos en el año t en mg/l
- SS es la concentración de sólidos suspendidos en el escenario actual en mg/l.

5. Análisis costo/beneficio

Las tasas de descuento social para la evaluación económica de proyectos en un rango entre el 8 % y el 15% son las más aconsejadas por la mayoría de los organismos de financiación multilaterales, así como organismos de múltiples países en vías de desarrollo [89]. La tasa de descuento establecida para el proyecto es del 12%, valor estándar aplicado por instituciones de planificación y organismos multilaterales en América Latina, como el BM - Banco Mundial y el BID - Banco Interamericano de Desarrollo [90]. Para la construcción del flujo de caja del escenario alternativo se consideró una tasa de inflación del 3,5% siendo el valor anual más alto registrando en los últimos cinco años [91].

Los indicadores financieros que se seleccionaron para el análisis son: Valor Actual Neto (VAN), Índice de rentabilidad (B/C), Período de recuperación (*Payback* Descontado) y Tasa Interna de Retorno (TIR). Las ecuaciones empleadas para el cálculo de los indicadores fueron las recopiladas por [92].

5.1. Valor Actual Neto (VAN)

$$VAN = -C_0 + \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+r)^t}$$

Ec. 10. Ecuación del VAN

Donde:

- C_0 es el componente de inversión inicial
- C_t es el flujo de caja en el periodo t .
- r es la tasa de descuento social.
- T es el número total de periodos
- t es el periodo en el que ocurre el flujo de caja

5.2. Índice de rentabilidad (B/C)

$$B/C = \frac{VAN}{|C_0|}$$

Ec. 11. Ecuación del índice de rentabilidad

Donde:

- VAN es el Valor Actual Neto

- C_0 es el componente de inversión inicial

5.3. Tiempo de recuperación (Payback descontado)

$$\text{Payback descontado} = t - 1 + \frac{I_0}{C_{VAN}}$$

Ec. 12. Ecuación del payback descontado

Donde:

- t es el año en que el componente de inversión inicial casi se recupera
- I_0 es la inversión restante por recuperar al inicio del año t .
- C_{VAN} es el valor presente del flujo neto en el periodo.

5.4. Tasa Interna de Retorno (TIR).

$$TIR = VAN = 0$$

Ec. 13. Ecuación del TIR

6. Análisis de riesgo

De acuerdo con [69], las variables más relevantes para analizar la solidez financiera de proyectos de restauración ecológica enfocados hacia la gestión de sedimentos son los costos de capital, los costos de restauración y el rendimiento de la infraestructura natural. Para el análisis de las tres variables anteriormente mencionadas se utilizó la simulación Monte Carlo, una técnica estadística que mediante funciones de distribución y después de n iteraciones, simula el comportamiento de sistemas complejos o procesos que son influenciados por la incertidumbre. La aplicación del método Monte Carlo se ejecutó con la ayuda de la herramienta *Risk Simulator* que funciona como complemento de *Microsoft Excel*, descargada como versión de prueba desde la página *Software Shop* en su versión 2020. Una vez instalada, se puede visualizar como una pestaña *Excel*, con el despliegue de opciones presentado en la **Figura 9**.

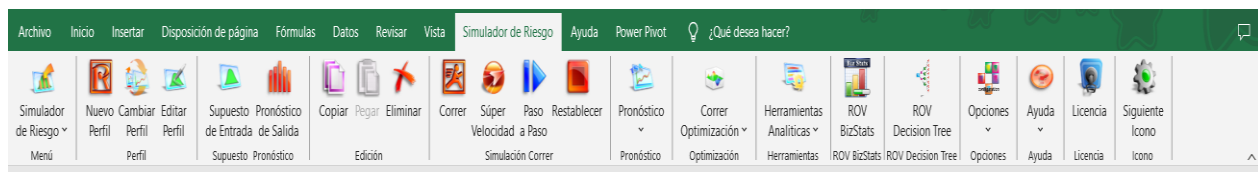


Fig. 9. Cinta de opciones de la herramienta *Risk Simulator*

Para iniciar la simulación, se seleccionó la opción Nuevo Perfil, en donde se edita tanto el nombre como el número de iteraciones del perfil. Acto seguido se seleccionó el supuesto de entrada o variable independiente, utilizando una distribución triangular que permite introducir valores mínimos, máximos y los que con mayor probabilidad pueden suceder (Ver Fig. 10).

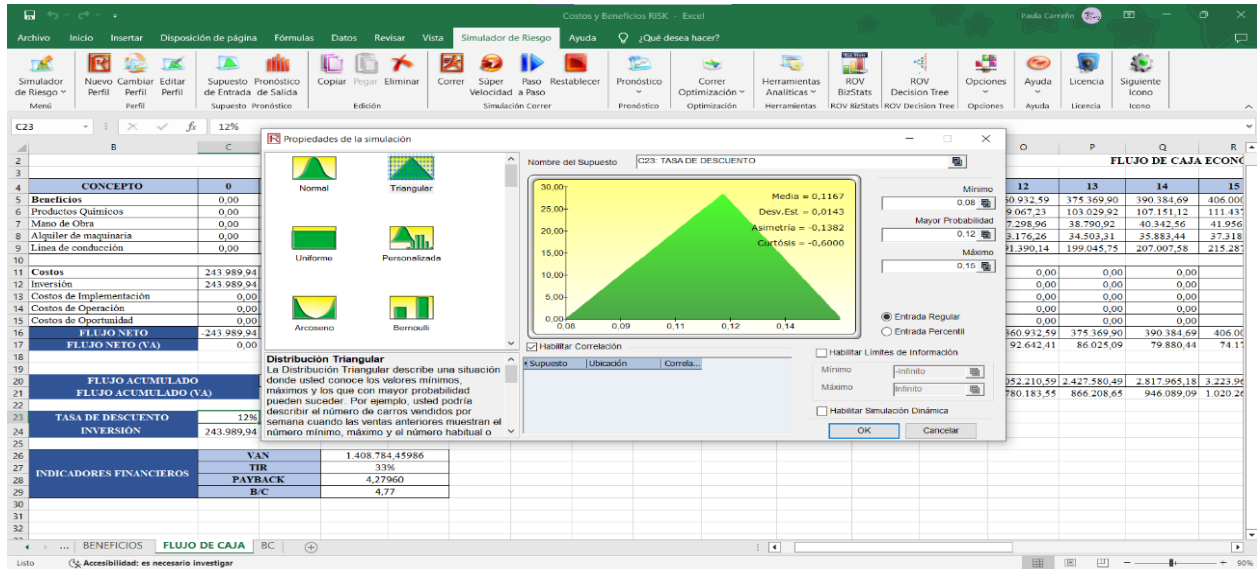


Fig. 10. Distribución del supuesto de entrada de un perfil de simulación

Una vez ingresada la variable dependiente o pronóstico de salida, se selecciona la opción Correr para poner en marcha el programa, desplegándose ventanas donde evidencian el progreso de las simulaciones e histogramas de las variables de salida (Ver Fig. 11).

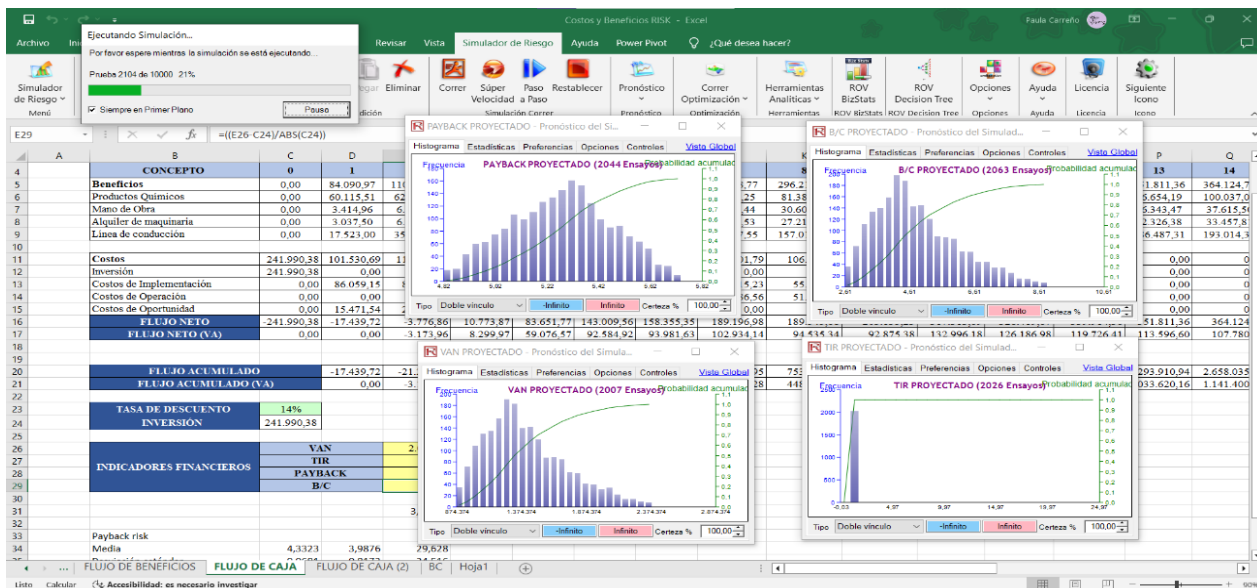


Fig. 11. Ventanas desplegadas durante la simulación para el análisis de sensibilidad

Para el análisis de la sensibilidad del proyecto de restauración ecológica, se ejecutó un total de 10.000 iteraciones, considerando valores distribuidos en escenarios de bajo y alto riesgo detallados en la **TABLA XV**.

TABLA XV
VARIABLES Y ESCENARIOS CONSIDERABLES

Variables independientes	Escenario de bajo riesgo	Escenario actual	Escenario de alto riesgo
Tasa de descuento	8%	12%	15%
Eficiencia de retención de sedimentos	85%	90%	95%
Tasa de inflación contemplada para costos y beneficios	3%	3.5%	4%

VIII. RESULTADOS

1. Objetivo de inversión

1.1. Objetivo de inversión y resultados ambientales esperables

1.1.1. Objetivo de inversión

Reducir el volumen de la carga de sedimentos generados en la subcuenca alta de Casacay mediante la restauración ecológica en las zonas con alta susceptibilidad de erosión para la reducción de sedimentos y turbidez en el tratamiento de sedimentos y turbidez del agua en el sistema de tratamiento.

1.1.2. Resultados ambientales esperables

Mediante entrevista se estimó que la producción de sedimentos promedio anual equivale 9000 m³ o 9000 ton en la Planta de captación “La Danesa”. Este valor tiende a variar de acuerdo con la intensidad de los procesos de tormenta, temporadas de lluvia y los fenómenos naturales como El Niño.

1.2. Inversionistas

La cuenca del río Casacay beneficia del suministro de agua a los cantones de Machala, Pasaje y El Guabo [6]. Si bien, la empresa encargada de la Planta de Captación “La Danesa” y la Planta Potabilizadora “La Esperanza”, se determinó que los inversionistas para el proyecto de restauración ecológica en la cuenca alta sean las empresas públicas encargadas del suministro y administración del servicio de agua en las localidades mencionadas. Siendo así, los siguientes inversionistas:

- Empresa pública “Aguas Machala”, AGUASMACHALA-EP
- Empresa pública de Agua, Alcantarillado y Aseo de Pasaje, AGUAPAS-EP
- Empresa pública de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario de El Guabo, EPAAGUA

1.3. Beneficiarios y acreedores

[67] identificó a las comunidades más importantes según la unidad hidrográfica en la que se encuentran, considerando que la subcuenca baja consta de una unidad hidrográfica, mientras que

la subcuenca media y alta de cuatro unidades de nivel 6 respectivamente, expresadas en la siguiente tabla.

TABLA XVI
LISTADO DE POBLADOS EN LA SUBCUENCA CASACAY

Poblados según su ubicación en la Subcuenca Casacay		
Subcuenca baja	Subcuenca media	Subcuenca alta
<ul style="list-style-type: none"> • Casacay • Los Playones 	<ul style="list-style-type: none"> • El Naranjo • Guirishio • San Antonio • Dumarí • Mochata • Dumarire 	<ul style="list-style-type: none"> • Bachiquillo • Gallo Cantana • Picota

Fuente: [67]

Estos poblados y la población de los cantones Machala, Pasaje y El Guabo son los beneficiarios del proyecto, en caso de ejecutarse.

1.4. Herramienta de apoyo para la toma de decisiones

Para evaluar la efectividad económica del presente estudio considerando dos escenarios o alternativas se utilizó el análisis costo – beneficio. Según [93] y [94] este análisis permite evaluar la efectividad de un proyecto considerando varias alternativas y así expresarlo en términos monetarios. Los escenarios establecidos en el estudio son el actual y el alternativo basados en la infraestructura gris y verde existente en cada uno.

2. Escenarios de estudio

6.1. Escenario actual o infraestructura gris

6.1.1. Uso y cobertura del suelo en la Unidad Hidrográfica

La unidad hidrográfica de Cód. 139629 determinada por [67] es un espacio comprendido en la subcuenca alta del río Casacay. Sobre este territorio se sitúan las zonas con alta susceptibilidad de erosión y presenta coberturas como bosque nativo correspondiente al ecosistema montano alto, vegetación arbustiva y herbácea, páramo, mosaicos agropecuarios y pastizales, y plantación forestal correspondiente a la plantación de pinos (Ver **Fig. 12**)

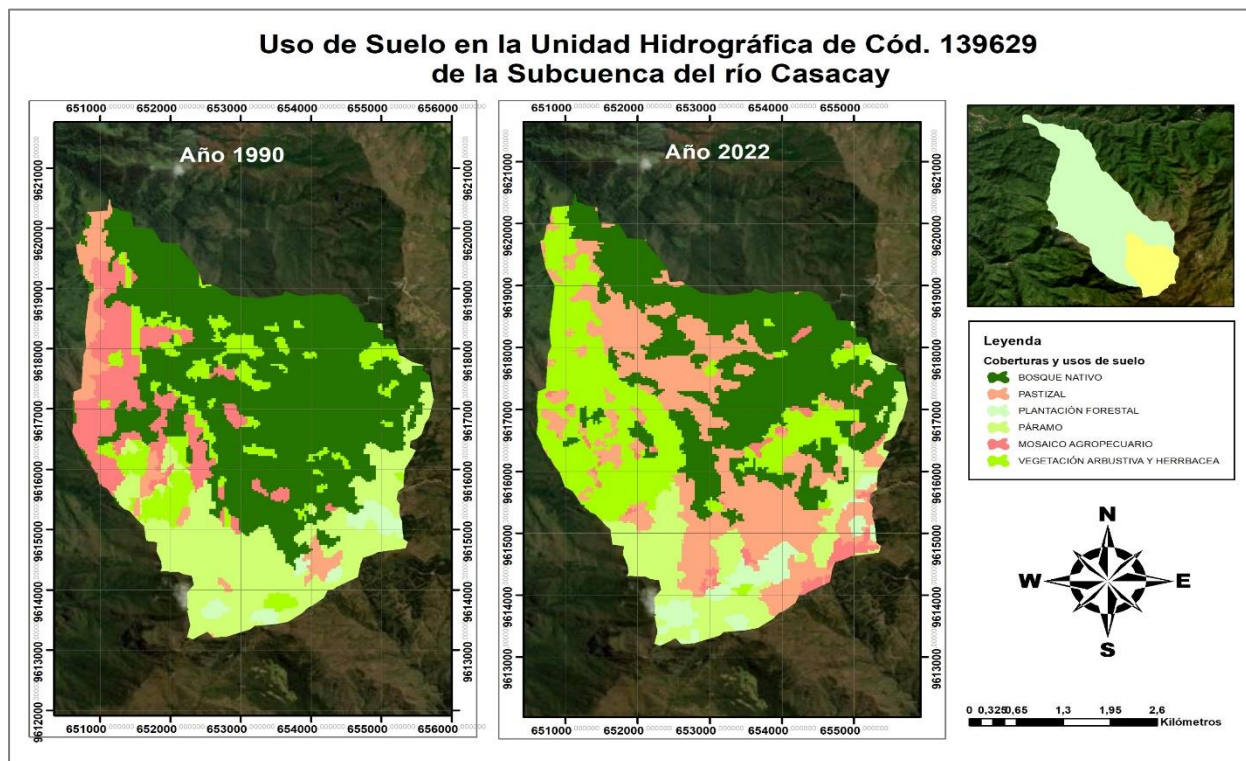


Fig. 12. Mapa de uso de suelo en la unidad hidrográfica cód. 139629

La **Fig 12.** muestra la variabilidad de la cobertura y uso de suelo en un lapso de 32 años en unidad hidrográfica de cód. 139629. Las coberturas de pastizales, plantación forestal de pinos y vegetación arbustiva y herbácea mostraron un incremento significativo; mientras que, la cobertura de bosque nativo, páramo y las tierras agropecuarias disminuyeron. En la siguiente tabla (Ver **TABLA XVII**) se demuestra cuantitativamente la tasa de cambio de uso de suelo para cada cobertura en la unidad hidrográfica de Cód. 139629.

TABLA XVII
TASA DE CAMBIO DE COBERTURA Y USO DE SUELO EN SUBCUENCA ALTA

Cobertura y uso de suelo	Superficie (ha) 1990	Representatividad 1990 (%)	Superficie ha (2022)	Representatividad 2022 (%)	Tasa	Representatividad Tasa	Interpretación
Bosque nativo	1.162,85	49,71	753,1	32,19	409,75	35,24	Disminuyó
Páramo	488,90	20,90	285,25	12,19	203,65	41,66	Disminuyó
Pastizal	111,43	4,76	631,26	26,99	-	17,65	Aumentó
Plantación forestal	54,75	2,34	91,67	3,92	-	59,73	Aumentó
Tierra agropecuaria	280,5	11,99	55,22	2,36	225,28	19,68	Disminuyó
Vegetación arbustiva	240,77	10,29	522,73	22,35	-	46,06	Aumentó
Total	2.339,21	100,00	2.339,22	100	281,95	-	

6.1.2. *Uso y cobertura del suelo en las Zonas con Alta Susceptibilidad de Erosión*

Las zonas de alta susceptibilidad de erosión de la Subcuenca del río Casacay establecidas por [67] según la información temática obtenida del Instituto Geográfico Militar (IGM) presenta coberturas antes descritas en los usos de suelo de la Unidad Hidrográfica como bosque nativo, vegetación arbustiva y herbácea, páramo, mosaicos agropecuarios y pastizales, y plantación forestal (Ver **Fig.13**).

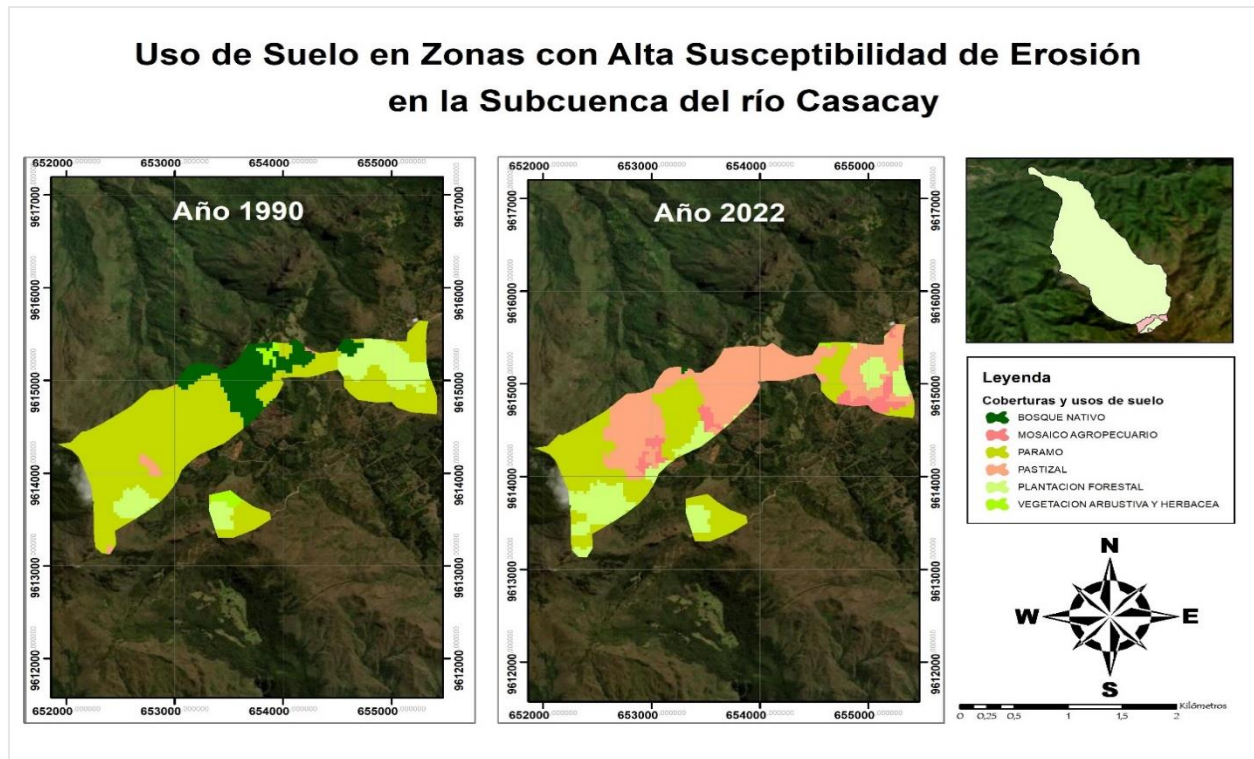


Fig. 13. Mapa de uso de suelo en zonas con alta susceptibilidad de erosión

La **Fig 13.** muestra la variabilidad de la cobertura y uso de suelo en un lapso de 32 años en las zonas con alta susceptibilidad de erosión. Notablemente, las coberturas de mosaico agropecuario y pastizal han aumentado desplazando considerablemente al bosque nativo y a la vegetación arbustiva y herbácea; mientras que el aumento de la plantación de pinos ha desplazado considerablemente al páramo. En la siguiente tabla (Ver **TABLA XVIII**) se demuestra cuantitativamente la tasa de cambio de uso de suelo para cada cobertura en las zonas de alta susceptibilidad de erosión.

TABLA XVIII
TASA DE CAMBIO DE COBERTURA Y USO DE SUELO EN ZONAS EROSIONABLES

Cobertura y uso de suelo	Superficie (ha) 1990	Representatividad 1990 (%)	Superficie		Tasa	Representatividad Tasa	Interpretación
			ficie (ha) 2022	Representatividad 2022 (%)			
Bosque nativo	41,96	14,83	0,35	0,12	41,61	99,17	Disminuyó
Páramo	189,98	67,16	99,00	35,00	90,98	47,89	Disminuyó
Pastizal	3,06	1,08	120,36	42,55	-	2,54	Aumentó
Plantación forestal	41,90	14,81	46,19	16,33	4,29	90,71	Aumentó
Tierra agropecuaria	0,35	0,12	16,45	5,82	16,10	2,14	Aumentó
Vegetación arbustiva	5,64	1,99	0,53	0,19	5,10	90,52	Disminuyó
Total	282,89	100,00	282,89	100,00	-	-	

El cambio del uso de suelo de las coberturas naturales como el bosque nativo, vegetación arbustiva y herbácea y páramo tienden a disminuir progresivamente mientras más elevada sea la altitud del terreno. Es decir, este cambio y uso de suelo es más notorio en la subcuenca alta.

6.1.3. Estado actual del área de estudio

El servicio ecosistémico de provisión de agua es uno de los más importantes debido a la alta densidad de drenaje de la subcuenca del río Casacay con un caudal ecológico equivalente a 2,56 m³/s. Esta se sitúa mayoritariamente sobre el terreno del cantón Pasaje (69,5 %) que del cantón Chilla (30,5 %) y recibe sus aguas desde los ríos Dumarí, Quera, Tobar y de las quebradas de Pano, Peña Negra, Mochata y Ringilo para desembocar en el río Jubones [95].

En cuanto a la geología del territorio, está caracterizada por la presencia de rocas metamórficas, especialmente por cuarcitas, esquistos y filitas en la zona baja y media. Sin embargo,

la geomorfología se caracteriza por relieves montañosos con cimas agudas y subagudas [95]. De acuerdo con la propuesta del plan de manejo en la Subcuenca del río Casacay de [95] determina que en el área se sitúan factores bióticos representativos de flora y fauna expresados en la **TABLA XIX**.

TABLA XIX
ESTADO ACTUAL DEL ÁREA DE ESTUDIO - FACTORES BIÓTICOS

Factores bióticos en la Subcuenca del río Casacay		
	Ornamental	Claveles, girasoles, dalias, etc.
	Frutal	Banano, cacao, chonta, etc.
Flora	Medicinal	Mastrante, malva, copal, etc.
	Maderable	Pino, caña guadua, guayacán.
	Arbustal	Laurel de montaña, laritco, mastrante, etc.
	Mamíferos	Armadillo, guatusa, tigrillo, etc.
	Aves	Carpintero, perico de El Oro, tórtola, etc.
Fauna	Reptiles	Chonta, guaso, sayama, etc.
	Peces	Raspa, lancetero, bocachico, etc.
	Artrópodos	Camarón de río.

Fuente: [94]

Hacia el año 2000, el ex PREDESUR sembró decenas de hectáreas con pinos y eucaliptos con intención de generar protección a la subcuenca del río Casacay [96]; sin embargo, esto ha condicionado la incidencia de incendios forestales importantes y [96] recomendó ya no realizar más sembríos de estas especies. Los bosques de pinos y eucaliptos corren un alto riesgo de sufrir incendios forestales y, a su vez, compromete gradualmente a la sostenibilidad del suministro de madera e industriales forestales de un lugar [97].

