



Solutions for environment and development  
Soluciones para el ambiente y desarrollo

**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA**

**DIVISIÓN DE EDUCACIÓN**

**PROGRAMA DE POSGRADO**

**Dinámica de servicios ecosistémicos y comportamiento hidrológico bajo  
escenarios de cambio climático en la región hidrográfica del estero de  
Jaltepeque, El Salvador**

**Por**

**Hedmer Jhoan Martínez Solano**

***MAGISTER SCIENTIAE***

**Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas**

**Turrialba, Costa Rica**

**Octubre, 2019**

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

**MAGISTER SCIENTIAE EN MANEJO Y GESTIÓN INTEGRAL  
DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

**FIRMANTES:**



Ney Ríos, M.Sc.  
**Director de tesis**

Christian Birkel, Ph.D.  
**Miembro Comité Consejero**

William Watler, M.Sc.  
**Miembro Comité Consejero**

Isabel A. Gutiérrez-Montes, Ph.D,  
**Decana Escuela de Posgrado**

Hedmer Jhoan Martínez Solano  
**Candidato**

## DEDICATORIA

A Dios y la Vida.

A mis padres Marco Martínez y Rosmira Solano por haberme forjado como la Persona que soy; muchos de mis logros se los debo a ustedes. Gracias por la motivación constante para alcanzar mis anhelos.

A mis hermanas Angie, Alejandra y Camila por colorear momentos grises.

A mi hermano Santiago por permitirme estar aquí.

## AGRADECIMIENTOS

Para CATIE por brindarme la oportunidad de cumplir una meta dentro de mi plan de vida.

A los Profesores Ney Ríos, William Watler, Sergio Vilchez, Laura Benegas y Christian Birkel por sus consejos, conocimientos y por potenciar atributos dentro de mi formación profesional.

A mis amigos de CATIE por compartir momentos inolvidables y coincidir en este proceso

A Sandra, la Señora Petro, Roberto, Yader, Waldo, Valentin, Edwin T, Vannesa, Rafa, Belkis, Abad, Fabi, Enya, Iraheta, Elio, Isael, Liz, Natalia, Hanna, Eduardo a quienes considero parte de la familia de este Llanero.

## CONTENIDO

<b>CAPITULO I</b> .....	1
1. INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN .....	1
1.1. OBJETIVOS.....	2
1.1.1. Objetivo General .....	2
1.1.2. Objetivos Específicos .....	2
2. MARCO REFERENCIAL .....	3
2.1. Escenarios de Cambio Climático.....	3
2.1. Servicios Ecosistémicos .....	4
2.2. Servicios Ambientales.....	5
2.2.1. Servicios Ambientales Hidrológicos -SAH .....	5
2.2.2. Restauración de Servicios Ambientales Hidrológicos.....	6
2.3. Medidas De Protección De Ecosistemas.....	7
2.3.1. Protección, Recuperación y Mejora de Ecosistemas Alterados.....	8
3. MODELOS HIDROLÓGICOS .....	9
3.1. Definición de Modelos Hidrológicos .....	9
3.2. Importancia de los Modelos Hidrológicos.....	10
3.2.1. Modelos Hidrológicos más usados.....	10
4. Modelo Hidrológico SWAT .....	11
4.1. Calibración del Modelo hidrológico SWAT .....	12
5. HERRAMIENTA RIOS .....	13
5.1. Descripción de la Herramienta RIOS .....	13
5.2. Como Funciona RIOS .....	13
5.2.1. Asesor de Portafolio de Inversiones .....	14
5.2.2. Traductor de Portafolio.....	14
5.3. OBJETIVOS RIOS .....	14
6. Herramienta InVEST .....	14
6.1. Características del Modelo InVEST .....	15
7. BIBLIOGRAFÍA.....	16
<b>CAPITULO II</b> .....	<b>22</b>

ARTICULO I. Utilización del modelo hidrológico SWAT para la determinación del comportamiento hidrológico bajo escenarios de cambio climático en la Región Hidrográfica del Estero de Jaltepeque, El Salvador .....	22
RESUMEN.....	22
ABSTRACT .....	22
INTRODUCCIÓN .....	23
1. MATERIALES Y MÉTODOS.....	24
2.1. Área de Estudio .....	24
2.2. Modelo Hidrológico SWAT .....	25
2.3. Datos de entrada del modelo SWAT.....	27
2.4. SWAT Simulación.....	32
2.5. Calibración.....	33
2.6. Modelos de Circulación General MCG y Trayectorias de concentración representativas (RCP).....	35
3. RESULTADOS .....	36
3.1. Comportamiento Precipitación .....	36
3.2. Componentes Balance Hídrico .....	37
3.3. Calibración del modelo SWAT .....	39
3.4. Comportamiento hidrológico futuro.....	42
3.5. Producción de Agua .....	44
3.6. Erosión.....	46
4. DISCUSIÓN .....	48
4.1. Calibración del Modelo .....	48
4.2. Comportamiento Precipitación .....	49
4.3. Producción de agua .....	50
4.4. Erosión.....	51
5. CONCLUSIONES .....	52
6. RECOMENDACIONES .....	53
7. LITERATURA CITADA.....	53
<b>CAPITULO III .....</b>	<b>61</b>
ARTICULO II. Análisis de la dinámica de servicios ecosistémicos hídricos mediante el uso de insumos de cobertura generados por el traductor de portafolio del software RIOS utilizando la plataforma InVEST.....	61

RESUMEN.....	61
ABSTRACT .....	61
2. INTRODUCCIÓN .....	62
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	63
2.2. Área de Estudio .....	63
2.1. Acoplamiento Modelo SDR-InVEST y RIOS .....	64
2.2. Sistema de Optimización de Inversión en Recursos – RIOS .....	65
2.3. Como Funciona RIOS .....	65
2.4. Requerimiento Datos Espaciales Modelo – RIOS.....	67
2.5. Valoración Integrada de Servicios e Intercambios Ambientales – InVEST.....	70
2.6. Requerimiento Datos Espaciales <i>Modelo de Relación de Suministro de Sedimentos</i> - InVEST.....	71
2.7. Metodología Obtención Buenas Practicas .....	72
3. RESULTADOS .....	73
3.1. Portafolio de Inversiones Priorizado .....	73
3.2. Traductor de portafolio .....	75
3.3. Modelo SDR-InVEST.....	77
3.4. Estimador de Beneficios .....	79
4. DISCUSIÓN .....	82
5. CONCLUSIONES .....	83
6. RECOMENDACIONES .....	83
7. LITERATURA CITADA.....	84

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Medidas de protección y mejora de ecosistemas.....	9
<b>Cuadro 2.</b> Insumos del modelo SWAT .....	27
<b>Cuadro 3.</b> Código SWAT asignado a las coberturas de suelo .....	29
<b>Cuadro 4.</b> Parámetros físicoquímicos de suelos requeridos por el Modelo SWAT.....	30
<b>Cuadro 5.</b> Descripción de los tipos de suelo según Nomenclatura SWAT.....	31
<b>Cuadro 6.</b> Modificación Variables SWAT.....	32
<b>Cuadro 7.</b> Parámetros Iniciales y rangos de calibración en SWAT-CUP.....	34
<b>Cuadro 8.</b> Modelos de Circulación General utilizados en la 3 <sup>a</sup> Comunicación Nacional para la elaboración de los escenarios climáticos, Republica de El Salvador.....	36
<b>Cuadro 9.</b> Parámetros más sensibles. ....	40
<b>Cuadro 10.</b> Resultados Estadísticos Calibración Línea Base .....	41
<b>Cuadro 11.</b> Valores Óptimos de desempeño estadístico (Moriasi et al. 2007) .....	41
<b>Cuadro 12.</b> Línea Base de los componentes hidrológicos y escenarios futuros.....	42
<b>Cuadro 13.</b> Respuesta hidrológica de la RH Estero de Jaltepeque en los periodos de estudio.....	43
<b>Cuadro 14.</b> Clasificación Producción de Agua.....	45
<b>Cuadro 15.</b> Clasificación Perdida Suelo FAO-PNUMA-UNESCO (1981) .....	47
<b>Cuadro 16.</b> Servicios ecosistémicos modelados por RIOS y estrategias de Conservación.....	66
<b>Cuadro 17.</b> Módulos RIOS.....	66
<b>Cuadro 18.</b> Datos espaciales para modelar los objetivos de recarga de acuíferos y control de la erosión.....	67
<b>Cuadro 19.</b> Nomenclatura Cobertura de suelos RIOS.....	69
<b>Cuadro 20.</b> Insumos del modelo SWAT .....	71
<b>Cuadro 21.</b> Objetivos Identificados para la creación de portafolio de inversiones RIOS.....	72
<b>Cuadro 22.</b> Prácticas y costos de implementación del portafolio RIOS .....	72
<b>Cuadro 23.</b> Portafolio de Servicios Priorizado por RIOS.....	74

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Ubicación, subcuencas y Red hídrica Región Hidrográfica Estero de Jaltepeque, Fuente (Ramsar 2013) .....	25
<b>Figura 2.</b> Cobertura del área de estudio en SWAT: relieve (a); usos de suelo (b); clases de pendiente (c); edafología (d).....	29
<b>Figura 3.</b> Componentes del balance hídrico del área de estudio según QSWAT.....	38
<b>Figura 4.</b> Delimitación de Región Hidrográfica Estero de Jaltepeque y ubicación de las estaciones meteorológicas .....	38
<b>Figura 5.</b> Componentes que determinan la Producción de agua en la línea base.....	45
<b>Figura 6.</b> Producción de agua anual promedio contribuido por cada subcuenca al año 2040 bajo los escenarios RCP4,5 y RCP8,5, según cuatro modelos de circulación general .....	46
<b>Figura 7.</b> Proyección de la contribución de Erosión potencial anual promedio por cada subcuenca al año 2040 bajo los escenarios RCP4,5 y RCP8,5, según cuatro modelos de circulación general .....	47
<b>Figura 8.</b> Ubicación, subcuencas y Red hídrica Región Hidrográfica Estero de Jaltepeque, Fuente (Ramsar 2013) .....	64
<b>Figura 9.</b> Uso de suelos según los coeficientes biofísicos de RIOS .....	70
<b>Figura 10.</b> Representación espacial del Portafolio Priorizado .....	74

<b>Figura 11.</b> Escenario de Transiciones de la cubierta vegetal causadas por el portafolio de servicios.....	76
<b>Figura 12.</b> Salida Modelo InVEST SDR escenario Actual (A): exportación de sedimentos; (B): retención sedimentos.....	78
<b>Figura 13.</b> Estimación de Beneficios del establecimiento del Portafolio de inversión.....	79
<b>Figura 14.</b> Metodología espacial InVEST - RIOS-Estimación de Beneficios.....	81

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

<b>Gráfica 1.</b> Distribución multianual de la precipitación.....	37
<b>Gráfica 2.</b> Comportamiento datos mensuales del Caudal Observado y Simulado sin calibrar, interfaz QSWAT.....	39
<b>Gráfica 3.</b> Calibración Región Hidrográfica Estero de Jaltepeque- Estación la Ceiba, microcuenca Rio Jalponga, datos promedio mensuales.....	40
<b>Gráfica 4.</b> Comportamiento WYLD y SYLD línea base frente a los diferentes modelos y escenarios climáticos al 2040.....	44
<b>Gráfica 5.</b> Proceso Modelo RIOS e InVEST.....	65

