



CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA

ESCUELA DE POSGRADO

**Valoración económica de la producción de agua y sedimentos en la parte alta de la
cuenca del río Yaque del Norte, República Dominicana**

**Tesis sometida a consideración de la División de Educación y el Programa de Posgrado
como requisito para optar al grado de**

MAGISTER SCIENTIAE

en Economía, Desarrollo y Cambio Climático

Brenda Figuerero Sosa

Turrialba – Costa Rica

2020

Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero de la estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

**MAGISTER SCIENTIAE EN ECONOMÍA, DESARROLLO
Y CAMBIO CLIMÁTICO**

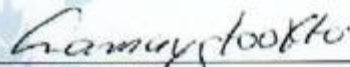
FIRMANTES:



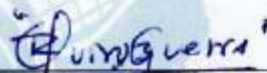
Róger Madrigal, Ph.D.
Director de tesis



Juan Robalino, Ph.D.
Miembro Comité Consejero



Ney Ríos, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



Roberto Quiroz Guerra, Ph.D.
Decano de la Escuela de Posgrado



Brenda Figuerero Sosá
Candidata

DEDICATORIA

A mis padres Brenda Sosa y Julio Figuereo y mi abuela Rosario Tatis por el apoyo incondicional y ser la inspiración para lograr mis metas.

Al Ing. Ramón Díaz e Ing. Francisco Cuevas por impulsarme y guiarme en el proceso de formación profesional y personal.

A mis parientes y amigos por brindarme una mano amiga en momentos difíciles, por las palabras de afecto y siempre confiar en mí. Especialmente Elizabeth Arias, Fransheska Figuereo, Emma Figuereo y Mariasela Reyes.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme cumplir esta meta, por siempre acompañarme y darme las fuerzas para salir adelante.

A mi amada familia, por tener fe en mí desde el principio y apoyarme a la distancia. Gracias por la motivación durante estos años de estudio y darme palabras de inspiración para mejorar cada día.

Al Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales por formar parte de mi experiencia laboral y apoyarme para desarrollar mis estudios de posgrado. Al Ministerio de Educación Superior, Ciencia y Tecnología (MESCYT) por la oportunidad de capacitación y al Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) por la formación profesional y personal.

A mi tutor Róger Madrigal y mis asesores Ney Ríos y Juan Robalino, por la colaboración, la paciencia y el gran aporte de conocimientos durante todo el proceso del trabajo de investigación

A Sol Teresa Paredes, Santa Rosario y el personal del proyecto PSA-CYN por el acompañamiento y apoyo técnico necesario durante el trabajo de campo y desarrollo de la investigación.

Al estimado Alfredo Mena por ser el principal partícipe en el proceso de cursar la maestría en CATIE. Por el soporte, atención y velar por el bienestar.

Al equipo técnico y profesional, amigos y compañeros del CATIE por hacer de esta una gran experiencia y hacerme sentir en familia.

CONTENIDO

Artículo 1. Valoración económica de la producción de agua y sedimentos en la parte alta de la cuenca del río Yaque del Norte, República Dominicana	1
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1 Revisión de literatura	5
2. METODOLOGÍA	7
2.1 Área de estudio	7
2.2 Proceso metodológico	8
2.2.1 Cuantificación del efecto del cambio de uso de suelo sobre la producción de agua y sedimentos	9
2.2.2 Análisis de propuestas de intervención	11
2.2.3 Análisis de costo de las intervenciones	12
2.2.4 Valoración económica de los beneficios de las intervenciones	13
2.2.5 Análisis costo beneficio de las intervenciones	14
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	15
3.1 Efecto del cambio de uso de suelo en la producción de agua y sedimentos	15
3.2 Costeo de las intervenciones propuestas poner luego de los resultados de los modelos	19
3.3 Valoración económica de los beneficios	20
3.4 Análisis costo beneficio de las intervenciones	21
3.4.1 Análisis de sensibilidad del VAN de las intervenciones	22
4. CONCLUSIONES	23
4.1 Limitaciones	24
5. RECOMENDACIONES	25
6. LITERATURA CITADA	26
7. ANEXOS	31

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Estudios de caso del retorno de la inversión en infraestructura verde	6
Cuadro 2. Insumos para modelación hidrológica en QSWAT	9
Cuadro 3. Escenarios de cobertura y uso de suelo 2020-2050	11
Cuadro 4. Escenarios de intervención	12
Cuadro 5. Promedio de producción de agua anual y sus componentes a partir de cambios en el uso de suelo en el periodo 2020-2050	17
Cuadro 6. Producción de sedimentos a partir de cambios en el uso de suelo	18
Cuadro 7. Costos de escenarios de intervención (2020-2050)	19
Cuadro 8. Valor económico de los beneficios derivados de las intervenciones proyectados al 2050	21
Cuadro 9. Análisis costo beneficio de las intervenciones propuestas proyectadas al 2050	22

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio	8
Figura 2. Proceso metodológico general	9
Figura 3. Proceso de modelación hidrológica con QSWAT	10
Figura 4. Caudal simulado vs. Observado en la estación Los Velazquitos, subcuenca 5.	16
Figura 5. Producción promedio de sedimentos (t/ha) en la parte alta de la CRYN	17
Figura 6. Cambios en la capacidad de almacenamiento en el embalse de la presa Tavera.	20
Figura 7. Cambios en la producción de sedimentos para cada escenario de intervención propuesta proyectada para el año 2050.	20

LISTA DE ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

CORAASAN	Corporación del Acueducto y Alcantarillado de Santiago
CRYN	Cuenca del río Yaque del Norte
EGEHID	Empresa de Generación Hidroeléctrica Dominicana
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
INDRHI	Instituto Nacional De Recursos Hidráulicos
MIMARENA	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
MMC	Millones de metros cúbicos
QGIS	Quantum GIS
ROI	Retorno de la inversión
PSA	Pagos por Servicios Ambientales
PSA-CYN	Programa de Pagos por Servicios Ambientales en la Cuenca del río Yaque del Norte
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
TNC	The Nature Conservancy
UNESCO	La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
URH	Unidades de respuestas hidrológicas
VAN	Valor Actual Neto

Artículo 1. Valoración económica de la producción de agua y sedimentos en la parte alta de la cuenca del río Yaque del Norte, República Dominicana

Brenda Figuerero Sosa

Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE)

Brenda.figueroe@catie.ac.cr

Resumen

Se analiza la viabilidad económica de las intervenciones de conservación de bosque y reforestación en la producción de agua y sedimentos, bajo el contexto del programa del Pagos por Servicios Ambientales en la parte alta de la cuenca del río Yaque del Norte (PSA-CYN). Se cuantifican los impactos biofísicos de las intervenciones por medio de modelación hidrológica con SWAT, así como también sus costos asociados. Se estiman los beneficios en términos monetarios de la reducción en la producción de sedimentos para la empresa hidroeléctrica EGEHID y la empresa de acueducto CORAASAN. Se determina la rentabilidad de cada intervención con el método de costo beneficio y se evalúa la sensibilidad de esta ante cambios en la tasa de descuento, horizonte temporal, costos de intervención y precio de dragado. Se determina que, bajo los supuestos de este estudio, el programa PSA-CYN puede ser una herramienta efectiva para reducir la producción de sedimentos en la parte alta de la CRYN, dando como resultado esperado la reducción en hasta 5.7% en la cantidad de sedimentos en un periodo de 30 años en una escala espacial que va desde 1,355.76 ha (1.7%) hasta 8,586.48 ha (11%) del área de la parte alta de la cuenca. El VAN de las intervenciones va desde US\$0.79 MM hasta US\$4.26 MM, siendo las intervenciones de conservación de bosque aquellas con las que se obtienen mayores beneficios netos, seguido de la intervención que combina conservación con reforestación. Las intervenciones que solo contemplan reforestación no resultan rentables en términos monetarios. Ante variaciones en los supuestos de escala temporal, tasa de descuento, costos de intervención y beneficios, el VAN de todas las intervenciones muestra mayor sensibilidad al precio del dragado (beneficios), seguido del horizonte temporal en las intervenciones combinadas. A medida que se reduce el precio de dragado, el VAN de las intervenciones disminuye. En el caso del horizonte temporal, el VAN disminuye a medida se reduce el periodo de análisis, llegando a afectar en mayor magnitud la rentabilidad de las intervenciones combinadas.

Palabras claves: Pagos por Servicios Ambientales, modelación hidrológica, producción de agua y sedimentos, conservación de bosque y reforestación, costos de intervención en cuencas hidrográficas, valoración económica, análisis costo beneficio, rentabilidad.

Abstract

The economic viability of forest conservation and reforestation interventions in the production of water and sediments is analyzed, under the context of the Payment for Environmental Services program in the upper basin of Yaque del Norte river (PSA-CYN). The biophysical impacts of the interventions are quantified by means of hydrological modeling with SWAT, as well as their associated costs. The benefits in monetary terms of the reduction in sediment production are estimated for the hydroelectric company EGEHID and the water services company CORAASAN. The profitability of each intervention is determined with the cost benefit method and its sensitivity to changes in the discount rate, time horizon, intervention costs and dredging price is evaluated. It is determined that, under the assumptions of this study, the PSA-CYN program can be an effective tool to reduce sediment production in the upper section of the CRYN, resulting in a reduction up to 5.7% in the amount of sediment in a 30-year period on a spatial scale ranging from 1.355,76 ha (1,7%) to 8.586,48 ha (11%). The NPV of the interventions ranges from US \$ 0,79 MM to US \$ 4,26 MM, with forest conservation interventions being those with which the greatest net benefits are obtained, followed by the intervention that combines conservation with reforestation. Interventions that only contemplate reforestation are not profitable in monetary terms. Faced with variations in the assumptions of timescale, discount rate, intervention costs and benefits, the NPV of all the interventions shows greater sensitivity to the price of dredging (benefits), followed by the time horizon in the combined interventions. As the price of dredging is reduced, the NPV of the interventions decreases. In the case of the time horizon, the NPV decreases as the analysis period is shortened, affecting the profitability of the combined interventions to a greater extent.

Keywords: Payments for Environmental Services, hydrological modeling, water and sediment production, forest conservation and reforestation, intervention costs in hydrographic basins, economic valuation, cost benefit analysis, profitability.

1. INTRODUCCIÓN

Las cuencas hidrográficas ofrecen una diversa gama de bienes y servicios ambientales que tienen un mercado como el agua potable, y otros que no tienen mercado, como la regulación del ciclo hidrológico. Hay un reconocimiento a nivel global de la degradación de las cuencas por el cambio de uso de suelo altera los procesos físicos, biológicos y químicos de los sistemas naturales; afecta el ciclo natural de la cuenca y contribuye a la reducción de la calidad de agua (Oliveira-Filho et al. 2012; Pérez-Ortega et al. 2016). La degradación de estos servicios representa pérdidas de activos de capital; aumento en los costos de tratamiento de agua potable, disminución en el rendimiento de cultivos agrícolas y pérdidas en el sector hidroeléctrico (Kroeger et al. 2017; Vogl 2017; CAF y TNC 2009; Werman 2009). A pesar de esto, existen vacíos a nivel de políticas y metodologías para la cuantificación de costos relacionados con el agua y el deterioro de las cuencas hidrográficas, así también de los beneficios derivados del manejo integrado de los recursos hídricos (Goldberg 2007).

A pesar de numerosos esfuerzos para proteger las cuencas hidrográficas o establecer proyectos de agua potable, algunos programas se ocupan solo de la conservación de áreas protegidas, que a menudo se crearon para proteger las fuentes de agua (Echavarría 2002). Como resultado, el nivel de inversión en la conservación de las fuentes de agua es minúsculo, teniendo en cuenta la necesidad de garantizar la capacidad de regeneración de los recursos. Las nuevas políticas y proyectos sobre el uso sostenible de los recursos a través de infraestructura verde y servicios ecosistémicos se combinan con instrumentos económicos para recompensar la protección y conservación, promover el conocimiento del funcionamiento del ecosistema y su importancia para el capital manufacturado, y mejorar los medios de vida de las comunidades. Un ejemplo de estos instrumentos es el Pago por Servicios Ambientales, a través del cual se reconoce que invertir en los servicios ambientales de las cuencas hidrográficas y vincular a los usuarios de los servicios con los propietarios de tierras donde se generan estos, como por ejemplo en la cuenca alta, puede ser una estrategia proactiva y flexible para asegurar la calidad de agua mientras se cumple el objetivo de conservación (Bennett et al. 2016), bajo el principio de que es más barato prevenir los problemas del agua en la fuente que enfrentarlos más adelante aguas abajo (TNC 2015).

A través de los programas de PSA se gestionan y se invierten recursos económicos en las cuencas hidrográficas por medio de intervenciones de conservación, restauración, prácticas de manejo sostenibles, entre otras (Echavarría 2012). Estas inversiones pueden generar un retorno económico y ambiental, evitando costos de operación y mantenimiento, prevenir interrupciones en el funcionamiento de sistemas de agua y prolongando el periodo de inversiones de capital (Echavarría et al. 2015). Algunos de estos programas han logrado el apoyo privado y filantrópico y un público significativo, basados en la premisa de que darán como resultado un retorno de inversión positivo (Bennett y Carroll 2014).

En las últimas décadas se ha dado el aumento considerable de programas de PSA con más de 550 programas activos en todo el mundo de los cuales el 70% (387) corresponden a PSA en cuencas hidrográficas (Salzman et al. 2018). En la República Dominicana, se ha estado

implementando desde hace más de una década el programa de Pagos por Servicios Ambientales en la cuenca del río Yaque del Norte (Echavarría et. al 2015), la cual tiene un aporte significativo en el desarrollo económico nacional (CEDAF 2013) por los importantes sistemas de presas para producción energética y suministro de agua para consumo humano, uso agrícola, ganadero, industrial, entre otros (Fondo Agua 2015). El objetivo del PSA-CYN es contribuir a la protección de los cuerpos de agua de la cuenca, promoviendo diversos cambios de uso del suelo y actividades de descontaminación, con el fin de aportar a la sostenibilidad del recurso hídrico en calidad y cantidad (Heindrichs 2003; Diaz 2010).