La subcuenca del río Casacay es una zona ecológica importante de protección hídrica ya que abastece de agua a los centros poblados más grandes de la provincia [66]. Considerando a la subcuenca como un área de protección hídrica, [66] recomienda que la zonificación sea de conservación, protección estricta, restauración y de uso múltiple. De acuerdo con [66] se planteó que alrededor 1.684,91 de hectáreas que corresponden al 17,87 % del territorio total se transformen en zona de restauración mediante actividades como la recuperación de ecosistemas naturales y agroforestería.

Si bien el uso de la tierra es heterogéneo, el cambio de uso de suelo, especialmente la transformación de áreas naturales a pastizales o plantaciones de pino son un problema latente. Gran parte de cobertura vegetal uso de la tierra corresponde a pastizales (42,28 %) y a bosque nativo (35,54 %), seguido por vegetación arbustiva (14,78 %) y páramo (2,52 %) [66]. Los cambios importantes y las transformaciones de los ecosistemas naturales a zonas de uso múltiple pueden aumentar la escorrentía superficial durante los procesos de tormenta y, a su vez, aumentar la producción de sedimentos [98].

Según [99] menciona que, a inicios del año 2024, se registraron varios eventos pluviales por la época lluviosa. El 21 de febrero de este año se registró un evento de tormenta tan importante que obligó a suspender el servicio de agua potable debido al aumento de turbidez y la obstrucción por el arrastre de sedimentos y sólidos en la Planta de Captación “La Danesa” y a la Planta Potabilizadora “La Esperanza” (Ver **Ilust. 1**). Este evento no sólo afectó a la planta, si no que detuvo el abastecimiento de agua potable para otras comunidades con sistemas de producción de agua más pequeños como Buenavista y Loma de Franco.



Ilustración 1 Obreros de mantenimiento retirando sedimentos

Fuente: [99]

6.1.4. Componentes de la infraestructura de abastecimiento de agua

Planta de Captación “La Danesa”

Esta infraestructura gris se encarga de captar el agua y reducir los sedimentos para que el agua cruda sea tratada en la Planta Potabilizadora “La Esperanza” desde los drenajes de la Subcuenca del río Casacay.

Fase 0: Retención de sedimentos

Actualmente, la planta de captación cuenta con cribas, un vaso de captación y un desarenador. La función de esta infraestructura es reducir la cantidad sólidos de mediano y gran tamaño, sedimentos y arenas que pudieran obstruir o desmejorar el proceso de potabilización posterior. El resultado de esto es que el agua cruda presente únicamente sólidos finos en suspensión.

Si bien, ambas instalaciones permiten reducir la cantidad de sólidos y sedimentos, la mayor parte de recolección se sitúa en el vaso de captación, y este cuenta con las siguientes características:

TABLA XX
CARACTERÍSTICAS DEL VASO DE CAPTACIÓN

Características del vaso de captación		
Característica	Medida	Unidad
Área	3.000	m ²
Profundidad promedio	1,50	m
Volumen (Capacidad del vaso limpio)	4.500	m ³

El mantenimiento del vaso de captación y del desarenador dependerá de la capacidad de almacenamiento. Anualmente se realizan dos mantenimientos fijos para el vaso de captación cuando este ya ha captado su capacidad máxima. Es decir que, en un año se retiran alrededor de 9.000 m³ o 9.000 ton de sedimentos que provienen de la subcuenca.

Cabe mencionar que, durante los procesos de tormenta con palizadas considerables, los mantenimientos son más continuos debido a la cantidad de sólidos y sedimentos que obstruyen la operatividad de la planta. Los monitoreos de la calidad del agua se realizan según el Acuerdo Ministerial 097 – A, Anexo 1: Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes del Recurso Agua.

Los sedimentos retenidos en esta fase no son tratados, pero son entregados a los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GADs) que conforman la Mancomunidad “La Esperanza” y se le da uso como material de áridos y pétreos.

Planta Potabilizadora “La Esperanza”

Fase 1: Floculación

Proceso serpentín con una gradiente mínima para que los sólidos finos en suspensión descendan. La floculación se encarga de extraer los sólidos en suspensión que, común y naturalmente, pueden tardar días e inclusive décadas para asentarse en el agua.

Los floculadores son de flujo horizontal y al dosificar el Sulfato de Aluminio Tipo “A” de grano fino, los sedimentos disueltos en el agua se separarán y coagularán entre sí. Esto provoca un aumento en la densidad de los sólidos y, por tanto, van a decantar. Se ha registrado que, en casos especiales de procesos de tormenta intensos, se han utilizado hasta 300 sacos de 25 kg de este compuesto para reducir la carga de sedimentos.

Adicionalmente, durante esta fase también se aplica el Hipoclorito de Calcio al 70 % como proceso de pre-cloración.

Fase 2: Sedimentación

Por medio de semi tubos, el agua cruda proveniente de la fase anterior y que aún contiene sólidos en suspensión llega a las piscinas de sedimentación cuya altura alcanza hasta los 8 metros. Actualmente, se cuenta con 5 decantadores con sus respectivas compuertas y el objetivo principal de esta fase es que dichos sólidos en suspensión decanten sobre semi tubos por acción de la gravedad en un tiempo determinado que puede tardar hasta cuatro horas. Después de que los sólidos han decantado en el tiempo estimado, el agua cruda clarificada pasará por medio de un canal compartido hasta la fase de filtración

Los lodos obtenidos en esta fase no tienen tratamiento y su disposición final es el río ya que el volumen de estos es mínimo.

Fase 3: Filtración

Se cuenta con seis filtros compuestos de arena, gravas y una capa de carbono activado para garantizar una clarificación mayor del agua cruda. Los filtros de la planta no cuentan con monitoreos y cambios continuos.

Fase 4: Desinfección

En el tramo de la salida de la filtración y el tanque de distribución se inyecta Gas Licuado de Cloro. Posterior a este proceso, se distribuye para la Mancomunidad “La Esperanza”. Actualmente, se realizan aproximadamente cuatro monitoreos diarios y los resultados son comparados con la Norma Técnica INEN 1108 y, anualmente se realiza al menos un monitoreo con un Laboratorio Acreditado por el SAE.

6.1.5. Costos de operación, mantenimiento y capital de la infraestructura de abastecimiento de agua

6.1.5.1. Costos de operación y mantenimiento

Los costos de operación y mantenimiento de la Planta de Captación “La Danesa” y de la Planta Potabilizadora “La Esperanza” varía según el personal operativo, los equipos de protección personal, servicios básicos, el alquiler de equipo y maquinaria, reparaciones de las líneas de conducción y del sistema eléctrico y en repuestos para mantenimiento de tubería. Los costos totales anual del año 2023 por cada actividad operativa se visualiza en la **TABLA XXI**.

TABLA XXI
COSTOS DE OPERACIÓN ANUALES DEL AÑO 2023

Ítem	Descripción (Período 2023)	Costo total anual (\$ USD)
1	Personal operativo	147.588,00
2	Equipo de protección personal	6.200,00
3	Servicios básicos (Energía eléctrica, radio frecuencia, etc).	9.420,00
	Total	163.208,00

El personal operativo consta de 26 personas y está estructurado de acuerdo a sus puestos de trabajo ya sea en las plantas o en la oficina. El personal administrativo consta de 1 coordinador general, 1 jefe administrativo financiero, 1 jefe técnico de operación, producción y mantenimiento, 1 asesor jurídico, 1 contador, 1 analista de servicios generales, 1 asistente técnico, 1 asistente administrativo y 1 asistente legal. Del costo en personal operativo, \$ 147.588 USD anuales, alrededor del 86 % corresponde para 17 trabajadores, cuyos puestos de trabajo están en campo. En la siguiente tabla se describen los puestos de trabajo en planta y el salario mensual.

TABLA XXII
SALARIOS DEL PERSONAL OPERATIVO DEL AÑO 2023

Ítem	Descripción	Cantidad de personal	Salario	Observaciones
1	Supervisor técnico	1	733	-
2	Operadores de planta de tratamiento	6	675	3 turnos de 48 h (2 personas/turno)
3	Operadores de captación y desarenador	3	622	3 turnos de 48 h (1 persona/turno)
4	Operadores del Reservorio “El Vergel”	3	622	3 turnos de 48 h (1 persona/turno)
5	Obreros de mantenimiento	4	527	-
Total		17 personas en el sistema de tratamiento		

Nota: La cantidad de obreros de mantenimiento varía según la necesidad operativa de las plantas, especialmente, durante procesos de tormenta y palizadas.

En cuanto a los costos de mantenimiento anual, el costo del combustible está presupuestado por la Mancomunidad “La Esperanza”, pero no se han realizado monitoreos de calidad de agua en la cuenca alta al menos en los últimos 5 años, así que no se considera como un ítem. En la siguiente tabla se visualizan los costos por mantenimiento anuales.

TABLA XXIII
COSTOS DE MANTENIMIENTO ANUALES DEL AÑO 2023

Ítem	Descripción (Período 2023)	Costo total anual (\$ USD)
1	Alquiler de equipo y maquinaria	22.500,00
2	Reparaciones de la línea de conducción	77.500,00
3	Reparaciones eléctricas	5.869,25
4	Repuestos para mantenimientos de la tubería	52.300,00
Total (\$ USD)		158.169,25

El consumo de insumos químicos para el tratamiento de agua se basa en los siguientes ítems:

- Sulfato de aluminio, Tipo “A”, grano fino
- Hipoclorito de calcio al 70%
- Gas Licuado de Cloro Líquido

El gasto anual en el año 2023 por la compra de los insumos químicos fue de \$ 104.682,25 USD, y se distribuyó de la siguiente forma (Ver **TABLA XXIV**):

TABLA XXIV
COSTO ANUAL EN INSUMOS QUÍMICOS DEL AÑO 2023

Ítem	Producto Químico	Costo total anual (\$ USD)
1	Sulfato de aluminio, Tipo “A”, grano fino	64.468,00
2	Hipoclorito de calcio al 70%	1.802,25
3	Gas Licuado de Cloro Líquido	88.347,60
Total (\$ USD)		154.617,85

El costo de operación y mantenimiento en el año 2023, considerando los insumos químicos, es de \$ 475.995,10 USD.

6.1.5.2. Capital

La Mancomunidad “La Esperanza” para administrar la Planta de Captación “La Danesa” y la Planta Potabilizadora “La Esperanza” tiene un único ingreso de capital que depende de la venta y distribución de agua potable para Machala, Pasaje y El Guabo. Actualmente, la captación autorizada es de 850 l/s y el costo del agua potabilizada es de \$ 0,035/m³. Tomando estas consideraciones, la distribución y el costo de esta actividad para cada ciudad se expresa en la siguiente tabla:

TABLA XXV
PRESUPUESTO MENSUAL ESTIMADO

Mancomunidad La Esperanza	Distribución	m ³ /mes	Costo mensual m ³ (\$ USD)
Machala	450 l/s	1.000.000	35.000,00
Pasaje	225 l/s	500.000	17.500,00
El Guabo	175 l/s	400.000	14.000,00
Ingreso mensual			66.500,00

Si el ingreso mensual es de \$ 66.500,00 USD., se estima que en un año el ingreso o capital oscila los \$ 798.000,00 USD.

6.1.6. Vida útil de la infraestructura de abastecimiento de agua

La Planta de Captación “La Danesa” y la Planta Potabilizadora “La Esperanza” entraron en funcionamiento a partir de la década de los 80’s. Actualmente, el tiempo estimado de vida útil de

30 años ha finalizado e inclusive ha sido superado; sin embargo, las autoridades competentes han realizado mantenimientos y mejoras en los sistemas alargando el funcionamiento de ambas.

6.1.7. Horizonte de análisis

La Comisión Europea recomienda que para un análisis costo – beneficio de proyectos de infraestructura verde-gris para el suministro de agua y afines se establezca un horizonte temporal de 30 años [24]. En proyectos similares de Brasil y México, se recomienda trabajar en un horizonte estimativo entre 20 a 30 años para inversiones significativas [24]. Por otro lado, según las orientaciones del Instrumento Estructural de Preadhesión, ISPA, considera que para la evaluación de los proyectos de infraestructura se requiere un período de 20 a 30 años ya que esto representa una estimación orientada sobre la vida útil económica del mismo [100].

Bajo estas consideraciones, se estimó que el horizonte temporal para este proyecto orientado hacia el mejoramiento del suministro de agua sea de 30 años.

6.2. Escenario de infraestructura verdes y gris

6.2.1. Normas pertinentes que afectan la planificación del uso del suelo

Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de Pasaje, período 2019 – 2023

En concordancia con la Constitución de la República del Ecuador (CRE), el Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización (COOTAD) y el Plan Nacional de Desarrollo “Plan Toda una vida” 2017 – 2021, el GAD de Pasaje pone en marcha el PDOT en su área de jurisdicción.

De acuerdo con [101] menciona que el río Casacay representa alrededor de 4,5 % de los drenajes que van hacia la cuenca del río Jubones. Este río baña a la parroquia que lleva su nombre, Casacay, y alimenta al ecosistema del bosque húmedo [101]. Actualmente, este ecosistema se ha visto desplazado por el avance de la frontera agrícola, específicamente por los pastos cultivados [101].

Plan de Uso y Gestión de Suelo de Pasaje, período 2020 – 2032

En la propuesta de [102] se establece la subclasificación de uso de suelo de protección en zonas aledañas y en la Subcuenca del río Casacay destinadas a la intervención territorial del cantón Pasaje (Ver **TABLA XXVI**).

TABLA XXVI
CATEGORÍAS DE CONSERVACIÓN EN PASAJE

Clasificación de suelo	Subclasificación	Intervención territorial	Categorías
			BVP Casacay
		Representación directa	PVP Uzhcurrumi, La Cadena, Peña Dorada, Casacay
Rural	Protección	Área de Protección Hídrica	Margen de protección hídrica
		Área de importancia hídrica	Río Casacay Río Chillayacu

6.2.2. Planificación actual e histórica de la infraestructura verde y de la gris BVP Bosque Protector “Casacay”

En enero de 1997, mediante Acuerdo Ministerial No. 02 y Registro Oficial No. 109, se declaró oficialmente al Bosque Protector Casacay [66] [101]. El BVP no está delimitado ni georreferenciado, pues sus límites coinciden con los de microcuencas de sistemas fluviales pequeños pertenecientes a la cuenca del Pacífico y cuenta con una superficie aproximada de 12.577 hectáreas [66] [101]; de las cuales, el 43,03 % del territorio corresponde a vegetación natural remanente [66].

[102] Alrededor del 50 % del área total del BVP Casacay se encuentra intervenido. Los remanentes de bosque, especialmente en la zona alta del BVP, han sufrido impactos significativos al ecosistema debido al desplazamiento de especies nativas encargadas de proteger el aprovisionamiento de agua ocasionado por los cultivos de *Pinnus patula*, pinos [101].

De acuerdo con [103] afirma que, a pesar de que la parte alta forme parte del bosque protector, esto no inhibe la deforestación y el cambio de uso de suelo de bosque a tierras agropecuarias en la zona (Ver **Ilust. 2**); al contrario, cada año se pierden más hectáreas de bosque. En la sección 2.1.1. de este documento, se estimó que para el período 1990 – 2022, aproximadamente el 99 % de los bosques habían sido desplazados para otros usos en las zonas con alta susceptibilidad de erosión y [103] estimó que para entre el período 2014 – 2016, alrededor de 377,43 ha de bosque fueron desplazadas por tierras agropecuarias.



Ilustración 2 Subcuenca alta de río Casacay

La declaración del BVP Casacay no ha sido suficiente para garantizar su conservación ya que las acciones y la gestión en el área debe enfocarse en ralentizar la expansión agropecuaria y en asignar políticas para la producción rural a través del Ministerio de Agricultura y Ganadería, MAG [102]. Actualmente, el paisaje de la subcuenca alta del río Casacay y la zona alta del BVP Casacay se ve opacado por las plantaciones de pino que crecen progresivamente (Ver **Ilust. 3**).



Ilustración 3 Plantación de pinos en la Subcuenca alta del río Casacay

No existen regulaciones y normas dentro del BVP Casacay ni se han asignado las competencias financieras y legales al gobierno local para su manejo y conservación [101]. A pesar de esto, el GAD Provincial de El Oro ha lanzado propuestas innovadoras como un intento de conservación, tales como:

- Corredor Ecológico de la provincia de El Oro: En la propuesta se insertó una sub-propuesta para crear un subsistema de áreas naturales de conservación que incluye al BVP Casacay como una zona núcleo ya que ha sido declarado prioridad de conservación muy alta [66].
- Gestión de procesos para el cambio de *Bosque Protector* a *Bosque Nacional de Protección* [102].

Protección Hídrica

La problemática con el recurso hídrico yace de la extracción de áridos y pétreos que altera la dinámica de los cauces en el río Casacay y destruye ecosistemas aledaños a los márgenes [102].

De acuerdo con la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamientos del Agua, artículo 10, de dominio hídrico público, enlista los elementos naturales que requieren protección hídrica lo que incluye a aguas superficiales, subterráneas, acuíferos, fuentes de agua, álveos, lechos y subsuelos de aguas superficiales, riberas, entre otros [102]. Por esto, [102] incluye al río Casacay como un río principal y establece una zona de protección de 100 m., y lo declara área de importancia hídrica con 26,9 hectáreas. Sin embargo, sólo se han protegido hasta 30 m en los márgenes del cauce que corresponden al área de dominio hídrico público.

6.2.3. Componentes individuales de la infraestructura

6.2.3.1. Estrategias de conservación

Existen varios tipos de estrategias de conservación y cada una se diferencia en las metas y los planes de acción que se ejecutan, ya que las metas definen la condición ecológica y las estrategias se abordan a través de esas mismas metas [104]. Entre los tipos de estrategias de conservación, [104] menciona los siguientes expresados en la **TABLA XXVII**.

TABLA XXVII
TIPOS DE ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN

Tipos de estrategias de conservación	Ejemplos
Protección de la tierra	Derechos, adquisición, servidumbres.
Manejo y restauración	Biológica o efectos humanos
Relaciones comunitarias	Educación, regulación, asociaciones
Programática	Recaudación de fondos, personal, equipo
Investigación	Sistemas naturales, especies, efectos de amenazas

6.2.3.2. Restauración ecológica

Partiendo desde que la fragmentación, la calidad y el desempeño de los servicios ecosistémicos de un bosque están estrechamente relacionados e influyen en la seguridad ecológica de las cuencas hidrográficas [105]. Los proyectos de restauración ecológica a mediano y largo plazo responden significativamente a la recuperación de ecosistemas [105].

La restauración ecológica busca imitar los procesos de sucesión ecológica de un ecosistema después de una perturbación antrópica mediante acciones que permitan alcanzar el clímax o un funcionamiento maduro de sus servicios ecosistémicos [106]. Por esto por lo que, los objetivos de un proyecto de restauración ecológica se rigen sobre la estructura y composición del ecosistema y los valores sociales [107] y pueden prevenir la fragmentación de los bosques [105].

Es así como, mientras más estrictos sean los programas o proyectos de restauración ecológica en cuanto al cambio de uso de suelo, las perturbaciones antrópicas serán menores y facilitará el proceso de restauración [105]. A pesar de que los programas y proyectos de restauración ecológica suelen ignorar las implicaciones socioculturales durante su ejecución [107], actualmente, las metodologías de análisis costo – beneficio permiten evaluar la viabilidad del proyecto considerando al eje social como un factor determinante y decisivo para su implementación.

6.2.4. Priorización de los componentes de la infraestructura

Los problemas en la Subcuenca Casacay se originan desde la alteración del bosque nativo y el aumento progresivo de la ganadería [95]. Si bien la relación erosión – sedimentos es compleja, dinámica y depende de factores geológicos y climáticos [95]; los procesos erosivos aumentan la carga de sedimentos en los cursos del agua y alteran su calidad [95]. La erosión del suelo es más

común en espacios en los que la ganadería se ha identificado y la cobertura nativa es baja [95]. El cambio de uso de suelo, desde bosques nativos a tierras agrícolas aumenta la erosión, mientras que las prácticas agrícolas sostenibles la disminuyen [95] y los bosques, por sí solos, previenen la erosión en las riberas de los arroyos y regulan la sedimentación en los ríos [95].

La planificación del territorio y la gestión pertinente del uso del suelo inciden en el suministro y la calidad del agua [95]. Sin una planificación estratégica, los intentos de conservación de la Subcuenca del río Casacay no se han integrado a largo plazo. Las estrategias deben definir objetivos claros y medibles, establecer bases sólidas y permitir nuevas oportunidades para las actividades productivas [95] y, por ejemplo, estas deberían estar orientadas hacia la regulación de la tasa de procesos ecosistémicos para garantizar el éxito en la restauración ecológica [108].

6.2.4.1. Planificación estratégica en la Subcuenca Casacay

Según [109] las zonas de amortiguamiento son el método más eficaz para eliminar sedimentos de la escorrentía en un río. La anchura de las zonas de amortiguamiento para sedimentos se determina por las características del terreno [109]; sin embargo, entre mayor sea la anchura, mayor será la eficiencia de captura del contaminante (Ver **Fig. 14**).

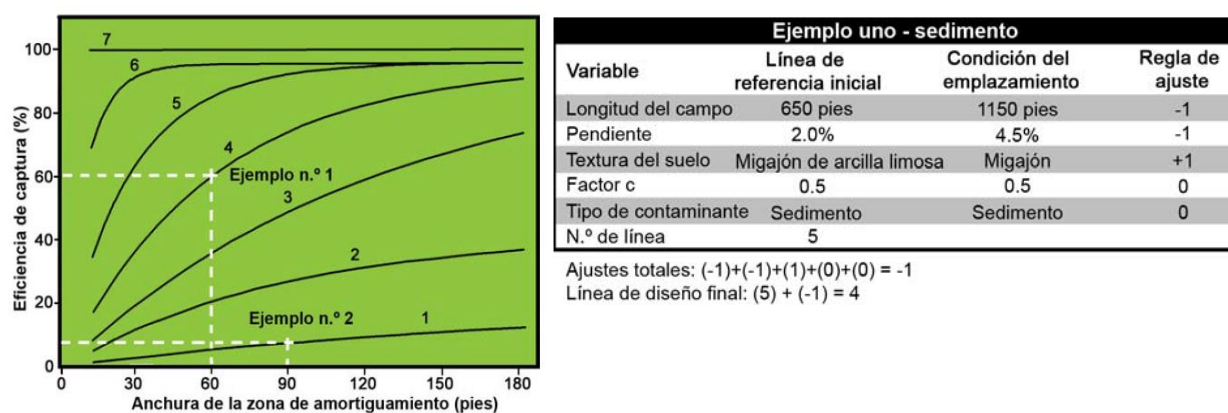


Fig. 14. Relación entre la anchura y la eficiencia de captura en la zona de amortiguamiento

Nota: Fuente: [109]

De acuerdo con [102] la anchura promedio en los márgenes de los ríos principales para fomentar la protección y conservación es de 30 metros. Mientras que, según [109] entre la anchura de 90 a 120 pies (27,43 – 36,58 metros) equivale a una eficiencia de captura superior o igual al 90 % para la retención de sedimentos. De esta forma, se plantea minimizar la carga de sedimentos en los cauces de la cuenca alta del río Casacay implementando la restauración ecológica en las zonas

de amortiguamiento para sedimentos con una anchura de 30 m en los márgenes hacia afuera, considerando sólo los cauces con relación directa a las zonas con alta susceptibilidad de erosión establecidas por [2] y [67] (Ver Fig. 15).

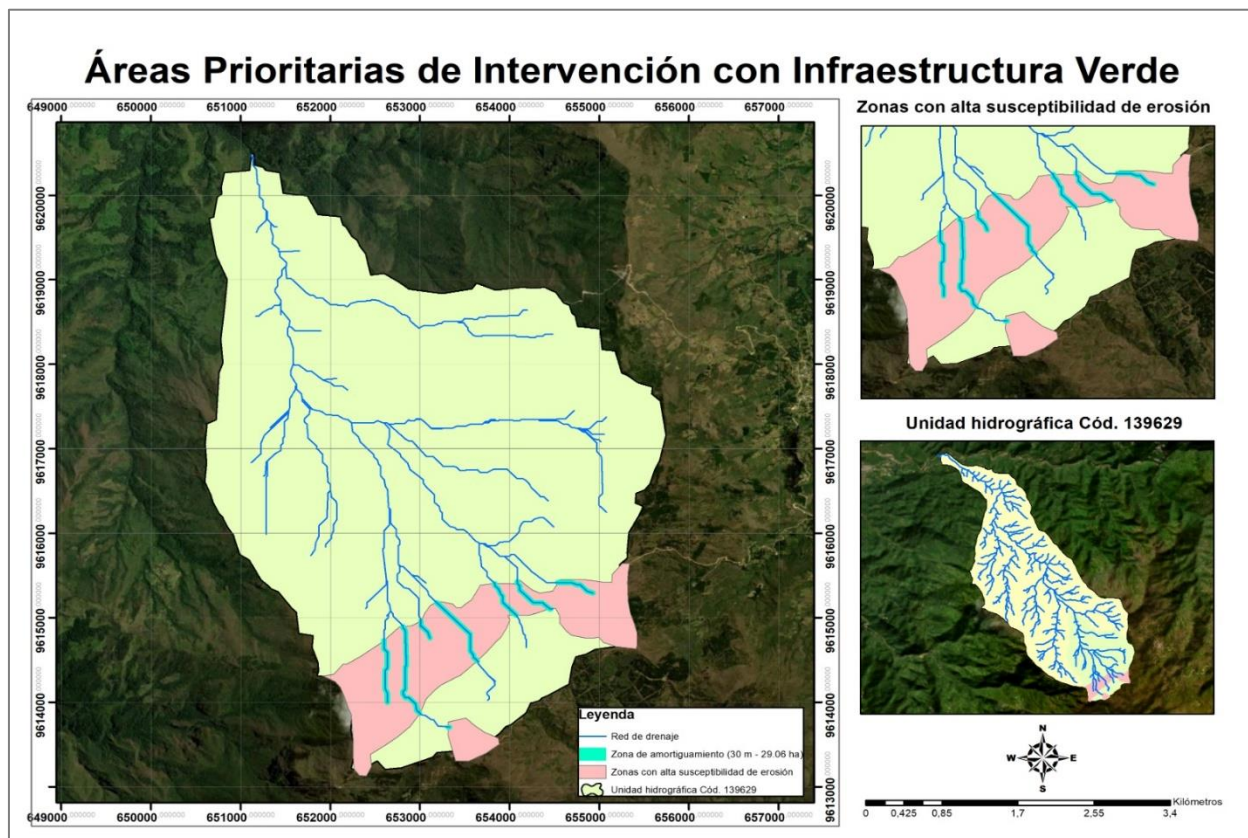


Fig. 15. Mapa de áreas prioritarias de intervención con infraestructura verde

Las zonas con alta susceptibilidad de erosión corresponden a un área de 277,18 ha y son espacios en los que la ganadería ha aumentado progresivamente y el bosque nativo ha disminuido considerablemente; mientras que, la zona de amortiguamiento para sedimentos corresponde a un área de 29,06 ha con una longitud total de drenaje de 4.477,17 m.