## **LISTA DE ACRÓNIMOS, ABREVIATURAS Y UNIDADES**

<b>CEPAL</b>	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
<b>GMC</b>	Modelos de Circulación Global
<b>InVEST</b>	Valoración integrada de servicios e Intercambio de ecosistemas
<b>IPCC</b>	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
<b>MARN</b>	Ministerio de Ambiente de Recursos Naturales – El Salvador
<b>MUSLE</b>	Ecuación Universal de Perdida de Suelo Modificada
<b>RCP</b>	Rutas de Concentración Representativas
<b>RIOS</b>	Sistema de Optimización de Inversiones en Recursos
<b>SDR</b>	Distribución de Sedimentos
<b>SEH</b>	Servicios Ecosistémicos Hídricos
<b>SE</b>	Servicios Ecosistémicos
<b>SUFI-2</b>	Ajuste de Incertidumbre Secuencial-2
<b>SWAT</b>	Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua
<b>SWAT-CUP</b>	Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua-Programa de Calibración e Incertidumbre
<b>USDA-ARS</b>	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos - Servicio de Investigación Agrícola
<b>USLE</b>	Ecuación Universal de Perdida de Suelo

## CAPITULO I

### 1. INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN

Los servicios ecosistémicos son los beneficios que los ecosistemas le brindan al ser humano, entre ellos el hídrico (**SEH**) de indispensable y absoluta importancia para el desarrollo de sociedades y como elemento vital para la vida. De acuerdo con la regulación del ciclo hidrológico depende en gran medida de la capacidad de regulación de los ecosistemas, es decir, las propiedades biofísicas del mismo para brindar servicios como lo son la regulación de la calidad y cantidad de agua, la regulación del clima a escalas locales, entre otros (Bennett *et al.* 2009).

Sin embargo, el SEH está siendo afectado por la conversión de ecosistemas naturales a ecosistemas intervenidos acompañado de prácticas inadecuadas tales como: la ampliación de la frontera agrícola (deforestación), ganadería convencional, quemas, prácticas inadecuadas en el manejo del suelo como la eliminación de la cobertura vegetal, la cual acelera los procesos de degradación del suelo y pérdida de la productividad; actividades que contribuyen a la desertificación (Pagliai *et al.* 2004; Castillo *et al.* 2009; Ibáñez y Damman 2010).

Después de haber sucedido el cambio de uso de la tierra, especialmente al transformar un ecosistema nativo a uno agrícola, los procesos biofísicos que controlan el régimen hidrológico también cambian, así mismo los SEH proporcionados se degradan (Reyes y Volpedo 2013). Sin embargo, es posible recuperar los SEH mediante la identificación y puesta en marcha de prácticas de conservación del suelo.

Una forma de conocer el comportamiento del SEH es mediante el uso de herramientas hidrológicas o que permitan cualificar y conocer su dinámica a nivel de cuenca o paisaje bajo escenarios actuales y futuros, lo cual permitirá tener una visión holística de estos procesos a partir de cambios de uso de suelo, actividades de deforestación, clima y/o acciones que modifiquen o transformen el paisaje.

Una de las herramientas más usadas para predecir el impacto de uso y manejo de la tierra en la producción y calidad del agua y sedimentos es la simulación hidrológica, de los cuales el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) es uno de los más usados en los últimos años por ser un modelo robusto (Arnold *et al.* 1998; Neitsch *et al.* 2002; Douglas-Mankin *et al.* 2010; Tuppad *et al.* 2011). Además del modelo hidrológico SWAT, según Vogl *et al.* (2016) se encuentran otras herramientas hidrológicas entre ellas RIOS (Resource Investment Optimization System), la cual toma factores biofísicos de la cuenca, estrategias o actividades de conservación y el costo del establecimiento de cada una, bajo varios escenarios con el fin de determinar la solución óptima de intervención.

Esto convierte al modelo de simulación hidrológica combinada en un instrumento de planificación para la priorización de inversiones en la restauración de servicios hidrológicos puesto que permiten valorar los efectos de los cambios de uso de la tierra y de las distintas actividades de recuperación y de conservación del suelo ofreciendo una base óptima para la toma de decisiones.

## **1.1. OBJETIVOS**

### **1.1.1. Objetivo General**

Estimar la dinámica de los servicios ecosistémicos y el comportamiento hidrológico bajo escenario de cambio climático mediante los modelos hidrológicos RIOS, InVEST y SWAT en la región hidrográfica del estero de Jaltepeque, El Salvador.

### **1.1.2. Objetivos Específicos**

<b>Objetivos Específicos</b>	<b>Preguntas de Investigación</b>
<b>A. Determinar el comportamiento hidrológico bajo escenarios de cobertura y cambio climático utilizando el modelo SWAT.</b>	<p>A. ¿Cuáles son los valores del balance hídrico generados por el modelo SWAT?</p> <p>B. ¿Cuál es el comportamiento hidrológico bajo los escenarios futuros?</p>
<b>B. Analizar la dinámica de servicios ecosistémicos mediante el uso de insumos de cobertura generados RIOS utilizando la plataforma InVEST.</b>	<p>A. ¿Qué características presenta la capa de cobertura generada por RIOS?</p> <p>B. ¿Cuál es el retorno de servicios ecosistémicos? (control de erosión)</p>

## 2. MARCO REFERENCIAL

### 2.1. Escenarios de Cambio Climático

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) define el cambio climático como la *“Variación del estado del clima, identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo”* (IPCC 2007; IPCC 2014).

Las proyecciones del clima futuro tienen un cierto nivel de incertidumbre debido a la naturaleza cambiante del clima y a la dificultad de establecer cuáles serán las emisiones futuras de Gases de Efecto Invernadero (GEI) (Cifuentes Jara 2009), los cuales están ligadas estrechamente al modelo económico y a los factores antropogénicos como el crecimiento de la población, el uso de energías alternativas o renovables, desarrollo tecnológico, económico y político y de la actitud del ser humano para el ambiente.

De acuerdo con lo anterior, un escenario de cambio climático es un conjunto de hipótesis y/o supuestos sobre cómo puede evolucionar la sociedad y su efecto sobre el clima y los sistemas medioambientales, construidos a partir de escenarios de emisiones, denominados SRES (Special Report on Emissions Scenarios), convirtiéndose en la base para la adopción de pautas adecuadas para la adaptación. (Moss *et al.* 2010).

El AR5 (Assessment Report Fifth) del IPCC ha generado cuatro nuevos escenarios futuros de emisiones denominados RCP's (Representative Concentration Pathways), estas se identifican por su FR (Forzamiento Radiactivo) total para el año 2100 que varía desde 2,6 a 8,5 W/m<sup>2</sup> (IPCC 2013; IPCC 2014).

Los RCP utilizados para la realización de las proyecciones describen 4 trayectorias distintas para el siglo XXI de las emisiones y las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero, las emisiones de contaminantes atmosféricos y el uso del suelo. Dichas trayectorias describen un escenario de mitigación estricto (RCP2,6), dos escenarios intermedios (RCP4,5 y RCP6,0) y un escenario con niveles muy altos de emisiones de GEI (RCP8,5) (Meinshausen *et al.* 2011; IPCC 2013).

Los RCP, tienen una mayor cobertura en cuanto a los escenarios del informe especial sobre Escenarios de emisiones utilizados en el AR4, en comparación de las familias con los nuevos RCP, estos pueden tener una equivalencia aproximada: según IPCC (2013) el RCP8,5 puede compararse en términos generales con el escenario A2; RCP6,0 con B2 y RCP4,5 con B1. Respecto a RCP2,6 no hay un escenario equivalente puesto que se caracteriza principalmente por mantener el calentamiento global a menos de 2°C (van Vuuren *et al.*

2011) lo que implica establecer emisiones negativas netas sustanciales, es decir, secuestrar más GEI de los que se libera a la atmosfera (Flato *et al.* 2013).

## **2.1. Servicios Ecosistémicos**

Los Servicios Ecosistémicos, son los bienes y servicios que la sociedad obtiene del funcionamiento de los ecosistemas (Leemans y de Groot 2003; Balvanera 2012), estos beneficios pueden ser directos como por ejemplo la provisión de alimento directamente consumible, las resinas, medicina natural, o indirectos a través de las interacciones entre el ecosistemas que son fundamentales para la vida como por ejemplo la fertilización de los suelos, regulación del microclima o la polinización de la cual depende la producción de los frutos para el consumo humano.

La clasificación de SE más ampliamente utilizada (MEA 2005; Potschin y Haines-Young 2016) distingue ampliamente a cuatro grupos de SE:

- *Servicios de Provisión:* son los bienes y servicios proporcionados por los ecosistemas al mantener que puedan ser aprovechados directamente por las comunidades ligadas a este, como los alimentos, recursos generitos, fuentes de energía o medicinas naturales (Brown *et al.* 2014).
- *Servicios de Regulación:* son los beneficios obtenidos a partir de la interacción y regulación de las propiedades de los ecosistemas, como lo es la calidad del aire, la regulación hídrica y del clima, control biológico y polinización de plantas útiles (Casanoves *et al.* 2011; Polania *et al.* 2011; Balvanera 2012).
- *Servicios Culturales:* relación directa que existe entre las comunidades y sus ecosistemas, donde los beneficios no materiales que estos brindan se convierten en parte esencial de la calidad de vida, tales como los valores estéticos, religiosos, espirituales y turismo asociado a la naturaleza.
- *Servicios de Soporte:* Indicándolos como los servicios necesarios para la producción de los demás servicios, incluido el ciclo de nutrientes, producción de oxígeno, ciclado de nutrientes, provisión de hábitats, ente otros de acuerdo con La Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (2005) y Potschin y Haines-Young (2016).

Cabe destacar que el vínculo entre biodiversidad, servicios ecosistémicos y el bienestar humano está dado por la capacidad de recuperación de los ecosistemas (Chazdon 2008) y el valor que se le atribuye a la naturaleza desde un enfoque integrador.

El Enfoque de SE demuestra como las personas dependemos y nos beneficiamos de los ecosistemas gracias a los múltiples servicios que proveen a la sociedad. De esta manera se

manifiesta que debemos conservar el medio ambiente natural, no solamente por su valor intrínseco, sino porque es vital para el mantenimiento de nuestro bienestar y prosperidad.

## **2.2. Servicios Ambientales**

Son servicios ambientales-SA todos aquellos beneficios que las personas obtienen a partir de la interacción entre los elementos de la naturaleza (especies de fauna y flora, medio físico –abiótico) (Carpenter *et al.* 2006).

Aunque difieren de los servicios ecosistémicos porque son beneficios indirectos, generalmente no transados en los mercados, que la sociedad obtiene de los ecosistemas (Wunder *et al.* 2007), los cuales reciben un valor de acuerdo a los beneficios que provee tanto a las sociedades como a los particulares (Macip-Ríos y Macip 2013). Dentro de los SA más importantes o principales reportados por la literatura (Robertson y Wunder 2005; Wunder 2007; Wunder *et al.* 2007; Cordero *et al.* 2008) se encuentran:

captación y purificación de agua, conservación del suelo, secuestro de Carbono (CO<sub>2</sub>), provisión de polinizadores para la reproducción de poblaciones de plantas y dispersión de semillas, control biológico, reciclaje de nutrientes, conservación de ecosistemas y biodiversidad, provisión de espacios para la recreación y el turismo.