El alcance actual del PSA-CYN abarca la parte alta de la cuenca, correspondiente a la zona de escorrentía de la presa Tavera, la cual tiene importancia por su aporte al suministro de agua potable del acueducto del Cibao Central, aporte al sector hidroeléctrico y riego agrícola (CNE-EGEHID 2009). En la parte alta de la cuenca existen conflictos de uso de suelo en un 18.5% de su superficie y se presentan prácticas inadecuadas en la producción agrícola e industrial, afectando la disponibilidad y calidad del agua en la cuenca (Fondo Agua 2017; CEDAF 2013; Plan Yaque 2018). Un informe presentado por la CNE y EGEHID (2009) llamado *Estudio para determinar el costo de producción de la hidroelectricidad de la Empresa de Generación Hidroeléctrica Dominicana (EGEHID)*, señala que para el 1992 se registró una disminución de 20.7% en la capacidad de almacenamiento de la presa Tavera por sedimentación en el embalse, lo que podría significar altos costos de mantenimiento e interrupción en la generación de energía, riego y abastecimiento de agua potable.

La implementación del programa de PSA-CYN contribuye a la preservación y restauración de la masa forestal e implementación de prácticas agrícolas sostenibles, lo que podría garantizar la continuidad de los servicios ecosistémicos como la regulación de la producción de agua, control de la erosión, entre otros. Los principales beneficiarios de la implementación de este programa en la parte alta de la cuenca abarcan las partes interesadas que se benefician de la reducción en la producción de sedimentos y cambios positivos en la producción de agua; la Corporación de Acueducto y Alcantarillado de Santiago (CORAASAN), junta de regantes y la Empresa de Generación Hidroeléctrica Dominicana (EGEHID). La reducción de la sedimentación en el embalse Tavera y la regulación en la producción de agua, son servicios contemplados en el acuerdo de PSA-CYN con las empresas EGEHID y CORAASAN (Luciano O. 2010). Además, este tema se incluye dentro de sus retos en el Plan Estratégico de EGEHID para el período 2019-2026 como un reto para la hidroeléctrica.

Uno de los limitantes poco visibles en temas de inversión en el manejo de cuencas hidrográficas es la importancia de utilizar métodos científicos confiables para apuntar inversiones en actividades de conservación de suelo y agua para lograr maximizar los impactos positivos aguas abajo (Naeem et al. 2015; Rocha et al. 2012). Autores como Abell et al. (2017) y Madrigal y Alpízar (2008), señalan la importancia de la adecuada selección de prácticas, priorización de las áreas de intervención y un análisis de costos asociados para lograr impactos significativos en la cuenca. Que los programas muestren el potencial de las inversiones en las cuencas es un paso crítico para aprovechar fuentes de financiamiento y satisfacer el interés de

los inversionistas al tener estimaciones creíbles de retorno de la inversión (Bennett y Carroll, 2014).

Realizar estudios de valoración económica en cuencas hidrográficas requiere en primera instancia de conocimientos específicos sobre la relación entre los cambios en el estado de las cuencas y la cantidad y calidad de agua. La información disponible requiere mucha elaboración y depuración ya que no hay series de tiempo completas, la información de sedimentación de los embalses es escasa y no hay suficientes observaciones disponibles sobre el cambio de uso del suelo en las cuencas (CNE-EGEHID 2009). Adicional a esto, se carece de información de los efectos de los cambios en los servicios ecosistémicos sobre la producción y costo de provisión de agua en usuarios potenciales.

El objetivo de esta investigación es determinar la viabilidad económica de invertir en conservación y reforestación en la parte alta de la cuenca del río Yaque del Norte, por medio del análisis de costos y beneficios derivados de los cambios en la producción de agua y sedimentos producidos por cambios en el uso de suelo. Estudios globales realizados por Forest Trends demuestran que los proponentes de programas de protección hídrica están utilizando herramientas como el análisis costo beneficio para medir la efectividad de la inversión en cuencas (Bennett y Carroll, 2014; Sadoff et al. 2015).

1.1 Revisión de literatura

La cobertura boscosa en una cuenca hidrográfica cumple un papel fundamental en la regulación del ciclo hidrológico, estabilización y calidad del suelo (Acosta y Kucharsky 2012; Bueno et al. 2014). Cuando se producen cambios de uso de suelo, se esperan variaciones en la dinámica hídrica y cantidad de sedimentos debido a las modificaciones en la infiltración, evapotranspiración, escorrentía y erosión (Meng et al. 2018). Dentro de las consecuencias de estos cambios esta la alteración en la cantidad y calidad de agua, cantidad de nutrientes del suelo y producción de sedimentos (Kavian et al. 2018). Autores como Carvallo (2006) y expresan que las áreas con cobertura forestal tienden a disminuir la escorrentía superficial provocando una baja erosión del suelo, a diferencia de áreas con cultivos y potreros que tienen a aumentarla. Así también Llerena (2017) menciona que el bosque desempeña un papel importante por su influencia en el almacenamiento de agua en el subsuelo principalmente para época seca, permitiendo que esta se distribuya a lo largo del año gracias a la infiltración paulatina, percolación y otros procesos permitidos por las características intrínsecas del mismo.

Para la predicción de impactos de cambio de uso de suelo en la producción de agua y sedimentos en cuencas hidrográficas ha sido útil la aplicación de la herramienta de evaluación de suelos y agua SWAT (Neitsch 2005; Barrios y Urribarri 2010; Ulloa 2014). Esta herramienta se ha estado utilizando en estudios de análisis de impactos ante cambios en el clima y cobertura boscosa (Jodar-Abellan et al. 2018; TNC 2013; Silva 2004), estudios de valoración económica para conocer el impacto de las intervenciones en cuencas hidrográficas a través de programas de PSA y Fondos de Agua (Vogl et al. 2017; Kroeger et al. 2017; de Castro et al. 2016; Tallis & Markham 2012).

En la República Dominicana se ha utilizado SWAT para evaluar el impacto del clima y cambio de uso de suelo en las cuencas Yaque del Norte, Ozama, Haina y Nizao (TNC 2013). Los resultados indican que los escenarios de conservación e implementación de buenas prácticas de manejo son los que muestran un mayor rendimiento y flujo base de agua, además de menor producción de sedimentos. Estudios regionales han demostrado que la conversión de bosque en áreas agrícolas y ganaderas produce incrementos en la producción de sedimentos en las cuencas, sin embargo, no hay cuantificación de los efectos y magnitud de las actividades antrópicas (MEPyD 2018).

Un estudio reciente en la parte alta de la cuenca del río Yaque del Norte (Rodríguez 2019) indica que a pesar de utilizar escenarios contrastantes de cobertura y uso de suelo (85% de bosque y cambio total de bosque a pasto), la estimación de producción de agua muestra diferencias casi nulas en los promedios anuales, por lo que el autor recomienda el análisis de los componentes de la producción de agua por separado. Así también lo muestra el estudio realizado por Cuello (2003), donde el cambio en la cobertura no tiene un efecto significativo en la cantidad de agua que se produce. Para la parte alta de la CRYN se han reportado valores de producción de sedimentos aplicando la herramienta SWAT; 24t/ha (Rodríguez 2019) y con datos de batimetría del INDHRI; 30t/ha (CORAASAN-CDES 2014), 35.54 t/ha (de la Fuente, 2014), 36.54 t/ha (Ovalles 2011) y 36.60 t/ha (Jiménez et al. 2005).

En términos monetarios, los cambios en los usos de suelo en las cuencas a través de intervenciones con programas de Fondos de Agua y PSA, han demostrado que las intervenciones de conservación de bosque, reforestación y prácticas de uso sostenible del suelo resultan ser rentables mientras se cumple con el objetivo de promover servicios ecosistémicos. Resultados de estudios de caso sobre análisis de viabilidad financiera de las intervenciones en infraestructura verde a través de mecanismos de PSA y Fondos de agua, para promover servicios ecosistémicos de producción de agua y control de sedimentos en las cuencas hidrográficas, muestran resultados positivos de VAN. En el siguiente cuadro se muestran algunos de estos resultados.

Cuadro 1. Estudios de caso del retorno de la inversión en infraestructura verde

Caso/país	Beneficiarios	Periodo de análisis (años)	Inversión US\$ (millones)	Beneficios US\$ (millones)	VAN US\$ (millones)
Río Tana, Nairobi Kenia	Agricultores, acueducto e hidroeléctrica	30	10.0	21.1	5.9
Cuenca Cantareira, Sao Paulo, Brasil	Acueducto	30	38.0	106.0	4.6
Bogotá, Colombia	Acueducto	10	20.5	35.0	-

En el estudio de caso de la cuenca Tana en Nairobi, se estiman aumentos de hasta US\$ 3 millones en el rendimiento de los cultivos para los productores agrícolas, un ahorro de US\$ 40,000/año en costos en el uso de floculantes para tratamiento de agua para la empresa de acueducto, e ingresos adicionales para la hidroeléctrica de US\$ 600,000/año por aumento en la producción de agua y US\$ 30,000/año por disminución en interrupciones por reducción de la sedimentación. (Vogl et al. 2017). En Sao Paulo, Brasil, la reducción de carga de sedimentos en la cuenca Cantareira representa un ahorro aproximadamente de un 28% en los costos de tratamientos de agua y dragado (Ozment et al. 2018). En Bogotá, Colombia, se estiman aproximadamente ahorros de US\$ 458,000/año en costos de tratamiento en el área de suministro con los mayores costos actuales de tratamiento de agua (Tallis & Markham 2012).

Un análisis del retorno de la inversión en cuencas para el río Camboriú en Brasil, muestra que las reducciones en costos de tratamiento de agua por sedimentos y las pérdidas de agua compensa el 80% de la inversión de EMASA en el proyecto de conservación de cuencas y el 60% de los costos totales del proyecto en un horizonte temporal de 30 años. Se estiman beneficios de US\$ 27,800/año por ahorro en el uso de químicos para tratamiento de agua, ahorro de dragado de US\$1,050/año, US\$ 147,000/año por pérdida de agua evitada en temporada alta, entre otros. (Kroeger et al. 2017).

En la República Dominicana, a pesar de que se ha evaluado el impacto de las intervenciones en cuencas hidrográficas, no se cuenta con información detallada de los costos directos e indirectos derivados del deterioro de las cuencas, así como de los múltiples beneficios derivados las intervenciones de reforestación, conservación de bosque, prácticas de uso de suelo sostenibles y otras actividades de manejo.

2. METODOLOGÍA

2.1 Área de estudio

La parte alta de la cuenca del río Yaque del Norte está ubicada en la pendiente norte de la cordillera Central. Abarca una superficie de aproximadamente 898.3 km² (89,830 ha) equivalente al 13% de la cuenca del río Yaque del Norte. Se encuentra en las coordenadas 18°55' hasta 19 17' Latitud Norte, y 70 31' a 70 50' Longitud Oeste abarcando 15 microcuencas distribuidas entre las comunidades Manabao, Taveras, Jarabacoa y Jimenoa; provincias La Vega y Santiago de los Caballeros, República Dominicana. El 70% de la superficie total de la cuenca alta está ubicado dentro de los límites geográficos del municipio de Jarabacoa. La precipitación media anual es de 1,500 mm/año, con una temperatura promedio de 21°C y un 80% de humedad relativa. Tiene una altitud que va desde los 400 msnm hasta los 1,600 msnm, entre la presa Tavera y el Parque Nacional Armando Bermúdez. (Díaz, 2010).



Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio

En la delimitación del área de estudio, correspondiente al área de escurrimiento de la presa Tavera, los usuarios potenciales del agua de este embalse son la empresa de agua potable CORAASAN, la junta de regantes y la empresa hidroeléctrica EGEHID (Díaz 2010). Por medio de la toma de agua en el completo de Tavera-Bao, CORAASAN garantiza el abastecimiento de agua potable del 85% del consumo de las ciudades de Santiago, Moca, Jánicó, Sabana Iglesia y otros poblados pequeños cercanos. El suministro de agua potable es la actividad primordial de los usos de agua de la presa Tavera. Por otra parte, la planta de Tavera de la empresa hidroeléctrica EGEHID, aporta al sistema eléctrico un promedio anual de 191.50 GWh/año (CNE-EGEHID 2009).

2.2 Proceso metodológico

La metodología propuesta para determinar la viabilidad económica de invertir en conservación y reforestación en la parte alta de la cuenca del río Yaque del Norte, se resume en la figura 2.

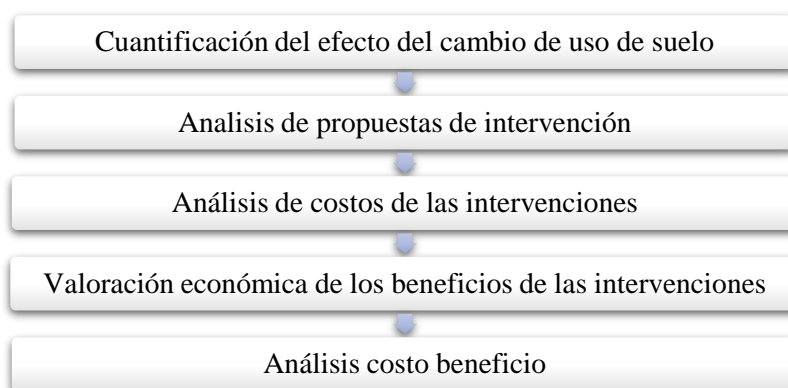


Figura 2. Proceso metodológico general

2.2.1 Cuantificación del efecto del cambio de uso de suelo sobre la producción de agua y sedimentos

Se utiliza la herramienta de evaluación de suelos y agua SWAT 2012 (Arnold et al. 1998; Gassman et al. 2007) en la interfaz de Qgis, para estimar los cambios en la producción de agua y sedimentos bajo diferentes escenarios de cobertura y uso de suelo. Siendo la producción de agua la sumatoria del agua que fluye sobre las laderas hasta llegar al cauce (escorrentía superficial), del agua que fluye subsuperficial mente hasta alimentar canales de drenaje (flujo lateral) y del agua que se infiltra y alimenta al flujo base en temporada de estiaje (flujo de retorno) (Ordoñez 2011; Méndez- Morales 2016; Uribe 2010; Rodríguez 2016; OMM 2012). La producción de sedimentos se refiere a la pérdida/erosión del suelo transportados por los cuerpos de agua/ríos(t/año) (Mintegui y López 1990).