6.2.5. Secuencia de implementación

Sabiendo que, la restauración activa estimula la recuperación y regeneración de ecosistemas muy degradados con la intervención de la mano del hombre [110]. El monitoreo y mantenimiento de este tipo de proyectos es una etapa crucial para determinar el nivel de cumplimiento del objetivo propuesto para la restauración ecológica [110]. Los primeros meses son los más importantes para garantizar la eficiencia del crecimiento de las especies y, por tanto, el seguimiento debe ser periódico y continuo [110]. Posterior a esto, se pueden adoptar rangos semestrales o trimestrales

para la operación y el mantenimiento con actividades imprescindibles como el replante de las especies que han muerto y el control de malezas [110].

Para los proyectos de restauración ecológica existen dos tipos de monitoreo: el monitoreo a corto plazo o de implementación y a largo plazo o de efectividad [108]. El monitoreo de implementación determina si los procesos de restauración ecológica se ejecutaron tal y como se diseñaron, cuantifica los cambios inmediatos una vez puesto en marcha el proyecto y permite ajustar las estrategias de manejo [108]. Mientras que, monitoreo de efectividad determina el cumplimiento del objetivo principal del proyecto y la recuperación de los servicios ecosistémicos, y permite redefinir el objetivo de restauración ecológica para ajustar las estrategias de [108].

Se estableció un horizonte de trabajo de 30 años, de los cuales, los primeros cinco años corresponden al trabajo minucioso de la siembra, el trasplante, replante de especies muertas y el monitoreo y seguimiento de estos para garantizar la supervivencia de las especies.

6.2.5.1. Cantidad de plantas a utilizar en la restauración

Considerando que se necesita un escenario de 1:1 de planta por metro cuadrado [2], que el área a intervenir es de 29,06 ha y que esta especie representa eficiencia de plantación entre 80% y 90 % debido a sus características, se tiene que:

1. Transformación de hectáreas a metros cuadrados

La **Ecuación 14** permite estimar el área a intervenir convirtiendo las hectáreas a metros cuadrados.

$$\text{área a intervenir} = 1 \text{ ha} * \frac{10.000 \text{ m}^2}{1 \text{ ha}}$$

Ec. 14. Ecuación para estimar el área a intervenir

Entonces, considerando que 1 ha es equivalente a 10.000 m² y que el área a intervenir es de 29,06 ha, se tiene que:

$$\text{área a intervenir} = 29,06 \text{ ha} * \frac{10.000 \text{ m}^2}{1 \text{ ha}}$$

$$\text{área a intervenir} = 290.600 \text{ m}^2$$

2. Cálculo de la eficiencia de plantación

a. Eficiencia al 85 %

La **Ecuación 15** permite establecer las áreas a intervenir que van a alcanzar el 85 % de eficiencia para la plantación.

$$\text{Eficiencia de plantación} = \text{área a intervenir} * 85 \%$$

Ec. 15. Ecuación de eficiencia de plantación

Considerando que, el área a intervenir equivale a 290.600 m² y que la eficiencia de plantación es de 85 %, se tiene que:

$$\text{Eficiencia de plantación} = 290.600 \text{ m}^2 * 85 \%$$

$$\text{Eficiencia de plantación} = 247.010 \text{ m}^2$$

3. Cálculo del número de plántulas requeridas según el área a intervenir y la eficiencia de plantación

a. Eficiencia al 85 %

La **Ecuación 16** permite estimar la cantidad de plantas requeridas en la unidad de terreno eficiente para el sembrío.

$$\text{Numero de plántulas} = \text{eficiencia de plantación} * \frac{1 \text{ plántula}}{1 \text{ m}^2}$$

Ec. 16. Ecuación para estimar la cantidad de plantas requeridas

Considerando que la eficiencia de plantación alcanza los 247.010 m² y que la proporción de las plantas es de 1:2; es decir, 1 planta cada 2 m², se tiene que:

$$\text{Numero de plántulas} = 247.010 \text{ m}^2 * \frac{1 \text{ plántula}}{2 \text{ m}^2}$$

$$\text{Numero de plántulas} = 123.505 \text{ plántulas}$$

Es decir, para el proyecto de restauración ecológica en un espacio de 29,06 ha se deberá plantar 123.505 plántulas de colle considerando una eficiencia de plantación del 85% y cada planta ocupará 2 m².

6.2.5.2. Eficiencia de crecimiento

En un escenario ideal, cuando la eficiencia de crecimiento es de 100 %, se estima que para el año 3 todas las plántulas (123.505) estarán sembradas en 29,06 ha (Ver **TABLA XXVIII**).

TABLA XXVIII
RESTAURACIÓN ECOLÓGICA CON UNA EFICIENCIA DEL 100%

Eficiencia 100 %	Años de implementación								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ha restauradas	11,624	8,718	8,718						
Plantas sembradas	49402	37052	37051						

Mientras que, para una eficiencia de supervivencia del 85 % para las plántulas sembradas en los primeros 3 años, se tiene que para el año 4, todas las plántulas estarán sembradas (Ver **TABLA XXIX**).

TABLA XXIX
RESTAURACIÓN ECOLÓGICA CON UNA EFICIENCIA DEL 85 %

Eficiencia 85 %	Años de implementación								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ha restauradas	11,62	8,72	8,72	-	-	-	-	-	-
Plantas sembradas	41.992	38.905	37.051	5.558	-	-	-	-	-

Para establecer los cronogramas de los monitores es imprescindible tener en cuenta la edad de maduración de las plantas, aproximadamente 2 años, para así estimar eficiencia total del ecosistema restaurado para el objetivo propuesto de retención de sedimentos. Con estas especificaciones se establecen las fases o monitoreos para el proyecto de implementación y efectividad.

6.2.5.3. Monitoreo de implementación

La fase de implementación comprende los primeros seis años de haber iniciado el proyecto de restauración. El tiempo estimado para esta fase depende directamente de la edad de maduración de las plantas a sembrar, por tanto, para el año no. 6 el ecosistema ya alcanzará la maduración suficiente para ofrecer servicios ecosistémicos con una alta eficiencia. En la **TABLA XXX** se encuentra el cronograma para la fase 1 o de implementación.

TABLA XXX
FASE 1 DE IMPLEMENTACIÓN O MONITOREO DE IMPLEMENTACIÓN

Ítems / Fases o monitoreo	Fase 1: Implementación por años					
	1	2	3	4	5	6
Siembra	X	X	X			
Replante		X	X	X		
Seguimiento	X	X	X	X	X	X

6.2.5.4. Monitoreo de efectividad

El monitoreo de efectividad requiere la puesta en marcha del proyecto y se deberá realizar un programa de monitoreo y seguimiento específico para el área de intervención. En la **TABLA XXXI** se evidencia la planificación general de la Fase 2.

TABLA XXXI

FASE 2 DE EFECTIVIDAD O MONITOREO DE EFECTIVIDAD

Ítems / Fases o monitoreo	Fase 2: Efectividad por años										
	7	8	9	10	11	12	13	14	15	“n”	30
Operación y mantenimiento	X	X	X								

6.2.6. Vida útil del componente de infraestructura

6.2.6.1. Características de la especie

La especie *Buddleja coriácea* o colle es un arbusto / árbol que puede alcanzar desde los 2 m a 8 m de altura y un espesor de diámetro entre 15 a 60 cm (Ver **Fig.16**). Posee una copa globosa de follaje compacto y denso, y es común encontrarla en formaciones de bosque seco a húmedo en altitudes de hasta 4.100 metros [111].

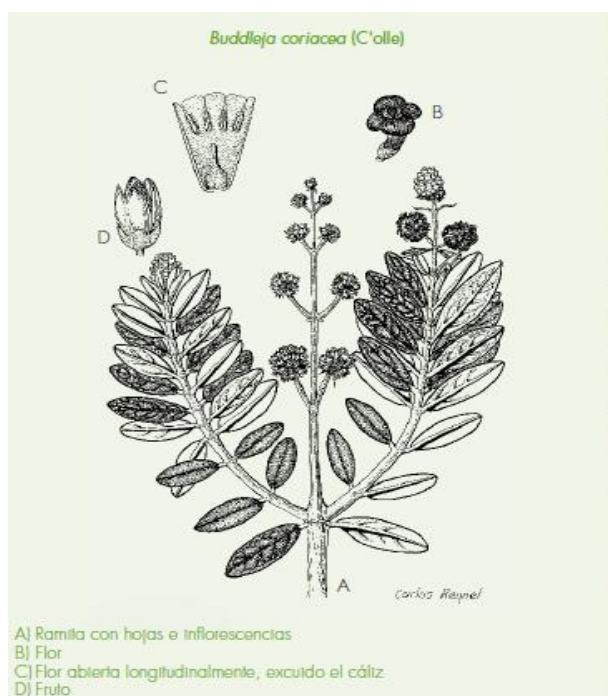


Fig. 16. *Buddleja coriácea* o colle

Nota: [111]

Adicionalmente, esta especie es utilizada para la protección de los suelos debido a la eficiencia y resiliencia ante las variaciones climáticas que pueden surgir en el piso altitudinal [111]. A pesar de ser una especie resiliente y resistente, es recomendable trabajarla en viveros [2] y [111].

a. Germinación y manejo en vivero

No requiere de tratamiento pre-germinativo y el tipo de germinación es epigea con un poder germinativo entre 80 % a 90 %. Por lo general, el inicio de la germinación puede durar entre 12 a 15 días y terminar a los 20 días [111].

b. Plantación

Lo más recomendable es realizar la plantación en almácigos en sustrato de tierra negra y arena, Además, la propagación asexual puede darse por los esquejes, los cuales alcanzan entre 90 % a 95 % de prendimiento en el sustrato de tierra agrícola, arena y turba [111].

c. Cuidados

El traslado de las plántulas deberá ser después de 5 meses y garantizando que estas hayan alcanzado una altura mínima de 5 cm. En caso de que se registren riesgos, [111] recomienda realizar un muro de piedras alrededor de la planta.

d. Maduración

El colle alcanza la edad madura una vez que empieza a florecer. Este proceso puede tardar al menos 2 años aproximadamente [111].

3. Resultados biofísicos

3.1. Modelo biofísico

Con la información generada usando la metodología de USLE, la Subcuenca alta del río Casacay presenta las siguientes características (Ver **TABLA XXXII** y **Fig. 17**):

TABLA XXXII
RESULTADOS DEL MODELO BIOFÍSICO

Factores	Rango	Susceptibilidad a erosionar
R	3822,84 Mj/ha/h	Muy alta
LS	0 – 14,2	Alta
K	0,31 – 0,67	Baja – media/alta
C	0,05 – 0,35	Baja - media

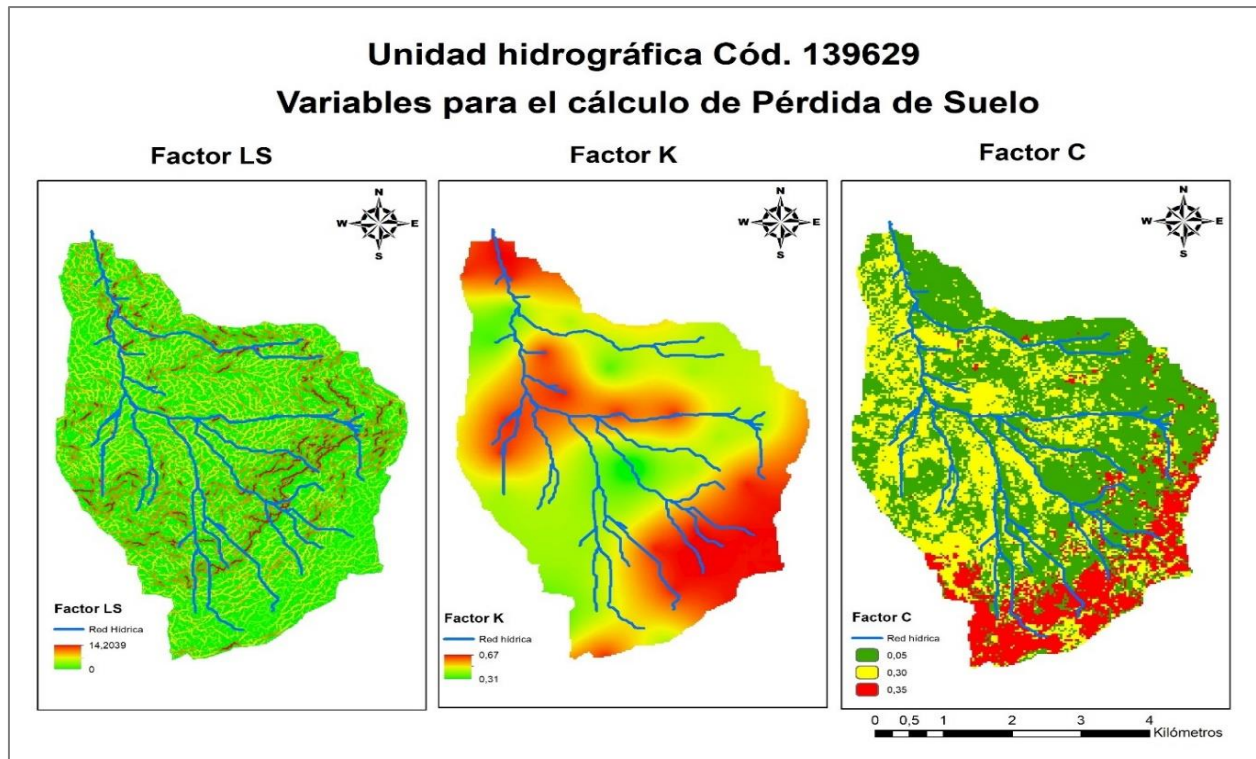


Fig. 17. Mapa de los factores LS, K y C

Independientemente, todas las variables representan una probabilidad de media a alta de que la unidad hidrográfica de Cód. 139629 sea susceptible a erosionar. La Subcuenca alta del río Casacay tiene la capacidad de generar en promedio 3.642,37 ton/ha/año y una capacidad máxima que sobrepasa las 60.000 ton/ha/año (Ver **Fig. 18**). Es decir, la parte alta de la subcuenca Casacay es una unidad hidrográfica que presenta una pérdida de suelo o erosividad severa.



Fig. 18. Capacidad de erosión de la Subcuenca alta del río Casacay

3.2. Cambios en los resultados biofísicos a través del tiempo

3.2.1. Importancia de conservación

La restauración ecológica se realizará en las zonas de amortiguamiento del cauce que intersecta con las zonas con alta susceptibilidad de erosionar de la Subcuenca alta del río Casacay. Se estimó que para con la anchura de la zona de amortiguamiento restaurada (30 m), se obtendrá al menos un 90 % de eficiencia para la retención de sedimentos en 29,06 ha con la siembra total de 123.505 plantas de *Buddleja coriácea*, una especie diagnóstica con las características idóneas para la retención de sedimentos cuya edad de maduración es de 2 años.

Con estas especificaciones, se estableció la relación entre el total de las plantas maduras y la capacidad de retener sedimentos en un período de tiempo y se concluyó que para el año 6 se logrará el 90% de eficiencia para la retención de sedimentos esperada (Ver **TABLA XXXIII**).

TABLA XXXIII
RETENCIÓN DE SEDIMENTOS ESPERABLES

Ítems / Fases	Fase 1: Implementación por años						Fase 2: Efectividad por años				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	"n"	30
Total de plantas maduras	0	0	41.992	80.897	117.948	123.505	123.505	123.505	123.505	123.505	123.505
Retención de sedimentos	10	20	30,60	58,95	85,95	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00

Nota: Para el año 1 y 2 se estimó que la eficiencia es menor a 30,6%. Los valores establecidos para cada año son referenciales.

4. Valoración de costos y beneficios

4.1. Valoración de costos

La implementación del escenario alternativo requiere un desembolso total de \$ 1.243.062,22 USD considerando una inflación del 3,5 % para los cálculos. En la **TABLA XXXIV**, se presenta la inversión desglosada tomando en cuenta los componentes de inversión inicial, de implementación, el mantenimiento y los costos de oportunidad.

TABLA XXXIV
INVERSIÓN TOTAL DEL PROYECTO

Componente	Subcomponente	Inversión total (\$)
Inversión	Compra de semillas	29,15
	Preparación de sustrato	480,61
	Suministros	91,74
	Otros	55.980,00
	Actividades de protección	4.793,00
	Costos de transacción	180.615,88
	Costos totales de inversión	
Implementación	Suministros	91,74
	Costos laborales	525.532,90
	Cuidado en vivero	49.963,25
	Otros	81.887,63
	Actividades de protección	4.493,00
Costos totales de implementación		661.968,51
Mantenimiento	Control de maleza	135.000,92
	Poda	6.615,08
	Reparación de cercado	225,15
Costos totales de mantenimiento		141.841,15
Oportunidad	Producción lechera (sistema pastoril)	197.262,19
Costo total del proyecto (\$ USD – Valores 2024)		1.243.062,22

Nota: El flujo de caja de las actividades se encuentra en el *Anexo I*.

El costo de implementación es el componente que demanda la mayor contribución de fondos, con un desembolso bruto de \$ 661.968,51 USD durante los seis primeros años del horizonte. Mientras que, el componente de inversión inicial, donde se consideran los costos de transacción, representa el 19 % del desembolso total. Por su parte, el componente de oportunidad estimado en \$ 197.262,19 USD representa el 16 % del costo total del proyecto y se encuentra distribuido de acuerdo con el número de hectáreas que se tiene planificado restaurar por año.

Finalmente, los costos de operación y mantenimiento que se encuentran considerados durante los tres años siguientes del periodo de implementación, representan el 11 % del total calculado.

La distribución del desembolso anual para suplir los costos totales de implementación del proyecto se presenta en la **Figura 19**. La inversión más representativa a lo largo del horizonte del proyecto se identifica durante el año 0 o componente de inversión inicial, con un desembolso bruto de \$ 241.990,38 USD. Es a partir del noveno año, una vez finalizado el periodo de restauración ecológica, que los costos son nulos.

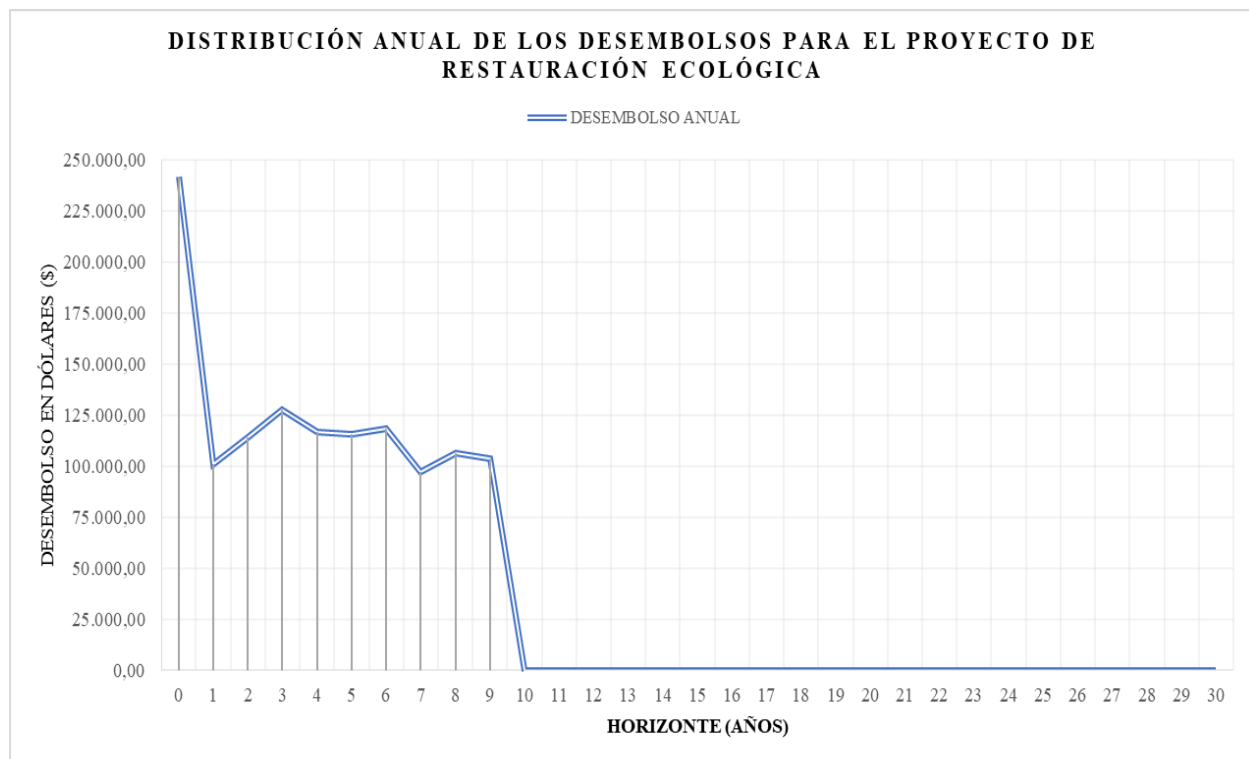


Fig. 19. Distribución de los desembolsos anuales del proyecto

En las secciones siguientes se describen cada uno de los costos planteados para inversión, operación y mantenimiento, de transacción y de oportunidad.

4.1.1. Costos de inversión

4.1.1.1. Compra de semilla

La *Buddleja coriácea* es una especie óptima para realizar reforestación en un rango altitudinal de 3.410 a 4.160 m.s.n.m. y cumple con los requerimientos ecológicos para el área a intervenir [2]. Esta especie tiene un alto porcentaje de germinación y según [2] recomiendan que

para producir aproximadamente 2.000 plántulas se necesitan 1,5 g de semillas por metro cuadrado, por lo que se pueden obtener hasta 2000 plántulas por metro cuadrado [111], por tanto, la cantidad de semillas requerida depende del número de plántulas por la densidad, tal como se expresa en la **Ecuación 17**.

$$\text{Cantidad de semillas} = \text{número de plántulas} * \frac{\text{semilla}}{\text{plántula}}$$

Ec. 17. Ecuación para la estimación de la cantidad de semillas requerida

Tomando estas especificaciones, el número de plántulas es de 123.505 y la densidad o relación semilla:plántula es de 1,5 g / 2000 plántulas, se tiene que:

$$\text{Cantidad de semillas} = 123\ 505 \text{ plántulas} * \frac{1,5g}{2000 \text{ plántulas}}$$

$$\text{Cantidad de semillas} = 92,63 \text{ g}$$

Con estas consideraciones, para el área de siembra se requieren 92,63 g de semilla para sembrar un equivalente mínimo a 123.505 plántulas con 85 % de eficiencia. Según [2] mencionan que 1 kilogramo de esta especie tiene un costo de 58,29 dls y cada saco de 1 kg contiene alrededor de 14.000.000 de semillas. En la **TABLA XXXV** se desglosa el costo por la compra de semillas.

TABLA XXXV

COSTOS DE INVERSIÓN: COMPRA DE SEMILLAS

Restauración asistida	Actividades / Suministros	Unidad requerida (g)	Costo por kg	Costo Total (\$ USD)
Compra de semilla	Semillas de Colle	312,79	58,29	29,15

Nota: El costo total es referido a ½ kg de semillas de Colle.

4.1.1.2. Preparación del sustrato

Considerando que en el primer año germinarán y se sembrarán la mayor cantidad de plantas, aproximadamente 41.992, y que un semillero estilo bandeja contiene 288 alvéolos, entonces se necesitan 146 semilleros que pueden ser reutilizados para las siguientes metas de siembra. Las dimensiones del semillero son: 2 cm x 2 cm x 3,5 cm por cada alvéolo, entonces el volumen total por cada semillero es de 4.032 cm³. En la **TABLA XXXVI** se desglosa el volumen requerido de sustrato por la cantidad de semilleros ocupados y de plántulas sembradas.

TABLA XXXVI
COSTOS DE INVERSIÓN: SEMILLEROS Y VOLUMEN REQUERIDOS

No. De año	No. De semilleros ocupados	No. De plántulas en el semillero	Volumen requerido (cm ³)
1	146	41.992	588.672
2	135	38.905	544.320
3	129	37.051	520.128
4	19	5.558	76.608

Un semillero estilo bandeja con esas especificaciones y que esté fabricado con plástico de alta densidad cuesta aproximadamente \$ 3,00 USD. Sabiendo que, se requieren 146 semilleros, entonces el costo por este insumo se expresa en la **TABLA XXXVII**.

TABLA XXXVII
COSTOS DE INVERSIÓN: COMPRA DE SEMILLERO

Restauración asistida	Actividades / Suministros	Insumo	Unidad requerida	Costo unitario	Costo Total (\$USD)
Preparación de sustrato	Almácigos	Semillero bandeja de germinación 288 alvéolos (c/u de 2x2x3,5 cm ³)	146	3	438
		Total			438

Para la preparación del sustrato se requiere el ensamblaje de componentes sustratos y almácigos. Según [111] y [112] recomiendan que, para la preparación en almácigos, la proporción de tierra agrícola y tierra negra sea de (1:1) con un tiempo que varía entre 2 a 3 meses considerando la tasa de siembra en almácigo de 1,5 g de semilla por metro cuadrado. Además, recomiendan que las semillas sean cubiertas con una pequeña capa de tierra agrícola, arena y paja para que las plántulas no se afecten por el frío y haya mejor drenaje, con una proporción de 1:1:1. Con estas especificaciones, se obtuvo que las siguientes cantidades de sustratos para la preparación de almácigos por año (Ver **TABLA XXXVIII**).