Sin embargo, los SA deben ser evaluados y cuantificados para poder colocarles un precio, aunque es imposible cuantificar y evaluar algunos, debido a que hace falta investigación básica e instrumentos para determinar si el servicio es de bajo, alto o medio rendimiento (Macip-Rios y Macip 2013).

### **2.2.1. Servicios Ambientales Hidrológicos -SAH**

De acuerdo con (Garzón 2009), los SAH tienen una estrecha relación con los componentes del ciclo hidrológicos y son percibidos como los beneficios que las personas obtienen de las funciones de los ecosistemas para la generación de agua en calidad y cantidad apropiadas.

Según (Robertson y Wunder 2005; Cordero *et al.* 2008; Célleri 2010), los principales SAH generados son:

- Regulación de flujos hidrológicos.
- Mantenimiento o Mejora de la calidad del agua (Químicamente buena y reducción de sedimentos en los cursos de agua).
- Recarga de Acuíferos.
- Reducción de la erosión del suelo.
- Conservación de suelos.

Según Robertson y Wunder (2005) los SA que se tratan con mayor frecuencia son los relacionados con secuestro de carbono y los asociados con bosques tropicales. Debido a

que los bosques naturales brindan incontables y valiosos servicios, pero afrontan el problema de la deforestación por lo cual se incrementa la atención de invertir en instrumentos de protección especialmente para la conservación de cuencas hidrográficas y por consiguiente el mantenimiento de servicios hidrológicos.

Los ecosistemas son importantes proveedores de SAH (Célleri 2010), Buytaert *et al.* (2006) sitúa a los páramos ubicados en la parte alta como excelentes reguladores del ciclo hidrológico, sus características de suelo, topografía y vegetación permiten almacenar considerables cantidades de agua y liberarla gradualmente garantizando su provisión constante. Pero la intervención antrópica y el rápido incremento de las actividades humanas en las que resaltan la agricultura y ganadería intensiva, el sobrepastoreo, quema y extracción de madera altera las condiciones de cobertura vegetal, el uso del suelo y la capacidad de regulación del agua en las zonas de montaña, afectando el abastecimiento de agua para consumo humano, la generación de energía eléctrica y otros usos.

Estos servicios hidrológicos están estrechamente ligados con el régimen hidrológico, es decir, con el modo en la cual el agua es liberada al ecosistema al igual que con las propiedades del bosque, especialmente la vegetación, suelo y clima (Manson 2004a). Debido a esto existe una relación muy cercana entre biodiversidad y provisión del recurso hídrico, es decir si el bosque se mantiene sin intervención antrópicas, la biodiversidad se estará siempre alta y los servicios hidrológicos se mantienen en equilibrio.

### **2.2.2. Restauración de Servicios Ambientales Hidrológicos**

Gracias a los diferentes estratos de la vegetación, esta logra interceptar el agua de lluvia, canalizándola en sus hojas, ramas y troncos hasta llegar al suelo, de esta forma se evita la saturación del suelo y (Sundborg y Rapp 1986). Ya en el agua en el suelo favorece la infiltración y recarga de los mantos acuíferos.

Un punto importante es la pérdida de bosque por deforestación como se mencionó anteriormente, pues esta trae consigo una pérdida en las reservas de carbono almacenadas en la biomasa, una remoción completa del bosque no solo afecta el ciclo hidrológico como anteriormente se mencionó, sino, que causa destrucción en la biodiversidad nativa. Sin contar los efectos del sistema aguas abajo que se ve afectado lo cual incide directamente en la vida acuática del lugar, favoreciendo la escorrentía, la erosión hídrica y el depósito de sedimentos en el cauce de los ríos.

Sin duda la remoción de los bosques en la parte alta de la cuenca, genera problemas en la interceptación del agua y detiene el proceso de la recarga de acuíferos generando menor disponibilidad de agua durante la época seca y aumentando el flujo de agua significativamente en los ríos (Bruijnzeel 2004), así como la rapidez con la cual se eleva

el nivel de los mismos por volumen de sedimentos y agua después de las tormentas (Manson 2004b).

Las cuencas deforestadas en las partes altas de la cuenca, son muy vulnerables a la pérdida de suelo por escurrimiento, por ejemplo en zonas relativamente planas, la deforestación aumenta la tasa de erosión de 2 Ton/Ha/año hasta 15 Ton/Ha/Año (Romero y Vásquez 2005), sin embargo con un aumento de pendiente la tasa de erosión del suelo se incrementa significativamente.

La erosión del suelo no solo afecta su productividad, causando muchos problemas adicionales. Al disminuir la capacidad de retención de humedad del suelo la estructura del mismo se pierde y se hace improductiva, además de generar sedimentos en los ríos, conocido como azolve(Granados-Sánchez *et al.* 2006). El azolve de los ríos en zonas deforestadas hace que su cauce sea menos profundo y en combinación con el escurrimiento pluvial se aumenta significativamente el riesgo de inundaciones (Fitzpatrick y Knox 2000).

Este azolve también causa que las presas hidroeléctricas se llenen de sedimentos reduciendo considerable la vida útil de las mismas, en varias partes del mundo, el aumento de las intensidades de las precipitaciones es un tema de preocupación para el sistema hidroeléctrico debido al aumento de la erosión de las cuencas y la sedimentación de los embalses, por lo tanto la conservación de los bosques y suelos de la cuenca aguas arriba es una medida de adaptación al Cambio Climático (Vignola *et al.* 2010).

A mayor grado de deforestación los procesos erosivos aumentan favoreciendo el depósito de sedimentos en los ríos y aumentando la concentración de nutrientes como los nitratos y fosfatos, esta alta concentración puede causar problemas de eutrofización y condiciones anoxias en los cuerpos de agua que conlleven con el desplazamiento de hábitats de especies e inclusive la muerte.

Sin embargo, los bosques y las selvas ayudan en la estabilización de los paisajes y protección de zonas expuestas a tormentas, las raíces profundas de los árboles funcionan como un agregador de las partículas del suelo reteniéndolas y evitando el deslave.

### **2.3. Medidas De Protección De Ecosistemas**

Las actividades adoptadas para la protección y mejora de ecosistemas tienen la finalidad de proteger y conservar los SAH como, la regulación del ciclo hidrológico, mantener la calidad del agua y la recarga del manto acuífero. Generalmente las medidas deben aplicarse en el área de recarga hídrica que coinciden generalmente con la parte alta de la cuenca, aunque también debe darse priorizada a las zonas de ribera donde se establece generalmente recuperación y restauración de franjas marginales.

### **2.3.1. Protección, Recuperación y Mejora de Ecosistemas Alterados**

La intervención antrópica puede incidir en la estructura de la vegetación, características del suelo y modificación del paisaje mediante prácticas inadecuadas para el medio ambiente (Puig et al. 2018). La aplicación de medidas se realiza con el objetivo de mejorar la provisión de SAH, entre las prácticas se encuentran se recomiendan (Valdés S. 2008, Zaccagnini et al. 2014):

- Permitir la regeneración de ecosistemas naturales mediante la restricción del acceso y uso del suelo.
- Recuperación de la cobertura vegetal mediante introducción de especies no forestales que evitan la erosión e introducen sombra al suelo, favoreciendo la regeneración natural y aplicando medidas al suelo para retener los sedimentos.
- La reforestación y forestación mediante especies nativas de rápido crecimiento y adaptabilidad.

También se establecen medidas para mejorar las condiciones de ecosistemas alterados disminuyendo la presión hacia ellos y mejorando las condiciones del suelo. Las medidas que se toman para mejorar las condiciones del suelo son:

- Introducción de Sistemas Agroforestales SAF, donde se mezclan diferentes especies arbóreas con diferentes alturas y ciclos permitiendo generar sombra sobre el suelo y aportando mayor materia orgánica al mismo (Pinho et al. 2012, Shibu 2009).
- Mejora de practica agrícolas mediante la enseñanza de prácticas de labranza que no erosionen el suelo y el reemplazo de fertilizantes y pesticidas de uso químico por orgánico (Shibu 2009).
- Mejores prácticas ganaderas mediante la implementación de Sistemas Silvopastoriles, la tabulación del ganado y las prácticas de manejo de pasturas (Abberton et al. 2010).

La introducción de las prácticas poseen la estrategia de factor clave de implementación, especialmente al no desplazar la actividad original de los productores, es decir, en vez de restringir el uso a los propietarios les resulta un beneficio a través de mejor productividad en las tierras, menor esfuerzo laboral y/o mejores ingresos económicos (Quintero 2009). A continuación, en el cuadro 1 se enumeran las prácticas y/o medidas de protección y mejora de Ecosistemas.

**Cuadro 1.** Medidas de protección y mejora de ecosistemas

<b>MEDIDAS DE PROTECCIÓN Y MEJORA DE ECOSISTEMAS</b>	
<b>Protección de Ecosistemas Naturales</b>	Restricción de Uso
<b>Recuperación de Ecosistemas</b>	Regeneración Natural
	Reforestación
	Recuperación de la Cobertura Vegetal
<b>Mejoras de Ecosistemas Alterados</b>	Agroforestería
	Mejoras Prácticas Agrícolas
	Mejoras Prácticas Ganaderas
	Mejoras Prácticas Silvícolas
	Granjas Integrales
	Alternativas Productivas

Fuente: Con base en **Celleri, 2010**.

### **3. MODELOS HIDROLÓGICOS**

#### **3.1. Definición de Modelos Hidrológicos**

Los modelos hidrológicos son herramientas que nos ayudan a comprender y nos permiten predecir los desafíos que enfrenta el recurso hídrico en el futuro (Abdulla et al. 1996), así como su funcionamiento en un entorno alterado por el hombre y el clima, los cuales incluyen desde los procesos de eventos extremos (sequías e inundaciones), eventos sociales como la presión del crecimiento económico y la población en los recursos naturales (Wu et al. 2012, Salathé 2005).

Sin embargo, antes de aplicar un modelo hidrológico se debe conocer el funcionamiento del ciclo hidrológico lo que implica entender la respuesta de la cuenca en la generación de agua en tiempo y espacio y como sus propiedades biofísicas determinan la calidad y cantidad de esta. Bajo este marco los modelos se representan como una herramienta para conocer mejor el comportamiento y funcionamiento de las diferentes interacciones entre los componentes del ciclo hidrológico (Arnold *et al.* 1995). Por este motivo la base de los modelos hidrológicos es la modelación de cuencas.

Cada cuenca tiene condiciones particulares en su cobertura vegetal, clima y geomorfología por lo cual no todos los modelos se ajustan a las cuencas del planeta, es decir, los modelos no son perfectos, porque carecen de entendimiento de los procesos propios del sistema y su capacidad predictiva depende de cómo lo construimos y como lo aplicamos (Cabrera 2012).

La modelación hidrológica se aplica con varias finalidades, especialmente para la mejora del conocimiento en los procesos y el análisis de los escenarios futuros.