Los insumos recopilados para la construcción del modelo son de tipo espacial y climático, correspondientes a la parte alta de la CRYN, con los cuales se crea la base de datos a importar en el proyecto de QSWAT.

Cuadro 2. Insumos para modelación hidrológica en QSWAT

Insumo	Detalle	Fuente
DEM	Modelo de Elevación Digital. Formato raster. Tamaño de celda de 30m	DIARENA. Ministerio Medio Ambiente y Recursos Naturales
Datos climáticos	Datos diarios de precipitación, temperatura máxima y mínima periodo 1970 a 2018	ONAMET. Estaciones meteorológicas Jarabacoa y Constanza
Red hídrica	Formato shapefile	DIARENA. Ministerio Medio Ambiente y Recursos Naturales
Mapa uso de suelo 2018	Mapa de cobertura y uso de suelo en formato ráster. Tamaño de celda de 30m	DIARENA. Ministerio Medio Ambiente y Recursos Naturales
Mapa tipo de suelo 1976	Mapa tipo de suelo de la FAO en formato ráster. Tamaño de celda de 30m	DIARENA. Ministerio Medio Ambiente y Recursos Naturales
Información de suelo	Información físicoquímica del suelo según la clasificación taxonómica de la FAO	DIARENA. Ministerio Medio Ambiente y Recursos Naturales

Datos de caudal	Caudal promedio mensual para el periodo de 1981 a 1993	INDHRI. Estación Los Velazquitos, Presa Tavera.
-----------------	--	---

La construcción del modelo hidrológico con QSWAT consiste en las siguientes etapas (Dile et. al 2015).



Figura 3. Proceso de modelación hidrológica con QSWAT

Para la simulación de la línea base, el delineador automático de QSWAT subdivide espacialmente la parte alta de la CRYN en 5 subcuencas y 344 Unidades de respuesta hidrológica (URHs). Define un área de estudio de 783.62 km², aproximadamente un 13% inferior al área total de la parte alta de la CRYN; 898.3 km², omitiendo parte del área de influencia del río Bao. Se utilizan 3 años de calentamiento para la simulación y un tiempo de salida mensual. Se generan las tablas de salida por subcuenca, corriente y URH (sub, rch y hru). Para esta investigación se utilizan salidas de promedios anuales para las variables flujo de salida (FLOW_OUTcms), producción de agua (WYLDmm), escorrentía superficial (SURQmm), flujo lateral (LAT_Qmm), flujo de retorno (GW_Qmm), producción de sedimentos (SYLDt_ha) y salida de sedimentos (SED_OUTtons).

Para el ajuste del modelo, se comparan los resultados de flujo de salida (FLOW_OUTcms) con la información de caudal del 1981 al 1993 de la estación de aforo Los Velazquitos, ubicada en la cuenca de salida. Con esta comparación se estima el promedio de extracción de agua por mes, la cual se introduce en el modelo por medio de la modificación de datos de entrada de usos de agua.

Los escenarios de cobertura y uso de suelo que se modelan en este estudio toman como referencia las tasas de deforestación y reforestación en la República Dominicana, así también las actividades de intervención que realiza el programa PSA-CYN en la parte alta de la CRYN, dentro de las cuales está la conservación de bosque y reforestación. En total se evalúan siete escenarios de cobertura y uso de suelo para un periodo de 30 años a partir del 2020. Para su definición se considera un análisis de sensibilidad, utilizando tasas de deforestación mayor y menor que la tasa histórica. Así también, se evalúa por separado el potencial tanto de la conservación de bosque como de la reforestación. Los cambios de uso de suelo se basan en la tendencia dominante de cambio de uso en la parte alta de la CRYN, estos son de bosque a pasto para los escenarios de pérdida de bosque y reforestación (de pasto a plantación) para los escenarios de reforestación. Los siete escenarios de cobertura y uso de suelo se agrupan en tres bloques:

- Pérdida de bosque: analiza la pérdida de bosque utilizando la tasa de deforestación anual histórica de 0.1% (Ovalles 2011), una tasa intermedia de 0.3% y una tasa alta de

0.5%, la cual es la mayor tasa que se ha reportado para el país (FRA 2005). El cambio de uso de suelo es de bosque a pasto.

- Reforestación: evalúa el efecto de la reforestación, utilizando la tasa de reforestación anual histórica de 0.14% (Ovalles 2011) y se mantiene nula la pérdida de bosque. El cambio de uso es de pasto a plantación forestal con Pino criollo (*Pinus occidentalis*), Pino hondureño (*Pinus caribaea*) y especies latifoliadas como Caoba criolla (*Swietenia mahagoni*), Caoba hondureña (*Swietenia macrophylla*), Mara (*Calophyllum calaba*), cedro (*Cedrella odorata*), entre otras especies. Las especies van de acuerdo con la clasificación de uso de SWAT (Neitsch 2002) y algunas de las especies aptas para la zona.
- Reforestación y pérdida de bosque: en este se combinan los escenarios de pérdida de bosque con el escenario de reforestación.

Cuadro 3. Escenarios de cobertura y uso de suelo 2020-2050

Bloque	Escenario	Tasa de deforestación anual %	Cambios acumulados al 2050 %	Tasa de reforestación anual %	Cambios Acumulados al 2050 %	Cambio neto cobertura%
1. Pérdida de bosque	1.1	0.1	3	-	-	-3
	1.2	0.3	9	-	-	-9
	1.3	0.5	15	-	-	-15
2. Reforestación sin pérdida de bosque	2.1	-	-	0.14	4	4
3. Reforestación con pérdida de bosque	3.1	0.1	3	0.14	4	1
	3.2	0.3	9	0.14	4	-5
	3.3	0.5	15	0.14	4	-11

* Cambios acumulados se calculan de la siguiente manera

**En la columna de cambio neto (%), los números negativos corresponden a pérdida de bosque y los positivos a aumentos de cobertura por reforestación.

Para la modelación de los diferentes escenarios de uso de suelo se modifican manualmente los porcentajes en las categorías de uso de suelo, en la opción de *fragmentar usos de suelo* al momento de crear las URH (Dile et. al 2015). Los usos de suelo que se modifican son bosque (latifoliado, conífera y seco) y pasto, según cada cambio propuesto en los escenarios.

2.2.2 Análisis de propuestas de intervención

Se proponen intervenciones en la parte alta de la CRYN, tomando como referencia los resultados de la modelación hidrológica con SWAT y dos de las actividades del programa PSA-CYN; reforestación y conservación de bosque. Las intervenciones tienen enfoque en cambios de cobertura y uso del suelo, en estas no se incluyen prácticas propias de las intervenciones como prácticas de establecimiento y manejo. Según el mapa de uso de suelo 2018, el uso de suelo predominante en la parte alta de la CRYN es el uso de bosque con 45,192 ha (57%),

conformado por bosque latifoliado, bosque de coníferas y bosque seco. Seguido el uso de suelo pasto con 15,825 ha (21%). Se propone realizar las intervenciones de reforestación en áreas con uso de suelo de pasto y conservación en áreas con tendencia a cambio de uso de bosque a pasto. Estas intervenciones se plantean para los 30 años del periodo de estudio y los detalles se muestran en el siguiente cuadro:

Cuadro 4. Escenarios de intervención

Escenario	Descripción del escenario de intervención	Conservación al 2050 (ha)	Reforestación al 2050 (ha)
C1	Conservación del 3% de bosque	1,355.76	-
C2	Conservación del 9% de bosque	4,067.28	-
C3	Conservación del 15% de bosque	6,778.8	-
R1	Reforestación del 4% Pérdida del 3% de bosque	-	1,807.68
R2	Reforestación del 4% Pérdida del 9% de bosque	-	1,807.68
R3	Reforestación del 4% Pérdida del 15% de bosque	-	1,807.68
CR1	Reforestación del 4% Conservación del 3% de bosque	1,355.76	1,807.68
CR2	Reforestación del 4% Conservación del 9% de bosque	4,067.28	1,807.68
CR3	Reforestación del 4% Conservación del 15% de bosque	6,778.8	1,807.68

2.2.3 Análisis de costo de las intervenciones

Los costos de cada intervención propuesta en la investigación para promover la producción de agua y reducir la producción de sedimentos, están determinados según el tipo de intervención. La estimación de dichos costos se hará bajo el supuesto de que las intervenciones serán financiadas bajo el contexto del programa de Pagos por Servicios Ambientales en la CRYN. Este supuesto podría estar subestimando los costos privados de las intervenciones planteadas (e.g. la reforestación podría costar más que el monto entregado por el programa de PSA para este fin, así como también el monto de conservación de bosque actual del programa podría estar subestimado el costo de oportunidad). No obstante, el interés principal es determinar si la inversión actual y potencial de este programa rinde un beneficio neto positivo. En más detalle, la estimación de los costos de las intervenciones incluye:

- Para las intervenciones de conservación de bosque (C1, C2 y C3), los costos se derivan de los pagos actuales por conservación que realiza el programa PSA-CYN (US\$50/ha) para evitar la pérdida de bosque anual según la tasa de deforestación de cada escenario. El costo anual total de conservación va de acuerdo con la incorporación gradual anual de las hectáreas conservadas durante el periodo de 30 años. La incorporación anual de hectáreas conservadas para C1 es de 45.19 ha, para C2 es de 135.58 ha y para C3 de

225.96 ha. Esto bajo el supuesto de que hay cumplimiento y renovación de todos los contratos de conservación.

- Para las intervenciones de reforestación (R1, R2 y R3), se consideran los costos de establecer la plantación (USD\$ 800/ha) durante los primeros diez años del análisis para contabilizar los beneficios derivados de estas dentro del periodo de análisis.
- Para los escenarios de conservación de bosque y reforestación (CR1, CR2 y CR3), los costos se derivan de los pagos actuales por conservación que realiza el programa PSA-CYN (US\$50/ha) para evitar la deforestación anual según cada tasa de deforestación. El costo anual total va de acuerdo con el aumento gradual anual de las hectáreas conservadas para cada escenario durante el periodo de 30 años. Adicional a esto, se añaden los costos de reforestación (USD\$ 800/ha) durante los primeros diez años del análisis.

El total de costos estimados para cada intervención se actualiza a su valor actual neto utilizando la tasa de descuento del 11.04% (Banco Central 2020).

2.2.4 Valoración económica de los beneficios de las intervenciones

El proceso de valoración consiste en la estimación y monetización de los beneficios derivados de los cambios en la producción de agua y sedimentos para cada intervención propuesta en esta investigación. Se considera que los cambios en la producción de agua y sedimentos afectan la función de producción y/o alteran la estructura de costos de las empresas EGEHID y CORAASAN, ya que la producción de agua influye en la generación de energía y producción de agua potable y la cantidad de sedimentos influyen en la frecuencia y costos de actividades de mantenimiento, costos de tratamiento de agua potable, interrupciones de generación eléctrica, vida útil del embalse de la presa Tavera y actividades de dragado.

Debido a la información disponible, solo se estiman los beneficios derivados de la reducción en la producción de sedimentos, traducido en ahorro de costos de remoción de sedimentos en el embalse Tavera a través de dragado, suponiendo que los costos son asumidos por ambas empresas. Para la estimación de estos beneficios, se hace comparación a partir de la línea base de cuanto es el aporte en reducción de sedimentos en cada intervención propuesta. Se hace revisión de datos históricos de batimetría del embalse en la Presa Tavera de los años 1979, 1981 y 1993, además de la tasa de sedimentación estimada a partir de estos, para comparar con los resultados de la modelación. Para la estimación de beneficios, se asume que las hectáreas intervenidas, sin considerar la ubicación espacial dentro de la cuenca, reducen en igual proporción la cantidad de sedimentos, ya que no se realiza priorización de áreas de intervención; la distribución de las intervenciones se hace de forma aleatoria con QSWAT.

Para la monetización de los beneficios se aplica la metodología de costos evitados. Con este método es posible cuantificar la disposición que se tiene para incurrir en costos con el fin de

evitar daños causados por degradación del medio ambiente, lo que podría ocasionar la pérdida de un servicio ambiental (Cristeche & Penna, 2008). Las actividades de remoción de sedimentos a través de dragado tienen un costo aproximado de US\$13/m³ (Morillo 2020). Como el costo total de dragado depende de la cantidad de metros cúbicos de sedimentos a remover, se estima en términos monetarios cuánto es el ahorro en costos a partir de la reducción de sedimentos en cada intervención propuesta.

El flujo de beneficios estimados depende de cada tipo de intervención. Para las intervenciones de conservación de bosque, los beneficios se estiman para el mismo año que se invierte en esta y va de acuerdo con el aumento gradual anual de hectáreas conservadas. En las intervenciones de reforestación, los beneficios se estiman a partir del año 11 de cada hectárea reforestada, esto considerando que después de diez años, las reforestaciones ya podrían generar un impacto considerable en la cuenca (Llerena et. al 2007) y se les restan los beneficios que se dejan de recibir debido a la pérdida de bosque. Para las intervenciones que combinan conservación de bosque y reforestación, los beneficios por conservación se estiman para el mismo año que se invierte en esta y va de acuerdo con el aumento gradual anual de hectáreas conservadas y a partir del año 11 del análisis, se adicionan los beneficios derivados de la reforestación. El total de beneficios estimados para cada intervención se actualiza a su valor actual neto (VAN), representando el presente valor de los flujos de efectivo futuros (Assaf Neto 2010), utilizando la tasa de descuento del 11.04%, según el Banco Central de la República Dominicana para junio del 2020.