TABLA XXXVIII
COSTOS DE INVERSIÓN: CANTIDAD DE SUSTRATO REQUERIDA POR AÑO

Sustratos	Cantidad de sustrato (cm ³) por cada año				Total (cm ³)
	1	2	3	4	
Tierra agrícola	266.304	246.240	235.296	34.656	782.496
Tierra negra	210.240	194.400	185.760	27.360	617.760
Arena	56.064	51.840	49.536	7.296	164.736
Paja	56.064	51.840	49.536	7.296	164.736
Total	588.672	544.320	520.128	76.608	1.729.728

En cuanto a los costos, en la ciudad de Quito, la venta de tierra negra de páramo es de \$120,00 USD por cada 9 m³ [113], y la tierra vegetal o agrícola es de \$160,00 USD por cada 9 m³ [114]. En la página web de [115] la arena lavada de río tiene un costo de \$145,35 USD por cada 6 m³. Mientras que, la paja o cascarilla se vende en \$4 USD por cada 40L o 0.04 m³ [116]. Entonces, se estima un costo total de \$42,61 USD detallados en la **TABLA XXXIX**.

TABLA XXXIX
COSTO DE INVERSIÓN: PREPARACIÓN DE SUSTRATO

Actividad / Suministro	Insumo	Cantidad total requerida (cm ³)	Cantidad		Costo Unitario (m ³ /\$USD)	Costo total (\$ USD)
			total	requerida (m ³)		
Ensamblaje de componentes sustratos y almácigos	Tierra agrícola	782.496	0,78		17,78	13,91
	Tierra negra	617.760	0,62		13,33	8,23
	Arena	164.736	0,16		24,23	3,99
	Paja	164.736	0,16		100,00	16,47
Total						42,61

Nota: El desglose de los costos por la preparación del sustrato se detalla en el Anexo B.

4.1.1.3. Suministros

El uso de hoyadoras con mecha y combustible considerando el tiempo en minutos de uso de la máquina perforadora y la durabilidad de la máquina perforadora tienen un costo de \$45,87 USD por hectárea [84]. En la **TABLA XL** se desglosa el costo del suministro según las hectáreas en las que se usará.

TABLA XL
COSTOS DE INVERSIÓN: SUMINISTROS

Restauración asistida	Actividades / Suministros	Cantidad de material	Costo (\$USD/ha)	Total de ha	Costo Total (\$ USD)
Suministros	Hoyadora	2	45,87	29,06	2.665,96
Total					2.665,96

Nota: El desglose de los costos por los suministros se detalla en el *Anexo C*.

4.1.1.4. Costos laborales

Para la primera fase o monitoreo de implementación, se necesitarán 3 jornales que realicen las actividades del vivero, la siembra y el trasplante durante los primeros 5 años. Considerando el Acuerdo Ministerial MDT-2023-175, la jornada laboral en Ecuador representa 40 horas a la semana con un salario básico unificado de \$ 460 USD [117]. En cuanto a la administración, se consideró a un coordinador de proyecto, su asistente y un guardaparque; para el sueldo básico unificado (SBU) del coordinador se referenció al sueldo de un analista [118] y para el asistente y guardaparque según lo establecido por [119] para cada puesto de trabajo. En la siguiente tabla se detalla el SBU anual para cada puesto de trabajo.

TABLA XLI
COSTOS DE INVERSIÓN: COSTOS LABORALES

Restauración asistida	Actividades / Suministros	Cantidad de jornales	Salario básico unificado (SBU) \$ dls.	SBU anual (\$ USD)	Costo total (\$ USD)
Siembra en vivero	Costos laborales de siembra	3	460,00	16.560,00	99.360,00
	Costos laborales de trasplante				
Administración	Coordinador de proyecto	1	1.802,00	21.624,00	194.616,00
	Asistente de coordinación	1	817,00	9.804,00	88.236,00
	Guardaparque	1	733,00	8.796,00	79.164,00
Total				56.784,00	515.952,00

Nota: El desglose de los costos laborales se detalla en el *Anexo D*.

4.1.1.5. Cuidado en vivero

El cuidado en vivero comprende de medidas que impulsar el crecimiento y germinación de las plántulas tales como el control de la maleza y la poda. El costo del control de la maleza, en términos de control por plántula, es de \$ 0,34 USD y la poda, en términos de poda por plántula, es de \$ 0,05 USD [120]. Entonces:

TABLA XLII
COSTOS DE INVERSIÓN: CUIDADO EN VIVERO

Restauración asistida	Actividades / Suministros	Número total de plántulas	Costo Unitario (\$USD)	Total (\$ USD)
Cuidado en vivero	Control de malezas	-	0,34	41.992,04
	Poda	-	0,05	6.175,3
Total				48.167,34

Nota: El desglose de los costos por el cuidado en vivero se detalla en el *Anexo E*.

4.1.1.6. Otros

4.1.1.6.1. Vehículo

Se establece la compra de 2 camionetas de modelo AC 2,4 4X4 TM Diesel cuyo uso se destina a las labores operativas y administrativas del proyecto; es decir, cada área o departamento tiene un vehículo para el desarrollo de sus actividades. De acuerdo con [121] el costo estimado para un vehículo de esas características ronda los \$ 27.990,00 USD. Entonces, al necesitarse dos vehículos se estima un costo de \$ 55.980,00 USD desglosados en la siguiente tabla.

TABLA XLIII
COSTOS DE INVERSIÓN: VEHÍCULO

Restauración asistida	Actividades / Suministros	Cantidad	Costo Unitario (\$ USD)	Costo Total (\$ USD)
Otros	Camioneta AC 2,4 4x4 TM Diesel	2	27.990,00	55.980,00

4.1.1.6.2. Combustible

El precio del combustible Ecopaís es de \$ 2,40 USD [122]. Considerando un aproximado de hasta 2 viajes por año y teniendo de referencia que existen 43,9 km de distancia en la ruta E585 entre la ciudad de Machala y el sector Dumarí, en un viaje completo se puede consumir hasta \$ 20

en combustible EcoPaís. Entonces, en la **TABLA XLIV** se establece el consumo de combustible para cada área de trabajo con un costo anual de \$ 2.439,02 USD.

TABLA XLIV
COSTOS DE INVERSIÓN: COMBUSTIBLE

Restauración asistida	Actividades / Suministros	Costo combustible (\$ USD/gal)	Consumo promedio (1 viaje gal)	Total de viajes al año	Costo anual (\$ USD)
Otros	Combustible EcoPaís – administrativo	2,4	8,33	2	39,98
	Combustible EcoPaís – jornal	2,4	4	240	2.399,04
Total					2.439,02

Nota: El desglose de los costos por el cuidado en vivero se detalla en el *Anexo F*.

4.1.1.6.3. Mantenimiento de vehículo

El mantenimiento para un vehículo de modelo AC 2,4 4x4 TM Diesel según el kilometraje usado [123]. Considerando que, se realizan mantenimientos por cada 10.000 km recorrido y con un mínimo de dos veces al año, el costo por cada mantenimiento, según [123], es de \$ 289, el costo total anual por el mantenimiento de las dos camionetas es de \$ 1.156,00. Estas cifras se desglosan en la **TABLA XLV**.

TABLA XLV
COSTOS DE INVERSIÓN: MANTENIMIENTO DE VEHÍCULO

Restauración asistida	Actividades / Suministros	Kilometraje	Costo por kilometraje	No. Mantenimientos al año	Costo anual (\$ USD)
Otros	Mantenimiento camioneta administrativa	10 K	289,00	2	578,00
	Mantenimiento camioneta jornal	10 K	289,00	2	578,00
Total					1.156,00

Nota: El desglose de los costos por el cuidado en vivero se detalla en el *Anexo F*.

4.1.1.6.4. Cercado

En el Programa Nacional de Reforestación con Fines de Conservación Ambiental, Protección de Cuencas Hidrográficas y Beneficios Alternos se estimó que para el diseño de un vivero se debe realizar un estudio basado en el clima, plano y buen drenaje, vías de acceso y fuentes de agua a un costo de \$300,00 USD; mientras que, para la construcción y adecuación se requiere de la implementación de cercas, semilleros o germinadores, accesos internos, riego, entre otros ítems con un presupuesto de \$3.000,00 USD [124].

Por otro lado, según [125] establece que el área de restauración ecológica requiere de medidas de protección como un cercado total o parcial, entre otras. Las cañas de bambú pueden usarse para la construcción de cercas rudimentarias considerando que pueden tener una altura de hasta 15 m y un diámetro de 0,30 m [126] y se cierra el cerco con alambre de púas para alejar al ganado. Considerando que:

- En la venta de cañas el promedio de altura es de hasta 3 m;
- La altura del cerco será de 1 m y, por tanto, se obtienen hasta 3 pedazos de 1 caña;
- La distancia entre cada caña que conforma el cerco es de 10 m y el grosor de cada caña es de 30 cm o 0,3 m;

Con esto, se obtienen las cantidades requeridas para cada suministro para implementar el cercado siguiendo la longitud de los cauces en los que se desarrollará el proyecto, expresados en la **TABLA XLVI**.

TABLA XLVI
CANTIDADES REQUERIDAS PARA HACER UN CERCADO

Longitud total de Z.A. (m)	Suministro	Unidad requerida	Total requerido
4477,17	Caña	447,72 (cañas de 1m)	150 (cañas de 3 m)
	Alambre	4.477,17 (sin enrollar a la caña)	4.612 m (con enrollado)

El precio de la caña guadúa preservada es de \$1,50 USD/m [127] y el rollo de 500 m de alambre de púas motto rojo para cercar y proteger plantaciones [128] tiene un costo de \$ 82,10 USD [129]. Entonces, en la **TABLA XLVII** se incluyen estas especificaciones para establecer el costo de las actividades de cuidado en vivero.

TABLA XLVII
COSTOS DE INVERSIÓN: ACTIVIDADES DE PROTECCIÓN

Restauración asistida	Actividades / Suministros	Consideraciones	Cantidad	Valor unitario (\$ USD)	Costo total (\$ USD)
Actividades de protección	Diseño de vivero	Clima, plano y buen drenaje, fuentes de agua, vías de acceso y el diseño	1	300,00	300,00
	Construcción y adecuación	Cercas, semilleros o germinadores, patabandas de crecimiento, accesos internos, riego, área de almacenamiento, oficinas y bodegas	1	3.000,00	3.000,00
	Cercado para zona de amortiguamiento	Cañas de 1 m	448	1,5	672,00
		Rollos de 500 m de Alambre de púas (4 612 m en rollos equivale a 9.22 rollos)	10	82,10	821,00
Total					4.793,00

Nota: El desglose de los costos por el cercado se detalla en el *Anexo G*.

4.1.2. Costos de transacción

Los costos totales del proyecto son \$ 1.074.149,96 USD considerando la inversión, la implementación, operación y mantenimiento y de oportunidad. De esto se estima que los costos de transacción son de \$ 182.605,49 USD. En la **TABLA XLVII** se especifica el costo y la tasa considerada.

TABLA XLVIII
COSTOS DE TRANSACCIÓN

Costo total del proyecto (\$ USD)	Tasa de los costos de Transacción (%)	Costos de transacción (\$ USD)
1.074.149,96	17	182.605,49

4.1.3. Costos de operación y mantenimiento

Basado en que los costos de operación y mantenimiento ocurren durante los primeros tres años posteriores a la fase de implementación [130] y que las actividades son de control de malezas, poda y reparación del cercado, se estima un costo total de \$ 132.375,50 desglosados en la siguiente tabla:

TABLA XLIX
COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTOS

Restauración asistida	Actividades / Suministros	Costo Unitario (\$ USD)	Costo total (\$ USD)
	Control de malezas	0,34	125.975,1
Operación y mantenimiento	Poda	0,05	6.175,25
	Reparación de cercado	225,15	225,15
	Total		132.375,50

Nota: El desglose de los costos de operación y mantenimiento se detalla en el *Anexo H*.

4.1.4. Costos de oportunidad

Los pastizales constituyen el uso de suelo con mayor predominancia en la zona de intervención, abarcando aproximadamente el 48 % de la superficie. La abundancia y distribución de pastos naturales y/o cultivados en zonas altoandinas facilita el desarrollo de actividades pecuaria [131]. De acuerdo con [132], la producción bovina de carne y leche en Ecuador se desarrolla bajo sistemas de pastoreo extensivo, en los que predominan bajos niveles de tecnificación y de productividad. Aproximadamente el 95% de la ganadería emplea mano de obra familiar para una producción destinada principalmente al autoconsumo e intercambio.

El bosque siempreverde montano-alto de Catamayo-Alamor es el principal ecosistema que se extiende por la zona de intervención de acuerdo al Sistema de Clasificación de Ecosistemas del Ecuador Continental [68]. Las actividades ganaderas de este ecosistema de montaña típicamente húmedo se encuentran mayormente direccionadas hacia la producción lechera [133]. El sector lechero de las zonas rurales del cantón Chilla se maneja bajo sistemas ganaderos extensivos tradicionales [134]. De esta forma, se estima que los costos de oportunidad del área de estudio son equivalentes a las ganancias obtenidas por la productividad del sistema pastoril (litros/ha/año).

La producción y carga animal fueron datos necesarios para calcular la productividad académica del sistema de producción lechera (SPL). La producción animal registrada para fincas de 1 a 5 ha ubicadas en zonas húmedas templadas del Ecuador, se sitúa en un rango de entre 3,4

l/UBA/día a 13,5 l/UBA/día [135]. Las fincas pequeñas con mayor presencia de pasturas naturales ubicadas en zonas de transición de páramo mantienen una carga animal promedio de 1,25 UBA/ha [136].

Considerando que, el precio por litro de leche es de \$ 0,42 USD fijado por el Decreto Ejecutivo 195, Reglamento General a la Ley Orgánica para Fomentar la Producción Comercialización, Industrialización, Consumo y Fijación del precio de la leche y sus derivados, el ingreso por la producción de leche en la zona de intervención fue de \$ 1.331,00 USD/ha/año. La producción anual se ajustó a 300 días, tiempo en el cual una vaca lechera se encuentra en el periodo de lactancia dentro de su ciclo productivo [137]. Los valores referenciales para el cálculo del costo de oportunidad se presentan en la **TABLA L**.

TABLA L
COSTOS DE OPORTUNIDAD

Productividad del sistema pastoril	
Producción promedio (litros/UBA/año)	2.535
Carga (UBA /ha)	1,25
Precio (USD/litro)	0,42
TOTAL (\$ USD/ha/año)	1.331,00

Es preciso señalar que estos costos se conciben como una forma de compensar a los propietarios de la tierra por destinar superficie para la restauración ecológica en lugar de aprovecharla para la producción lechera. El pago está programado a ejecutarse durante el desarrollo de la fase de implementación. Al término de dicha fase, partiendo del supuesto que el ecosistema maduro será plenamente funcional en la retención de sedimentos, se plantea discontinuar los costos de oportunidad. Esta decisión se fundamenta en el artículo 10 de la LORHUYA que declara dominio público hídrico una franja de 30 metros de la zona ribereña del Río Casacay.

4.2. Valoración de beneficios

El proyecto de restauración ecológica pretende generar beneficios, expresados como los costos ahorrados en el tratamiento del agua, de \$ 11.523.731,65 USD a lo largo de 30 años. Considerando que el caudal de tratamiento de la planta es de aproximadamente 850 l/s, los costos asociados a la eliminación de los sedimentos en el escenario actual ascienden a \$ 12.933.351,46 USD. Una vez consolidado el proyecto de restauración ecológica en el escenario alternativo, dichos costos

presentarían una reducción del 90 % con una cifra total de \$ 1.409.619,81 USD. Como se observa en la **TABLA LI**, la fuente principal de ahorro está relacionado con la adquisición del sulfato de aluminio para flocular los sedimentos.

TABLA LI
VALORACIÓN DE BENEFICIOS

Componente	Subcomponente	Escenario Actual (\$ USD)	Escenario futuro (\$ USD)	Ahorro (\$ USD)	Porcentaje (%)
Tratamiento del agua	Productos químicos	3.444.491,14	194.866,04	3.249.625,10	94,34
	Mano de Obra	1.351.551,90	173.024,23	1.178.527,67	87,20
	Alquiler de maquinaria	1.202.163,10	153.899,64	1.048.263,46	87,20
	Línea de conducción	6.935.145,33	887.829,90	6.047.315,43	87,20
TOTAL (\$ USD)		12.933.351,46	1.409.619,81	11.523.731,65	-

Nota: El flujo de caja de beneficios se encuentra en el *Anexo J*.

5. *Análisis económico*

Los resultados revelan que el proyecto de restauración ecológica es financieramente viable para la Mancomunidad “La Esperanza” (Ver *Anexo K*). La implementación del escenario futuro tiene un costo total de \$ 1.243.062,22 USD con beneficios que ascienden a \$ 11.523.731,65 USD en valor presente. Durante los 30 años de horizonte se produce un flujo de caja neto total \$ 21.016,89 USD y un flujo acumulado de \$ 1.539.230,00 USD en valor presente.

Considerando una tasa de descuento social del 12 % se genera un VAN de \$ 1.275.494,82 USD, una TIR de 31 % y un B/C de \$ 5,27 USD. El componente de inversión inicial expresado en valor presente se recuperaría en un plazo de 5 años 3 meses. De esta forma, el análisis económico revela que el proyecto es rentable al contar con un VAN positivo, una TIR superior a la tasa de descuento, una relación B/C mayor 1 y un tiempo de recuperación del componente de inversión inicial bastante corto, lo que le proporciona una rápida liquidez. En general, estos resultados muestran que la infraestructura natural que se desea implementar financieramente debe fungir

como complemento de la infraestructura tradicional para el control de sedimentos con el fin de mejorar la calidad del agua en la subcuenca del Río Casacay.

6. Análisis de riesgo e incertidumbre

Para abordar el riesgo en el escenario alternativo se contempló variables como la tasa de descuento, eficiencia de retención de sedimentos y costos de implementación del proyecto. Como variables dependientes se identificaron a los cuatro indicadores económicos evaluados en el paso anterior. Se utilizaron un total de 10.000 iteraciones para establecer valores promedio, máximos, mínimos y la desviación estándar.

- ***Financiamiento: tasa de descuento***

Para abordar diferentes perspectivas de los costes de capital se varió el tipo de descuento social enmarcado dentro del rango aconsejado por la mayoría de los organismos de financiación multilaterales [89].

Considerando un “escenario de bajo riesgo” del 8% y un “escenario de alto riesgo” del 15%, se obtuvo un comportamiento favorable de los indicadores financieros para la implementación del proyecto, se tiene que:

- El indicador B/C, con una desviación estándar de \$ 1,28 USD, presentó un valor promedio de \$ 5,68 USD, con una cifra mínima de \$ 3,38 USD y una máxima de \$ 9,83 USD.
- El VAN, tomando en consideración una desviación estándar de \$ 308.773,80 USD, arrojó un valor promedio de \$ 1.375.143,11 USD con una máxima de \$ 2.379.343,26 USD y una mínima de \$ 817.877,52 USD.
- El *payback* de la inversión presentó una duración promedio de 5 años 3 meses, con una máxima de 5 años 8 meses y una mínima de 4 años 9 mes, considerando una desviación estándar de aproximadamente 2 meses.
- La TIR fue el único indicador que presentó un comportamiento constante, manteniéndose en el 31%.

Los histogramas de las iteraciones e información estadística generada por la herramienta *Risk Simulator* durante este perfil de simulación se presenta en las **Figuras 20, 21, 22 y 23**.

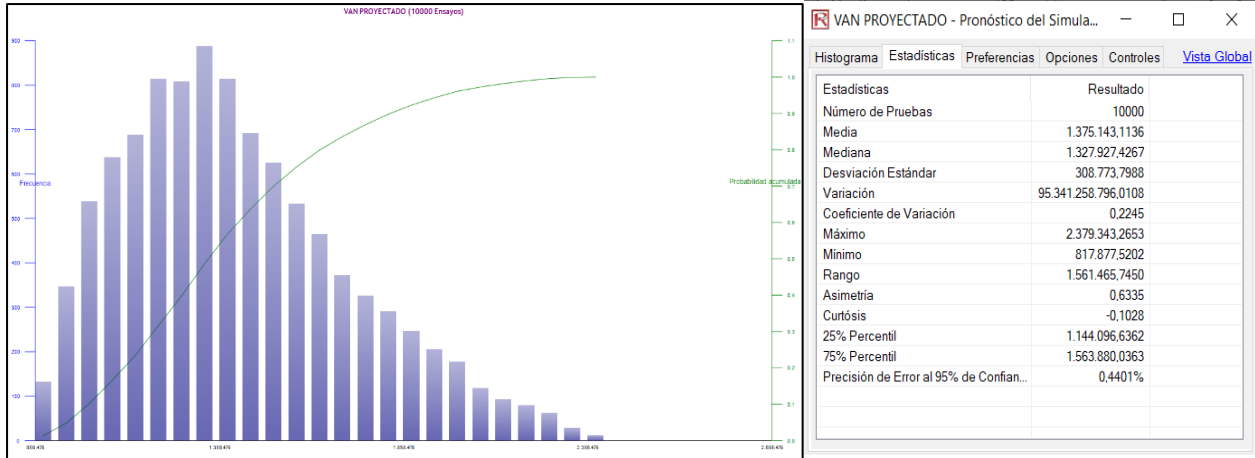


Fig. 22. Resultados de la simulación del riesgo para la tasa de descuento (VAN)

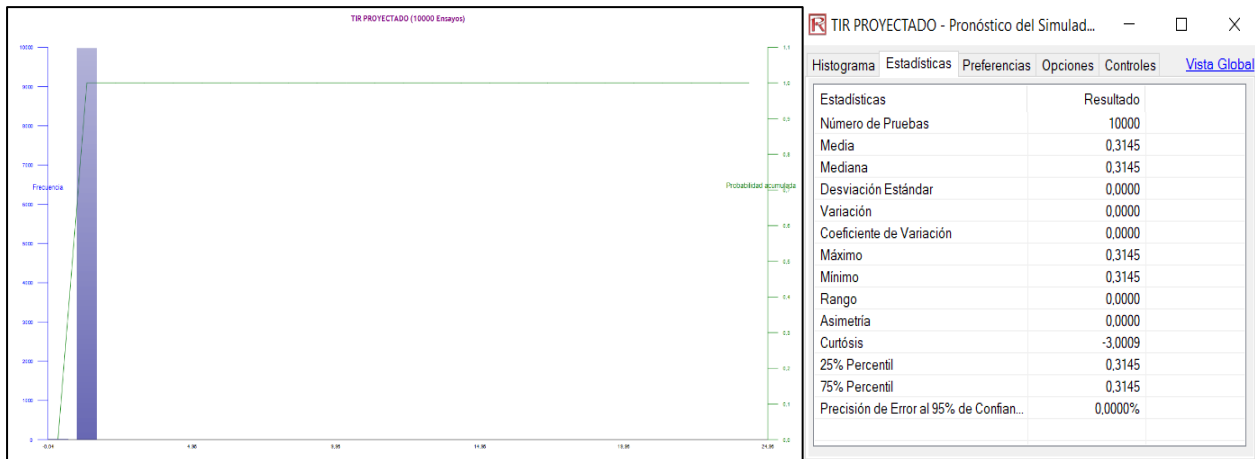


Fig. 21. Resultados de la simulación del riesgo para la tasa de descuento (TIR)

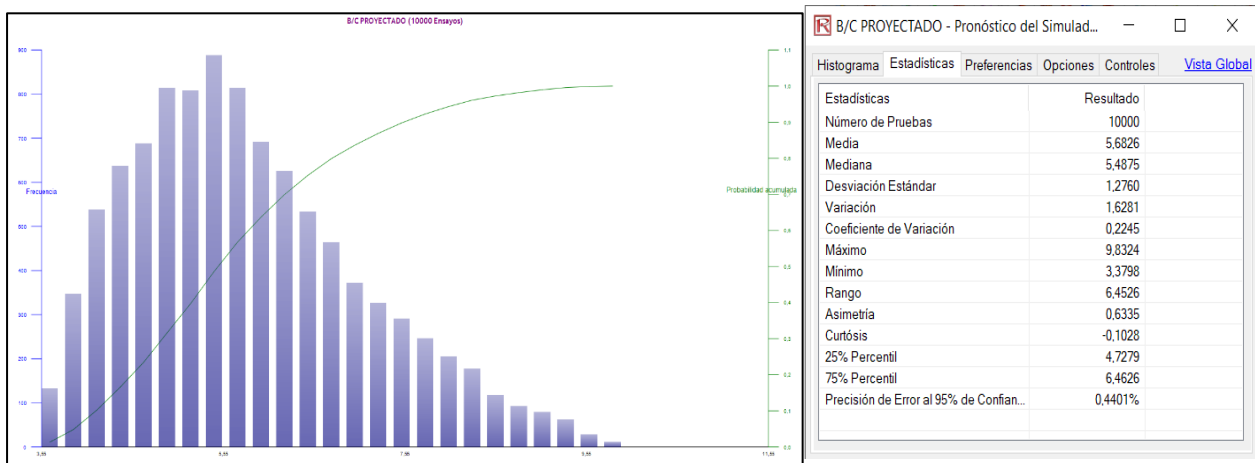


Fig. 20. Resultados de la simulación del riesgo para la tasa de descuento (índice B/C)

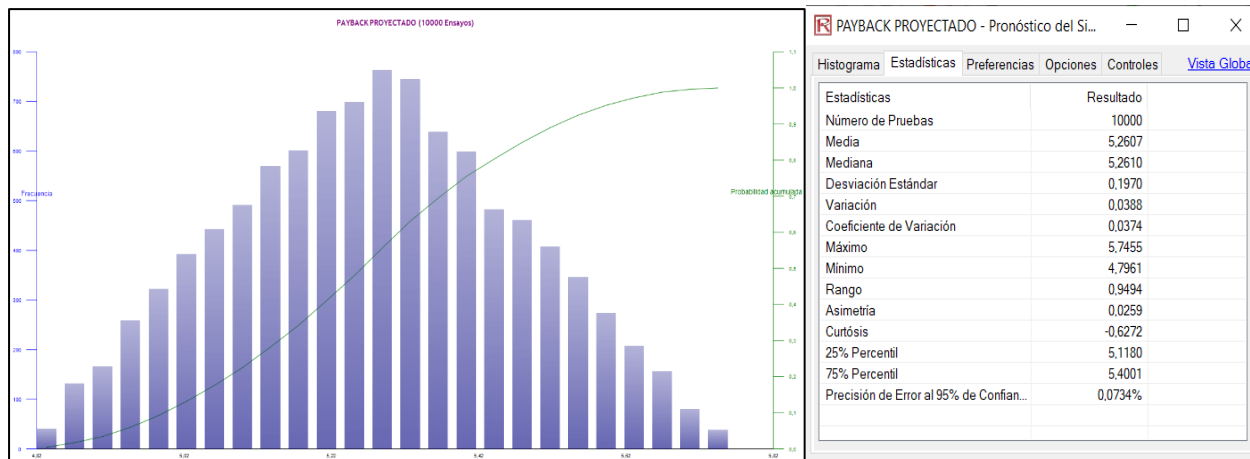


Fig. 23. Resultados de la simulación del riesgo para la tasa de descuento (Payback)

- ***Rendimiento de la infraestructura natural: producción de sedimentos***

Para abordar la incertidumbre inherente al rendimiento de la infraestructura natural para el control de sedimentos, se utilizó cifras de eficiencia extremos entre el 85 % y 95 %. Utilizando una tasa de descuento del 12 % sugerida por el BID, los indicadores financieros demostraron que la variación del rendimiento de retención de sedimentos del ecosistema maduro no es una limitante para el proyecto, se tiene que:

- El indicador B/C arrojó un valor promedio de \$ 5,27 USD, con una cifra máxima de \$ 5,51 USD y una mínima de \$ 5,04 USD y una desviación estándar de \$ 0,097 USD.
- El VAN presentó un valor promedio de \$ 1.275.592,52 USD, con un máximo de \$ 1.334.399,97 USD y un mínimo de \$ 1.219.667,24 USD, considerando una desviación estándar de \$ 23.604,17 USD.
- El *payback* del componente de inversión inicial, considerando una desviación estándar de 12 días, arrojó un valor promedio de 5 días 3 meses, con una duración máxima de 5 años 4 meses y una mínima de 5 años 2 meses
- La TIR, con una desviación del 0,21%, presentó un porcentaje promedio de 31,45%, con un máximo de 31,98% y un mínimo de 30,94%.