### 3.2. Importancia de los Modelos Hidrológicos

Su importancia radica en la predicción, estimación y simulación del comportamiento hidrológico en los procesos físicos de la cuenca Torres Benites *et al.* (2005), evaluando las entradas y salidas del sistema para estudiar la relación causa y efecto a corto, mediano y largo plazo y poder entender el comportamiento de las variables que condicionan la producción de agua y sedimentos, evaluar escenarios futuros y realizar cambios en el modelo hidrológico para evaluar la reacción del sistema real convirtiéndose en una herramienta útil para la toma de decisiones.

#### 3.2.1. Modelos Hidrológicos más usados

La importancia en los modelos hidrológicos computacionales de cuencas radica entre otros aspectos, en la simulación y predicción de fenómenos físicos a corto, mediano y largo plazo, obteniendo relaciones de causa y efecto sin haber realizado cambios en los sistemas reales. Los modelos hidrológicos son entonces representaciones simplificadas de los sistemas hidrológicos reales (base física = "Cuenca Hidrográfica") que nos permiten estimar con eficiencia el comportamiento del ciclo hidrológico.

Entre los modelos hidrológicos más usados y destacados se encuentran los siguientes:

- « **HEC-HMS:** Centro Hidrológico de Ingeniería (por sus siglas en Ingles, HEC), Sistema de Modelación Hidrológica (Por sus siglas en Ingles, HMS) es un modelo de eventos desarrollado por el US Fuerza de Ingeniero de la Armada de los Estados Unidos (Acevedo y Redfearn 2008; Halwatura y Najim 2013). Permite la simulación del fenómeno de la lluvia-escorrentía de cuencas con drenaje dendrítico. El modelo se ha utilizado en un rango amplio de situaciones en los que incluye desde disponibilidad de agua y problemas de inundaciones para grandes cuencas hasta el drenaje urbano de pequeñas cuencas (Umaña-Quirós 2014; Santos Rueda 2017).
- « **SOBEK:** Es un software integrado para la gestión de ríos, manejo urbano – rural y la simulación de la cantidad y calidad del agua en estas áreas permitiendo analizar problemas de la gestión integral del agua, simulación hidráulica para el estudio de inundaciones, evolución de caudales y niveles del agua en un curso de agua y zonas adyacentes (Quiroga *et al.* 2013). SOBEK resulta óptimo para los estudios referentes a prevención de los desastres, redacción de planes urbanísticos y de gestión de cuencas (Fattorelli y Fernández 2011).
- « **WEAP:** Sistema de Planificación y evaluación del Agua (por sus siglas en Ingles, WEAP) es una herramienta que provee un enfoque integral para la planificación del recurso hídrico que puede ser aplicado a diferentes escalas, desde pequeñas zonas de captación hasta extensas cuencas (Sieber y Purkey 2011). Según Escobar y

Vicuña (2009) WEAP incluye demandas de agua con prioridades asociadas y usa escenarios para evaluar diferentes esquemas de distribución del recurso.

Entre los modelos más destacados se encuentran La Herramienta de Evolución de Suelos y Agua (Por sus siglas en inglés, SWAT), Sistema de Optimización de Inversión en Recursos (Por sus siglas en inglés, RIOS) y el modelo de Valoración Integrada de Servicios e Intercambios Ambientales (Por sus siglas en inglés, InVEST) los cuales se describen a continuación.

#### 4. Modelo Hidrológico SWAT

La Herramienta de Evolución de Suelos y Agua (SWAT, Por sus siglas en Inglés), es un software de modelamiento hidrológico, diseñado por el Dr. Jeff Arnold para el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, siglas en Ingles) y el Servicio Agrícola de Investigación (ARS, siglas en Ingles), fue desarrollado para predecir el impacto de las prácticas de manejo del suelo en la generación de agua, producción de sedimentos y producción de sustancias agrícolas químicas, en cuencas grandes y complejas con variedad de suelos, uso de tierra y condiciones de manejo sobre un tiempo prolongado. También evalúa los efectos del cambio en el paisaje, las prácticas de gestión en materia de agua y los rendimientos químicos agrícolas en una cuenca hidrográfica (Neitsch *et al.* 2011).

El modelo está conformado por un conjunto de submodelos, los cuales se pueden emplear para simular distintos procesos hidrológicos. SWAT está basado en la ecuación general de balance hídrico (Arnold *et al.* 2013).

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

Ecuación General de Balance Hídrico, Tomado de (Neitsch *et al.* 2011)

Donde:

**SW<sub>t</sub>** = Contenido final de agua en el suelo (mm).

**SW<sub>0</sub>** = Contenido Inicial de agua en el suelo diario (mm).

**t** = Tiempo (días).

**R<sub>day</sub>** = Precipitación diaria (mm).

**Q<sub>surf</sub>** = Escorrentía Superficial diaria (mm).

**E<sub>a</sub>** = Evapotranspiración diaria (mm).

**W<sub>seep</sub>** = Cantidad de agua infiltrada en el suelo diariamente (mm).

**Q<sub>gw</sub>** = Flujo de retorno diario (mm).

Los principales componentes del modelo pueden ser ubicados en ocho grupos principales: hidrología, clima, sedimentación, temperatura del suelo, crecimiento de cultivos, nutrientes, pesticidas y manejo de cultivos. El módulo más importante y que sirve como base para los

demás es el hidrológico, lo que significa que cualquier error en su calibración puede invalidar los resultados de los demás módulos (Valenzuela 2006; Fernández y Prados 2010).

Los datos de entrada son un factor de gran importancia pues de su calidad y cantidad depende la confiabilidad de los resultados. De acuerdo con Ramírez Cruz (2015), el modelo requiere los siguientes datos:

- Topografía en formato Ráster.
- Suelo en Formato Ráster o Vectorial.
- Uso del Suelo en Formato Ráster o Vectorial.
- Manejo de datos de producción en cuanto a uso de fertilizantes, tipo de labranza, número de cabezas de ganado.
- Datos de caudal de río.
- Clima: Precipitación, Temperatura Máxima y mínima, velocidad del viento, humedad relativa, radiación solar.

Para la simulación el modelo divide la unidad de estudio en secciones más pequeñas con la finalidad de brindar datos más seguros y confiables. Estas secciones más pequeñas se denominan Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU, por sus siglas en inglés) y son obtenidas del cruce de los diferentes tipos de suelo (textura), con el uso o la cobertura del suelo y pendiente. Cada HRU se obtiene de las combinaciones de los diferentes factores mencionados, es decir, cada polígono de HRU tienen un mismo suelo, cobertura vegetal y pendiente (Uribe 2010).

#### **4.1. Calibración del Modelo hidrológico SWAT**

La calibración es el proceso por el cual se identifican los valores de los parámetros del modelo que mejor ajustan la serie de datos simulados a los observados. La calibración del modelo implica correr el modelo usando los parámetros determinados en el proceso de calibración (Moriassi *et al.* 2007), otra definición según Bonaldi *et al.* (2011) es el procedimiento de asignar valores a los parámetros en búsqueda de la máxima coherencia entre el objetivo y las herramientas que se evaluarán. Se recomienda que la calibración se cumpla en el siguiente orden: a) balance de agua y producción de agua; b) sedimentos y c) nutrientes.

En la validación y calibración del modelo se utilizan estadísticos que sirven para determinar el grado de semejanza entre la serie observada y la simulada (Guzmán *et al.* 2004). uno de ellos es el coeficiente de determinación  $R^2$ , que mide la correlación entre los datos observados y los simulados (Moriassi *et al.* 2007), un  $R^2$  de 1 es una correlación perfecta e indica un modelo preciso. También se han utilizado un método denominado el Porcentaje bias (PBIAS), que mide la tendencia de los datos simulados para ser mayor o menor que su

contraparte (datos observados) , el valor optimo del PBIAS es 0 (Moriassi *et al.* 2007), valores negativos indican tendencia a la sobreestimación y positivos a la subestimación.

## 5. HERRAMIENTA RIOS

### 5.1. Descripción de la Herramienta RIOS

El Sistema de Optimización de Inversiones en Recursos (RIOS, por sus siglas en inglés) es una herramienta de Sistemas de Información Geográfica, SIG. fue desarrollado por el Nature Capital Project (NatCap), en estrecha colaboración con The Nature Conservancy (TNC) y la Alianza Latinoamericana de Fondos de Agua (una sociedad entre The Nature Conservancy, el Banco Interamericano de Desarrollo, el FMAM y FEMSA). RIOS es una herramienta de software para la priorización de las inversiones en los servicios ecosistémicos (Vogl *et al.* 2016).

La herramienta RIOS puede establecer un portafolio de servicios a partir del análisis de variables como:

Control de Erosión para agua potable, Control de Erosión para reservorios de agua, Retención de Nutrientes (Fósforo), Retención de Nutrientes (Nitrógeno), Mitigación de inundaciones, Recarga Acuífera, Control y regulación del Caudal, Biodiversidad además de poder realizar un análisis de productividad de los servicios mediante la inclusión de modelos de cambio climático para evaluar que tan productivo pueden ser la inversión de los recursos y el rendimiento y comportamiento de las variables en la generación de recursos naturales.

RIOS actualmente trabaja específicamente con los Fondos de Agua con el fin de conservar y proteger sistemas hídricos a lo largo del planeta mediante inversiones directas en infraestructura verde, para asegurar agua en cantidad y calidad para los seres vivos asociados a estos sistemas(Vogl *et al.* 2016). De esta manera RIOS se convierte en una herramienta ideal para la planificación de inversión inteligente en zonas que mantengan la calidad del ecosistema y aseguren la provisión de servicios ecosistémicos.

En los Fondos de Agua se trata de colocar la mayor cantidad de recursos, dinero, en esas áreas prioritarias de protección, conservación, manejo y buenas prácticas. RIOS permite identificar cuáles áreas van a ser las prioritarias para obtener los mejores resultados para controlar inundaciones, sedimentación, infiltración y erosión, por citar solo algunas.

### 5.2. Como Funciona RIOS

RIOS es una herramienta de sistemas de información geográfica SIG, que consta de un premódulo en ARCGIS (preparación de datos) y tres módulos principales.

### **5.2.1. Asesor de Portafolio de Inversiones**

Asesor del Portafolio de Inversiones, combina varios de los componentes básicos, datos tipo espacial, información sobre las actividades y sus costos asociados para poder desarrollar un portafolio de inversiones destinados a maximizar el retorno de servicios ecosistémicos.

El portafolio de inversiones es un mapa de actividades (por ejemplo, protección, restauración, reforestación) el cual muestra el conjunto probablemente más eficiente y eficaz de inversiones que un fondo de agua puede hacer (Vogl *et al.* 2016).

### **5.2.2. Traductor de Portafolio**

El traductor de Portafolio es el segundo módulo de RIOS, en el cual se estima un escenario que refleja las condiciones futuras de la cuenca si se implementara el portafolio seleccionado del primer módulo (Vogl *et al.* 2016), es decir genera un mapeo en el cual identifica las actividades priorizadas y estima el rendimiento para evidenciar las condiciones de la cuenca si se ejecutara las actividades en el tiempo.