2.2.5 Análisis costo beneficio de las intervenciones

Se hace un análisis costo beneficio desde la perspectiva privada. A partir del flujo de costos y beneficios se calcula el valor actual neto VAN de las intervenciones propuestas. El VAN es la sumatoria de todos los montos descontados para cada año utilizando una tasa de descuento. Los costos del flujo de caja se definen según las inversiones en conservación y/o reforestación para cada una de las intervenciones, mientras que los beneficios están definidos los costos evitados (ahorro en costos de dragado) derivado de cada una de estas.

Para el análisis de costo beneficio se consideran los siguientes supuestos:

- El horizonte temporal del análisis financiero es de 30 años
- Se utiliza una tasa de descuento anual del 11.04%
- El costo por hectárea de reforestación es de US\$ 800
- El costo por conservación de bosque es de US\$ 50/ha
- El beneficio derivado por ahorro en costos de dragados es de US\$ 13/m³ y ese se estima anualmente
- La inversión en reforestación se realiza los primeros diez años para obtener beneficios dentro del periodo de análisis y la inversión en conservación de bosque se realiza anualmente durante los 30 años
- Los beneficios de la reforestación se estiman a partir del año 11 de cada hectárea reforestada

- Los beneficios de conservación se estiman el mismo año que se invierte en esta y dependen de la incorporación anual de hectáreas conservadas
- Los demás cambios de uso de suelos no considerados en la modelación se mantienen constantes
- Las empresas realizan las inversiones en la cuenca a través de través del programa PSA-CYN
- Los costos de mantenimiento de las reforestaciones no son asumidos por el programa PSA-CYN

Para probar la sensibilidad del VAN, se varían los parámetros asociados a los supuestos planteados en los que se podría tener mayor incertidumbre sobre la rentabilidad de las intervenciones. Se calcula el VAN con cambios en el horizonte temporal, tasa de descuento, costo por hectárea de reforestación, monto por hectárea de conservación de bosque y precio y frecuencia de dragado.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Efecto del cambio de uso de suelo en la producción de agua y sedimentos

La simulación inicial señala que la precipitación media para el periodo de estudio es de 1,559.3 mm/año (anexo 1), similar a valores observados en la parte alta de la CRYN, correspondiente a 1,500 mm/año (Díaz, 2010). El valor promedio anual de la producción de agua estimada es de 1,408.72 mm, correspondiente al 90% del promedio anual de la precipitación. De la producción de agua, la escorrentía superficial representa el 35% de la precipitación ocurrida, el flujo lateral un 8% y el flujo de retorno un 47%, siendo este último el componente que más aporta a la producción de agua. Según Carvallo (2006) y Gopal (2015), para considerar un escenario apto o conveniente, debe generarse la mayor cantidad de agua con una menor proporción de escurrimiento superficial y mayor flujo base, el cual proviene del flujo de retorno, con el objetivo de que sea mínima la erosión. En el anexo 2 se muestra el comportamiento de estos componentes.

El ajuste del modelo utilizando las diferencias entre el caudal simulado ($39.23 \text{ m}^3/\text{s}$) y el caudal observado ($25.02 \text{ m}^3/\text{s}$) (figura 4) como un estimado de las extracciones de agua, da como resultado un caudal ajustado de $31.09 \text{ m}^3/\text{s}$ similar al caudal reportado que aporta el río Yaque del Norte a la presa Tavera, correspondiente a $31.73 \text{ m}^3/\text{s}$ (CNE-EGEHID 2009). El caudal ajustado muestra una sobreestimación del 25% (figura 4), indicando un R^2 de 0.90. Esta sobreestimación es inferior a la inicial correspondiente al 57%. Esto puede explicarse porque inicialmente el modelo no considera las extracciones de agua, lo que supone que hay una disminución del total del agua producida previo a la llegada al cauce principal (Cabrera 2012). Una reducción en la sobreestimación indica que las salidas de la modelación hidrológica con QSWAT representan con mayor precisión la realidad de la producción de agua y sedimentos en la parte alta de la CRYN.

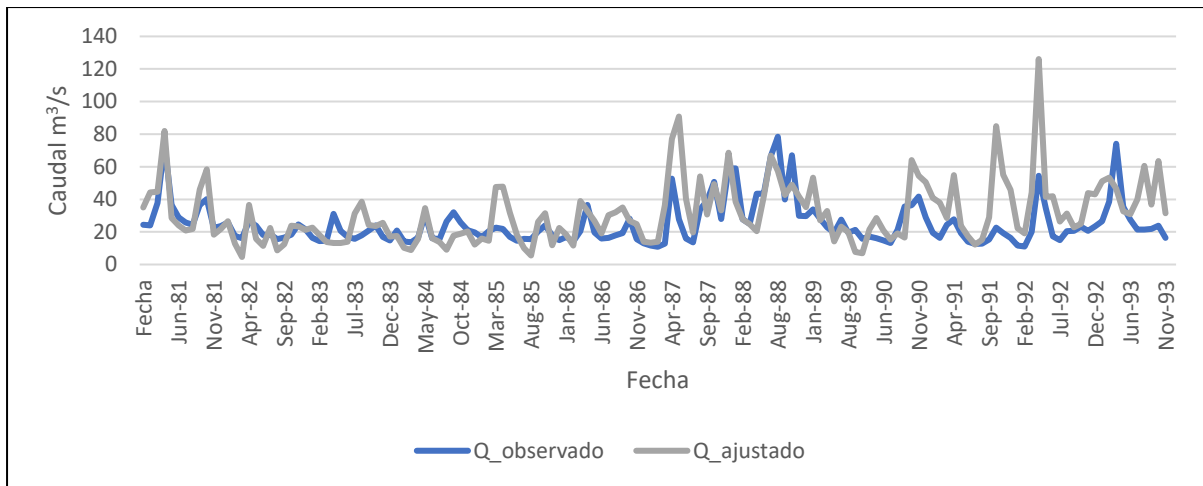


Figura 4. Caudal simulado vs. Observado en la estación Los Velazquitos, subcuena 5.

Esta sobreestimación considerarse como favorable debido a que la investigación está orientada hacia el control erosión, la cual es causada principalmente por la escorrentía superficial. El hecho de que haya sobreestimación es positivo por su relación con el principio de prevención ante daños derivados de la sedimentación e inundaciones (Rodríguez 2019). Estudios señalan que SWAT brinda resultados coherentes en la simulación aún sin calibrar. (Di Luzio et. al, 2005; Urrutia, 2016).

El promedio anual de sedimentos en la parte alta de CRYN, según la modelación con QSWAT, es de 32.36 t/ha (20.23 m³/ha). Este resultado es similar a las tasas de sedimentación reportadas para esta zona; 24t/ha (Rodríguez 2019), 30t/ha (CORAASAN-CDES, 2014), 35.54 t/ha (de la Fuente, 2014), 36.54 t/ha (Ovalles 2011) y 36.60 t/ha (Jiménez et. al 2005). La calibración de los sedimentos no resulta posible debido a la falta de observaciones de este tipo, sin embargo, los resultados se acercan mucho a los promedios reportados. En la siguiente figura se muestran los resultados de modelación de la producción de sedimentos por subcuena:

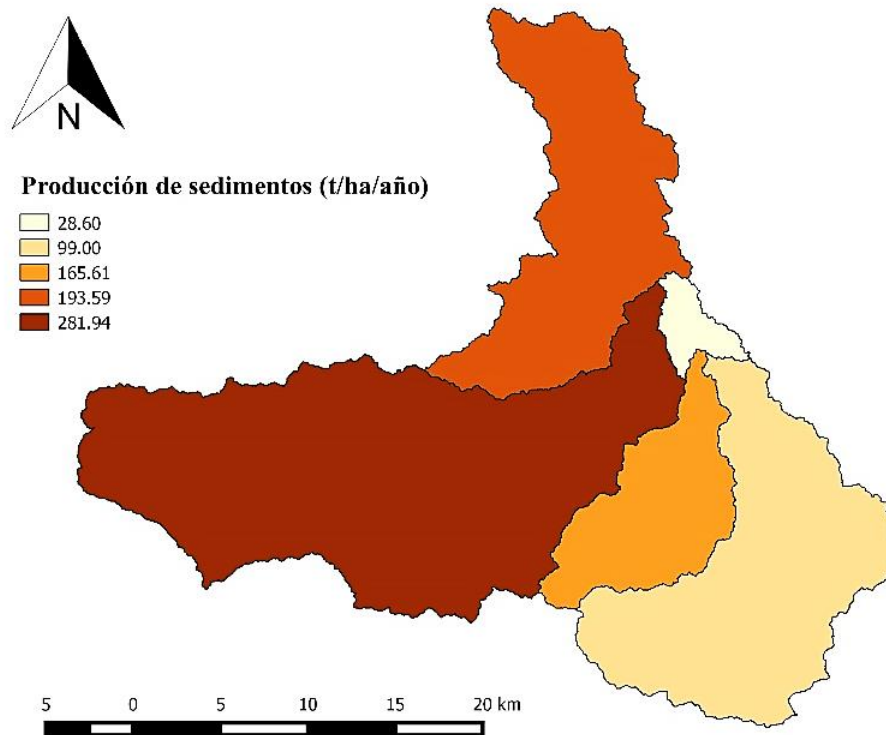


Figura 5. Producción promedio de sedimentos (t/ha) en la parte alta de la CRYN

El análisis a nivel de subcuenca muestra que la mayor sedimentación se produce en la subcuenca 1, con un promedio de 281 t/ha, donde predomina el uso de suelo bosque de conífera. Esto puede deberse a las actividades derivadas del aprovechamiento forestal, las cuales, dependiendo de la intensidad, pueden ocasionar cambios en la calidad de agua por el aumento en la sedimentación (Castillo-Ugalde et al. 2009). En segundo lugar, está la subcuenca 5 o subcuenca de salida con un promedio de 193.60 t/ha, zona en la que predomina el uso de suelo pasto, el cual tiene un impacto negativo sobre la calidad de agua por el aumento en la erosión (Ríos et al. 2013; Chagas et al. 2007). La producción promedio de sedimentos de cada uso de suelo por subcuenca se muestra en el anexo 3.

Para estimar los cambios en la producción de agua y sedimentos bajo los diferentes escenarios de cobertura y uso de suelo, se hace la comparación de la línea base con los resultados de la modelación de los diferentes escenarios para el periodo 2030-2050. Estos resultados se muestran en el cuadro 5.

Cuadro 5. Promedio de producción de agua anual y sus componentes a partir de cambios en el uso de suelo en el periodo 2020-2050

Variable (mm)	Escenario							
	LB	1.1	1.2	1.3	2.1	3.1	3.2	3.3
Escorrentía	545.21	547.17	551.09	555.00	541.95	544.32	548.47	552.39
Flujo lateral	128.71	128.45	127.92	127.42	129.16	128.85	128.27	127.76
Flujo retorno	734.82	733.14	729.79	726.42	737.57	735.56	732.03	728.66
Prod. de agua	1,408.74	1,408.76	1,408.80	1,408.84	1,408.68	1,408.73	1,408.77	1,408.81

Los resultados indican que la producción promedio anual de agua no muestra cambios considerables bajo los escenarios de cobertura y uso de suelo modelados. Es decir, la producción de agua no es considerablemente sensible a los cambios en la cobertura y uso de suelo. Esto lo confirman resultados de medición de impacto de cambios en la cobertura utilizando SWAT en la parte alta de la CRYN, los cuales señalan que la producción de agua bajo diferentes escenarios de cobertura, aun siendo contrastantes como el aumento de bosque a un 85% y el cambio total de bosque a pasto, muestra diferencias casi nulas (Rodríguez 2019; Cuello 2003). Esto podría deberse a los criterios utilizados para los cambios de uso de suelo modelados en este análisis, ya que la distribución se hizo automática a través de QSWAT considerando la capacidad productiva del suelo y su uso actual.

El hecho de que la producción de agua no muestre cambios significativos ante cambios de uso de suelo, podría ser beneficioso para las empresas en términos de la cantidad de agua que produce la cuenca. Sin embargo, en términos de calidad, la disponibilidad de agua podría verse afectada por los cambios en la escorrentía superficial y flujo de retorno. La calidad del agua influye en la disponibilidad del recurso ya que su nivel de degradación la inutiliza para determinados usos (Cirelli 2003). Como la escorrentía superficial es la principal causa de la erosión hídrica (FAO 1992; Cervantes 1999; Buscuñán 2010), el aumento de esta representa una disminución en la calidad de agua lo que se traduce en una reducción de la disponibilidad del recurso principalmente para CORAASAN. En el caso del flujo de retorno, la disminución de este se traduce en una disminución de la disponibilidad de agua en tiempos de sequía ya que este es la principal fuente de abastecimiento del flujo base, caudal que se incorpora a una corriente de agua durante periodos largos de estiaje (OMM 2012). La reducción en el flujo de retorno podría afectar negativamente a las empresas en temporada seca con interrupciones de generación hidroeléctrica y producción de agua potable.

Con respecto a la producción de sedimentos, en el siguiente cuadro se muestra la producción promedio de sedimentos para cada uno de los escenarios de cobertura y uso de suelo en un periodo de 30 años, los cambios que se producen en cada uno de estos a partir de la línea base y el porcentaje de cambio que representa.