Los histogramas de las iteraciones e información estadística generada por la herramienta *Risk Simulator* durante este perfil de simulación se presenta en las **Figuras 24, 25, 26 y 27**.

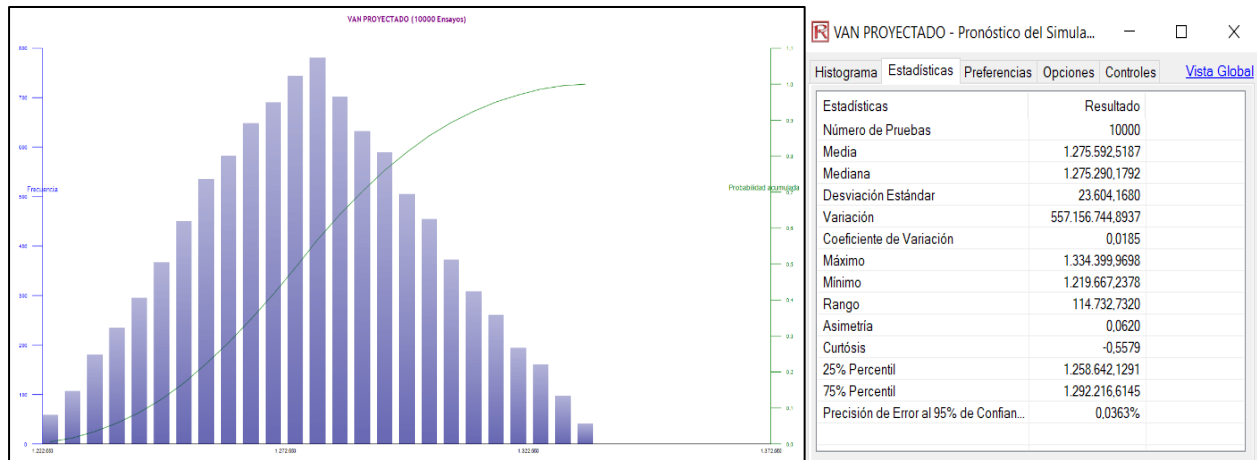


Fig. 24. Resultados de la simulación del riesgo para la retención de sedimentos (VAN)

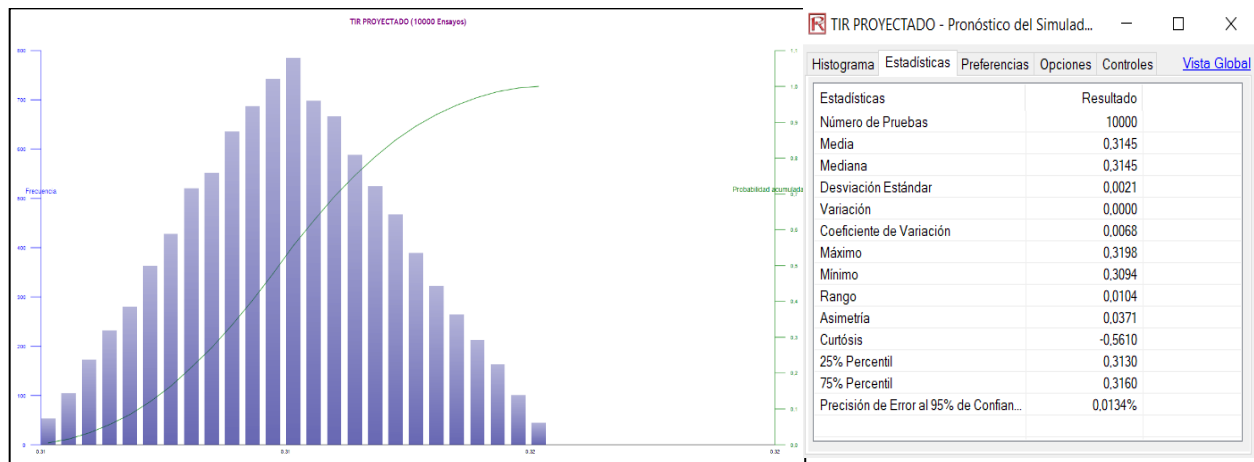


Fig. 25. Resultados de la simulación del riesgo para la retención de sedimentos (TIR)

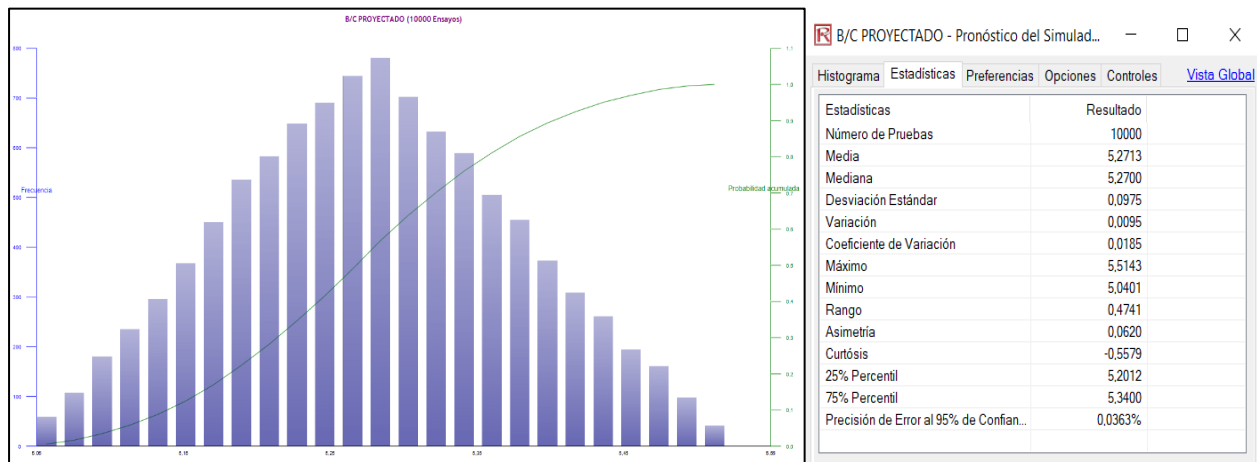


Fig. 26. Resultados de la simulación del riesgo para la retención de sedimentos (B/C)

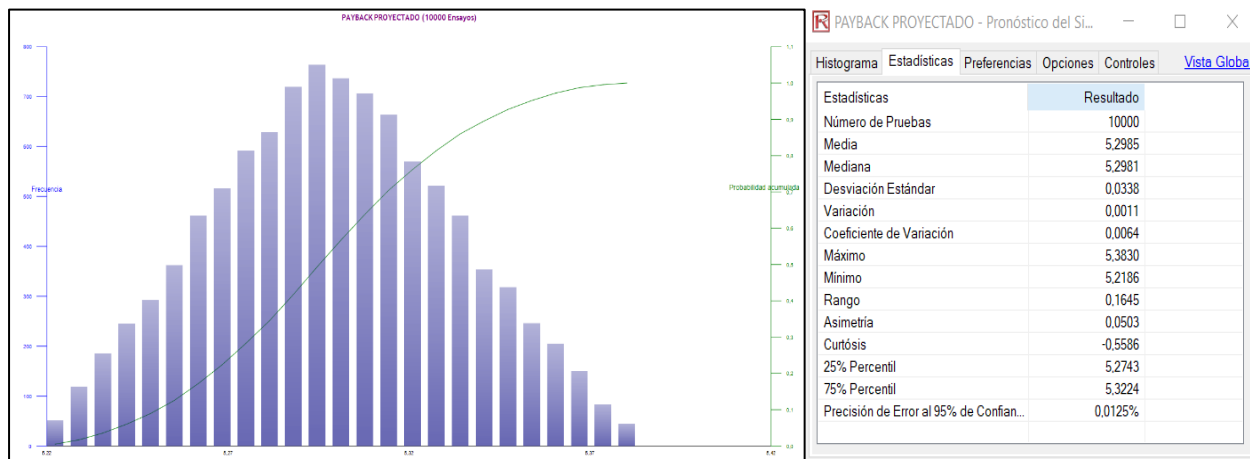


Fig. 27. Resultados de la simulación del riesgo para la retención de sedimentos (Payback)

- **Factores de implementación: costo de la restauración ecológica**

Para abordar la incertidumbre inherente a los costos de la implementación del escenario futuro, se optó por variar la tasa de inflación del 3 % al 4 % para el establecimiento de costos y beneficios. El análisis de sensibilidad, considerando una tasa de descuento del 12%, arrojó resultados financieros que permiten catalogar al proyecto como viable, teniendo que:

- El indicador B/C estimó que las ganancias promedio durante el horizonte serán de \$ 5,28 USD por cada dólar invertido, con valores máximos de \$ 5,78 USD y mínimos de \$ 4,80 USD y una desviación estándar de \$ 0,20 USD.
- El VAN promedio estimado fue de \$ 1.276.175,84 USD con una desviación estándar de \$ 48.382,21 USD, y a su vez alcanzando una cifra máxima de \$ 1.397.656,49 USD y mínima de \$ 1 161 902,45 USD.
- El *payback* mantuvo su duración promedio de 5 años 3 meses para recuperar la inversión, pero presentó un tiempo máximo de 5 años 5 meses y uno mínimo de 5 años 1 mes, con una desviación estándar de 23 días.
- La TIR presentó porcentajes promedio de 31,45%, máximos de 32,45% y mínimos de 30,45%, con una desviación estándar de 0,41%.

Los histogramas de las iteraciones e información estadística generada por la herramienta *Risk Simulator* durante este perfil de simulación se presenta en las **Figuras 28, 29, 30 y 31**.

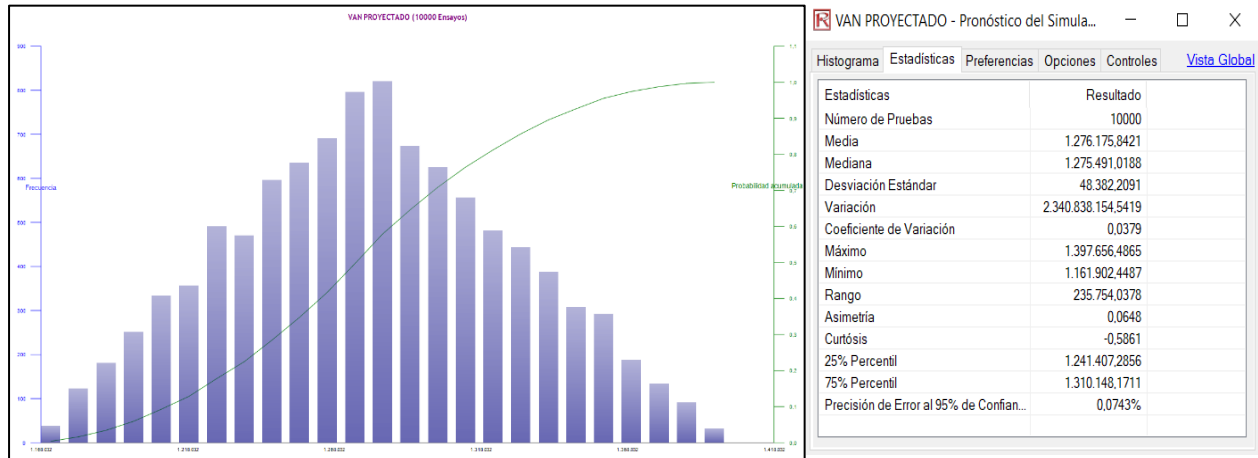


Fig. 28. Resultados de la simulación del riesgo para los costos (VAN)

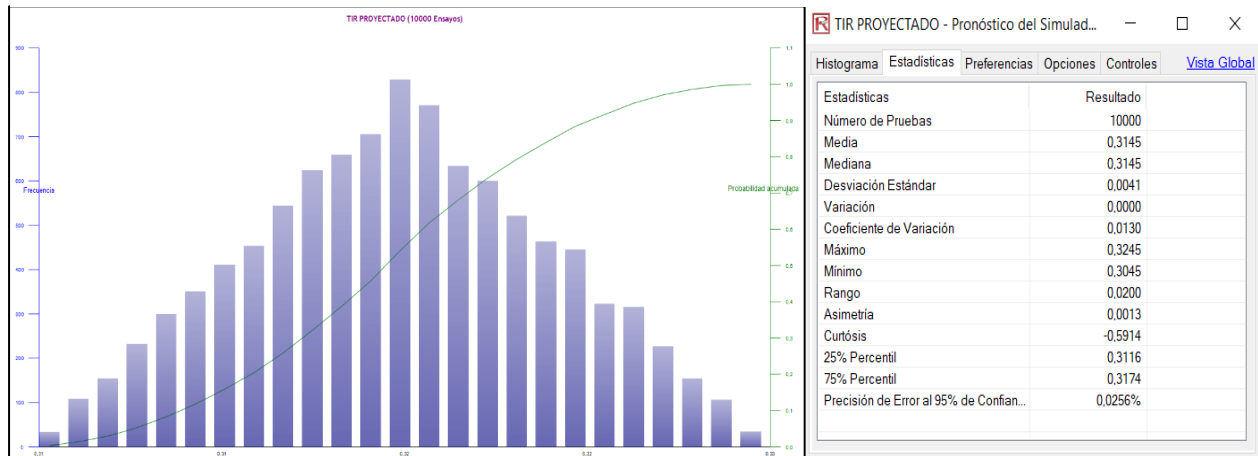


Fig. 29. Resultados de la simulación del riesgo para los costos (TIR)

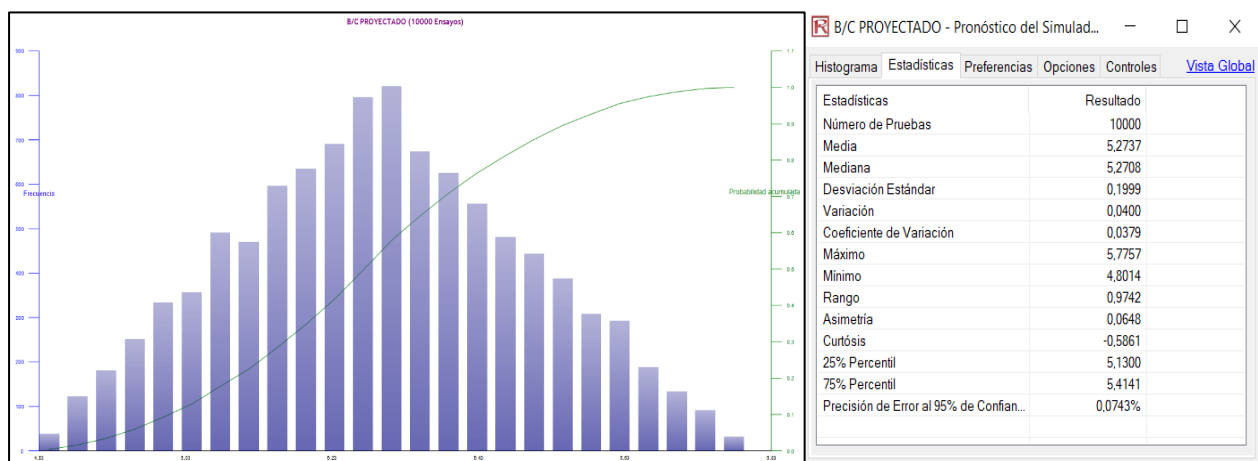


Fig. 30. Resultados de la simulación del riesgo para los costos (B/C)

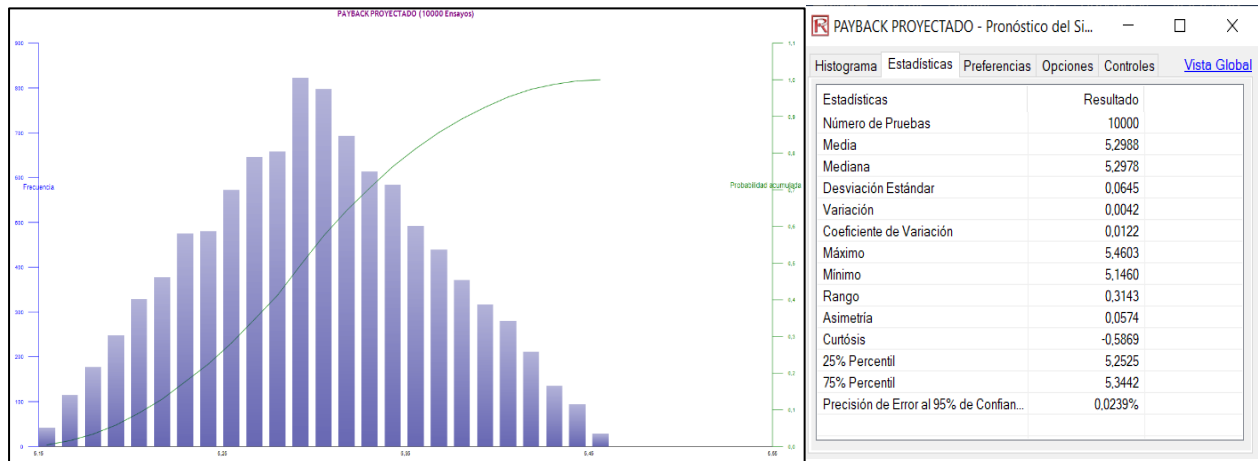


Fig. 31. Resultados de la simulación del riesgo para los costos (Payback)

IX. DISCUSIÓN

La restauración ecológica es una terminología relativamente nueva, pero su aplicación trasciende desde hace algún tiempo atrás ya que se la ha aplicado a través de medidas como reforestación y reintroducción de especies [138]. Es decir, es una práctica que se ha realizado desde hace décadas o que al menos se han creado proyectos con objetivos afines a la restauración ecológica de ecosistemas.

La restauración ecológica es un proceso difícil que involucra a la complejidad de las interrelaciones y los elementos de un ecosistema [139]. La factibilidad es un tema a discusión entre la comunidad científica debido a la dificultad para restaurar varias hectáreas de bosque, el desconocimiento sobre las comunidades y la complejidad de las interacciones en el ecosistema reducen la eficacia de la restauración ecológica [138]. Debido a esto, [138] establece que para aplicar este tipo de proyectos se requieren conocimientos sobre procesos de sucesión ecológica, capacidad adaptativa de las especies a restaurar, entre otros, para recuperar o restaurar la estructura, composición y la función del ecosistema degradado.

El éxito de la restauración ecológica depende de la elaboración de los objetivos, la selección del ecosistema de referencia y la evaluación de los resultados con un programa de monitoreo [139], [140]; adicionalmente, [138] menciona que otra de las actividades complejas y que definen el éxito de estos proyectos es la selección de la especie florística que se utilizará como mecanismo de restauración. De esta forma, la restauración ecológica es factible y viable si y sólo si se aplican modelos de gestión ambiental sostenible. Si bien, requiere de la selección de un ecosistema o imagen de referencia, sus objetivos deben orientarse hacia el futuro más no intentar recuperar situaciones pasadas [141].

En Colombia, en el año 2014 se crearon y ejecutaron más de 100 proyectos de restauración ecológica exitosos vinculados a la supervivencia y el crecimiento vegetativo, el control de la erosión, la calidad y la cantidad del agua, y los cambios en el paisaje [138]; mientras que, en el estudio de [142] se determinó que una de las prioridades de restauración ecológica está ligada a las zonas susceptibles a procesos de erosión para la recuperación de la calidad del suelo y servicios ecosistémicos asociados. El Pacto *pela Restauracao da Mata Atlantica* ha creado protocolos de monitoreo de efectividad de programas y proyectos de restauración ecológica que se han aplicado en la costa de Brasil, pero que pueden ser replicables en diversos proyectos que utilicen a la

restauración ecológica como mecanismo de recuperación de un ecosistema y/o sus servicios ambientales [138]. En el centro – sur de Chile, se ha estudiado el impacto de la actividad humana sobre los servicios ecosistémicos en los bosques nativos, especialmente sobre aquellos que están asociados a la diversidad biológica y la provisión del agua en cantidad y calidad [143]. En Estados Unidos, posteriormente a una década, los ecosistemas restaurados han proporcionado entre un 31 – 93 % de servicios ecosistémicos más que un ecosistema natural sin ninguna intervención [141] y alrededor de 38 000 proyectos tienen objetivos comunes como mejorar la calidad del agua, gestionar las zonas ripícolas y la estabilización de bancos de sedimentos, entre otros [140].

Por otro lado, [144] menciona que, en nuestro país, especialmente en la región sur, la restauración ecológica es un tópico incipiente debido a la carencia de estudios técnicos sobre la salud de los ecosistemas. Los únicos registros nacionales sobre la restauración ecológica están relacionados a estudios académicos de tesis y proyectos y entre 1979 – 2010 se encontraron al menos 15 publicaciones, pero a partir del 2007 este número ha aumentado considerablemente [143]. Además, [143] hace hincapié en que los proyectos no se han llevado a cabo debido a la falta de factores demostrativos de su viabilidad.

La infraestructura verde y las SbN son más resilientes y rentables que la infraestructura gris [44] ya que los esfuerzos de esta última no son suficientes para sobrellevar desastres naturales y antrópicos [32], [38]. La restauración ecológica puede ser un proceso costoso, pero que brinda estabilidad y sostenibilidad a largo plazo para el ecosistema a intervenir [50].

La propuesta de restauración ecológica en las zonas con alta susceptibilidad en la Subcuenca del río Casacay está justificada con los objetivos de inversión medibles asociados al volumen de sedimentos, la selección del ecosistema ripícola con la especie *Buddleja coriácea*, y los programas de monitoreo de la Fase 1 y la propuesta para la Fase 2. Asimismo, con la metodología *Green-Gray Assessment* se consideraron aspectos biofísicos, indicadores financieros y un análisis de riesgos para dichos indicadores que permiten demostrar su viabilidad. La implementación de este proyecto garantiza beneficios a corto plazo ligados a la recuperación de los servicios ecosistémicos como el control de sedimentos y la calidad del agua [30], [35], [38], [42]. De esta manera, se transforma el servicio ecosistémico de regulación y calidad del agua a un capital natural monetario [50] a través del análisis costo beneficio para generar una política basada en el análisis de transferencia de los beneficios [50] y los proyectos con mejores resultados son aquellos en los que se conservan y restauran cuencas hidrográficas [57].

En el lapso de 32 años, la subcuenca alta o la unidad hidrográfica de cód. 139629 ha sufrido un cambio en el uso de suelo progresivo y agresivo con el bosque y el páramo ya que alrededor del 35 % y 42 % correspondientemente han sido desplazados por pastizales y las plantaciones de pinos y eucaliptos. Por otra parte, en las zonas con alta susceptibilidad de erosión, las pérdidas de bosque y vegetación arbustiva y herbácea ascendieron a 99 % y 90 % correspondientemente debido a la plantación de pinos. De acuerdo con [141] las plantaciones forestales no presentan cobertura vegetal suficiente durante los primeros años de crecimiento ocasionando un aumento en los procesos erosión por la escorrentía superficial. Las plantaciones de *Eucalyptus spp.* no sirven para el control de erosión y requieren el desmalezamiento lo que hace que el terreno sea más susceptible a erosión, especialmente si existen pendientes pronunciadas [142]. Estas plantaciones forestales de rápido crecimiento pueden destruir bosques nativos y deterioran los servicios ecosistémicos relacionados al control de erosión y a la provisión de cantidad y calidad del agua [141]. De acuerdo con este análisis, los cambios severos de las coberturas naturales disminuyen gradualmente los servicios ecosistémicos relacionados con la calidad del agua y la carga de sedimentos.