## **5.3. OBJETIVOS RIOS**

Los objetivos que brinda la herramienta RIOS, hace referencia a los servicios ecosistémicos que se quieren recuperar o maximizar el retorno en el área de intervención, son los siguientes:

- a. Control de la Erosión para la calidad de agua.
- b. Control de la Erosión para el mantenimiento de Reservorios.
- c. Retención de Nutrientes – Nitrógeno.
- d. Retención de Nutrientes – Fosforo.
- e. Mitigación de Inundaciones.
- f. Mejoramiento de la Recarga de Acuíferos.
- g. Caudal base en estación seca.
- h. Biodiversidad.
- i. Otros\*.

\*El Ítem I, se incluyen para que los usuarios puedan incorporar otros modelos o fuentes de datos para hacer frente a otros objetivos como por ejemplo la variable de cambio climático.

## **6. Herramienta InVEST**

El modelo de Valoración Integrada de Servicios e Intercambios Ambientales (InVEST, por sus siglas en inglés) es un permite cuantificar, mapear y valorar servicios ambientales. Desarrollado por el Proyecto Capital Natural (NatCap), (Kareiva 2011; Tallis y Polasky 2011), y un equipo interdisciplinario de científicos y líderes de la universidad de Stanford, The

Nature Conservancy, Fondo Mundial para la Vida Silvestre, y la Universidad de Minnesota (Sharp et al. 2016). El Proyecto tiene como objetivo integrar los valores de la naturaleza en todas las decisiones importantes que afectan el medio ambiente y el bienestar humano.

InVEST es una herramienta de evaluación de SE estandarizados, software de libre acceso la cual pueden descargar en el sitio web <https://www.naturalcapitalproject.org/invest/>, se compone en un conjunto de (18) modelos adaptados a condiciones terrestre, de agua dulce y ecosistemas marinos que utilizan datos en formato ráster de topografía, uso del suelo, cobertura vegetal, precipitación y evapotranspiración para estimar niveles de valoración de servicios ecosistémicos (Pacha 2014) utilizados para mapear y valorar los bienes y servicios de la naturaleza (Sharp *et al.* 2016).

El modelo InVEST se ha utilizado con mayor eficiencia dentro de los procesos de Ordenamiento Territorial, para facilitar la toma de decisiones de actores claves del territorio (Goldman-Benner *et al.* 2012), diseñado con el propósito de generar información (mapeo, identificación y valoración de SE) sobre la toma de decisiones y el manejo de los recursos naturales, además de estimar en qué lugar del territorio se generan los SE y donde se consumen (Pacha 2014).

InVEST a menudo utiliza un enfoque de función de producción para cuantificar y valorar los SE, y de esta manera determinar el impacto de los cambios de producción en la tierra, agua o en los niveles de rendimiento de los SE, denominándolos como "oferta, valor y servicio" de esta manera vincula funciones de producción sobre los beneficios proporcionados a las personas (Daily *et al.* 2009).

### **6.1. Características del Modelo InVEST**

El modelo InVEST se compone de un conjunto de modelos que utilizan los patrones espaciales de uso del suelo (LU) y de cobertura vegetal (LC) (Pacha 2014) para estimar la valoración de los servicios que proveen los ecosistemas naturales.

El modelo se ejecuta en un mapa reticulado con un intervalo de tiempo anual; sus resultados se pueden obtener en términos biofísicos o en términos monetarios, en función de las necesidades y de la disponibilidad de información. InVEST incluye modelos para cuantificar, graficar y evaluar espacialmente los beneficios proporcionados por los sistemas terrestres, de agua dulce y marinos (Nelson *et al.* 2009; Brandizi *et al.* 2014).

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo, MF; Redfearn, H. 2008. Modelación de los cambios de cobertura del territorio y sus consecuencias hidrológicas *Environmental Management* 72(1-2):94-103.
- Acevedo, MF; Redfearn, H. 2008. Modelación de los cambios de cobertura del territorio y sus consecuencias hidrológicas *Environmental Management* 72(1-2):94-103.
- Arnold, J; Kiniry, J; Srinivasan, R; Williams, J; Haney, E; Neitsch, S. 2013. SWAT 2012 Input/Output Documentation. Texas Water Resources Institute.
- Arnold, JG; Williams, JR; Maidment, DR. 1995. Continuous-time water and sediment-routing model for large basins *Journal of Hydraulic Engineering* 121(2):171-183.
- Arnold, JG; Srinivasan, R; Muttiah, RS; Williams, JR. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 34(1):73-89.
- Balvanera, P. 2012. Los servicios ecosistémicos que ofrecen los bosques tropicales (Regulación climática; recursos; cultura; manejo de bosques tropicales; servicios de regulación; servicios culturales). (2012).
- Benavides Santamaría, RE; Buendía Mena, EK; Henríquez Alfaro, JC; Rivas Landaverde, ODJ. 2005. Plan maestro ruta turística estero de Jaltepeque y anteproyectos arquitectónicos de los complejos turísticos en San Luís La Herradura y La Puntilla. Tesis Universidad de El Salvador.
- Bennett, EM; Peterson, GD; Gordon, LJ. 2009. Understanding relationships among multiple ecosystem services *Ecology letters* 12(12):1394-1404.
- Bonaldi, P; Prada, JD; González, A; Rodríguez, D; Rojas, LE. 2011. Método numérico para la calibración de un modelo DSGE *Desarrollo y Sociedad*(68):119-156.
- Brandizi, L; Flaherty, S; Pessacg, N; Liberoff, A; García Azorey, M; Pascual, M. 2014. Valoración de servicios ecosistémicos en el Río Chubut. Red Ecofluvial de la Patagonia. *In*, Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. p.
- Brown, C; Reyers, B; Ingwall-King, L; Mapendembe, A; Nel, J; O'Farrell, P; Dixon, M; Bowles-Newark, N. 2014. Measuring ecosystem services: Guidance on developing ecosystem service indicators UNEP-WCMC, Cambridge, UK:
- Bruijnzeel, LA. 2004. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? *Agriculture, ecosystems & environment* 104(1):185-228.
- Buytaert, W; Céleri, R; De Bièvre, B; Cisneros, F; Wyseure, G; Deckers, J; Hofstede, R. 2006. Human impact on the hydrology of the Andean páramos *Earth-Science Reviews* 79(1):53-72.
- Cabrera, J. 2012. Calibración de modelos hidrológicos. Peru, (Instituto Para la Investigacion de los Efectos del Niño).
- Carpenter, SR; Bennett, EM; Peterson, GD. 2006. Scenarios for Ecosystem Services: An Overview *Ecology and Society* 11(1): doi 10.5751/ES-01610-110129
- Casanoves, F; Pla, L; Di Rienzo, JA. 2011. Valoración y análisis de la diversidad funcional y su relación con los servicios ecosistémicos:

- Castillo, V; BOIX FAYOS, C; De Vente, J; MARTÍNEZ MENA, M; Barberá, G. 2009. Efectividad de los proyectos de restauración hidrológico forestal para el control de la erosión en cuencas mediterráneas *Advances in Studies on Desertification*. Editum, Murcia:199-2002.
- Céleri, R. 2010. Estado del conocimiento técnico científico sobre los servicios ambientales hidrológicos generados en los Andes. *In* Quintero, M (ed.). *Servicios Ambientales Hidrológicos en la Región Andina*. CONDESAN, IEP. Lima. Lima, Peru, CONDENA. p. 25-45.
- Chazdon, RL. 2008. Beyond deforestation: restoring forests and ecosystem services on degraded lands *science* 320(5882):1458-1460.
- Cifuentes Jara, M. 2009. ABC del cambio climático en Mesoamérica. CATIE, Turrialba (Costa Rica).
- Cordero, D; Moreno, A; Kosmus, M. 2008. Manual para el desarrollo de mecanismos de pago/compensación por servicios ambientales GTZ/Inwent, Lima:
- Daily, GC; Polasky, S; Goldstein, J; Kareiva, PM; Mooney, HA; Pejchar, L; Ricketts, TH; Salzman, J; Shallenberger, R. 2009. Ecosystem services in decision making: time to deliver *Frontiers in Ecology and the Environment* 7(1):21-28.
- Douglas-Mankin, K; Srinivasan, R; Arnold, J. 2010. Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model: Current developments and applications *Transactions of the ASABE* 53(5):1423-1431.
- Escobar, M; Vicuña, S. 2009. Guía Metodológico: Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos Con El Modelo Weap. A joint publication of Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile and Stockholm Environment Institute.
- Fattorelli, S; Fernández, PC. 2011. Diseño Hidrológico 2da Edición (Edición Digital), cap. I, sección 2:
- Fernández, M; Prados, MJ. 2010. Cambios en las coberturas y usos del suelo en la cuenca del río Guadalfeo (1975-1999) *Geofocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*(10):158-184.
- Fitzpatrick, FA; Knox, JC. 2000. Spatial and temporal sensitivity of hydrogeomorphic response and recovery to deforestation, Agriculture, and floods *Physical Geography* 21(2):89-108. Disponible en <http://pubs.er.usgs.gov/publication/70022451>
- Flato, G; Marotzke, J; Abiodun, B; Braconnot, P; Chou, SC; Collins, W; Cox, P; Driouech, F; Emori, S; Eyring, V; Forest, C; Gleckler, P; Guilyardi, E; Jakob, C; Kattsov, V; Reason, C; Rummukainen, M. 2013. *Evaluation of Climate Models*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press. 741–866 p. Disponible en [www.climatechange2013.org](http://www.climatechange2013.org)
- Garzón, A. 2009. Estado de la Acción sobre los Mecanismos de Financiamiento de la Protección y Recuperación de los Servicios Ambientales Hidrológicos. *In* Quintero, M (ed.). *Informe Final de la Síntesis Regional Sobre Servicios Ambiental Hídricos en Los Andes*. Lima, Peru, CONDENA. p. 47 - 90.

- Goldman-Benner, RL; Benitez, S; Boucher, T; Calvache, A; Daily, G; Kareiva, P; Kroeger, T; Ramos, A. 2012. Water funds and payments for ecosystem services: practice learns from theory and theory can learn from practice *Oryx* 46(1):55-63.
- Gómez Varela, GI; González Rodríguez, EE. 2012. Aplicación de la legislación relativa a las áreas naturales protegidas. Caso: Estero de Jaltepeque. Tesis Universidad de El Salvador.
- Granados-Sánchez, D; Hernández-García, M; López-Ríos, G. 2006. Ecología de las zonas ribereñas *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente* 12(1):
- Guzmán, E; Bonini, J; Matamoros, D. 2004. Aplicación del modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para la predicción de caudales y sedimentos en una cuenca hidrográfica Caso de estudio: Cuenca del Rio Chaguana *Revista Tecnológica* 17(1):152-161.
- Halwatura, D; Najim, M. 2013. Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment *Environmental modelling & software* 46:155-162.
- Ibáñez, N; Damman, G. 2010. Indicadores de desertificación en Apurímac: relaciones espaciales entre degradación de suelos y presiones antrópicas *Zonas Áridas* 14(1):214-229.
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Solomon, S; Qin, D; Manning, M; Chen, Z; Marquis, M; Averyt, KB; Tignor, M; Miller, HL (eds.). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press. 996 p.
- IPCC. 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Stocker, TF; Qin, D; Plattner, G-K; Tignor, M; Allen, SK; Boschung, J; Nauels, A; Xia, Y; Bex, V; Midgley, PM (trads.). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press. 1535 p. Disponible en [www.climatechange2013.org](http://www.climatechange2013.org) doi 10.1017/CBO9781107415324
- IPCC. 2014. *Cambio Climático. Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad - Resumen para responsables de políticas*. Dokken, DJ; Mach, KJ; Mastrandrea, MD; Bilir, TE; Chatterjee, M; Ebi, LK; Estrada, YO; Genova, RC; Girma, B; Kissel, ES; Levy, AN; MacCracken, S; Mastrandrea, PR; White, LL (eds.). Buendía, EC; Moreno, JM (trads.). Ginebra, Suiza, Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. 34 p. (Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático ). No. 5to Informe. Disponible en [www.ipcc-wg2.gov/AR5](http://www.ipcc-wg2.gov/AR5)
- Jones, PG; Thornton, PK. 2013. Generating downscaled weather data from a suite of climate models for agricultural modelling applications *Agricultural Systems* 114:1-5.
- Leemans, R; de Groot, R. 2003. *Millennium Ecosystem Assessment: Ecosystems and human well-being: a framework for assessment*. Island Press.