Cuadro 6. Producción de sedimentos a partir de cambios en el uso de suelo

Escenario Cambio de uso de suelo	Producción de sedimentos (MMC)	Cambios con respecto a LB (MMC)	Porcentaje de cambio (%)
LB (línea base)	47.6	-	
1.1	48.2	0.7	1.5
1.2	49.8	2.2	4.7
1.3	51.6	4.0	8.5
2.1	47.3	-0.2	-0.5
3.1	47.5	-0.1	-0.1
3.2	48.7	1.2	2.5
3.3	50.4	2.8	5.9

*Valores negativos indican reducción en la producción de sedimentos

*MMC: Millones de metros cúbicos

Según los resultados que se muestran en el cuadro 6, la pérdida de bosque tiene más impacto en el aumento de la producción de sedimentos que la reforestación en la disminución de esta. Esto se evidencia en los bajos porcentajes de cambio de los escenarios de aumento de cobertura por reforestación en comparación con los porcentajes de cambio de los escenarios de pérdida. Por cada 1% de bosque que pasa a pasto, equivalente a 451.92 ha, la producción de sedimentos aumenta un 0.5%, mientras que por cada 1% reforestado, la producción de sedimentos reduce 0.1%.

Los resultados indican que las intervenciones propuestas de conservación de bosque podrían reducir en promedio la cantidad de sedimentos en 21.16 m³/ha y las intervenciones de reforestación 20.16 m³/ha. Esto significa que las intervenciones en conservación de bosque tienen un mayor impacto en la reducción de producción de sedimentos que las intervenciones en reforestación.

3.2 Costeo de las intervenciones propuestas poner luego de los resultados de los modelos

Los costos de las intervenciones propuestas para reducir la producción de sedimentos se derivan de las inversiones en reforestación y conservación de bosque. Considerando que el pago por conservación de bosque es de US\$50/ha y el costo de reforestación es de US\$800/ha, así como también el periodo y magnitud en que se realizan las inversiones según cada intervención propuesta, en el siguiente cuadro se muestran los resultados del análisis de costos de los diferentes escenarios de intervención:

Cuadro 7. Costos de escenarios de intervención (2020-2050)

Escenario de intervención	Detalles de intervención	Costos 2020-2050 (US\$)	VAN (US\$)
C1	Conservación del 3% de bosque	1,050,714.00	189,246.25
C2	Conservación del 9% de bosque	3,152,142.00	567,738.74
C3	Conservación del 15% de bosque	5,253,570.00	946,231.24
R1	Reforestación del 4% en pastizales	1,446,144.00	944,107.79
R2	Reforestación del 4% en pastizales	1,446,144.00	944,107.79
R3	Reforestación del 4% en pastizales	1,446,144.00	944,107.79
CR1	Conservación del 3% de bosque y reforestación del 4% en pastizales	2,496,858.00	1,133,354.04
CR2	Conservación del 9% de bosque y reforestación del 4% en pastizales	4,598,286.00	1,511,846.53
CR3	Conservación del 15% de bosque y reforestación del 4% en pastizales	6,699,714.00	1,890,339.03

Según los valores actualizados, los escenarios más costosos corresponden a las intervenciones que combinan reforestación con conservación de bosque, seguido de las intervenciones de reforestación. El valor actual neto de las inversiones es menor que los costos totales debido al descuento que se produce durante los 30 años del periodo de implementación. Si toda la inversión se hiciera el primer año, el VAN será mayor, así como también los beneficios.

3.3 Valoración económica de los beneficios

Los resultados de la modelación indican que la línea base de producción sedimentos es de 1.6 MMC/año, correspondiente al 1% de la capacidad de almacenamiento, coincidiendo con los datos de batimetría del embalse de la presa Tavera, que indican que anualmente se pierde de 1% a 2% de la capacidad de almacenamiento por acumulación de sedimentos (figura 6).

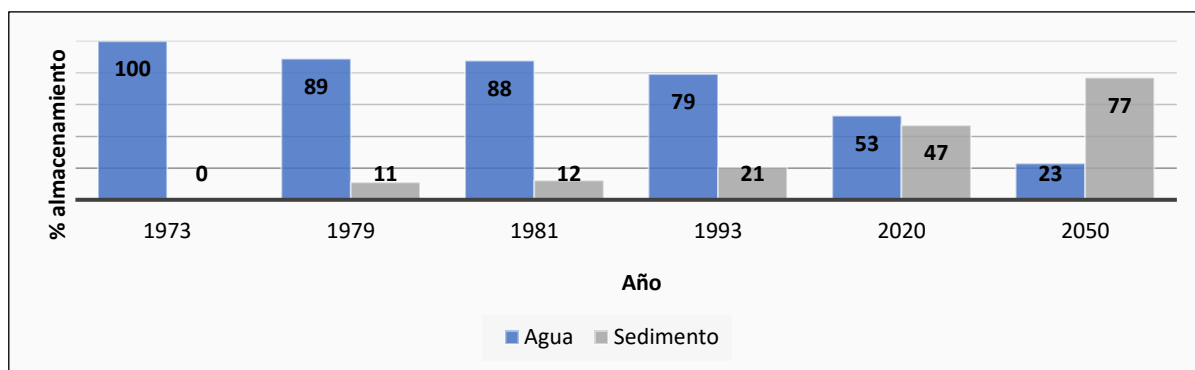


Figura 6. Cambios en la capacidad de almacenamiento en el embalse de la presa Tavera. Fuente: Datos batimetría (INDRHI) y proyección con tasa de sedimentación anual del 1%.

Comparando la contribución en reducción de sedimentos de las diferentes intervenciones propuestas con la capacidad total del embalse de 173 MMC (CNE-EGEHID 2009), estas contribuyen a evitar reducciones en la capacidad de almacenamiento desde un 0.1% hasta un 2.3%. Esto puede influir positivamente ante la reducción de tiempo de vida útil de la presa, altos costos de mantenimiento, interrupciones en el suministro de (agua potable, riego e hidroelectricidad), aumenta el riesgo de inundaciones, entre otros. Con la tasa de sedimentación del embalse según los datos de batimetría del INDRHI (1% anual), se estima que para el año 2050, la capacidad de almacenamiento de agua en el embalse apenas será de un 23% si no se toman las medidas necesarias. En la siguiente figura se muestran los cambios en la producción de sedimentos bajo las diferentes intervenciones propuestas.

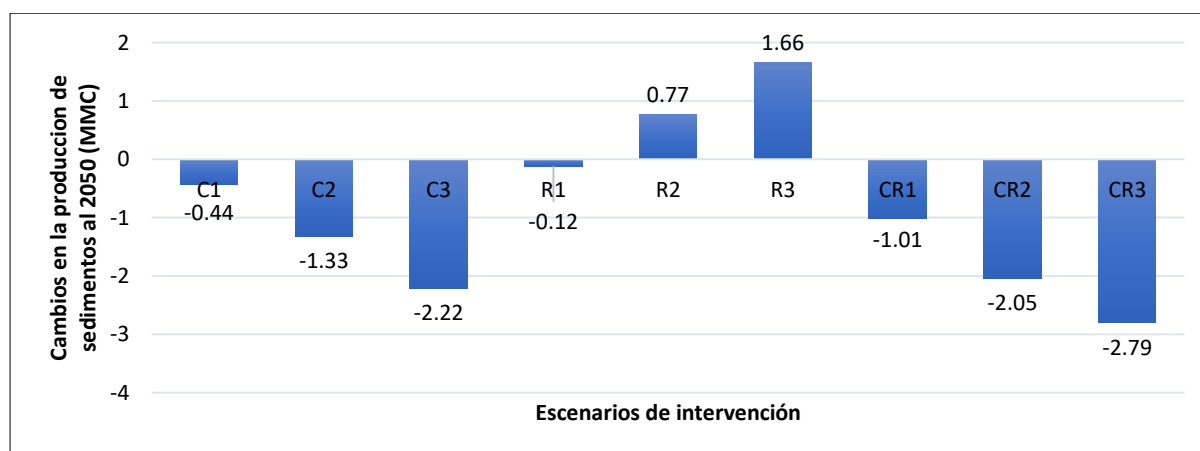


Figura 7. Cambios en la producción de sedimentos para cada escenario de intervención propuesta proyectada para el año 2050.

A partir de la línea base, con las intervenciones se obtienen reducciones en la producción de sedimentos para el 2050 desde 0.44 MMC hasta 2.79 MMC (figura 7). Para esta estimación, se toma en cuenta que la conservación de bosque reduce en promedio la cantidad de sedimentos en 21.16 m³/ha y la reforestación 20.16 m³/ha. En dos de las intervenciones no se obtienen beneficios ya que no hay reducción en la cantidad de sedimentos (R2 y R3), esto porque en ambos escenarios, las actividades de reforestación no compensan la pérdida de bosque. Los mayores beneficios se obtienen con las intervenciones que combinan conservación de bosque y reforestación, seguido de las intervenciones en conservación de bosque.

Los resultados de la valoración económica de los beneficios estimados derivados de los cambios en la producción de sedimentos se muestran en el cuadro 8. Para esto se considera que el precio de dragado es de US\$ 13/m³, así como también el periodo en el que se generan los beneficios en cada escenario.

Cuadro 8. Valor económico de los beneficios derivados de las intervenciones proyectados al 2050

Escenario de intervención	Detalles de intervención	Ahorro en costos 2020-2050 (US\$)	VAN (US\$)
C1	Conservación del 3% de bosque	5,780,608.14	1,041,157.15
C2	Conservación del 9% de bosque	17,341,824.43	3,123,471.46
C3	Conservación del 15% de bosque	28,903,040.71	4,976,987.05
R1	Reforestación del 4% en pastizales	1,562,621.86	-106,589.49
R2	Reforestación del 4% en pastizales	-9,998,594.42	-2,237,739.00
R3	Reforestación del 4% en pastizales	-21,559,810.71	-4,320,053.30
CR1	Conservación del 3% de bosque y reforestación del 4% en pastizales	13,123,838.15	1,926,889.62
CR2	Conservación del 9% de bosque y reforestación del 4% en pastizales	24,685,054.43	4,009,203.92
CR3	Conservación del 15% de bosque y reforestación del 4% en pastizales	36,246,270.72	6,091,518.23

Para los escenarios de intervención en conservación de bosque, se estiman ahorros desde un 0.9% hasta un 4.8% en dragado. En los escenarios de reforestación, para R1 se estima un ahorro del 0.3%, mientras que para R2 y R3 se estiman aumentos desde un 1.6% hasta un 3.5% en los costos de dragado, aún con las intervenciones. En el caso de las intervenciones que combinan conservación de bosque con reforestación, se estiman ahorros desde un 2.1% hasta un 5.9%

3.4 Análisis costo beneficio de las intervenciones

Debido a que los beneficios y costos tienen diferentes valores dependiendo de cuando se realizan, usamos la tasa de descuento de 11.04% para convertirlos en valores presentes. El VAN captura los costos y beneficios con descuento a medida que se acumulan y predicen en qué punto las intervenciones serán financieramente viables bajo los supuestos planteados. En los anexos 4, 5 y 6 se muestran ejemplos de los cálculos del VAN para cada tipo de intervención

Cuadro 9. Análisis costo beneficio de las intervenciones propuestas proyectadas al 2050

Escenario de intervención	Detalles de intervención	Beneficio neto (US\$)	VAN (US\$)
C1	Conservación del 3% de bosque	4,729,894.14	851,910.91
C2	Conservación del 9% de bosque	14,189,682.43	2,555,732.72
C3	Conservación del 15% de bosque	23,649,470.71	4,259,554.53
R1	Reforestación del 4% en pastizales	116,477.86	-1,099,532.48
R2	Reforestación del 4% en pastizales	-11,444,738.42	-3,181,846.79
R3	Reforestación del 4% en pastizales	-23,005,954.71	-5,264,161.09
CR1	Conservación del 3% de bosque y reforestación del 4%	10,626,980.15	793,535.58
CR2	Conservación del 9% de bosque y reforestación del 4% en pastizales	20,086,768.43	2,497,357.39
CR3	Conservación del 15% de bosque y reforestación del 4% en pastizales	29,546,556.72	4,201,179.21

Los resultados del flujo de beneficios muestran que, si se implementan correctamente las intervenciones de conservación y reforestación en la parte alta de la CRYN, el programa PSA-CYN producirá beneficios que superan los costos de intervención bajo una variedad de supuestos. Esto se muestra en todas las intervenciones modeladas excepto en los escenarios de reforestación, los cuales muestran un VAN negativo; no son rentables. Las intervenciones con mayor rentabilidad corresponden a las de conservación de bosque, seguido de intervenciones que combinan conservación de bosque con reforestación. Se debe tener en cuenta que el VAN continúa aumentando a medida que se extiende el horizonte temporal lo que indica que los beneficios continúan acumulándose después de 30 años.

3.4.1 Análisis de sensibilidad del VAN de las intervenciones

Con el aumento de la tasa de descuento, el VAN de las intervenciones disminuye, sin embargo, los cambios en esta no ponen en riesgo la rentabilidad de las intervenciones de conservación de bosque, soportando aumentos mayores al 100%. En el caso de las intervenciones de reforestación, no son rentables a pesar de reducciones en la tasa de descuento, excepto R1, la cual necesita una tasa de descuento igual a 0% para ser rentable. Para las intervenciones combinadas, los cambios en la tasa de descuento no afectan considerablemente la rentabilidad, excepto CR1, que soporta aumentos de hasta un 55% en la tasa de descuento (anexo 7).

Con respecto a las inversiones, el VAN disminuye a medida se aumentan los costos de intervención. Los cambios en el pago por conservación de bosque no afectan la rentabilidad de las intervenciones de conservación y las intervenciones combinadas. Mientras que los costos de reforestación, para las intervenciones combinadas solo se ve afectada la rentabilidad de CR1 cuando los costos se aumentan en un 100%. A pesar de la reducción de los costos, las intervenciones de reforestación no son rentables (anexo 8).

Con el aumento en los precios de dragado, el VAN de las intervenciones aumenta. La rentabilidad de las intervenciones de conservación de bosque no se ve afectada por la disminución del precio de dragado, este tendría que disminuir más de un 80% para que dejen de ser rentables. En las intervenciones de reforestación, para que R1 sea rentable se requiere de un aumento de un 130% en el precio de dragado. Las demás intervenciones de reforestación no son rentables a pesar del aumento en el precio de dragado. En el caso de las intervenciones combinadas, CR1 deja de ser rentable con la disminución de un 50% en el precio de dragado, mientras que CR2 y CR3, a partir de la disminución del 75% (anexo 9).