La Mancomunidad “La Esperanza” administra y gestiona el tratamiento de agua cruda y el suministro de agua potable de la Subcuenca del río Casacay mediante la operatividad de las plantas de captación “La Danesa” y la potabilizadora “La Esperanza”. Mediante un modelo empírico se determinó que la subcuenca alta tiene la capacidad máxima de hasta 60 000 ton/ha/año. Adicionalmente, en situaciones reales, la planta de captación recibe al menos 9 000 ton/año de sedimentos.

En Ecuador, se ha aplicado la metodología USLE en varias cuencas hidrográficas para estimar la pérdida de suelo por erosión hídrica. En el estudio de [145] en la microcuenca del río Muchacho, Manabí, presenta niveles de erosión severos de hasta 100 ton/ha/año agravándose en zonas de lluvias intensas y con poca o nula cobertura vegetal. [146] estudió la pérdida de suelo en la Subcuenca del río Portoviejo y encontró que alrededor del 97 % del terreno presentó una alta resistencia a la erosión hídrica (5 – 25 ton/ha/año) debido a la altitud baja del terreno; sin embargo, las pérdidas potenciales de hasta 200 ton/ha/año, como rango máximo, son lugares con lluvias intensas y altas pendientes. Por otra parte, [147] manifiesta que las cuencas andinas ecuatorianas pueden presentar procesos de erosión de $208 - 1\,954 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$, pero si las lluvias son más intensas pueden oscilar entre $2550 - 18\,842 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$, este comportamiento es frecuente en la región sur del país. Estos valores incrementan de acuerdo a las ponderaciones de

las variables usadas para la ecuación de USLE, sin embargo, [147] menciona que la susceptibilidad a erosión tiende a suceder en zonas montañosas de alta pendiente y lluvias intensas debido a que en estas zonas altas es más común el desprendimiento de suelo por el impacto de las gotas de lluvia, y, esto se intensifica aún más cuando existen actividades agrícolas y ganaderas, incluso si se realizan sobre los 3.000 m.s.n.m., ocasionando cambios en la trayectoria del flujo del agua.

Considerando estas especificaciones, de acuerdo con los rangos establecidos en los trabajos de [70], [144], [145] y [146] la subcuenca alta del río Casacay presenta una capacidad erosiva severamente alta. Según [146] la erosión severa se presenta en zonas con cobertura vegetal nula, con pendientes altas y en relieves de cimas de cordilleras o vertientes o en zonas con estas mismas características físicas, pero con cultivos. En Casacay, el cambio y uso de suelo demuestra un comportamiento de cambios progresivos e intensos hacia las zonas más altas que, según [146] evidencia el avance de la frontera agrícola hasta en zonas de altitud alta, sin embargo, en el lugar de estudio los procesos de erosión son más frecuentes en las zonas altas debido al incremento de las plantaciones forestales que, como menciona [142], no son efectivas para la retención de sedimentos y su rápida propagación sólo ocasiona problemas asociados a la calidad del suelo y el agua por la generación y arrastre de sedimentos.

La planificación actual e histórica de la infraestructura verde y gris relacionadas al suministro de agua en la Subcuenca del río Casacay es escasa. De acuerdo con [58] la erosión del suelo genera pérdidas ecológicas y económicas; por tanto, en la Subcuenca del río Casacay la pérdida ecológica está ligada al servicio ecosistémico de retención de sedimentos y calidad del agua, mientras que la económica al costo de tratamiento del agua según la carga contaminante principal, los sedimentos. Sin embargo, la erosión en las zonas ribereñas es la fuente principal para la carga de sedimentos en cursos de agua superficiales [63] y las tasas de producción de sedimentos aumenta en las temporadas de invierno [63]. Por esto, el control de sedimentos en la fuente de producción es menos costoso que dragar un río [64].

Es por esto por lo que, debido a la fragmentación, la calidad y el desempeño de los servicios ecosistémicos, a mediano y largo plazo, lo viable es implementar proyectos de restauración ecológica [32]. Estos proyectos responden a la dinámica de las Sbn, ya que promueven el mantenimiento, la mejora y restauración de ecosistemas [32] a través del uso de infraestructura verde [31], [39] [41]. Además, garantiza el uso de soluciones en base a la ingeniería y tecnología [35]; de tal forma que contrarresta problemas socioeconómicos y ambientales [36] enfocados en la

producción de sedimentos y la turbidez del agua. Los mejores resultados se obtienen a través de una planificación estratégica [30] [53]. Considerando las zonas con alta susceptibilidad de erosión establecidas por [2] [67] y a través de la aplicación de zonas de amortiguamiento de [109], la zona prioritaria de intervención son los cauces inmersos en las zonas más susceptibles a erosionar en la subcuenca alta, con una superficie de 29,06 ha.

El costo de tratamiento del agua en el escenario actual se fundamentó en componentes específicos de la planta empleados únicamente para el manejo de sedimentos como la cantidad de productos químicos, mano de obra y costos varios de mantenimiento. La cifra anual estimada que maneja la Mancomunidad “La Esperanza” es de \$14.119.190,15 USD. Aplicando el proyecto de restauración ecológica, se calculó un beneficio de \$ 11.562.411,15 USD expresado como ahorro en los costos de tratamiento durante el horizonte. De esta forma, la erosión del suelo es un factor que genera importantes costos in situ y ex situ, que pueden ser cuantificados mediante las labores necesarias para eliminar los sedimentos [148].

El estudio costo-beneficio para la protección de las fuentes de agua utiliza a la turbidez como principal variable de análisis [149]. La turbidez es monitoreada casi universalmente por las empresas de agua y utilizado por los operadores para optimizar los procesos de tratamiento, evaluar el rendimiento y monitorear el cumplimiento de los límites máximos permisibles [149]. Es una variable bastante completa, puesto que indica la presencia en el agua de arcilla en suspensión, limo, materia orgánica finamente dividida, algas y otros microorganismos [150]. El aumento de la turbidez del agua bruta, principal insumo en la producción de agua potable, puede traducirse en un aumento de los costes soportados por las instalaciones de tratamiento del agua. En [151] un estudio realizado en 309 megaciudades, se estimó que el 29 % presentaba un incremento de los costos de tratamiento del agua producto de la degradación de sus fuentes hidrográficas. Las ciudades impactadas demostraban un incremento aproximado del 44 % en costos de capital y del 53% en costos de operación y mantenimiento. El costo total de la degradación de sus fuentes hidrográficas ascendió a 5.400 millones de dólares anuales, lo que representó un coste neto actual para las empresas urbanas de suministro de agua de aproximadamente 108 millones de dólares.

El agua cruda de mejor calidad reduce la necesidad de remover sedimentos, facilita la filtración y reduce la implementación de procesos adicionales [151]. [152] establece que la disminución del 1% en la turbidez del agua cruda reduce los costos de tratamiento entre el 0,07% al 0,35%. La equivalencia en dólares de esta aseveración varía de acuerdo a la realidad de la planta

de tratamiento a intervenir. [150] estimaron que un cambio del 1% en la turbidez redujo el costo de tratamiento en \$ 534/ año en una planta de Texas. [153] estimaron que una disminución del 1% de turbidez redujo los costos de tratamiento en la cuenca del Río Maumee en \$ 504/año. Por su parte, [149] hace un compendio entre varios autores y presenta un rango promedio; el beneficio estimado de una reducción del 1% en la turbidez del agua cruda varía de \$121,00 a \$13.060,00 anualmente. Así mismo, establece que el aumento del 1% de las coberturas vegetales dentro de la cuenca fuente varía entre \$201,00 y \$63.293,00. Los resultados que obtuvimos sobrepasan lo enmarcado por los autores presentados. La disminución de los costos de tratamiento debido a la reducción de la turbidez es del 90% a partir del sexto año, puesto es directamente proporcional al nivel de eficiencia de retención de sedimentos del colle. El costo total de tratamiento del agua, implementando el manejo de sedimentos mediante infraestructura verde, evidencia una disminución más notoria en el subcomponente del sulfato de aluminio, donde se reduce el costo en un 95%.

La aplicación de la metodología GGA permitió cuantificar la rentabilidad del proyecto y evaluar políticas públicas sobre la gestión del recurso hídrico y los efectos de la población sobre este recurso, tal como lo expresa [56]. Sin embargo, [50] menciona que el principal reto de la aplicación de este tipo de metodologías es la generalización de valores económicos, esto se refleja al intentar cuantificar la valoración monetaria del tratamiento específico de sedimentos de las plantas de tratamiento que, al haber cumplido y sobrepasado su vida útil, la información sobre su inversión es escasa. Este reto puede simplificarse aplicando el análisis de riesgo o de sensibilidad y según con los resultados obtenidos, el análisis económico denotó una fuerte viabilidad y rentabilidad, puesto que incluso en un escenario de alto riesgo es capaz de generar beneficios significativamente superiores a sus costos. De esta forma, se cumple la hipótesis alternativa referente a que la restauración ecológica aplicada en las zonas con alta susceptibilidad de erosión en la subcuenca de río Casacay tiene un impacto positivo en la relación costo – beneficio en su implementación para la reducción de sedimentos y la minimización de los costos generados en la planta de tratamiento de agua “La Esperanza”.

X. CONCLUSIONES

La carga y el arrastre de sedimentos son los problemas latentes de la Subcuenca del río Casacay. En la parte alta, los cambios del uso de suelo de coberturas naturales a otras coberturas como pastizales, mosaicos agropecuarios y plantaciones de pino son más intensivos y progresivos. Estos cambios forman parte de las zonas con alta susceptibilidad de erosión; es decir, el cambio de uso de suelo de las coberturas naturales a otras está intrínsecamente relacionado a procesos de erosión más frecuentes y, además, alteran la escorrentía superficial aumentando así el arrastre y la carga de los sedimentos que deberán ser tratados en el sistema de tratamiento de “La Danesa” y “La Esperanza”.

Mediante planificación estratégica se planteó que la restauración ecológica con *Buddleja coriácea* debe ser implementada en 29,06 ha que corresponde a zonas de amortiguamiento en los cauces inmersos en las zonas con alta susceptibilidad de erosión que, a su vez, forman parte de la unidad hidrográfica 139629. Esta unidad hidrográfica tiene la capacidad de pérdida de suelo de hasta 60.000 ton/ha/año, aunque en la planta de captación “La Danesa” se ha registrado hasta 9.000 ton/año de sedimentos y se han usado hasta 300 sacos de 25 kg de sulfato de aluminio tipo “A” para el tratamiento de sedimentos y turbidez. Con esta información, se espera que, con la zona de amortiguamiento, la eficiencia de retención de sedimentos alcance el 90 % una vez que el ecosistema ripícola sea restaurado por completo.

En el escenario actual o gris, la Mancomunidad “La Esperanza”, encargada del sistema de tratamiento de agua para Machala, Pasaje y El Guabo, para el año 2023 estimó un costo total de operación y mantenimiento de \$ 475.995,10 USD y un capital o presupuesto de \$ 798.000 USD sólo considerando los ingresos de la venta de agua potable. Mientras que, en el escenario alternativo o verde-gris, con un horizonte de 30 años, se estimó un costo total del proyecto de \$ 1.243.062,22 USD con un ahorro de hasta \$ 11.523.731,65 USD en los costos de tratamiento del agua o de operación y mantenimiento.

La sensibilidad de los resultados considerando escenarios de alto riesgo, el actual y de bajo riesgo, el proyecto de restauración ecológica se mantiene viable y rentable. Las variables independientes seleccionadas para el análisis fueron la tasa de descuento, la eficiencia de retención de sedimentos y la tasa de inflación contemplada para la estimación del costo de la restauración ecológica. El procesamiento de las variables ejecutado por la herramienta *Risk Simulator* mediante

el método Monte Carlo evidenció que la operación conjunta de infraestructura verde y gris generan resultados financieramente favorables para ambos mencionados escenarios. Aunque el tiempo promedio de recuperación del componente de inversión inicial y la tasa interna de retorno se mantiene constante en las tres variables, el beneficio medio percibido por cada dólar invertido, es mayor en caso de producirse variaciones en los costos de capital con una diferencia de aproximadamente 40 centavos de los beneficios estimados para las otras variables. El VAN promedio resultante para la variación de la tasa de descuento asciende a \$1.375.143,11, mientras que para las variables de eficiencia para el control de sedimentos y la tasa de inflación considerada para el cálculo de los costos de restauración las cifras equivalen a \$ 1.275.592,52 USD y \$ 1.276.175,84 USD respectivamente.

XI. RECOMENDACIONES

- Realizar un análisis de la capacidad de intercambio catiónico en parcelas en las que se haya sembrado la especie *Buddleja coriácea*, para obtener datos precisos y exactos sobre la retención de sedimentos.
- Complementar el flujo de beneficios con la estimación de las pérdidas económicas que representa la suspensión del servicio de agua potable durante época de intensas lluvias, para los cantones de Machala, Pasaje y El Guabo.
- La depreciación de los equipos de la planta involucrados en el tratamiento de los sedimentos es un subcomponente importante de considerar para trabajos de esta misma línea. Para incluirlo como beneficio en el presente proyecto, es necesario que la Mancomunidad La Esperanza establezca el avalúo técnico y la tasa de depreciación de la infraestructura gris.
- En caso de realizarse el proyecto, el monitoreo de efectividad debe incluir indicadores ambientales para analizar la eficacia de la zona de amortiguamiento y considerar un programa de monitoreo para el análisis de la calidad del agua en el área intervenida.

XII. REFERENCIAS

- [1] P. Mokondoko, E. Ríos, A. Flores-Díaz, I. González-Mora, D. Terrazas, y J. Machorro Reyes, *Servicios ecosistémicos. Fundamentos desde el manejo de cuencas*. 2018.
- [2] L. A. V. Collaguazo y J. E. E. Correa, «La planificación estratégica como herramienta para la gestión integral de la Subcuenca de Casacay», *Revista Ciencia y Construcción*, 4(1), 48-55, 2023.
- [3] D. Fazeli Tello y L. del Moral, «Infraestructura Verde y sus potencialidades para la regeneración de territorios fluviales: ejemplos de buenas prácticas a diferentes escalas», *Agua Territ.*, vol. 18, pp. 39-59, jun. 2021, doi: 10.17561/at.18.5642.
- [4] A. Lochner, A. Sorolla, M. Bet, I. Rueda, y G. Sorolla, «Soluciones basadas en la Naturaleza (NBS) como una nueva manera inteligente de gestionar el urbanismo y la ingeniería clásica», 2020. Accedido: 4 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://es.studenta.com/content/133544954/informe-tecnico-nbs-es>
- [5] United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, *Informe mundial de las naciones unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2018*. en Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos. UN, 2019. doi: 10.18356/c18ed0db-es.
- [6] E. Montenegro. «Evaluación de la reforestación en la naciente del río Casacay en la provincia de El Oro». *M.S. Tesis*. Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador, 2017.
- [7] J. M. Bosch y J. D. Hewlett, «A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration», *J. Hydrol.*, vol. 55, n.º 1-4, pp. 3-23, feb. 1982, doi: 10.1016/0022-1694(82)90117-2.
- [8] E. R. Martin, I. A. Godwin, R. I. Cooper, N. Aryal, M. L. Reba, y J. L. Bouldin, «Assessing the impact of vegetative cover within Northeast Arkansas agricultural ditches on sediment and nutrient loads», *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 320, p. 107613, oct. 2021, doi: 10.1016/j.agee.2021.107613.

- [9] A. M. Braz, P. H. M. Garcia, A. L. Pinto, E. S. Chávez, y I. J. D. Oliveira, «Manejo integrado de cuencas hidrográficas: posibilidades y avances en los análisis de uso y cobertura de la tierra», *Cuad. Geogr. Rev. Colomb. Geogr.*, vol. 29, n.º 1, pp. 69-85, ene. 2020, doi: 10.15446/rcdg.v29n1.76232.
- [10] M. A. Aguirre, O. Buitrago-Bermúdez, y F. V. Bolaños-Tróchez, «Mecanismos de coordinación en la planificación de cuencas hidrográficas en Colombia: el caso del río Dagua», *Soc. Econ.*, p. e1019207, may 2021, doi: 10.25100/sye.v0i43.9207.
- [11] G. Browder, S. Ozment, I. R. Bescos, T. Gartner, and G.-M. Lange, «Integrating Green and Gray: Creating next generation infrastructure», *World Resources Institute and World Bank Group*, 2019.
- [12] M. Acreman *et al.*, «Evidence for the effectiveness of nature-based solutions to water issues in Africa», *Environ. Res. Lett.*, vol. 16, n.º 6, p. 063007, jun. 2021, doi: 10.1088/1748-9326/ac0210.
- [13] The Nature Conservancy. «Restauración ecológica: Transformar el planeta un bosque a la vez». [Online]. Disponible en: <https://www.nature.org/es-us/sobre-tnc/donde-trabajamos/tnc-en-latinoamerica/brasil/historias-en-brasil/restauracion-ecologica/#:~:text=La%20restauración%20ecológica%20es%20el,de%20enfoques%20efectivos%20en%20costos>.
- [14] Alianza Latinoamericana de Fondos de Agua. «Los fondos de agua de América Latina». [Online]. Disponible en: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjyNCXzuGEAxVobDABHWkTBuEQFnoECBoQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.fondosdeagua.org%2Fes%2Flos-fondos-de-agua%2F&usg=AOvVaw0haODA-RbUgZ5wc8Dmw4fc&opi=89978449>
- [15] C. M. Kauffman, «Financing watershed conservation: Lessons from Ecuador's evolving water trust funds», *Agric. Water Manag.*, vol. 145, pp. 39-49, nov. 2014, DOI: 10.1016/j.agwat.2013.09.013.

- [16] P. Marquet y M. Rojas, «Soluciones basadas en la naturaleza», Zenodo, dic. 2021. DOI: 10.5281/ZENODO.5736938.
- [17] M. Luo, J. Cai, Z. Zeng, Y. Zheng, y T. Lin, «Development and practices of nature-based solutions in China», *Nat.-Based Solut.*, vol. 5, p. 100109, jun. 2024, DOI: 10.1016/j.nbsj.2023.100109.
- [18] C. Vela & E. del Busto. «Soluciones basadas en la naturaleza para el agua en cooperación al desarrollo sostenible e inclusivo». *ONGAWA & AACID*, 2022.
- [19] K. Vigerstol, R. Abell, K. Brauman, W. Buytaert, y A. Vogl, «Addressing water security through nature-based solutions», en *Nature-based Solutions and Water Security*, Elsevier, 2021, pp. 37-62. doi: 10.1016/B978-0-12-819871-1.00004-X.
- [20] P. Taylor, P. Glennie, P. Koefoed, M. Bertule, J. Harlin, J. Dalton & R. Welling. «Nature-Based Solutions for Water Management: A Primer». *Paprika, Annecy*, 2018.».
- [21] Lenin Corrales, C. B. Pérez, E. F. McLeod, y J. Betbeder, «Evaluación de la infraestructura verde y conectividad ecológica en el cantón de Curridabat», 2019, DOI: 10.13140/RG.2.2.34136.65288.
- [22] D. Kaposztasova, K. Lavkova Cakyova, M. Vertal, Z. Vranayova, y E. K. Burdova, «Active Green Constructions and Their Impact on Gray Infrastructure», *Buildings*, vol. 14, n.º 2, p. 306, ene. 2024, doi: 10.3390/buildings14020306.
- [23] Y.-Y. Chiu, Y.-H. Wu, K.-L. Fu, T.-C. Lai, H.-E. Chen, y S.-C. Chen, «Nature-Based Solutions for Disaster Reduction and Improving Ecosystem Services in the Hutoubi Watershed, Taiwan», *Water*, vol. 15, n.º 14, p. 2527, jul. 2023, doi: 10.3390/w15142527.
- [24] E. Gray, S. Ozment, J. C. Altamirano, R. Feltran-Barbieri, y Y. G. Morales, «Green-Gray Assessment: Cómo Evaluar Los Costos Y Beneficios De La Infraestructura Verde En Los Sistemas De Suministro De Agua», World Resource Institute, 2020.

- [25] C. J. Vörösmarty *et al.*, «A green-gray path to global water security and sustainable infrastructure», *Glob. Environ. Change*, vol. 70, p. 102344, sep. 2021, doi: 10.1016/j.gloenvcha.2021.102344.
- [26] W. Li, R. Sun, y Y. Tian, «Research on the Application of NbS in Watershed Ecological Restoration: A Case Study of Jiulong River Watershed Shan-Shui Initiative», *Sustainability*, vol. 15, n.º 23, p. 16535, dic. 2023, doi: 10.3390/su152316535.
- [27] GAD Cantonal de Chilla. «Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de Chilla». Chilla, Ecuador, 2015.
- [28] J. Wang, J. Liu, H. Wang, y C. Mei, «Approaches to Multi-Objective Optimization and Assessment of Green Infrastructure and Their Multi-Functional Effectiveness: A Review», *Water*, vol. 12, n.º 10, Art. n.º 10, oct. 2020, doi: 10.3390/w12102714.
- [29] S. Ozment *et al.*, «Soluciones basadas en la naturaleza en América Latina y el Caribe: situación regional y prioridades para el crecimiento», *IDB Publ.*, oct. 2021, doi: 10.18235/0003687.
- [30] J. Maes & S. Jacobs «Nature-Based Solutions for Europe's Sustainable Development». *Conservation Letters: A Journal of the Society for Conservation Biology*. DOI: 10.1111/conl.12216.
- [31] N. Faivre, M. Fritz, T. Freitas, B. De Boissezon, y S. Vandewoestijne, «Nature-Based Solutions in the EU: Innovating with nature to address social, economic and environmental challenges», *Environ. Res.*, vol. 159, pp. 509-518, nov. 2017, DOI: 10.1016/j.envres.2017.08.032.
- [32] N. Kabisch *et al.*, «Nature-based solutions to climate change mitigation and adaptation in urban areas: perspectives on indicators, knowledge gaps, barriers, and opportunities for action», *Ecol. Soc.*, vol. 21, n.º 2, p. art39, 2016, DOI: 10.5751/ES-08373-210239.
- [33] L. Dai, Q. Han, B. De Vries, y Y. Wang, «Applying Bayesian Belief Network to explore key determinants for nature-based solutions' acceptance of local stakeholders», *J. Clean. Prod.*, vol. 310, p. 127480, ago. 2021, DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127480.

- [34] N. Hilmi, R. Chami, C. Fullenkamp, M. Jafari, y U. R. Sumaila, «Editorial: Nature-based solutions, climate mitigation, biodiversity conservation», *Front. Clim.*, vol. 5, p. 1308032, oct. 2023, DOI: 10.3389/fclim.2023.1308032.
- [35] N. Frantzeskaki *et al.*, «Nature-Based Solutions for Urban Climate Change Adaptation: Linking Science, Policy, and Practice Communities for Evidence-Based Decision-Making», *BioScience*, vol. 69, n.º 6, pp. 455-466, jun. 2019, DOI: 10.1093/biosci/biz042.
- [36] T. B. Randrup, A. Buijs, C. C. Konijnendijk, y T. Wild, «Moving beyond the nature-based solutions discourse: introducing nature-based thinking», *Urban Ecosyst.*, vol. 23, n.º 4, pp. 919-926, ago. 2020, DOI: 10.1007/s11252-020-00964-w.
- [37] N. Frantzeskaki, «Seven lessons for planning nature-based solutions in cities», *Environ. Sci. Policy*, vol. 93, pp. 101-111, mar. 2019, DOI: 10.1016/j.envsci.2018.12.033.
- [38] B. G. Reguero *et al.*, «Editorial: Nature-based solutions for natural hazards and climate change», *Front. Environ. Sci.*, vol. 10, p. 1101919, dic. 2022, DOI: 10.3389/fenvs.2022.1101919.
- [39] G. Reed *et al.*, «Toward Indigenous visions of nature-based solutions: an exploration into Canadian federal climate policy», *Clim. Policy*, vol. 22, n.º 4, pp. 514-533, abr. 2022, DOI: 10.1080/14693062.2022.2047585.
- [40] W. Bauer, «Reframing Urban Nature-Based Solutions Through Perspectives of Environmental Justice and Privilege», *Urban Plan.*, vol. 8, n.º 1, nov. 2022, DOI: 10.17645/up.v8i1.6018.
- [41] X. He, H. Wei, y S. Li, «Research progress and application prospect of nature-based solutions in China», *Front. Environ. Sci.*, vol. 11, p. 1133433, feb. 2023, DOI: 10.3389/fenvs.2023.1133433.
- [42] A. De Silva, D. Amaratunga, y R. Haigh, «Green and Blue Infrastructure as Nature-Based Better Preparedness Solutions for Disaster Risk Reduction: Key Policy Aspects», *Sustainability*, vol. 14, n.º 23, p. 16155, dic. 2022, DOI: 10.3390/su142316155.