- Macip-Rios, R; Macip, RF. 2013. Pago por servicios ambientales (ecosistémicos) en México— ¿ Una Alternativa para la Conservación de la Biodiversidad y El Desarrollo?|| Revista biocyt 6(20):375-387.
- Manson, RH. 2004a. Los servicios hidrológicos y la conservación de los bosques de México Madera y Bosques 10(1):3-20.
- Manson, RH. 2004b. Los servicios hidrológicos y la conservación de los bosques de México Madera y Bosques 10(1):
- MARN. 2013. 2a Comunicacion Nacional sobre Cambio Climatico. El Salvador, Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 136 p.
- MARN; BID; AECID. 2013. Elaboración De Planes De Manejo De Microcuencas Y La Ejecución De Obras De Conservación De Suelos Y Agua, Región Hidrográfica Del Estero De Jaltepeque. MARN (ed.) San Salvador, (Plan De Manejo Región Hidrográfica Del Estero De Jaltepeque).
- MEA, MEA. 2005. Ecosystems and human well-being: synthesis Island, Washington, DC:
- Meinshausen, M; Smith, SJ; Calvin, K; Daniel, JS; Kainuma, MLT; Lamarque, JF; Matsumoto, K; Montzka, SA; Raper, SCB; Riahi, K; Thomson, A; Velders, GJM; Vuuren, DPP. 2011. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300 Climatic Change 109(1-2):213-241. doi 10.1007/s10584-011-0156-z
- Molina, O; Monzón, RFV; Velásquez, CAZ; Meléndez, VZ; López, W; Barraza, E; Fuentes, W. 2010. Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar, Complejo Jaltepeque (FIR/CJ):
- Moriasi, DN; Arnold, JG; Van Liew, MW; Bingner, RL; Harmel, RD; Veith, TL. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations Transactions of the ASABE 50(3):885-900.
- Moss, RH; Edmonds, JA; Hibbard, KA; Manning, MR; Rose, SK; Van Vuuren, DP; Carter, TR; Emori, S; Kainuma, M; Kram, T. 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment Nature 463(7282):747.
- Neitsch, S; Arnold, J; Kiniry, Jea; Srinivasan, R; Williams, J. 2002. Soil and water assessment tool user's manual version 2000 GSWRL report 202(02-06):
- Neitsch, SL; Arnold, JG; Kiniry, JR; Williams, JR. 2011. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. Texas Water Resources Institute.
- Nelson, E; Mendoza, G; Regetz, J; Polasky, S; Tallis, H; Cameron, D; Chan, K; Daily, GC; Goldstein, J; Kareiva, PM. 2009. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales Frontiers in Ecology and the Environment 7(1):4-11.
- Pacha, M. 2014. Valoracion de los servicios ecosistemicos como herramienta para la toma de decisiones: Bases conceptuales y lecciones aprendidas en la Amazonia. Brasilia, Iniciativa Amazonica Viva, WWF.
- Pagliai, M; Vignozzi, N; Pellegrini, S. 2004. Soil structure and the effect of management practices Soil and Tillage Research 79(2):131-143.

- Polania, C; Pla, L; Casanoves, F. 2011. Diversidad funcional y servicios ecosistémicos Valoración y análisis de la diversidad funcional y su relación con los servicios ecosistémicos. Serie Técnica 384:
- Potschin, M; Haines-Young, R. 2016. Defining and measuring ecosystem services Potschin, M., Haines-Young, R., Fish, R., Turner, RK (Eds.), Routledge Handbook of Ecosystem Services. Routledge, London and New York:25-44.
- Quintero, M. 2009. Effects of conservation tillage in soil carbon sequestration and net revenues of potato-based rotations in the Colombian Andes. Tesis University of Florida.
- Quintero, M. 2010. Servicios ambientales hidrológicos en la región andina: Estado del conocimiento, la acción y la política para asegurar su provisión mediante esquemas de pago por servicios ambientales. IEP; CONDESAN.
- Quiroga, VM; Popescu, Ia; Solomatine, D; Bociort, L. 2013. Cloud and cluster computing in uncertainty analysis of integrated flood models Journal of Hydroinformatics 15(1):55-70.
- Ramírez Cruz, H. 2015. Aplicación del modelo SWAT para el análisis del flujo base en una cuenca mexicana del pacífico sur:
- Reyes, LF; Volpedo, AV. 2013. Evaluación de los cambios de estado en ecosistemas degradados de Iberoamérica:
- Robertson, N; Wunder, S. 2005. Fresh tracks in the forest: assessing incipient payments for environmental services initiatives in Bolivia. CIFOR.
- Rodríguez, E. 2012. Documento de diagnóstico del Bajo Lempa y Estero de Jaltepeque:
- Romero, H; Vásquez, A. 2005. Evaluación ambiental del proceso de urbanización de las cuencas del piedemonte andino de Santiago de Chile Eure (Santiago) 31(94):97-117.
- Santos Rueda, MD. 2017. Modelamiento del escurrimiento por el software Hec-Hms para predecir el comportamiento hídrico de la subcuenca del río Carrizal. Tesis Calcuta: ESPAM.
- Saxton, KE; Rawls, WJ. 2006. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions Soil science society of America Journal 70(5):1569-1578.
- Sharp, R; Tallis, H; Ricketts, T; Nelson, E; Vigerstol, K; Mendoza, G; Wolny, S; Olwero, N; Aukema, J; Foster, J; Forrest, J; Cameron, D; Arkema, K; Lonsdorf, E; Kennedy, C; Verutes, G; Kim, C; Guannel, G; Papenfus, M; Toft, J; Marsik, M; Bernhardt, J; Griffin, R; Glowinski, K; Chaumont, N; Perelman, A; Lacayo, M; Mandle, L; Hamel, P; Vogl, AL; Rogers, L; Bierbower, W; Denu, D; Douglass, J. 2016. InVEST 3.3.3 User's Guide. The Natural Capital Project. The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund., Stanford University, University of Minnesota, .
- Sieber, J; Purkey, D. 2011. WEAP: Water Evaluation And Planning System. User Guide Somerville, MA: Stockholm Environment Institute, US Center. [http://weap21.org/downloads/WEAP\\_User\\_Guide.pdf](http://weap21.org/downloads/WEAP_User_Guide.pdf):
- Sundborg, Å; Rapp, A. 1986. Erosion and sedimentation by water: problems and prospects Ambio:215-225.

- Torres Benites, E; Mejía Sáenz, E; Cortés Becerra, J; Palacios Vélez, E; Exebio García, A. 2005. Adaptación de un modelo de simulación hidrológica a la cuenca del río Laja, Guanajuato, México *Agrociencia* 39(5):
- Tuppad, P; Douglas-Mankin, K; Lee, T; Srinivasan, R; Arnold, J. 2011. Soil and Water Assessment Tool (SWAT) hydrologic/water quality model: Extended capability and wider adoption *Transactions of the ASABE* 54(5):1677-1684.
- Umaña-Quirós, BE. 2014. Análisis hidrológico de la cuenca del río Toyogres utilizando el modelo HEC-HMS:
- Uribe, N. 2010. Soil and Water Assessment Tool: Conceptos básicos y guía rápida para el usuario Versión SWAT 2005. CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical) y CGIAR Challenge Program on water and food. Consultado 3 abr 2013.
- Valenzuela, A. 2006. Estudio hidrogeológico para la gestión integrada de la cuenca del río Guadalfeo (Granada). Tesis Tesis PhD. Granada, España, Centro de Andaluz de Medio Ambiente Universidad de Granada. 185 p.
- van Vuuren, DP; Stehfest, E; Elzen, MGJ; Kram, T; Vliet, J; Deetman, S; Isaac, M; Klein Goldewijk, K; Hof, A; Mendoza Beltran, A; Oostenrijk, R; Ruijven, B. 2011. RCP2.6: exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2°C (Article). *Climatic Change* 109(1-2):95-116. doi 10.1007/s10584-011-0152-3
- Vignola, R; Otárola, M; Calvo, G. 2010. Defining ecosystem-based adaptation strategies for hydropower production: stakeholders' participation in developing and evaluating alternative land use scenarios and the strategies to achieve desired goals:
- Vogl, A; Tallis, H; Douglass, J; Sharp, R; Veiga, F; Benitez, S; Leon, J; GAME, E; Petry, P; Guimeraes, J; Lozano, JS. 2016. Resource Investment Optimization System (RIOS). Introduction & Theoretical Documentation. Project, TNC (ed.). University Stanford. 107 p.
- Wunder, S. 2007. The efficiency of payments for environmental services in tropical conservation *Conservation biology* 21(1):48-58.
- Wunder, S; Wertz-Kanounnikoff, S; Moreno-Sánchez, R. 2007. Pago por servicios ambientales: una nueva forma de conservar la biodiversidad *Gaceta ecológica*(84-85):

## **CAPITULO II**

### **ARTICULO I. Utilización del modelo hidrológico SWAT para la determinación del comportamiento hidrológico bajo escenarios de cambio climático en la Región Hidrográfica del Estero de Jaltepeque, El Salvador**

#### **RESUMEN**

En la utilización de recursos ecosistémicos de manera sostenible es importante comprender la cantidad y calidad del recurso hídrico, su relación con otros servicios y sinergia de complejos procesos como la meteorización, regulación de ciclos biogeoquímicos entre otros. Por lo tanto, el trabajo presentado intenta predecir el comportamiento hidrológico y la dinámica de servicios ecosistémicos hídricos, especialmente la producción de agua y la erosión dentro de la Región Hidrológica del Estero de Jaltepeque en El Salvador con un área de 821,6 km<sup>2</sup> (82160 Ha), para este fin se evalúa el desempeño del modelo Soil and Water Assessment Tool (QSWAT) ambiente Qgis. Se determinó, modelar el comportamiento hidrológico bajo escenarios de cambio climático, logrando calibrar de manera aceptable el modelo (NS:0,57 y R2:0,65). Los datos climáticos históricos proceden de tres estaciones meteorológicas de la zona (1963-1984) periodo considerado como línea base, se realiza calibración del modelo utilizando datos de caudales mensuales promedio (1/1971-4/1980), la calibración de sedimentos no se realiza por falta de datos observados pero el modelo estima la erosión en 22,6 ton Ha/año, la producción de agua en 672,4 mm/año y una precipitación de 1728,9 mm anual. El análisis bajo los escenarios RCP4,5 y RCP8,5 al 2040 determinó el efecto de los diferentes modelos de circulación global sobre los componentes del balance hídrico. Se estima una disminución en la precipitación del 2,96% (51,2mm/año) y 3,6% (62,3mm/año) respectivamente para ambos escenarios, reducción promedio de la producción de agua en 5,8% (39,6mm) y aumento en erosión del 20,6% (4,67 ton Ha/año) y 18,5% (4,18 ton Ha/año) frente a las 22,6 ton Ha/año de la línea base. En la región hidrográfica el principal impacto del cambio en cobertura y clima es la afectación en la producción de agua y el incremento en erosión y producción de sedimentos.