A medida se reduce el horizonte temporal, el VAN de las intervenciones disminuye. Las variaciones en el horizonte temporal no afectan la rentabilidad de las intervenciones de conservación de bosque, esto porque los beneficios que se obtienen el mismo año de la inversión son mayores que los costos. Para las intervenciones de reforestación, aún con el aumento en un 100% en el horizonte temporal, no son rentables. En el caso de las intervenciones combinadas, CR1 deja de ser rentable si el horizonte temporal es menor a 17 años, CR2 deja de ser rentable con un horizonte temporal menor a 11 años y CR3 menor a 6 años.

4. CONCLUSIONES

Las intervenciones propuestas en este análisis a través del programa PSA-CYN no influyen significativamente en cambios de la producción de agua. Esto probablemente esté relacionado con los criterios utilizados para los cambios de uso modelados en este análisis, ya que la distribución se hizo de forma aleatoria a través de QSWAT considerando la capacidad productiva del suelo y su uso actual. A pesar de que no hay cambios significativos en la cantidad de agua que produce la cuenca, en términos de calidad y disponibilidad en tiempos de sequía, la disponibilidad del agua podría verse afectada por los aumentos en la escorrentía superficial y disminución en el flujo de retorno, lo que podría representar pérdidas para las empresas como el aumento en los costos de potabilización de agua y mantenimiento, e interrupciones en la producción de energía y agua potable.

Si se implementan de manera adecuada bajo los supuestos planteados en esta investigación, las intervenciones propuestas, el programa PSA-CYN puede ser una herramienta efectiva para reducir la producción de sedimentos en la parte alta de la CRYN, dando como resultado esperado la reducción desde 0.44 MMC (0.9%) hasta 2.79 MMC (5.7%) en la cantidad de sedimentos por medio de intervenciones de conservación de bosque y reforestación, en un periodo de 30 años. En términos económicos, las intervenciones propuestas en este análisis generan beneficios para el 2050 que van desde US\$ 1.04 MM hasta un US\$6.09 MM (valores actualizados) por el ahorro en costos de dragado del embalse de la presa Tavera para las empresas EGEHID y CORAASAN. Siendo las intervenciones de conservación de bosque y reforestación aquellas con las que se obtienen mayores beneficios, seguido de las intervenciones de conservación de bosque.

De las intervenciones propuestas, las que corresponden a reforestación no resultan rentables en términos monetarios. El VAN de las intervenciones de bosques e intervenciones combinadas va desde US\$0.79 MM hasta US\$4.26 MM. El análisis de sensibilidad del VAN muestra que, de los parámetros asociados a los supuestos planteados, el precio del dragado es el que más afecta la rentabilidad de las intervenciones, seguido del horizonte temporal para las intervenciones combinadas. Para que la intervención de reforestación (R1) sea rentable, se requiere de un aumento del 130% en el precio de dragado y/o una tasa de descuento cero.

En general, este análisis demuestra el beneficio de usar una metodología integrada de definición de intervenciones, cuantificación de impactos y análisis costo beneficio, siendo este último un método fuertemente respaldado para evaluar inversiones en infraestructura de agua (Sadoff et al. 2015). El análisis costo beneficio de las intervenciones está destinado a proporcionar un caso de negocio para actores como EGEHID y CORAASAN para invertir en el programa PSA-CYN. La información producida en este análisis puede satisfacer una de las necesidades del programa PSA-CYN de demostrar retornos de inversiones positivos a usuarios potenciales del agua de la presa Tavera y gestionar futuras inversiones.

4.1 Limitaciones

No se priorizan las áreas de intervención, lo que tiene implicaciones de precisión en la estimación de efectos de las intervenciones, ya que se asume que, sin importar la ubicación espacial de las hectáreas intervenidas, estas generan el mismo efecto. Esto no representa la realidad de una cuenca hidrográfica. En la modelación no se incluyen prácticas de establecimiento y manejo de las intervenciones consideradas. Esto puede ser determinante en las salidas, principalmente en producción de sedimentos.

Este análisis solo estima uno de los beneficios derivados de la reducción en la producción de sedimentos por la falta de información específica requerida como datos históricos de potabilización de agua y entrada de sedimentos en la planta de agua potable, como también los datos históricos de interrupciones en la generación hidroeléctrica y mantenimiento derivado de la sedimentación. Si se contara con dicha información, los resultados de la estimación de beneficios podrían ser mayores. Considerando que actualmente CORAASAN y EGEHID aportan fondos al programa PSA-CYN voluntariamente, se puede interpretar que las posibles pérdidas ante la ausencia del programa superan el aporte en términos monetarios.

Los beneficios estimados en este análisis están sujetos a una serie de supuestos relacionados a la continuidad y monitoreo de parte del programa PSA-CYN para el cumplimiento de los contratos. Se asume que el programa es preciso en la identificación de áreas propensas a deforestación y áreas para reforestar y que la renovación de los contratos es exitosa. Esto podría representar una sobreestimación del potencial del programa, ya que la adecuada identificación de áreas para intervenir requiere de al menos un modelo probabilístico de deforestación y que se requiere un sistema de monitoreo para el cumplimiento de los contratos. Se debe determinar la tasa de efectividad del programa PSA-CYN para no sobreestimar el potencial de este.

Por otra parte, los costos de las intervenciones cambian si se incluyen los costos de transacción del proceso de inclusión al programa PSA-CYN (contratos), los costos de mantenimiento de las plantaciones y los costos de monitoreo y seguimiento del programa. Tanto los costos como los beneficios podrían cambiar con la inclusión de otros usuarios del agua del embalse de la presa Tavera, como la junta de regantes.

5. RECOMENDACIONES

Es recomendable utilizar información actualizada y profunda sobre los tipos de suelo para hacer más confiable los resultados. La información utilizada en esta modelación tiene una gran escala; 1:5,000,000. Así también es necesaria la inclusión de datos más robustos de caudal y sedimentación para la calibración del modelo, con el fin de reducir la sobreestimación de los resultados.

Se recomienda la priorización de áreas de intervención en la cuenca previo a la modelación hidrológica para lograr resultados más precisos sobre el efecto de las intervenciones propuestas, ya que este es uno de los factores claves para lograr impactos significativos en la cuenca. Esto puede solucionarse generando una capa (shape) de priorización de las intervenciones para integrar a los insumos de la modelación hidrológica.

Incluir y estimar otros beneficios que obtienen las empresas producto de los cambios en la producción de sedimentos derivados de las intervenciones en la parte alta de la cuenca. Así también la inclusión de costos no considerados en esta investigación, con el fin de obtener resultados más precisos sobre la rentabilidad de las intervenciones.

Considerar la inclusión de prácticas agroforestales en posibles escenarios de intervención, ya que esta se encuentra dentro de las actividades que realiza el programa PSA-CYN. De igual manera incluir otros usuarios potenciales del recurso hídrico en el embalse de la presa Tavera, como es el caso de la junta de regantes, y así poder estimar otros beneficios derivados de las intervenciones.

6. LITERATURA CITADA

- Abell, R. *et al.* 2017. Más Allá de la Fuente: Los beneficios ambientales, económicos y sociales de la protección de las fuentes de agua. The Nature Conservancy, Arlington, Virginia, EE.UU.
- Arnold, JG; Srinivasan, R; Muttiah, RS; Williams, JR. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment Part I: Model Development. Journal of the American Water Resources Association. Vol. 34. No. 1. Pp 73-89.
- Barrios, A; Urribarri, L. 2010. Aplicación del modelo SWAT en los Andes venezolanos: cuenca alta del río Chama. Revista Geográfica Venezolana. Vol. 5. No. 1.
- Benítez, S., et al. 2010. Using Water Funds to Finance Watershed Conservation in the Andes and Costa Rica. In Mountain Forum Bulletin Vol. 10, No. 1, pp. 71-73.
- Bennett, G; Carroll, N. 2014. Gaining Depth: State of Watershed Investment 2014. Forest Trends' Ecosystem Marketplace.
- Bennett, G; Cassin, J y Carroll, N. 2016. Natural infrastructure investment and implications for the nexus: a global overview. Ecosyst.
- Buscuñán, S. 2010. Relación entre la erosión producida por un flujo superficial en suelos finos y algunas propiedades de estos. Universidad de Chile. 222 p.
- Cabrera, J. 2012. Calibración de modelos hidrológicos. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Civil. Perú. 7 p.
- CAF y TNC, 2009: Conservando los Servicios Ambientales para la Gente y la Naturaleza. La Paz, Bolivia: CAF y TNC.
- Carvalho, E. 2006. Evaluación del efecto de los cambios de cobertura sobre la producción de agua y sedimentos en la microcuenca quebrada La Virgen, Los Teques, Edo. Miranda. (Tesis). Universidad Central de Venezuela. p. 81, 86, 87 y 88.
- Castillo-Ugalde, M; Quesada-Monge, R; Fallas-Castillo, A. 2009. Sistemas de aprovechamiento de madera caída en la Península de Osa.
- CEDAF. 2013. Estudio Socioeconómico Fondo de Agua Yaque del Norte. Informe final.
- Cervantes, R. 1999. Disminución en la escorrentía superficial debido a variaciones en el uso del suelo. UCR (Universidad de Costa Rica). 69 p.
- Chagas, C; Piazza, M; De Siervi, M; Santanatoglia, O; Moretton, J; Paz, M.; Irurtia, C. 2007. Calidad del agua de escorrentía superficial en sistemas ganaderos extensivos e intensivos de Argentina. AGROQUIMICA-PISA-, 51(2/3), 130.
- Cirelli, A. 2003. EL AGUA EN IBEROAMÉRICA. Aportes para la integración entre los organismos de gestión y los centros de investigación. CYTED XVII

- CNE-EGEHID. 2009. Estudio para Determinar el costo de producción de la hidroelectricidad de la Empresa de Generación Hidroeléctrica Dominicana. Segundo informe parcial
- CORAASAN-CDES. 2014. Plan Estratégico Gestion-Intervencion en Sistema de Cuenca. Plan Cuenca Santiago. Santiago de los Caballeros, República Dominicana.
- De Castro Dias, T; da Cunha, A. C; da Silva, J. 2016. Return on investment of the ecological infrastructure in a new forest frontier in Brazilian Amazonia. *Biological conservation*, 194, 184-193.
- De la fuente S. 2014. La cuenca del río Bao y su área de influencia. Santiago de los Caballeros, República Dominicana.
- Di Luzio, M; Arnold, JG; Srinivasan, R. 2005. Effect of GIS data quality on small watershed stream flow and sediment simulations. *Hydrological Processes*. Vol. 19. No. 3. Pp 629-650.
- Díaz, R. 2010. Mecanismo de pago por servicios ambientales en la cuenca del río Yaque de Norte en la República Dominicana. SEMARENA (Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Recursos Naturales). Caso de estudio. 11 p.
- Dile, Yihun & Srinivasan, R & George, Chris. 2015. Manual for QSWAT. QSWAT is the SWAT interface for QGIS. SWAT (Soil and Water Assessment Tool) is a physically based hydrological model. 10.13140/RG.2.1.1060.7201.
- Echavarría, M. 2002. Financing Watershed Conservation: The FONAG waterfund in Quito, Ecuador.
- Echavarría, M. 2012. Financing watershed conservation: The FONAG water fund in Quito, Ecuador. In *Selling Forest Environmental Services* (pp. 105-115).
- Echavarría, M; Zavala P; Coronel, L; Montalvo, T; Aguirre L. 2015. Infraestructura Verde en el Sector de Agua Potable en América Latina y el Caribe: Tendencias, Retos y Oportunidades. Informe.
- Fondo Agua. 2015. Plan de conservación (en línea). Santiago, República Dominicana.
- Fondo Agua. 2017. Fondo Agua Yaque del Norte. Santo Domingo, República Dominicana.
- Gassman, P; Reyes, M; Green, C; Arnold, J. 2007. The soil and water assessment tool: historical development, applications and future research direction (online). Invited review series. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. Vol. 50. No. 4. Pp 1211-1250.
- Goldberg, J. 2007. Valoración económica de las cuencas hidrográficas: Una herramienta para el mejoramiento de la gestión de los recursos hídricos. *Nota Informativa de Antecedentes para el VI Dialogo Interamericano sobre la Gestión de Agua Ciudad de Guatemala*, Guatemala.
- Gopal, L. 2015. Evaluación del Impacto de Cambios de Cobertura Vegetal en la Producción de Agua de la Cuenca del Río Güey (tesis). Universidad Central de Venezuela, Maracay, p. 15.