- [43] L. Xie y H. Bulkeley, «Nature-based solutions for urban biodiversity governance», *Environ. Sci. Policy*, vol. 110, pp. 77-87, ago. 2020, DOI: 10.1016/j.envsci.2020.04.002.
- [44] J. Bush y A. Doyon, «Building urban resilience with nature-based solutions: How can urban planning contribute?», *Cities*, vol. 95, p. 102483, dic. 2019, DOI: 10.1016/j.cities.2019.102483.
- [45] D. Portalanza *et al.*, «Ecosystem services valuation in the Abras de Mantequilla wetland system: A comprehensive analysis», *Ecol. Indic.*, vol. 158, p. 111405, ene. 2024, DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.111405.
- [46] C. Matos, C. M. Monteiro, C. Santos, A. Briga-Sá, y M. A. Imteaz, «Editorial: Urban nature-based solutions and green infrastructure as strategies for climate change adaptation», *Front. Environ. Sci.*, vol. 11, p. 1256044, ago. 2023, DOI: 10.3389/fenvs.2023.1256044.
- [47] S. Lee y G.-W. Choi, «Governance in a River Restoration Project in South Korea: The Case of Incheon», *Water Resour. Manag.*, vol. 26, n.º 5, pp. 1165-1182, mar. 2012, DOI: 10.1007/s11269-011-9952-5.
- [48] K. Tzoulas *et al.*, «A conceptual model of the social–ecological system of nature-based solutions in urban environments», *Ambio*, vol. 50, n.º 2, pp. 335-345, feb. 2021, DOI: 10.1007/s13280-020-01380-2.
- [49] M. Yang, C. Qin, Y. Zhu, Y. Zhao, G. He, y L. Wang, «Assessment of Multi-Regional Comprehensive Benefits of the South-to-North Water Diversion Project in China», *Water*, vol. 16, n.º 3, p. 473, ene. 2024, DOI: 10.3390/w16030473.
- [50] S. Liu, Y. Dong, F. Wang, H. Liu, y L. Yu, «Cost-benefit research and potential solutions of ecological restoration programs in China», *Trans. Earth Environ. Sustain.*, vol. 1, n.º 1, pp. 68-79, mar. 2023, DOI: 10.1177/2754124X221140800.
- [51] Y. Buitenhuis y C. Dieperink, «Governance conditions for successful ecological restoration of estuaries: lessons from the Dutch Haringvliet case», *J. Environ. Plan. Manag.*, vol. 62, n.º 11, pp. 1990-2009, sep. 2019, DOI: 10.1080/09640568.2018.1529556.

- [52] Z. Ma, C. Xia, y S. Cao, «Cost–Benefit Analysis of China’s Natural Forest Conservation Program», *J. Nat. Conserv.*, vol. 55, p. 125818, jun. 2020, DOI: 10.1016/j.jnc.2020.125818.
- [53] N. Becker, Y. Gross, y D. Lavee, «Cost–benefit analysis of restoring an ephemeral desert stream after an ecological accident», *Water Policy*, vol. 22, n.º 3, pp. 328-347, jun. 2020, DOI: 10.2166/wp.2020.014.
- [54] S. Cao, C. Xia, J. Xian, H. Guo, y H. Zheng, «Payoff of the Grain for Green policy», *J. Appl. Ecol.*, vol. 57, n.º 6, pp. 1180-1188, jun. 2020, DOI: 10.1111/1365-2664.13608.
- [55] A. Thompson, K. Bunds, L. Larson, B. Cutts and J. Hipp «Paying for nature-based solutions: A review of funding and financing mechanism for ecosystem services and their impacts on social equity», *College of Natural Resources*, North Carolina State University, USA, january 2023, DOI: 10.1002/sd.2510
- [56] N. Becker, A. Greenfeld, y S. Zemah Shamir, «Cost–benefit analysis of full and partial river restoration: the Kishon River in Israel», *Int. J. Water Resour. Dev.*, vol. 35, n.º 5, pp. 871-890, sep. 2019, DOI: 10.1080/07900627.2018.1501349.
- [57] M. Li *et al.*, «The cost–benefit evaluation based on ecosystem services under different ecological restoration scenarios», *Environ. Monit. Assess.*, vol. 193, n.º 7, p. 398, jul. 2021, DOI: 10.1007/s10661-021-09188-7.
- [58] X. Suo y S. Cao, «China’s three north shelter forest program: cost–benefit analysis and policy implications», *Environ. Dev. Sustain.*, vol. 23, n.º 10, pp. 14605-14618, oct. 2021, DOI: 10.1007/s10668-021-01260-z.
- [59] S. Kumar y A. Mishra, «Critical Erosion Area Identification Based on Hydrological Response Unit Level for Effective Sedimentation Control in a River Basin», *Water Resour. Manag.*, vol. 29, n.º 6, pp. 1749-1765, abr. 2015, DOI: 10.1007/s11269-014-0909-3.
- [60] F. Majoro, U. G. Wali, O. Munyaneza, y F.-X. Naramabuye, «Sustainability Analysis of Soil Erosion Control in Rwanda: Case Study of the Sebeya Watershed», *Sustainability*, vol. 15, n.º 3, p. 1969, ene. 2023, doi: 10.3390/su15031969.

- [61] Z.-Y. Wang, G. H. Huang, G. Q. Wang, y J. Gao, «Modeling of Vegetation-Erosion Dynamics in Watershed Systems», *J. Environ. Eng.*, vol. 130, n.º 7, pp. 792-800, jul. 2004, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(2004)130:7(792).
- [62] X. Wen, X. Deng, y F. Zhang, «Scale effects of vegetation restoration on soil and water conservation in a semi-arid region in China: Resources conservation and sustainable management», *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 151, p. 104474, dic. 2019, DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.104474.
- [63] R. D. Peacher, R. N. Lerch, R. C. Schultz, C. D. Willett, y T. M. Isenhardt, «Factors controlling streambank erosion and phosphorus loss in claypan watersheds», *J. Soil Water Conserv.*, vol. 73, n.º 2, pp. 189-199, 2018, DOI: 10.2489/jswc.73.2.189.
- [64] R. J. Rickson, «Can control of soil erosion mitigate water pollution by sediments?», *Sci. Total Environ.*, vol. 468-469, pp. 1187-1197, ene. 2014, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.05.057.
- [65] K. A. Brauman, R. Benner, S. Benitez, L. Bremer, y K. Vigerstøl, «Water Funds», en *Green Growth That Works*, L. Mandle, Z. Ouyang, J. E. Salzman, y G. Daily, Eds., Washington, DC: Island Press/Center for Resource Economics, 2019, pp. 118-140. DOI: 10.5822/978-1-64283-004-0_9.
- [66] Gobierno Autónomo Descentralizado de El Oro, «Propuesta del Subsistema de Áreas Naturales de Conservación y Diseño del Corredor Ecológico», *Serie de Publicaciones Misceláneas* No. 12, GADPEO - INABIO, 2019.
- [67] L. Vargas, «Bases para elaborar el Plan de Manejo de la Subcuenca del río Casacay (Bosque y Vegetación Protectora) Ecuador», *M.S. Tesis, Universidad de Buenos Aires*, Buenos Aires, Argentina, 2021.
- [68] Ministerio del Ambiente del Ecuador, «Sistema de clasificación de los ecosistemas del Ecuador Continental», *Subsecretaría de Patrimonio Natural*, Quito, Ecuador, 2013.
- [69] R. Feltran-Barbieri, S. Ozment, P. Hamel, E. Gray, H. L. Mansur, y T. Piazzetta, «Infraestructura natural para agua no sistema Guandu, Rio de Janeiro», p. 72, 2019.

- [70] K. McKague y P. Eng, «Universal Soil Loss Equation (USLE)», *Factsheet OMAFRA*, No. 12-051, 2023.
- [71] Nippon Koei Co. Ltd, «Chapter 4: Erosion Sources and Sediment Yield from the Wonogiri Dam Watershed», *Main Report Part I: Master plan study*, 2007.
- [72] M. González, «La ecuación universal de pérdidas de suelo: pasado, presente y futuro», *Ecología*, No. 5, pp. 13-50, 1991.
- [73] W. Wischmeir y D. Smith, «Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning», *U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook*, no. 537, 1978.
- [74] B. Olivares, D. Lobo y K. Verbist, «Aplicación del modelo USLE en parcelas de erosión bajo prácticas de conservación de suelos y aguas en San Pedro de Melipilla, Chile», *Ciencia e Ingeniería*, vol. 36, no. 1, pp- 3 - 10, ISSN: 1316-7081, ISSN Elect. 2244-8780, Universidad de los Andes, 2015.
- [75] B. Ramos y E. Sánchez, «Estimación de la pérdida de suelo utilizando el modelo USLE y herramientas SIG, en la microcuenca del río Puela, cantón Penipe», *Tesis, Universidad Nacional de Chimborazo*, 2023.
- [76] Yeleine Almoza Hernández *et al.*, «Rainfall energy characterization in Cuyaguaje basin erosion», *Cultivos Tropicales, Ministerio de Educación Superior de Cuba, Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas*, vol. 37, no.2, pp. 56-71, 2016. DOI: 10.13140/RG.2.1.3287.1925.
- [77] Sustainable Technologies Evaluation Program, «Soil Risk Assessment Tool Handbook V-2.0», 2015.
- [78] J. C. Tapia Aldas, «Modelización hidrológica de un área experimental en la cuenca del Río Guayas en la producción de caudales y sedimentos», *Magister Scientiae en Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas, Universidad Nacional de La Plata*, 2012. doi: 10.35537/10915/23364.
- [79] C. Reynel R. y J. León G., «Árboles y arbustos andinos para agroforestería y conservación de suelos.» *Ministerio de Agricultura de Lima, FAO*, 1990.

- [80] G. O. Acosta, «Familia BUDDLEJACEAE», *Flora del Bajío*, 2003., DOI: 10.21829/fb.198.2003.115.
- [81] O. Vargas Ríos, L. Pérez-Martínez, J. Insuasty, N. A. Rodríguez Castillo, y L. M. Melgarejo, *Semillas de plantas de páramo: ecología y métodos de germinación aplicados a la restauración ecológica*. 2014.
- [82] E. Ceccon, E. González, y C. Martorell, «Is Direct Seeding a Biologically Viable Strategy for Restoring Forest Ecosystems? Evidences from a Meta-analysis», *Land Degrad. Dev.*, vol. 27, ago. 2015, DOI: 10.1002/ldr.2421.
- [83] L. Pérez-Martínez y P. Velasco-Linares, *Viveros de Páramo para la Restauración Ecológica*. 2021.
- [84] D. R. Pérez, C. Ceballos, M. E. Oneto, D. R. Pérez, C. Ceballos, y M. E. Oneto, «Costos de plantación y siembra directa de *Prosopis flexuosa* var. *depressa* (Fabaceae) para restauración ecológica», *Acta Botánica Mex.*, n.º 129, 2022, doi: 10.21829/abm129.2022.1888.
- [85] S. Wunder y M. Albán, «Decentralized payments for environmental services: The cases of Pimampiro and PROFAFOR in Ecuador», *Ecol. Econ.*, vol. 65, n.º 4, pp. 685-698, may 2008, doi: 10.1016/j.ecolecon.2007.11.004.
- [86] E. Gray, S. Ozment, J. C. Altamirano, R. Feltran-Barbieri, y G. Morales, «Green-Gray Assessment: Cómo evaluar los costos y beneficios de la infraestructura verde en los sistemas de suministro de agua», jul. 2020, Accedido: 8 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://es.wri.org/publicaciones/green-gray-assessment-como-evaluar-los-costos-y-beneficios-de-la-infraestructura>
- [87] N. de O. Carvalho, «Hidrossedimentologia prática», *Editora Interciência*, 2008.
- [88] W. C. de Sousa Jr. y S. P. SMA - Secretaria de Estado do Meio Ambiente, “Análise econômica da relação entre uso do solo e custos de tratamento de água no estado de São Paulo”, 2011, Consultado: el 29 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.cetesb.sp.gov.br/items/6b38f065-5e99-40b3-9a77-f950b8c416ae017114_Analise-economica-2011.pdf

- [89] E. García, G. Suarez, M. Esquivel, A. Ruiz, D. Zuloaga, y O. Chevalier, «Bases generales para el desarrollo de estudios de reducción de riesgos hidrológicos en ciudades: Lecciones aprendidas de la iniciativa Ciudades Emergentes y Sostenibles ante el reto del cambio climático en Latinoamérica y el Caribe», *IDB Publ.*, dic. 2019, DOI: 10.18235/0002128.
- [90] D. Zhangallimbay y J. G. Castillo, «La Tasa Social de Descuento en la Evaluación de Proyectos de Inversión: Una Aplicación para el Ecuador», *CEPAL Rev.*, vol. 134, ago. 2021.
- [91] Banco Central del Ecuador, «Programación Macroeconómica Sector Real 2024-2025», *Dirección Nacional de Programación y Regulación Monetaria y Financiera*, Quito, abr. 2024.
- [92] G. L. Dumrauf, *Finanzas corporativas: un enfoque latinoamericano*, 3a Edición. Argentina: Alfaomega Grupo Editor, 2013.
- [93] FasterCapital, «Análisis de rentabilidad frente a análisis de coste beneficio: diferencias y cuándo usarlos», disponible en: <https://fastercapital.com/es/contenido/Analisis-de-rentabilidad-Analisis-de-rentabilidad--una-guia-completa.html>
- [94] A. Aguilera, «El costo-beneficio como herramienta de decisión en la inversión en actividades científicas», *Cofin Habana*, vol. 12, no. 2, pp. 322-343, *Universidad de la Habana*, La Habana, Cuba, 2017.
- [95] A. Araujo y F. Cabrera, «Propuesta de un Plan de Manejo Integral de la Subcuenca del río Casacay, ubicada en el cantón Pasaje y Chilla, provincia de El Oro - Ecuador, mediante la utilización de herramientas SIG», *Escuela Politécnica del Ejército*, 2005..
- [96] N. Ochoa, «Incidencia de la reforestación en la subcuenca del río Casacay en el incremento periódico de su caudal», *M.S. Tesis*, Universidad Técnica de Machala, Machala, Ecuador, 2016.
- [97] F. Rego, G. Louro y L. Constantino «The impact of changing wildfire regimes on wood availability from Portuguese forests», *Forest Policy and Economics*, vol- 29, pp. 56-61, 2013. v.pdf».

- [98] W. Nie, Y. Yuan, W. Kepner, M. S. Nash, M. Jackson, y C. Erickson, «Assessing impacts of Landuse and Landcover changes on hydrology for the upper San Pedro watershed», *J. Hydrol.*, vol. 407, n.º 1-4, pp. 105-114, sep. 2011, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.07.012.
- [99] Diario Correo «Pasaje, El Guabo y Machala sin agua potable por crecida del río Casacay», Accedido: 27 de mayo de 2024. [En Línea]. Disponible en: <https://diariocorreo.com.ec/94866/cantonal/pasaje-elguabo-y-machala-sin-agua-potable-por-crecida-del-riocasacay>
- [100] Comisión Europea, «Guía del análisis costes-beneficios de los proyectos de inversión», *Fondos Estructurales - FEDER, Fondo de Cohesión e ISPA*, 2003.
- [101] Gobierno Autónomo Descentralizado de Pasaje, «Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del cantón Pasaje, 2019-2023», 2019.
- [102] Gobierno Autónomo Descentralizado del cantón Pasaje, «Plan de Uso y Gestión del Suelo del cantón Pasaje, 2020 - 2032», 2020.
- [103] Gobierno Autónomo Descentralizado de la Parroquia Casacay, «Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Parroquia Casacay, 2019 - 2023», 2019.
- [104] K. A. Poiani *et al.*, «A scale-independent, site conservation planning framework in The Nature Conservancy», *Landsc. Urban Plan.*, vol. 43, n.º 1-3, pp. 143-156, dic. 1998, DOI: 10.1016/S0169-2046(97)00086-8.
- [105] S. Chen, S. Wu, y M. Ma, «Ecological restoration programs reduced forest fragmentation by stimulating forest expansion», *Ecol. Indic.*, vol. 154, p. 110855, oct. 2023, DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.110855.
- [106] J. Wallace, B. Clarkson y B. Farnworth, «Restoration Trajectories and Ecological Thresholds during Planted Urban Forest Successional Development», *Forests*, vol. 13, no. 199, DOI: 10.3390/f13020199, 2022.

- [107] M. Le Roy, J. Sawtschuk, F. Bioret, y S. Gallet, «Toward a social–ecological approach to ecological restoration: a look back at three decades of maritime clifftop restoration», *Restor. Ecol.*, vol. 27, n.º 1, pp. 228-238, ene. 2019, DOI: 10.1111/rec.12849.
- [108] O. Vargas, «Restauración ecológica: Biodiversidad y Conservación», *Acta biol. Colomb.*, vol. 16, no. 2, pp. 221-246, 2011.
- [109] G. Bentrup «Zonas de amortiguamiento para conservación: Lineamientos para diseño de zonas de amortiguamiento, corredores y vías verdes», *Informe Técnico Gral. SRS-109, Departamento de Agricultura, Servicio Forestal, Estación de Investigación Sur*, p. 128, 2008.
- [110] Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego de Perú, «Restauración ecológica», *CG Andina S.A.C., Depósito legal en la biblioteca nacional del Perú No. 2021-07365*, 2021.
- [111] C. Reynel y J. Marcelo «Árboles de los ecosistemas forestales andinos: Manual de identificación de especies», *Intercooperation Fundación Suiza para el Desarrollo y la Cooperación Internacional, Tarea Asociación Gráfica Educativa*, Hecho en el depósito legal No. 2010-06011 en la Biblioteca Nacional del Perú, 2010.
- [112] R. Quispe, «Proceso germinativo de Buddleja coriácea Remy en condiciones de vivero Jauja - Junín», *Tesis, Universidad Nacional del Centro del Perú*, Perú, 2022..
- [113] La Jardinería, «Venta de tierra negra (Papallacta)», disponible en: <https://jardines.ec/venta-plantas/tierra-negra-paramo/tierra-negra-papallacta>
- [114] La Jardinería, «Venta de tierra abonada (Papallacta)», disponible en: <https://jardines.ec/venta-plantas/tierra-negra-paramo/tierra-abonada-papallacta>
- [115] Piedra Tierra, «Venta de arena lavada de río», disponible en: <https://piedratierra.ec/materiales-sustratos/arena-lavada-de-rio/>
- [116] La Jardinería, «Venta de cascarilla», disponible en: <https://jardines.ec/venta-plantas/sustratos-siembra/cascarilla-arroz>

- [117] Ministerio de Trabajo de Ecuador «Acuerdo Ministerial No.-MDT-2023-175: Salario Básico del Trabajador para 2024», 2023.
- [118] Aguas Machala - EP «Remuneraciones mensuales de servidores públicos», 2020.
- [119] Ministerio del Ambiente de Ecuador, «Remuneración mensual por puesto de trabajo», 2016.
- [120] D. R. Pérez, C. Ceballos, y M. E. Oneto, «Costos de plantación y siembra directa de *Prosopis flexuosa* var. *depressa* (Fabaceae) para restauración ecológica», *Acta Bot. Mex.*, n.º 129, ene. 2022, DOI: 10.21829/abm129.2022.1888.
- [121] Ambacar, «Camioneta Great Wall Wingle 7 doble cabina | Ambacar Ecuador», disponible en: [Camioneta Great Wall Wingle 7 doble cabina | Ambacar Ecuador](#)
- [122] Petro-Ecuador, «Eco Plus 89: Preguntas Frecuentes – EP PETROECUADOR», disponible en: [Eco Plus 89 – Preguntas Frecuentes – EP PETROECUADOR](#)
- [123] Mitsubishi Motor, «Tabla de costos de mantenimiento L200-ACT», disponible en: <https://www.mitsubishi-motors.com.ec/wp-content/uploads/2022/03/Tabla-mantenimiento-L200-ACT.pdf>
- [124] Ministerio del Ambiente de Ecuador, «Proyecto Nacional de Reforestación con Fines de Conservación Ambiental, Protección de Cuencas Hidrográficas y Beneficios Alternos», CUP No. 40400000.0000.376201, 2014.
- [125] Prefectura de Imbabura, «Plan de Forestación y Reforestación de la Provincia de Imbabura», Consorcio de Gobiernos Autónomos Provinciales del Ecuador, 2014.
- [126] S. Elliott, D. Blakesley, y K. Hardwick, *Restauración de bosques tropicales: un manual práctico*, 1. ed. Kew: Kew Publ, 2013.
- [127] S. Vera, «Reporte técnico: Análisis de costos unitarios de componentes estructurales y componentes complementarios de construcciones en bambú - metodología APU, análisis de precio unitario», *COPADE, CEFOVE-FSC, INBAR*, Ecuador, 2021.

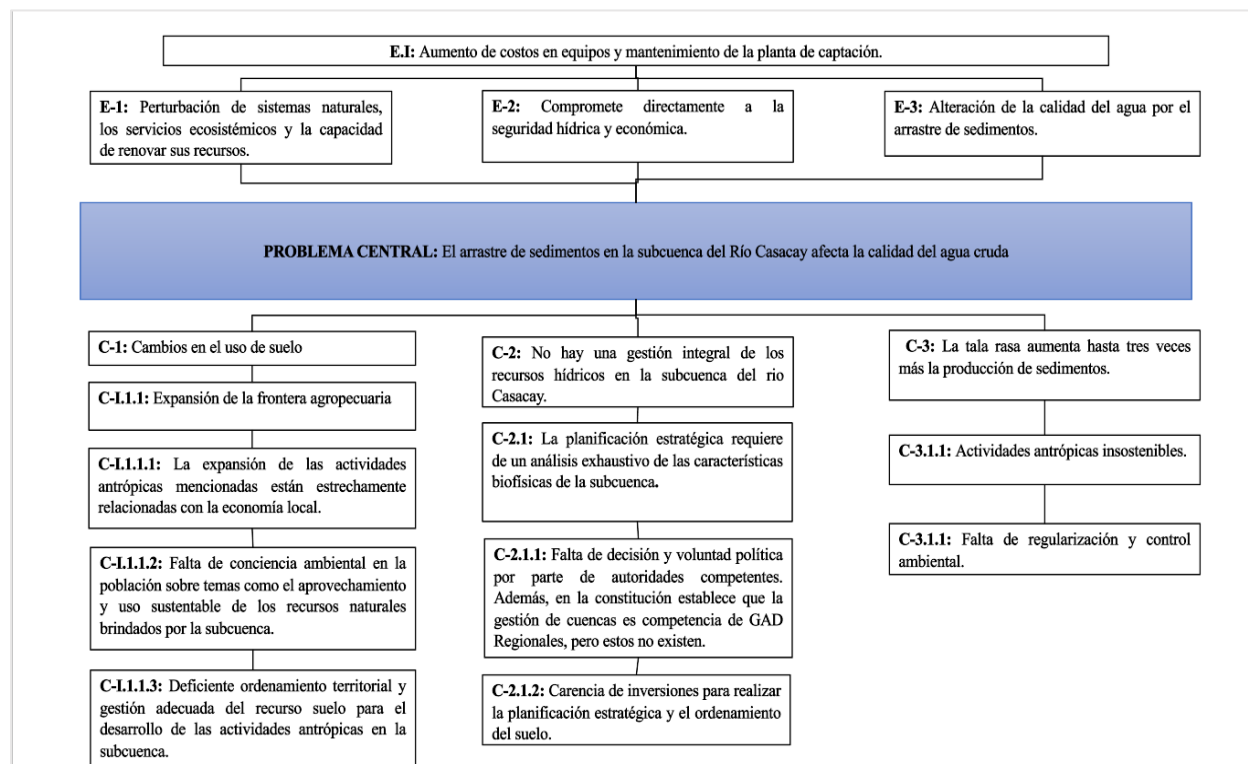
- [128] Disensa, «Ficha técnica de alambre de púas agrícola», disponible en: <https://disensa.com.ec/producto/alambre-de-puas-motto-rojo-rollo-de-500m-ideal-alambrec/>
- [129] Promart, «Alambre motto rojo de púas agrícola», En línea: [_https://www.promart.ec/alambre-de-puas-agricola-motto-500-metros/p?idsku=26047&gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw4MSzBhC8ARIsAPFOuyVY%E2%80%A6](https://www.promart.ec/alambre-de-puas-agricola-motto-500-metros/p?idsku=26047&gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw4MSzBhC8ARIsAPFOuyVY%E2%80%A6).
- [130] S. Ozment *et al.*, «Natural Infrastructure in Sao Paulo's water system», *World Resource Institute*, 2019.
- [131] R. Carrera *et al.*, «Buenas prácticas de ganadería sostenible en ecosistema de Páramo y Bosque Alto Andino, una alternativa de resiliencia al cambio climático», *Fave. Sección ciencias agrarias*, vol. 20, núm. 2, pp. 7–19, dic. 2021.
- [131] O. P. C. ., Sangoluisa Rodriguez, «Innovaciones en el sector ganadero: Compendio de experiencias en América Latina y el Caribe 2021», *Food & Agriculture Org.*, 2022.
- [131] R. León, F. Gutiérrez y N. Bonifaz, «Pastos y forrajes del Ecuador», *Universidad Politécnica Salesiana*, 2022.
- [134] R. Belduma, S. Barrezuela Unda, O. Vargas, y O. Sánchez-Romero, «Gestión y uso del suelo agropecuario en la zona de rural del cantón Chilla desde una visión socioeconómica», *Universidad y Sociedad* 12(1), 299-306, ene. 2020.
- [135] N. Requelme y N. Bonifaz, “Caracterización de sistemas de producción lechera de Ecuador”, *La Granja*, vol. 15, núm. 1, Art. núm. 1, jun. 2012, DOI: 10.17163/lgr.n15.2012.05.
- [136] J. V. Fierro, R. Pedraza, V. Rivera, R. Jara, y R. Guapi, “Análisis de unidades vacunas lecheras ecuatorianas”, *Ediciones Universidad de Camagüey.*, jun. 2017, Consultado: el 31 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://core.ac.uk/search?q=An%C3%A1lisis%20de%20unidades%20vacunas%20lecheras%20ecuatorianas>

- [137] P. Sepulveda Varas y F. Wittwer, «Período de transición Importancia en la salud y bienestar de vacas lecheras», 2017.
- [137] P. Meli, «Restauración ecológica de bosques tropicales: Veinte años de investigación académica», *Interciencia*, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, vol. 28, no. 10 2003.
- [139] Z. B. Llosa y J. Monge-Nájera, «Restauración ecológica en la Meseta Central de Costa Rica», *Biocenosis* vol. 23 (2), 2010.
- [140] D. M. Aguilar Garavito y W. A. Ramírez Hernández, Eds., «Monitoreo a procesos de restauración ecológica: aplicado a ecosistemas terrestres», Bogotá: *Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt*, 2015.
- [141] A. Acuña Ipinza, «Efectos de corto plazo de la restauración ecológica de bosques nativos en la provisión de los servicios ecosistémicos cantidad y calidad de agua en cuencas forestales», M.S. Tesis, *Universidad Austral de Chile*, 2012.
- [142] M. Castro-Romero, C. Valdés-López, y J. I. Barrera-Cataño, «Prioridades de restauración ecológica del suelo y sus servicios ecosistémicos asociados, degradados por uso agropecuario en la Microcuenca Santa Helena (SUESCA-CUNDINAMARCA)», *Caldasia*, vol. 36, n.º 1, pp. 37-52, jun. 2014, doi: 10.15446/caldasia.v36n1.43890.
- [143] C. Little y A. Lara, «Restauración ecológica para aumentar la provisión de agua como un servicio ecosistémico en cuencas forestales del centro-sur de Chile», *Bosque Valdivia*, vol. 31, n.º 3, pp. 175-178, 2010, DOI: 10.4067/S0717-92002010000300001.
- [144] J. González, V. Pambi, E. Uyaguari, y H. Zhiñin, «Estado actual de la restauración ecológica en la Región Sur del Ecuador», 2017.
- [145] J. Jaya-Santillán, «Altos niveles de erosión hídrica en una microcuenca tropical calculado mediante el modelo USLE», *FIGEMPA Investig. Desarro.*, vol. 15, n.º 1, pp. 26-39, ene. 2023, doi: 10.29166/revfig.v15i1.4269.