#### **ABSTRACT**

For a sustainable usage of ecosystem resources, it's important to comprehend the quantity and quality of the hydric resource. It's relation with other resources and complex processes like weathering and regulation of the biogeochemical cycles among others. Therefore, this work intends to forecast the hydrological behavior and dynamics of hydric ecosystems services. Specifically, water production and erosion in the Jaltepeque Estuary Hydrologic Region of El Salvador that has an area of 821,6 km<sup>2</sup> (82160 Ha). The performance of the Soil Water Assessment Tool on Qgis environment (QSWAT) was evaluated for this objective. To determine the hydric behavior under sceneries of climate change, calibrating the model with acceptable results (NS:0,57 & R2:0,65). The historic climatic data was obtained from three weather stations from the zone. With a foundation period that spans from 1963 to 1984. The model was calibrated from data of monthly water flows from 1/1971 to 4/1980.

Calibration of the sediments wasn't performed for lack of observed data, but the model estimates erosion at 22,6-ton Ha/y. Water production was equal to 672,4 mm/y and precipitation to 1728,9 mm/y. The scenario analysis of RCP4,5 and RCP8,5 on year 2040 determined the effect of the different global circulation models over the components of the hydrological balance. highlighting water production and sediments. A reduction of 2,96% (51,2 mm/y) and 3,6% (62,3 mm/y) for both scenarios. Average water production also reported a 5,8% (39,6mm) diminishment, while erosion increased 20,6% (4,67-ton Ha/y) and 18,5% (4,18-ton Ha/y) compared to the initial 22,6-ton Ha/y. The main impact of land cover change and climate on the hydrological region. Is the alteration of water production and an increment in erosion and sediment production.

## **INTRODUCCIÓN**

Los Servicios Ecosistémicos (**SE**) son los beneficios que los ecosistemas le brindan al ser humano, entre ellos los servicios ecosistémicos hídricos (**SEH**) que están estrechamente ligados al ciclo hidrológico siendo indispensables y de absoluta importancia para el desarrollo de sociedades y como elemento vital para la vida. De acuerdo con Quintero (2010) la regulación del ciclo hidrológico depende en gran medida de la capacidad de regulación de los ecosistemas, es decir las propiedades biofísicas del mismo para brindar servicios como lo son la regulación de la calidad y cantidad de agua, la regulación del clima a escalas locales, entre otros (Bennett et al. 2009).

Los SE de producción de agua (WYLD) y control de erosión (SYLD), están regulados por un conjunto complejo de procesos. El estado de la naturaleza está impulsando las actividades humanas, mientras que las actividades humanas cambian el estado de la naturaleza (Willemen et al. 2019). Sin embargo, las actividades antropogénicas desempeñan un papel cada vez más importante en el control de la calidad y cantidad de los SE, hasta el punto de realizar modificaciones a los ecosistemas para que produzcan de manera económica y confiable los SE deseados como alimentos, madera y fibras (Foley et al. 2005, Ricketts et al. 2008).

Por lo tanto, y según Bennett (2009), una intermisión humana de los ecosistemas ha resultado en la disminución inesperada e involuntaria de otros SE, es decir, un aumento en la producción de algunos servicios, especialmente los de suministro o provisión (alimentos, maderas, fibras...etc.) ha llevado a la disminución de otros servicios como el control de inundaciones, polinización, producción de aguas, control de erosión y sedimentación (Corvalán et al. 2005).

Sin embargo, con la influencia de la variabilidad climática y los consiguientes cambios en los regímenes de precipitación ponen a prueba la capacidad de resiliencia de los ecosistemas y el ser humano, en el cual se debe dejar a un lado la domesticación de ecosistemas y elaborar estrategias y políticas para realizar el máximo aprovechamiento de los SE bajo un ambiente

en armonía, control y conocimiento de procesos. En relación a lo anterior, se hace necesario indagar sobre el comportamiento de las condiciones climáticas sobre los SE de WYLD y SYLD, los cuales se pueden abordar mediante la aplicación de modelos hidrológicos (Ayivi y Jha 2018, Haverkamp et al. 2005) especialmente la Herramienta de Evaluación de Suelos y agua (SWAT; (Arnold et al. 1998) la cual permitan cualificar y conocer la dinámica hídrica de las cuencas bajo escenarios actuales y futuros.

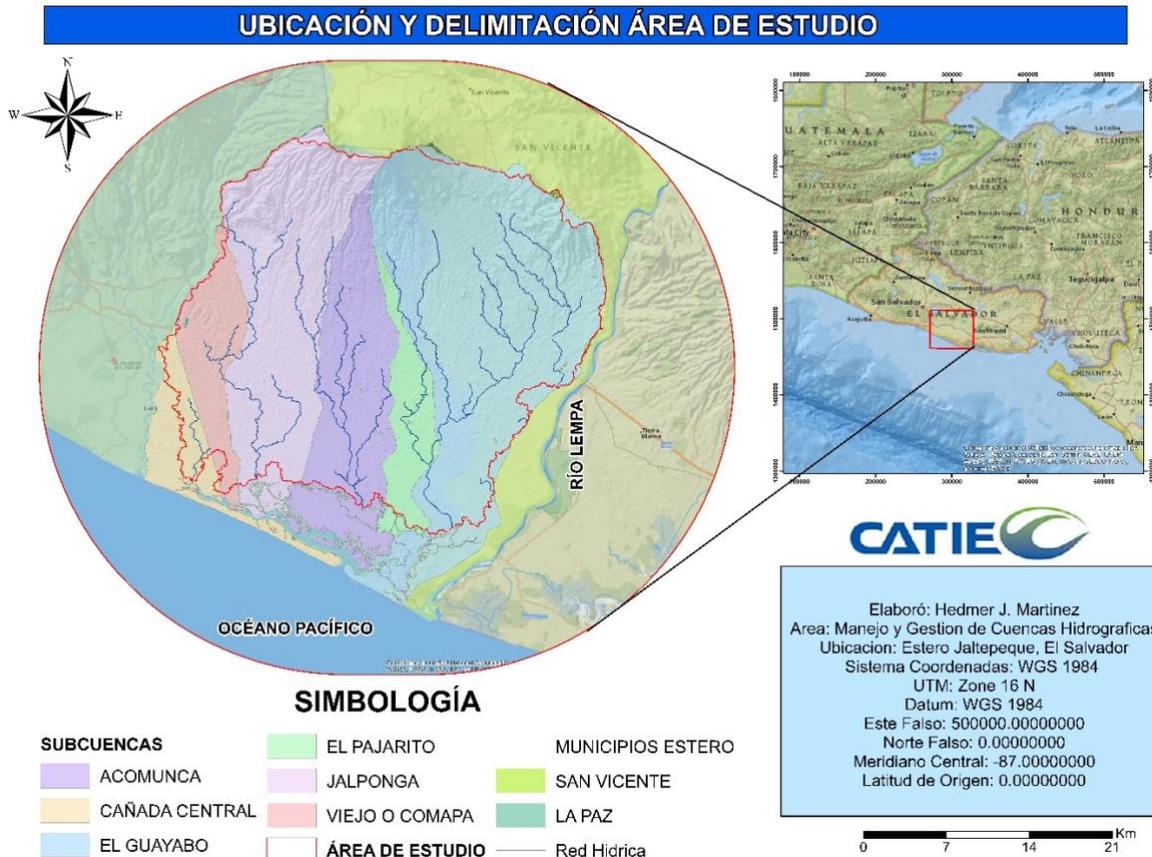
## **1. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1. Área de Estudio**

La Región Hidrográfica Estero de Jaltepeque (El Salvador) (13°20'33.4" N , 88° 56' 48.9" O), ubicado al sur de la Región de Los Nonualcos, entre los Departamentos de La Paz y San Vicente e integrado por el territorio del complejo de Jaltepeque declarado sitio RAMSAR el 2 de febrero de 2011 siendo el sexto sitio Ramsar de importancia Internacional en El Salvador (Ramsar 2013, Rodríguez 2012, Benegas Negri 2017). Limita al Norte por los relieves del Volcán de San Vicente o Chinchontepec (2182 m.s.n.m.); al Noroeste por el Lago de Ilopango y las estribaciones orientales de la Sierra del Bálsamo; al Este por el río Lempa y al Sur por el Estero de Jaltepeque en el Océano Pacífico (Gómez Varela y González Rodríguez 2012).

El Estero de Jaltepeque Abarca un área de 821,6 km<sup>2</sup> (MARN 2013), presenta un rango altitudinal de 0 – 2182 msnm., con una elevación media de 163 msnm, cerca del 74% del área total de la región se encuentra entre el 0 y 5% de pendiente con un rango altitudinal de 0-200 msnm.

El Plan de Manejo de la Región Hidrográfica del Estero de Jaltepeque, indica que el territorio es irrigado por 6 subcuencas las cuales tiene un sistema de drenaje bien definido (Larios 2012), excepto en las partes bajas (Figura 1), debido a que se encuentra una serie de sistemas estuarinos formados por las desembocaduras de los ríos Comalapa, Jalponga, Acomunca, Pajarito y Guayabo donde se desarrollan ecosistemas de manglar (Brenes et al. 2013, Rivera 2013).



**Figura 1.** Ubicación, subcuencas y Red hídrica Región Hidrográfica Estero de Jaltepeque, Fuente (Ramsar 2013)

## 2.2. Modelo Hidrológico SWAT

El modelo SWAT (Arnold et al. 1998) es una herramienta hidrológica de calidad de agua desarrollada por el Servicio de Investigación Agrícola del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (por sus siglas en inglés USDAARS) (Shen et al. 2012), basado en la ecuación general de balance hídrico y diseñado para predecir el impacto de las prácticas de manejo del suelo en la generación de agua, producción de sedimentos y sustancias agrícolas químicas, en cuencas hidrográficas grandes y complejas con variedad de suelos, usos de tierra y condiciones de manejo (Neitsch et al. 2011).

El modelo está conformado por un conjunto de submodelos, los cuales se pueden emplear para simular distintos procesos hidrológicos, SWAT calcula el ciclo hidrológico basado en la ecuación general de Balance Hídrico (Arnold et al. 2013).