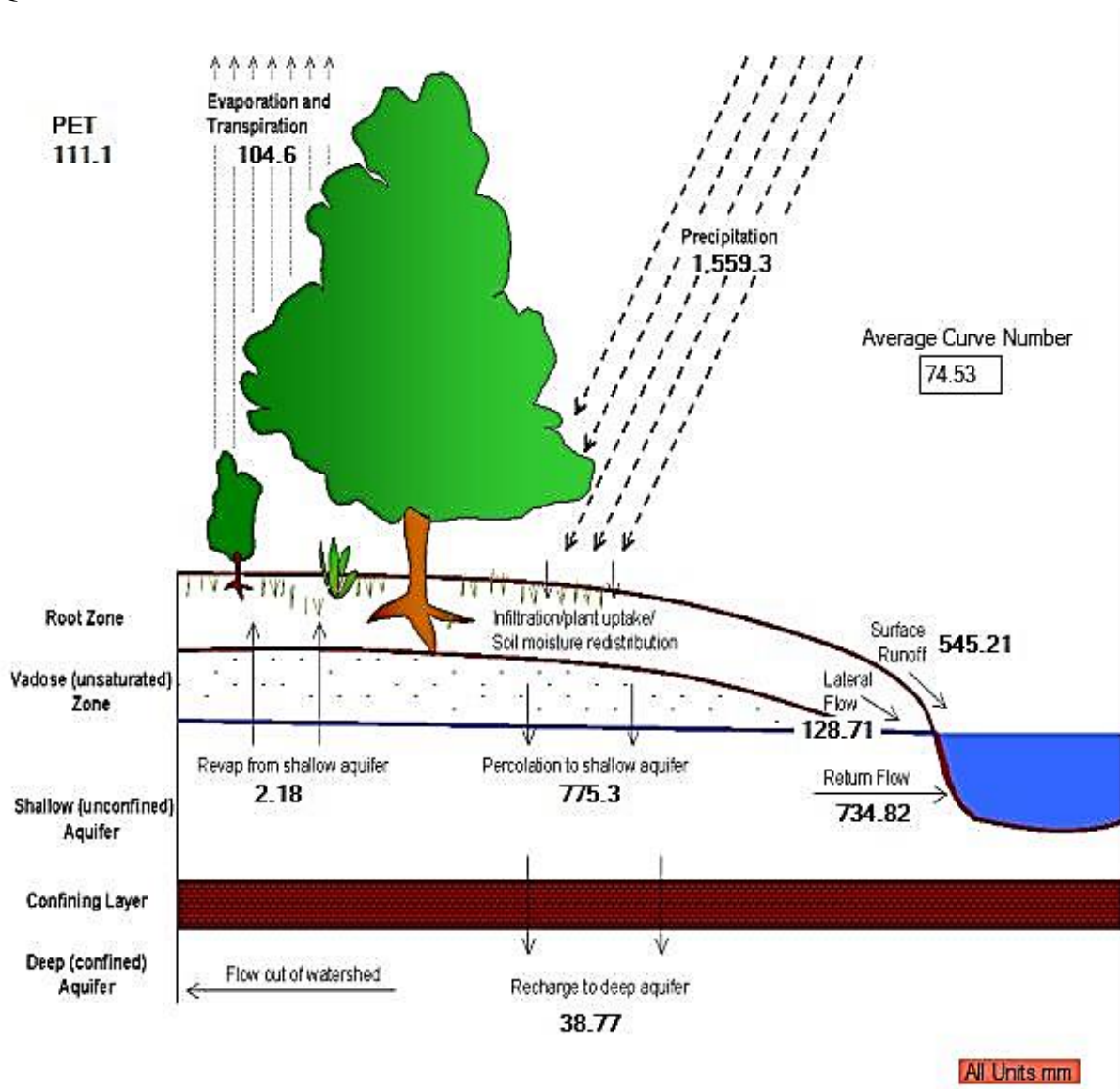
- Jodar-Abellan, A; Ruiz, M; Melgarejo, J. 2018. Evaluación del impacto del cambio climático sobre una cuenca hidrológica en régimen natural (SE, España) usando un modelo SWAT. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 35(3), 240-253.
- Heindrichs, T. 2003 Pagos por Servicios Ambientales (PSA) en PROCARYN: concertar fondos
- Jiménez, O; Farias, H; Rodríguez, C. 2005. Procesos De Sedimentación En Embalses En Ambientes Tropicales. *Estudios De Casos En Costa Rica Y República Dominicana. Ingeniería Del Agua · Vol. 12 · Nº 3* septiembre.
- Kroeger, Timm & Klemz, Claudio & Shemie, Daniel & Boucher, Timothy & Fisher, Jonathan & Acosta Porras, Eileen & Denedy-Frank, P. & Cavassani, Andre & Pospissil Garbossa, Luis & Blainski, Éverton & Santos, Rafaela & Petry, Paulo & Giberti, Silvana & Dacol, Kelli & Pinho, Samantha. 2017. Assessing the Return on Investment in Watershed Conservation Best Practices Approach and Case Study for the Rio Camboriú PWS Program, Santa Catarina, Brazil i Report Authors Assessing the Return on Investment in Watershed Conservation: Best Practices Approach and Case Study for the Rio Camboriú PWS Program.
- Llerena, Carlos & Melgar, Rosa & Llerena, L.M. 2007. Plantaciones forestales, agua y gestión de cuencas. *Debate Agrario-Análisis Y Alternativas*.
- Luciano Olga. 2010. Elaboración de una propuesta de instrumento Económico para la gestión de aguas residuales en la República Dominicana. Informe
- Madrigal R; Alpizar, F. 2008. Diseño y gestión adaptativa de un programa de pagos por servicios ecosistémicos en Copán Ruinas, Honduras.
- Méndez-Morales, M. 2016. Evaluación cuantitativa, espacial y temporal de los recursos hídricos de la cuenca del Río Agua Caliente mediante la construcción y análisis de balances hídricos. *TEC (Instituto Tecnológico de Costa Rica)*. 90 p.
- MEPyD (Ministerio de Economía, Planificación y Desarrollo). 2018. Contexto actual del agua en la Republica Dominicana. Octavo foro mundial del agua.
- Mintegui, J; López F. 1990. La Ordenación Agrohídrológica en la planificación. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. 306 p.
- Morillo, J. Jul. 2020. Costos de remoción de sedimentos por dragado (llamada telefónica). Santo Domingo, República Dominicana. Constructora Elams.
- Naeem et al. 2015. Get the science right when paying for nature's services.
- Neitsch, S; Arnold, J; Kiniry, J; Srinivasan, R; Williams, J. 2005. Soil and Water Assessment Tool. Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service.
- Neitsch, S; Arnold, J; Kiniry, J; Williams, J; King, K. 2002. Soil and Water Assessment Tool. Theoretical Documentation. Version 2000. GSWRL Report 02-01; BRC Report 02-05; TWRI Report TR-191. College Station, Texas.

- Oliveira-Filho, P; Dutra, A y Ceruti F. 2012. Qualidade das águas superficiais e o uso da terra: estudo de caso pontual em bacia hidrográfica do oeste do Paraná. *Revista Floresta e Ambiente, Seropédica*, v.19
- Ordoñez, J. 2011. Ciclo hidrológico. Cartilla técnica. Sociedad geográfica de Lima. Perú. 44 p.
- Ovalles, P. 2011. Identificación De Las Causas De La deforestación y la degradación de los Bosques En La República Dominicana. Informe final.
- Ozment, S; Feltran-Barbieri, E; Gray, P; Hamel, J; Baladelli Ribeiro, S; Roiphe Barreto, A; Padovezi; Piazzetta Valenta. 2018. Natural Infrastructure in São Paulo's Water System. Washington, DC: World Resources Institute.
- Pérez-Ortega, D; Pérez, A; Carvalho, S y Segovia, J. 2016. Development of Index of Resilience For Surface Water In Watersheds. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, V.10, N.1, P.72-82.
- Plan Yaque. 2018. Programa para la restauración hídrica de la porción Este de la cuenca media del río Yaque del Norte (PRO-YAQUE I): Conjunto de medidas de intervención y de gobernanza para la restauración y manejo sostenible de las 15 microcuencas del territorio comprendido entre Manabao-Jarabacoa-Taveras y Jimenoa, período 2018 al 2023.
- Ríos N; Ibrahim, M; Faustino J. 2013. Uso del modelo SWAT para estimar la producción de sedimentos en una cuenca dominada por Ganadería. Costa Rica.
- Rocha, E; Calijuri, M; Santiago, A; Assis, L; Alves, L. 2012. The contribution of conservation practices in reducing runoff, soil loss, and transport of nutrients at the watershed level. *Water Resour.*
- Rodríguez E. 2019. Análisis de sensibilidad en producción de agua y erosión hídrica bajo escenarios de cobertura vegetal y clima en la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte, República Dominicana. CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). Tesis de Maestría en Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas. Turrialba, Costa Rica.
- Rodríguez, L. 2016. Servicios ambientales hidrológicos proporcionados por los ecosistemas forestales de la cuenca del río Misantia, Veracruz. Universidad Veracruzana. México. 147 p.
- Sadoff et al. 2015. "Securing Water, Sustaining Growth: Report of the GWP/OECD Task Force on Water Security and Sustainable Growth", University of Oxford, UK, 180pp.
- Salzman, J., Bennett, G., Carroll, N., Goldstein, A. y Jenkins, M. (2018). El estado global y las tendencias de los pagos por servicios de los ecosistemas. *Sostenibilidad de la naturaleza*, 1 (3), 136-144.
- Tallis, H. y Markham, A. 2012. Water Funds Business Case: conservation as a source of competitive advantage. Latin America Conservation Council, 17.
- TNC (The Nature Conservancy). 2013. SWAT hydrological modeling and the impact of climate and land use change on the Yaque del Norte, Ozama, Haina, and Nizao

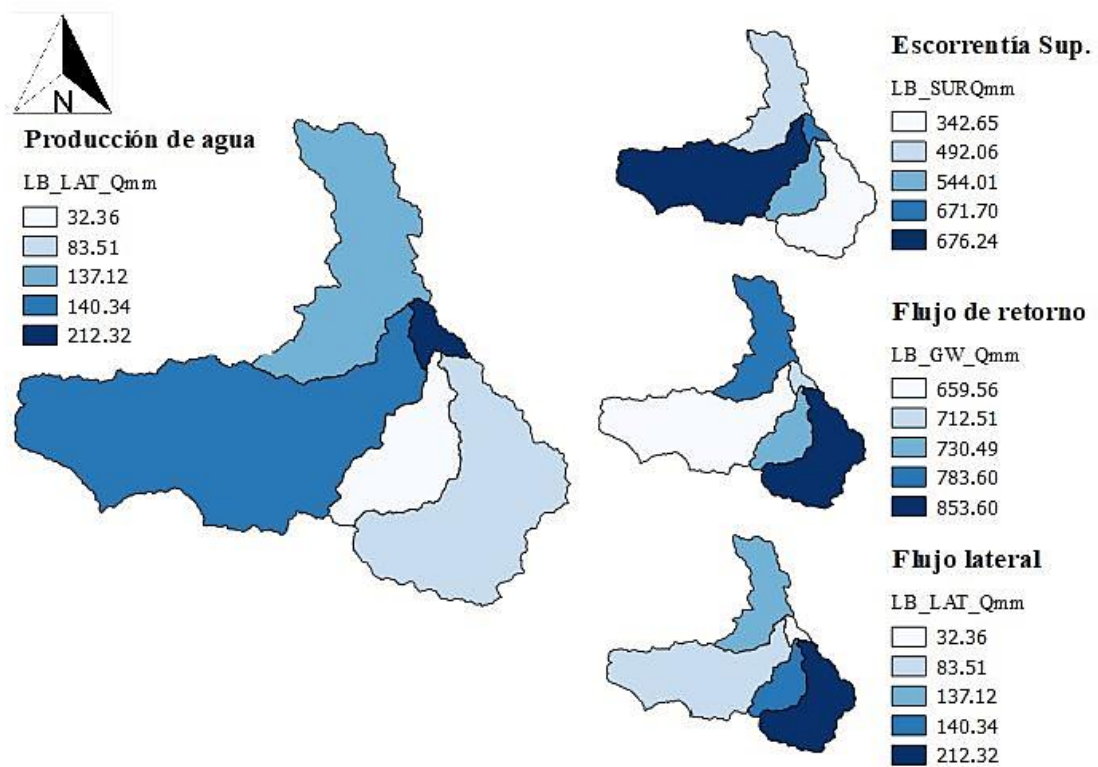
- watersheds. Environmental protection program. Reverside technology. Colorado, United State. No. 51. 190 p.
- TNC (The Nature Conservancy). 2015. Upper Tana-Nairobi Water Fund Business Case. Version 2. The Nature Conservancy: Nairobi, Kenya
- Ulloa D. 2014. El aporte de las zonas ribereñas al control de las inundaciones: estudio de caso de la cuenca Cahocacán, Chiapas, México. CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). Tesis de Maestría en Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas. Turrialba, Costa Rica. 72 p.
- Uribe, N. 2010. SWAT (Soil and Water Assessment Tool): conceptos básicos y guía rápida para el usuario. 47 p.
- Urrutia, M. 2016. Aplicación del modelo SWAT para la simulación del ciclo hidrológico de la Cuenca Alta del Río San Juan bajo la influencia de la actividad minera. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá D.C. Pp 20-75.
- Vogl, A; Bryant, B; Hunink, J; Wolny, S; Apse, C y Droogers, P. 2017. Valuing investments in sustainable land management in the Upper Tana River basin, Kenya. *Journal of Environmental Management*, 195, pp.78-91.
- Werman, M., 2009: Protecting Colombia's public water supply.