- [146] J. J. Jaramillo-Véliz, «Diagnóstico de la erosión hídrica del suelo aplicando modelo U.S.L.E mediante herramientas SIG Diagnosis of soil water erosion applying the U.S.L.E model using GIS tolos», vol. 6, n.º 4, 2021.
- [147] P. Arias-Muñoz, M. A. Saz, y S. Escolano, «Estimación de la erosión del suelo mediante el modelo RUSLE. Caso de estudio: cuenca media alta del río Mira en los Andes de Ecuador», *Investig. Geográficas*, n.º 79, p. 207, ene. 2023, doi: 10.14198/INGEO.22390.
- [148] P. Panagos *et al.*, «Understanding the cost of soil erosion: An assessment of the sediment removal costs from the reservoirs of the European Union», *J. Clean. Prod.*, vol. 434, p. 140183, ene. 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.140183.
- [149] J. I. Price y M. T. Heberling, «The Effects of Source Water Quality on Drinking Water Treatment Costs: A Review and Synthesis of Empirical Literature», *Ecol. Econ.*, vol. 151, pp. 195-209, sep. 2018, doi: 10.1016/j.ecolecon.2018.04.014.
- [150] D. Dearmont, B. A. McCarl, y D. A. Tolman, «Costs of water treatment due to diminished water quality: A case study in Texas», *Water Resour. Res.*, vol. 34, n.º 4, pp. 849-853, abr. 1998, doi: 10.1029/98WR00213.
- [151] R. I. McDonald, K. F. Weber, J. Padowski, T. Boucher, y D. Shemie, «Estimating watershed degradation over the last century and its impact on water-treatment costs for the world's large cities», *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 113, n.º 32, pp. 9117-9122, ago. 2016, doi: 10.1073/pnas.1605354113.
- [152] M. T. Heberling *et al.*, «Comparing drinking water treatment costs to source water protection costs using time series analysis», *Water Resour. Res.*, vol. 51, n.º 11, pp. 8741-8756, nov. 2015, doi: 10.1002/2014WR016422.
- [153] D. L. Forster y C. Murray, «Effects of Pesticide Use and Farming Practices on Water Treatment Costs in Maumee River Basin Communities», en *Economic Valuation of River Systems*, F. J. Hitzhusen, Ed., Edward Elgar Publishing, 2007. doi: 10.4337/9781847208705.00014.

ANEXOS

Anexo A. Árbol de Problemas



Anexo B. Preparación del sustrato: desglose anual

Año de inversión	Actividad / Suministro	Insumo	Cantidad total requerida (cm ³)	Cantidad	Costo Unitario (m ³ /USD)	Costo
				total requerida (m ³)		total (\$ USD)
1	Ensamblaje de componentes sustratos y almácigos	Tierra agrícola	266.304	0,27	17,78	4,73
		Tierra negra	210.240	0,21	13,33	2,80
		Arena	56.064	0,06	24,23	1,36
		Paja	56.064	0,06	100	5,61
			Total			14,50

Año de inversión	Actividad / Suministro	Insumo	Cantidad total requerida (cm ³)	Cantidad	Costo Unitario (m ³ /\$USD)	Costo
				total requerida (m ³)		total (\$ USD)
2	Ensamblaje de componentes sustratos y almácigos	Tierra agrícola	246.240	0,25	17,78	4,38
		Tierra negra	194.400	0,19	13,33	2,59
		Arena	51.840	0,05	24,23	1,26
		Paja	51.840	0,05	100	5,18
		Total				

Año de inversión	Actividad / Suministro	Insumo	Cantidad total requerida (cm ³)	Cantidad	Costo Unitario (m ³ /\$USD)	Costo
				total requerida (m ³)		total (\$ USD)
3	Ensamblaje de componentes sustratos y almácigos	Tierra agrícola	266.304	0,27	17,78	4,73
		Tierra negra	210.240	0,21	13,33	2,80
		Arena	56.064	0,06	24,23	1,36
		Paja	56.064	0,06	100	5,61
		Total				

Año de inversión	Actividad / Suministro	Insumo	Cantidad total requerida (cm ³)	Cantidad	Costo Unitario (m ³ /\$USD)	Costo
				total requerida (m ³)		total (\$ USD)
4	Ensamblaje de componentes sustratos y almácigos	Tierra agrícola	246.240	0,25	17,78	4,38
		Tierra negra	194.400	0,19	13,33	2,59
		Arena	51.840	0,05	24,23	1,26
		Paja	51.840	0,05	100	5,18
		Total				

Anexo C. Suministros: desglose anual

Restauración asistida	Actividades / Suministros	Cantidad de material	Costo Unitario (\$USD/ha)	Costo por hectáreas restauradas para siembra (\$USD)				Costo total 29.06 ha
				Año 1 11,624 ha	Año 2 8,718 ha	Año 3 8,718 ha		
Suministros	Hoyadora	2	45,87	1066.386	799,789	799,789	2.665,96	

Anexo D. Costos laborales: desglose anual

Restauración asistida	Actividades s / Suministros	N	SBU \$ USD	SBU total anual	Años trabajados									Costo Total \$ USD	
					1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Siembra en vivero	Costos laborales de siembra Costos laborales de trasplante	3	460,00	16.560,00	16.560	16.560	16.560	16.560	16.560	16.560	16.560	-	-	-	99.360
	Coordinador de proyecto	1	1.802,00	21.624,00	21.624	21.624	21.624	21.624	21.624	21.624	21.624	21.624	21.624	21.624	194.616
Administración	Asistente de coordinación	1	817,00	9.804,00	9.804	9.804	9.804	9.804	9.804	9.804	9.804	9.804	9.804	9.804	88.236
	Guardaparque	1	733,00	8.796,00	8.796	8.796	8.796	8.796	8.796	8.796	8.796	8.796	8.796	8.796	79.164
	Total				56.784	56.784	56.784	56.784	56.784	56.784	56.784	40.224	40.224	40.224	461.376,00

Anexo E. Cuidado en vivero: desglose anual

Restauración asistida	Actividades / Suministros	Año	Número total de plántulas sembradas	Costo Unitario	Costo Total
		1	41.992	0,34	14.277,28
		2	38.905	0,34	13.227,70
Cuidado en vivero	Control de malezas	3	37.051	0,34	12.597,34
		4	5.558	0,34	1.889,72
Total					41.992,04

Restauración asistida	Actividades / Suministros	Año	Número total de plantas maduras	Costo Unitario	Costo Total
		1	41.992	0,05	2.099,60
		2	38.905	0,05	1.945,25
Cuidado en vivero	Poda	3	37.051	0,05	1.852,55
		4	5.558	0,05	277,90
Total					6.175,30

Anexo F. Otros: desglose anual

Restauración asistida	Actividades s/ Suministros	Costo anual	Años trabajados								Total (\$ USD)	
			1	2	3	4	5	6	7	8		
Combustible administrativo	Combustible e Ecopaís	39,98	39,98	39,98	39,98	39,98	39,98	39,98	39,98	39,98	39,98	319,84
Combustible jornal	Combustible e Ecopaís	2.399,04	2.399,04	2.399,04	2.399,04	2.399,04	2.399,04	2.399,04	2.399,04	-	-	1.439,24
Total			2.439,02	2.439,02	2.439,02	2.439,02	2.439,02	2.439,02	2.439,02	39,98	39,98	14.714,08

Restauración asistida	Actividades / Suministros	Kilometraje	Costo por kilometraje	Costo anual (\$ USD)	Años de uso								Total \$ USD		
					1	2	3	4	5	6	7	8			
Otros	Mantenimiento camioneta administrativa	10 K	578	578	578	578	578	578	578	578	578	578	578	578	4.624,00
	Mantenimiento camioneta jornal	10 K	578	578	578	578	578	578	578	578	578	578	578	578	3.468,00
Total					1.156	1.156	1.156	1.156	1.156	1.156	1.156	578	578	8.092,00	

Anexo G. Actividades de protección – Cercado: desglose anual

Restauración asistida	Actividades / Suministros	Consideraciones	Años					Costo total (\$ USD)
			1	2	3	4	5	
		Cañas de 1 m	268,8	201,6	201,6			672,00
Actividades de protección	Cercado para zona de amortiguamiento	Rollos de 500 m de Alambre de púas (4 612 m en rollos equivale a 9.22 rollos)	328,4	246,3	246,3			821,00
Total			597,2	447,9	447,9			1493,00

Anexo H. Operación y Mantenimiento: desglose anual

Restauración asistida	Actividades / Suministros	Año	Número total de plántulas sembradas	Costo Unitario (\$ USD)	Costo Total (\$ USD)
		7	123.505	0,34	41.991,70
Cuidado en vivero	Control de malezas	8	123.505	0,34	41.991,70
		9	123.505	0,34	41.991,70
Total					125.975,10

Restauración asistida	Actividades / Suministros	Año	Número total de plántulas sembradas	Costo Unitario (\$ USD)	Costo Total (\$ USD)
		7	0	0,05	0
Cuidado en vivero	Poda	8	123505	0,05	6175,25
		9	0	0,05	0
Total					6175,25

Restauración asistida	Actividades/Suministros	Costo por año (\$ USD)			Costo Total (\$ USD)
		7	8	9	
Operación y mantenimiento	Reparación de cercado, considerando que el 15% de la longitud se deterioró	225,15	-	-	225,15
Total					225,15

Anexo J. Valoración de costos y beneficios

Plantas	Sembradas	41.992,00	80.896,00	117.947,00	123.505,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	Maduras	0,00	0,00	41.992,00	80.896,00	117.947,00	123.505,00	123.505,00	123.505,00	123.505,00	123.505,00	123.505,00	123.505,00	123.505,00	123.505,00	123.505,00	123.505,00	123.505,00	123.505,00	123.505,00	123.505,00	123.505,00
Eficiencia de retención de sedimentos (%)		0,10	0,20	0,31	0,59	0,86	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90

PROCEDIMIENTO		2023	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	Año 15	Año 16	Año 17	Año 18	Año 19	
PASO 1	SEDIMENTOS (TON/año)	261.540,00	235.386,00	209.232,00	181.508,19	107.361,74	36.746,89	26.154,00	26.154,00	26.154,00	26.154,00	26.154,00	26.154,00	26.154,00	26.154,00	26.154,00	26.154,00	26.154,00	26.154,00	26.154,00	26.154,00	26.154,00
PASO 2	SS (mg/l)	35.551,18	31.996,06	28.440,94	24.672,44	14.593,70	4.995,01	3.555,12	3.555,12	3.555,12	3.555,12	3.555,12	3.555,12	3.555,12	3.555,12	3.555,12	3.555,12	3.555,12	3.555,12	3.555,12	3.555,12	3.555,12
PASO 3	TURBIDEZ (NTU)	1.468,56	1.321,70	1.174,85	1.019,18	602,84	206,34	146,86	146,86	146,86	146,86	146,86	146,86	146,86	146,86	146,86	146,86	146,86	146,86	146,86	146,86	146,86

PASO 4: COSTOS DE TRATAMIENTO DEL AGUA

COSTOS PROYECTADOS: ESCENARIO ACTUAL																					
Componente	Subcomponente	Costos 2023	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	Año 15	Año 16	Año 17	Año 18	Año 19
Tratamiento del agua	Productos Químicos	64.468,00	66.724,38	69.059,73	71.476,82	73.978,51	76.567,76	79.247,63	82.021,30	84.892,04	87.863,27	90.938,48	94.121,33	97.415,57	100.825,12	104.354,00	108.006,39	111.786,61	115.699,14	119.748,61	123.939,81
	Mano de Obra	25.296,00	26.181,36	27.097,71	28.046,13	29.027,74	30.043,71	31.095,24	32.183,58	33.310,00	34.475,85	35.682,51	36.931,39	38.223,99	39.561,83	40.946,50	42.379,62	43.862,91	45.398,11	46.987,05	48.631,59
	Alquiler de maquinaria	22.500,00	23.287,50	24.102,56	24.946,15	25.819,27	26.722,94	27.658,24	28.626,28	29.628,20	30.665,19	31.738,47	32.849,32	33.999,04	35.189,01	36.420,63	37.695,35	39.014,69	40.380,20	41.793,51	43.256,28
	Línea de conducción	129.800,00	134.343,00	139.045,01	143.911,58	148.948,49	154.161,68	159.557,34	165.141,85	170.921,81	176.904,08	183.095,72	189.504,07	196.136,71	203.001,50	210.106,55	217.460,28	225.071,39	232.948,89	241.102,10	249.540,67
COSTOS PROYECTADOS: ESCENARIO FUTURO																					
Componente	Subcomponente	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	Año 15	Año 16	Año 17	Año 18	Año 19	
Tratamiento del agua	Productos Químicos	8.893,35	8.632,80	8.318,37	7.156,80	4.785,10	4.032,87	4.174,02	4.320,11	4.471,31	4.627,81	4.789,78	4.957,42	5.130,93	5.310,52	5.496,38	5.688,76	5.887,87	6.093,94	6.307,23	
	Mano de Obra	22.766,40	20.236,80	17.555,37	10.383,97	3.554,14	2.529,60	2.618,14	2.709,77	2.804,61	2.902,77	3.004,37	3.109,52	3.218,36	3.331,00	3.447,59	3.568,25	3.693,14	3.822,40	3.956,18	
	Alquiler de maquinaria	20.250,00	18.000,00	15.614,95	9.236,21	3.161,30	2.250,00	2.328,75	2.410,26	2.494,62	2.581,93	2.672,29	2.765,82	2.862,63	2.962,82	3.066,52	3.173,85	3.284,93	3.399,90	3.518,90	
	Línea de conducción	116.820,00	103.840,00	90.080,92	53.282,69	18.237,16	12.980,00	13.434,30	13.904,50	14.391,16	14.894,85	15.416,17	15.955,73	16.514,18	17.092,18	17.690,41	18.309,57	18.950,41	19.613,67	20.300,15	

COSTOS EVITADOS

BENEFICIOS																				
Componente	Subcomponente	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	Año 15	Año 16	Año 17	Año 18	Año 19
Tratamiento del agua	Productos Químicos	57.831,03	60.426,93	63.158,46	66.821,71	71.782,66	75.214,76	77.847,28	80.571,94	83.391,95	86.310,67	89.331,55	92.458,15	95.694,19	99.043,48	102.510,00	106.097,85	109.811,28	113.654,67	117.632,59
	Mano de Obra	3.414,96	6.860,91	10.490,76	18.643,78	26.489,57	28.565,64	29.565,44	30.600,23	31.671,24	32.779,73	33.927,02	35.114,47	36.343,47	37.615,50	38.932,04	40.294,66	41.704,97	43.164,65	44.675,41
	Alquiler de maquinaria	3.037,50	6.102,56	9.331,20	16.583,05	23.561,65	25.408,24	26.297,53	27.217,95	28.170,58	29.156,55	30.177,02	31.233,22	32.326,38	33.457,81	34.628,83	35.840,84	37.095,27	38.393,60	39.737,38
	Línea de conducción	17.523,00	35.205,01	53.830,66	95.665,80	135.924,52	146.577,34	151.707,55	157.017,31	162.512,92	168.200,87	174.087,90	180.180,98	186.487,31	193.014,37	199.769,87	206.761,82	213.998,48	221.488,43	229.240,52
TOTAL ANUAL		81.806,49	108.595,41	136.811,08	197.714,34	257.758,41	275.765,99	285.417,80	295.407,43	305.746,69	316.447,82	327.523,49	338.986,82	350.851,35	363.131,15	375.840,74	388.995,17	402.610,00	416.701,35	431.285,90

INFLACIÓN 1,035

0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
123.505,00	123.505,00	123.505,00	123.505,00	123.505,00	123.505,00	123.505,00	123.505,00	123.505,00	123.505,00	123.505,00
0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90

Año 20	Año 21	Año 22	Año 23	Año 24	Año 25	Año 26	Año 27	Año 28	Año 29	Año 30
26.154,00	26.154,00	26.154,00	26.154,00	26.154,00	26.154,00	26.154,00	26.154,00	26.154,00	26.154,00	26.154,00
3.555,12	3.555,12	3.555,12	3.555,12	3.555,12	3.555,12	3.555,12	3.555,12	3.555,12	3.555,12	3.555,12
146,86	146,86	146,86	146,86	146,86	146,86	146,86	146,86	146,86	146,86	146,86

											TOTAL
Año 20	Año 21	Año 22	Año 23	Año 24	Año 25	Año 26	Año 27	Año 28	Año 29	Año 30	
128.277,71	132.767,43	137.414,29	142.223,79	147.201,62	152.353,68	157.686,06	163.205,07	168.917,25	174.829,35	180.948,38	3.444.491,14
50.333,70	52.095,38	53.918,72	55.805,87	57.759,08	59.780,65	61.872,97	64.038,52	66.279,87	68.599,67	71.000,65	1.351.551,90
44.770,25	46.337,21	47.959,01	49.637,58	51.374,89	53.173,01	55.034,07	56.960,26	58.953,87	61.017,25	63.152,86	1.202.163,10
258.274,59	267.314,21	276.670,20	286.353,66	296.376,04	306.749,20	317.485,42	328.597,41	340.098,32	352.001,76	364.321,82	6.935.145,33
											TOTAL
Año 20	Año 21	Año 22	Año 23	Año 24	Año 25	Año 26	Año 27	Año 28	Año 29	Año 30	
6.527,98	6.756,46	6.992,94	7.237,69	7.491,01	7.753,19	8.024,56	8.305,42	8.596,10	8.896,97	9.208,36	194.866,04
4.094,65	4.237,96	4.386,29	4.539,81	4.698,70	4.863,16	5.033,37	5.209,54	5.391,87	5.580,59	5.775,91	173.024,23
3.642,06	3.769,53	3.901,47	4.038,02	4.179,35	4.325,63	4.477,02	4.633,72	4.795,90	4.963,76	5.137,49	153.899,64
21.010,65	21.746,03	22.507,14	23.294,89	24.110,21	24.954,07	25.827,46	26.731,42	27.667,02	28.635,37	29.637,60	887.829,90

											TOTAL
Año 20	Año 21	Año 22	Año 23	Año 24	Año 25	Año 26	Año 27	Año 28	Año 29	Año 30	
121.749,73	126.010,97	130.421,35	134.986,10	139.710,61	144.600,48	149.661,50	154.899,65	160.321,14	165.932,38	171.740,01	3.249.625,10
46.239,05	47.857,42	49.532,43	51.266,06	53.060,37	54.917,49	56.839,60	58.828,98	60.888,00	63.019,08	65.224,75	1.178.527,67
41.128,19	42.567,67	44.057,54	45.599,56	47.195,54	48.847,38	50.557,04	52.326,54	54.157,97	56.053,50	58.015,37	1048263
237.263,94	245.568,18	254.163,06	263.058,77	272.265,83	281.795,13	291.657,96	301.865,99	312.431,30	323.366,40	334.684,22	6.047.315,43
446.380,90	462.004,23	478.174,38	494.910,49	512.232,35	530.160,49	548.716,10	567.921,17	587.798,41	608.371,35	629.664,35	11.523.731,65

Anexo K. Flujo de Caja Económico

FLUJO DE CAJ

CONCEPTO	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Beneficios	0,00	81.806,49	108.595,41	136.811,08	197.714,34	257.758,41	275.765,99	285.417,80	295.407,43	305.746,69	316.447,82	327.523,49	338.986,82	350.851,35
Productos Químicos	0,00	57.831,03	60.426,93	63.158,46	66.821,71	71.782,66	75.214,76	77.847,28	80.571,94	83.391,95	86.310,67	89.331,55	92.458,15	95.694,19
Mano de Obra	0,00	3.414,96	6.860,91	10.490,76	18.643,78	26.489,57	28.565,64	29.565,44	30.600,23	31.671,24	32.779,73	33.927,02	35.114,47	36.343,47
Alquiler de maquinaria	0,00	3.037,50	6.102,56	9.331,20	16.583,05	23.561,65	25.408,24	26.297,53	27.217,95	28.170,58	29.156,55	30.177,02	31.233,22	32.326,38
Línea de conducción	0,00	17.523,00	35.205,01	53.830,66	95.665,80	135.924,52	146.577,34	151.707,55	157.017,31	162.512,92	168.200,87	174.087,90	180.180,98	186.487,31

Costos	241.990,38	101.156,28	114.200,33	127.766,29	116.923,69	115.740,18	118.165,20	97.001,79	106.670,05	103.448,04	0,00	0,00	0,00	0,00
Inversión	241.990,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Costos de Implementación	0,00	85.684,73	87.125,12	89.087,43	78.244,83	77.061,32	79.486,34	53.315,23	55.072,41	56.891,09	0,00	0,00	0,00	0,00
Costos de Operación	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	43.686,56	51.597,64	46.556,95	0,00	0,00	0,00	0,00
Costos de Oportunidad	0,00	15.471,54	27.075,20	38.678,86	38.678,86	38.678,86	38.678,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FLUJO NETO	-241.990,38	-19.349,79	-5.604,92	9.044,79	80.790,65	142.018,23	157.600,79	188.416,02	188.737,38	202.298,64	316.447,82	327.523,49	338.986,82	350.851,35
FLUJO NETO (VA)	0,00	0,00	0,00	6.437,90	51.343,92	80.584,96	79.845,47	85.229,84	76.227,86	72.950,92	101.887,73	94.155,18	87.009,47	80.406,08

FLUJO ACUMULADO	-19.349,79	-24.954,70	-15.909,92	64.880,73	206.898,96	364.499,76	552.915,77	741.653,15	943.951,79	1.260.399,61	1.587.923,11	1.926.909,92	2.277.761,28
FLUJO ACUMULADO (VA)	0,00	0,00	6.437,90	57.781,82	138.366,78	218.212,24	303.442,08	379.669,94	452.620,86	554.508,59	648.663,77	735.673,24	816.079,32

TASA DE DESCUENTO	12%
INVERSIÓN	241.990,38

INDICADORES FINANCIEROS	VAN	1.275.494,81765
	TIR	31%
	PAYBACK	5,29780
	B/C	5,27

A ECONÓMICO

14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
363.131,15	375.840,74	388.995,17	402.610,00	416.701,35	431.285,90	446.380,90	462.004,23	478.174,38	494.910,49	512.232,35	530.160,49	548.716,10	567.921,17	587.798,41	608.371,35	629.664,35
99.043,48	102.510,00	106.097,85	109.811,28	113.654,67	117.632,59	121.749,73	126.010,97	130.421,35	134.986,10	139.710,61	144.600,48	149.661,50	154.899,65	160.321,14	165.932,38	171.740,01
37.615,50	38.932,04	40.294,66	41.704,97	43.164,65	44.675,41	46.239,05	47.857,42	49.532,43	51.266,06	53.060,37	54.917,49	56.839,60	58.828,98	60.888,00	63.019,08	65.224,75
33.457,81	34.628,83	35.840,84	37.095,27	38.393,60	39.737,38	41.128,19	42.567,67	44.057,54	45.599,56	47.195,54	48.847,38	50.557,04	52.326,54	54.157,97	56.053,50	58.015,37
193.014,37	199.769,87	206.761,82	213.998,48	221.488,43	229.240,52	237.263,94	245.568,18	254.163,06	263.058,77	272.265,83	281.795,13	291.657,96	301.865,99	312.431,30	323.366,40	334.684,22

0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
363.131,15	375.840,74	388.995,17	402.610,00	416.701,35	431.285,90	446.380,90	462.004,23	478.174,38	494.910,49	512.232,35	530.160,49	548.716,10	567.921,17	587.798,41	608.371,35	629.664,35
74.303,83	68.664,70	63.453,54	58.637,87	54.187,67	50.075,22	46.274,86	42.762,93	39.517,53	36.518,43	33.746,94	31.185,79	28.819,01	26.631,86	24.610,69	22.742,91	21.016,89

2.640.892,43	3.016.733,17	3.405.728,34	3.808.338,34	4.225.039,69	4.656.325,59	5.102.706,49	5.564.710,73	6.042.885,11	6.537.795,59	7.050.027,95	7.580.188,43	8.128.904,54	8.696.825,70	9.284.624,11	9.892.995,46	10.522.659,81
890.383,14	959.047,84	1.022.501,38	1.081.139,25	1.135.326,92	1.185.402,14	1.231.677,00	1.274.439,93	1.313.957,47	1.350.475,90	1.384.222,84	1.415.408,64	1.444.227,65	1.470.859,51	1.495.470,20	1.518.213,11	1.539.230,00