7. ANEXOS

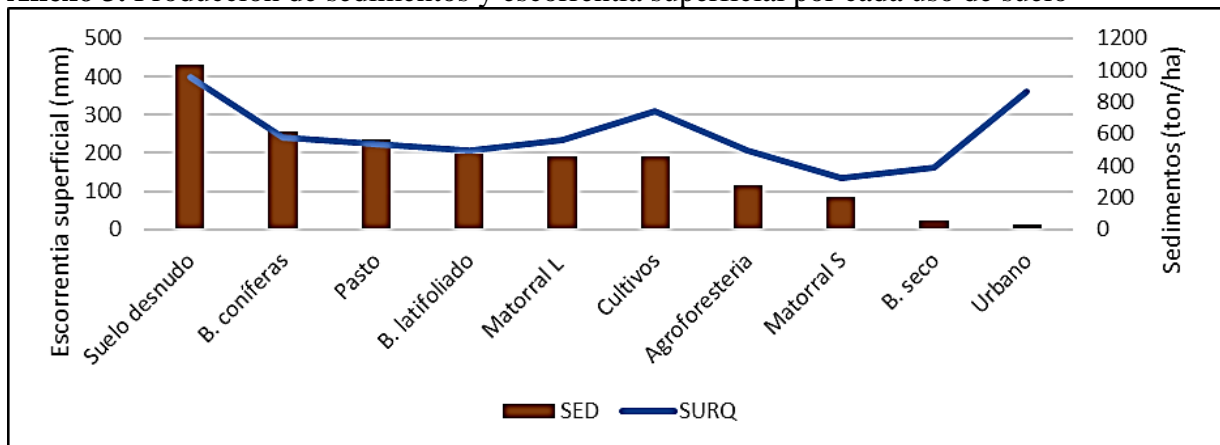
Anexo 1. Componentes del balance hídrico del área de estudio según la simulación inicial con QSWAT



Anexo 2. Producción de agua y sus componentes (mm/año) en la parte alta de la CRYN



Anexo 3. Producción de sedimentos y escorrentía superficial por cada uso de suelo



Anexo 4. Cálculo del VAN para el escenario de conservación del 3% de bosque en un periodo de 30 años (C1)

Conservación	3%														
Hectáreas	1,355.76														
Pago US\$/ha	50														
Precio dragado US\$	13														
tasa sedimentación	21.16														
Aumento gradual	45.19	90.38	135.58	180.77	225.96	271.15	316.34	361.54	406.73	451.92	497.11	542.30	587.50	632.69	677.88
Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Gastos	2,259.60	4,519.20	6,778.80	9,038.40	11,298.00	13,557.60	15,817.20	18,076.80	20,336.40	22,596.00	24,855.60	27,115.20	29,374.80	31,634.40	33,894.00
Ingresos	12,431.42	24,862.83	37,294.25	49,725.66	62,157.08	74,588.49	87,019.91	99,451.32	111,882.74	124,314.15	136,745.57	149,176.98	161,608.40	174,039.82	186,471.23
BN	10,171.82	20,343.63	30,515.45	40,687.26	50,859.08	61,030.89	71,202.71	81,374.52	91,546.34	101,718.15	111,889.97	122,061.78	132,233.60	142,405.42	152,577.23
Valores descontados	10,171.82	18,320.99	24,749.18	29,718.04	33,454.20	36,153.68	37,985.67	39,096.00	39,610.05	39,635.41	39,264.19	38,574.98	37,634.69	36,500.06	35,219.03
Aumento gradual	723.07	768.26	813.46	858.65	903.84	949.03	994.22	1,039.42	1,084.61	1,129.80	1,174.99	1,220.18	1,265.38	1,310.57	1,355.76
Año	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
Gastos	36,153.60	38,413.20	40,672.80	42,932.40	45,192.00	47,451.60	49,711.20	51,970.80	54,230.40	56,490.00	58,749.60	61,009.20	63,268.80	65,528.40	67,788.00
Ingresos	198,902.65	211,334.06	223,765.48	236,196.89	248,628.31	261,059.72	273,491.14	285,922.55	298,353.97	310,785.38	323,216.80	335,648.21	348,079.63	360,511.05	372,942.46
BN	162,749.05	172,920.86	183,092.68	193,264.49	203,436.31	213,608.12	223,779.94	233,951.75	244,123.57	254,295.38	264,467.20	274,639.01	284,810.83	294,982.65	305,154.46
Valores descontados	33,831.92	32,372.49	30,868.84	29,344.18	27,817.55	26,304.42	24,817.19	23,365.68	21,957.47	20,598.31	19,292.37	18,042.49	16,850.44	15,717.08	14,642.51

VAN US\$	851,910.91
Tasa de descuento	11.04%
ROI	5.5

Anexo 5. Cálculo del VAN para el escenario de reforestación del 4% considerando la pérdida del 3% de bosque en un periodo de 30 años (R1)

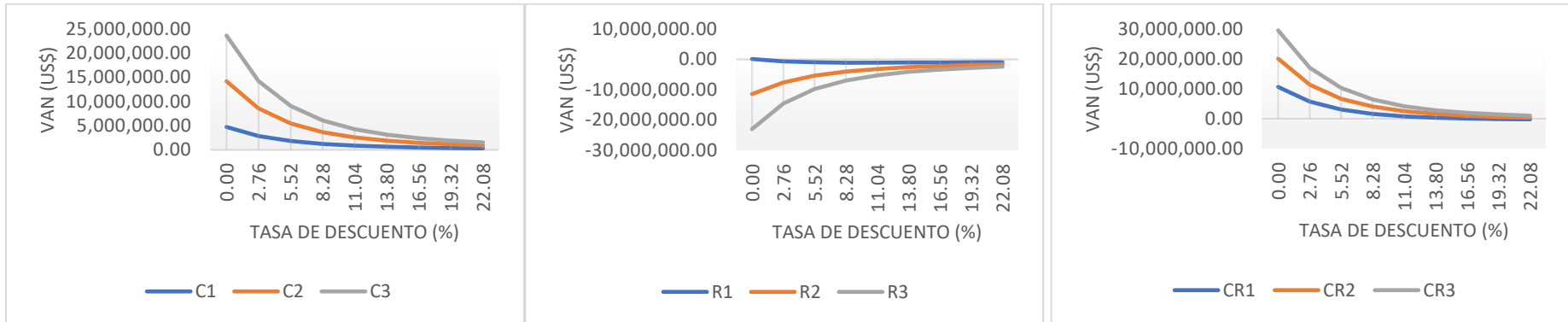
Reforestación	4%														
hectáreas	1,807.68														
costo US\$/ha	800														
Precio dragado US\$	13														
tasa sedimentación	20.16														
Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Hectáreas reforestadas											180.77	361.54	542.30	723.07	903.84
Beneficios perdidos	12,431.42	24,862.83	37,294.25	49,725.66	62,157.08	74,588.49	87,019.91	99,451.32	111,882.74	124,314.15	136,745.57	149,176.98	161,608.40	174,039.82	186,471.23
Gastos	144,614.40	144,614.40	144,614.40	144,614.40	144,614.40	144,614.40	144,614.40	144,614.40	144,614.40	144,614.40					
Ingresos	-12,431.42	-24,862.83	-37,294.25	-49,725.66	-62,157.08	-74,588.49	-87,019.91	-99,451.32	-111,882.74	-124,314.15	-89,369.89	-54,425.63	-19,481.37	15,462.89	50,407.16
BN	-157,045.82	-169,477.23	-181,908.65	-194,340.06	-206,771.48	-219,202.89	-231,634.31	-244,065.72	-256,497.14	-268,928.55	-89,369.89	-54,425.63	-19,481.37	15,462.89	50,407.16
Valores descontados	-157,045.82	-152,627.19	-147,534.79	-141,946.27	-136,010.62	-129,852.11	-123,573.73	-117,260.20	-110,980.56	-104,790.48	-31,361.49	-17,200.04	-5,544.55	3,963.31	11,635.36
Año	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
Hectáreas reforestadas	1,084.61	1,265.38	1,446.14	1,626.91	1,807.68	1,807.68	1,807.68	1,807.68	1,807.68	1,807.68	1,807.68	1,807.68	1,807.68	1,807.68	1,807.68
Beneficios perdidos	198,902.65	211,334.06	223,765.48	236,196.89	248,628.31	261,059.72	273,491.14	285,922.55	298,353.97	310,785.38	323,216.80	335,648.21	348,079.63	360,511.05	372,942.46
Gastos															
Ingresos	85,351.42	120,295.68	155,239.94	190,184.21	225,128.47	212,697.05	200,265.64	187,834.22	175,402.81	162,971.39	150,539.98	138,108.56	125,677.14	113,245.73	100,814.31
BN	85,351.42	120,295.68	155,239.94	190,184.21	225,128.47	212,697.05	200,265.64	187,834.22	175,402.81	162,971.39	150,539.98	138,108.56	125,677.14	113,245.73	100,814.31
Valores descontados	17,742.67	22,520.54	26,172.96	28,876.48	30,783.70	26,192.23	22,209.46	18,759.74	15,776.44	13,200.93	10,981.60	9,073.08	7,435.52	6,033.89	4,837.47

VAN US\$	-1,099,532.48
tasa de descuento	11.04%
ROI	1.1

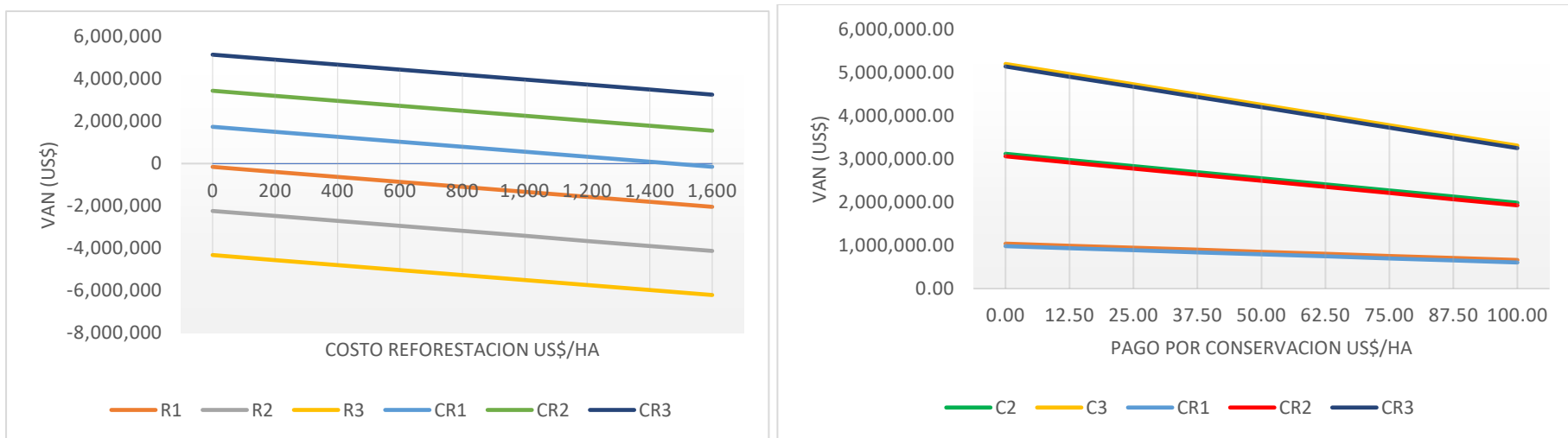
Anexo 6. Cálculo del VAN para el escenario de conservación del 3% de bosque y reforestación del 4% en un periodo de 30 años (CR1)

Reforestación	4%	Conservación	3%												
Hectáreas	1,807.68	Hectáreas	1,355.76												
costo US/ha	800	Pago US\$/ha	50												
Precio dragado	13	Precio dragado US\$	13												
tasa sedimentación	20.16	tasa sedimentación	21.16												
Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Hectáreas reforestadas											180.77	361.54	542.30	723.07	903.84
Beneficios conservación	12,431.42	24,862.83	37,294.25	49,725.66	62,157.08	74,588.49	87,019.91	99,451.32	111,882.74	124,314.15	136,745.57	149,176.98	161,608.40	174,039.82	186,471.23
Costos conservación	2,259.60	4,519.20	6,778.80	9,038.40	11,298.00	13,557.60	15,817.20	18,076.80	20,336.40	22,596.00	24,855.60	27,115.20	29,374.80	31,634.40	33,894.00
Gastos	146,874.00	149,133.60	151,393.20	153,652.80	155,912.40	158,172.00	160,431.60	162,691.20	164,950.80	167,210.40	24,855.60	27,115.20	29,374.80	31,634.40	33,894.00
Ingresos	12,431.42	24,862.83	37,294.25	49,725.66	62,157.08	74,588.49	87,019.91	99,451.32	111,882.74	124,314.15	184,121.25	243,928.34	303,735.43	363,542.52	423,349.62
BN	-134,442.58	-124,270.77	-114,098.95	-103,927.14	-93,755.32	-83,583.51	-73,411.69	-63,239.88	-53,068.06	-42,896.25	159,265.65	216,813.14	274,360.63	331,908.12	389,455.62
Valores descontados	-134,442.58	-111,915.32	-92,538.56	-75,908.54	-61,670.59	-49,513.47	-39,164.13	-30,383.29	-22,961.36	-16,714.92	55,889.16	68,519.09	78,085.13	85,071.68	89,897.09
Año	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
Hectáreas reforestadas	1,084.61	1,265.38	1,446.14	1,626.91	1,807.68	1,807.68	1,807.68	1,807.68	1,807.68	1,807.68	1,807.68	1,807.68	1,807.68	1,807.68	1,807.68
Beneficios conservación	198,902.65	211,334.06	223,765.48	236,196.89	248,628.31	261,059.72	273,491.14	285,922.55	298,353.97	310,785.38	323,216.80	335,648.21	348,079.63	360,511.05	372,942.46
Costos conservación	36,153.60	38,413.20	40,672.80	42,932.40	45,192.00	47,451.60	49,711.20	51,970.80	54,230.40	56,490.00	58,749.60	61,009.20	63,268.80	65,528.40	67,788.00
Gastos	36,153.60	38,413.20	40,672.80	42,932.40	45,192.00	47,451.60	49,711.20	51,970.80	54,230.40	56,490.00	58,749.60	61,009.20	63,268.80	65,528.40	67,788.00
Ingresos	483,156.71	542,963.80	602,770.90	662,577.99	722,385.08	782,192.17	842,000.26	901,808.35	961,616.44	1,021,424.53	796,973.57	809,404.99	821,836.40	834,267.82	846,699.24
BN	447,003.11	504,550.60	562,098.10	619,645.59	677,193.08	734,740.57	792,288.06	850,835.55	909,383.04	967,930.53	738,223.97	748,395.79	758,567.60	768,739.42	778,911.24
Valores descontados	92,922.04	94,456.85	94,767.93	94,083.44	92,598.28	84,644.41	77,356.81	70,681.61	64,569.09	58,973.33	53,852.00	49,166.08	44,879.61	40,959.48	37,375.23
tasa de descuento	11.04%														
VAN US\$	793,535.58														
ROI	5.3														

Anexo 7. Sensibilidad del VAN de las intervenciones ante cambios en la tasa de descuento



Anexo 8. Sensibilidad del VAN de las intervenciones ante cambios en los costos de intervención



Anexo 9. Sensibilidad del VAN de las intervenciones ante cambios el precio de dragado (beneficios)