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

Ecuación general del Balance Hídrico, tomado de (Neitsch et al. 2011)

Donde:

**SW<sub>t</sub>** = Contenido final de agua en el suelo (mm).

**SW<sub>0</sub>** = Contenido Inicial de agua en el suelo diario (mm).

**t** = Tiempo (días).

**R<sub>day</sub>** = Precipitación diaria (mm).

**Q<sub>surf</sub>** = Escorrentía Superficial diaria (mm).

**E<sub>a</sub>** = Evapotranspiración diaria (mm).

**W<sub>seep</sub>** = Cantidad de agua infiltrada en el suelo diariamente (mm).

**Q<sub>gw</sub>** = Flujo de retorno diario (mm).

El modelo diseñado para predecir la cantidad de pérdida de suelo por escurrimiento fue calculado a partir de la ecuación universal de pérdida de suelo modificada-MUSLE (J. R. Williams y H. D. Berndt 1977, Williams 1975, Zhang et al. 2009), siendo una modificación al modelo USLE y se expresa como:

$$Sed = 11,8 (Q_{surf} + q_{peak} + \text{Área}_{hru})^{0,56} * K * C * P * LS * CFRG$$

Ecuación Universal de Perdida de Suelo Modificada, tomado de (Neitsch et al. 2005, 2011)

Donde:

**S<sub>ed</sub>** = Producción de sedimentos después de un evento de lluvia (Ton).

**Q<sub>surf</sub>** = Escorrentía Superficial (mm<sub>H2O</sub>/Ha).

**q<sub>peak</sub>** = Caudal Pico (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>).

**Área<sub>hru</sub>** = Área de la Unidad de Respuesta Hidrológica (Ha).

**K** = Factor de Erodabilidad del suelo (0,013 ton<sup>-1</sup> m<sup>2</sup> hr/ (m<sup>3</sup> ton cm)).

**C** = Factor de uso de suelo (adimensional).

**P** = Factor prácticas de conservación del suelo (adimensional).

**LS** = Factor Topográfico (adimensional).

**CFRG** = Factor de fragmentación de la tierra (adimensional).

SWAT es un modelo de cuenca hidrológica de tiempo continuo que opera en un paso de tiempo diario. El modelo usa insumos fácilmente disponibles, es computacionalmente eficientes para el uso grandes volúmenes de información, siendo capaz de simular rendimientos a largo plazo para determinar el impacto de las prácticas de manejo del suelo (Arnold y Allen 1996).

Los componentes de SWAT incluyen: hidrología, clima, sedimentación/erosión, características del suelo, temperatura, crecimiento de plantas, nutrientes, pesticidas y manejo agrícola, puede encontrarse información detallada en (Neitsch et al. 2011, Arnold et al. 2013).

### 2.3. Datos de entrada del modelo SWAT

El modelo fue implementado con una extensión del software QGIS 2,6,1 denominada QSWAT 1,8 en adelante QSWAT. Para La Región Hidrográfica del Estero de Jaltepeque se construyó utilizando datos proporcionados por el Proyecto WATERCLIMA.LAC (Cuadro 2), estos datos se complementaron con fuentes disponibles de forma gratuita.

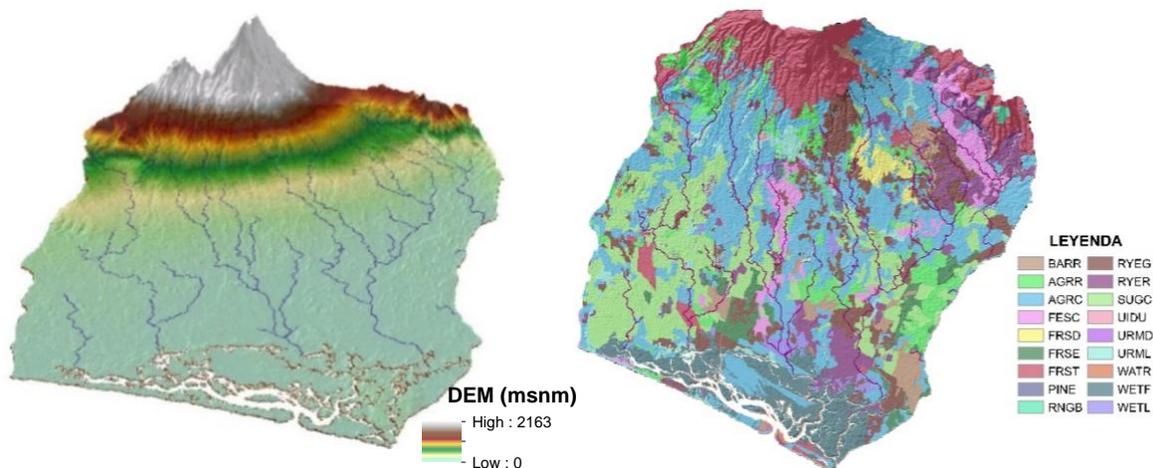
*Cuadro 2.* Insumos del modelo SWAT

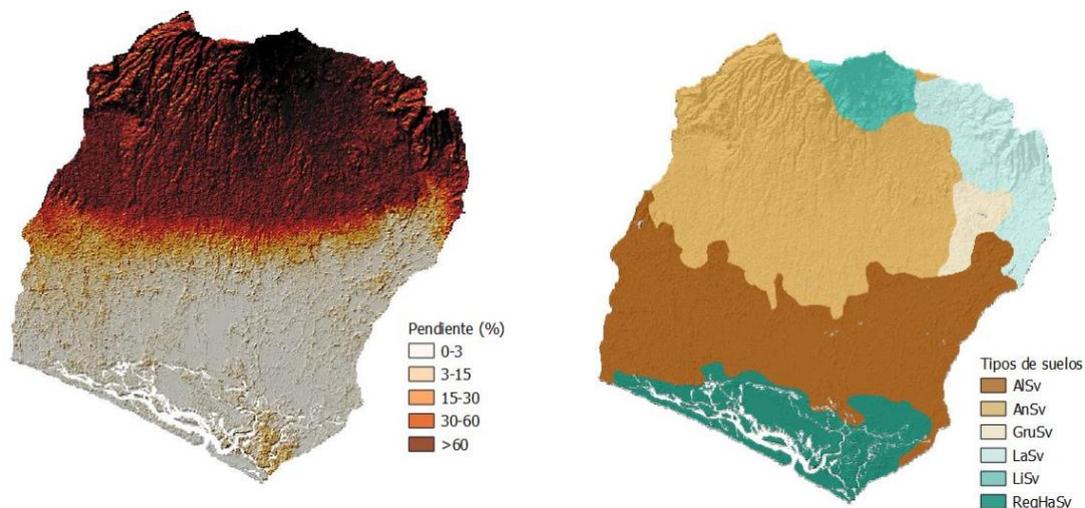
TIPO DE DATO	FUENTE DE INFORMACIÓN	CARACTERÍSTICAS DEL DATO
<b>MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN – DEM</b>	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) – El Salvador	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El DEM fue corregido utilizando el software ArcGIS 10.3 y el algoritmo <i>Fill</i> de la caja de herramientas "<i>Hydrology</i>" para ubicar y corregir los sumideros que pudiera presentar el DEM (Zhu et al. 2006)</li> <li>• Tamaño de celda 30*30 m</li> <li>• Proyección WGS 1984 UTM Zona 16N</li> <li>• Elaborado a partir del <i>Shapefile</i> Uso de suelo</li> </ul>
<b>USO DEL SUELO</b>	MARN – El Salvador	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transformación a formato <i>Ráster</i> a partir de la herramienta "<i>Feature to Ráster</i>" de la caja de herramientas <i>Conversión Tools</i></li> <li>• Tamaño de la celda 30*30 m</li> <li>• Proyección WGS 1984 UTM Zona 16N</li> </ul>
<b>PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL SUELO REQUERIDOS POR SWAT</b>	Soil and Terrain Database (SOTER) for Latin America and the Caribbean (SOTERLAC), version 2.0 <a href="https://files.isric.org/public/soter/SOTERLAC.zip">https://files.isric.org/public/soter/SOTERLAC.zip</a>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• SOTER consiste en una base de celdas de 30arcsegundos = 900m</li> <li>• Escala 1:1 millón</li> <li>• Año 2017</li> </ul>
<b>COBERTURA DE LA TIERRA</b>	MARN – El Salvador	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formato <i>Ráster</i></li> <li>• Tamaño de la celda 30*30 m</li> <li>• Proyección WGS 1984 UTM Zona 16N</li> </ul>
<b>RED HÍDRICA</b>	MARN – El Salvador	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Archivo <i>Shapefile</i> proporcionado por el MARN</li> <li>• Proyección WGS 1984 UTM Zona 16N</li> </ul>
<b>CUENCA HIDROGRÁFICA</b>	MARN – El Salvador	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Archivo en formato <i>Shapefile</i> el cual define los límites de la región Hidrográfica del estero de Jaltepeque y lo organiza en 6 subcuencas</li> <li>• Proyección WGS 1984 UTM Zona 16N</li> </ul>

<b>CLIMA</b>	MARN – El Salvador	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estaciones meteorológicas denominadas Ilopango, Portillo y San Miguel (Figura 4)</li> <li>Datos Diarios de Temperatura (Max, Min) y precipitación</li> <li>Fecha 1/1/1963 al 3/31/1984</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Estación Hidrometeorológica la Ceiba subcuenca Jalponga. Rio Jalponga</li> <li>Archivo formato .xlsx con mediciones 1/1971 al 4/1980</li> <li>Se utilizaron la clasificación de Pendientes de la FAO para ingresar al modelo</li> </ul>
<b>AFORO</b>	MARN – El Salvador	
<b>PENDIENTE</b>	FAO 2009	

Clases	Pendiente (%)	Descripción
1	0-3	Plano
2	3-15	Suavemente Plano
3	15-30	Moderadamente Ondulado
4	30-60	Fuertemente Escarpado
5	>60	Escarpado

Los códigos de uso de suelo fueron reclasificados según SWAT utilizando la metodología descrita por El- Sadek e İrvem (2014). La edafología de la cuenca se extrajo de la base de datos *Harmonized World Soil Database* (Batjes 2016), que recoge las unidades de suelo (código) establecidas en la FAO (1990) y WRB (2014), estos códigos de suelo fueron incluidos en la base de datos de SWAT. La pendiente fue dividida en cinco clases (0%-3%, 3%-15%, 15%-30%,30%-60% y >60%) de acuerdo a FAO (2009). En la figura 2, se visualizan entradas biofísicas del modelo SWAT, complementando Cuadro 2.





**Figura 2.** Cobertura del área de estudio en SWAT: relieve (a); usos de suelo (b); clases de pendiente (c); edafología (d).

La cartografía de cobertura de la tierra, facilitada por el MARN corresponde al año 2013. El cuadro 3, explica la clasificación inicial de coberturas empleadas y los códigos de SWAT asignados a cada cobertura

**Cuadro 3.** Código SWAT asignado a las coberturas de suelo

<b>Cobertura de Suelo</b>	<b>Código SWAT</b>	<b>Descripción SWAT</b>
Cultivos Agrícolas	<b>AGRC</b>	Tierra agrícola cultivada
Agricultura familiar	<b>AGRR</b>	Cultivos agrícolas en hileras
Área erosionada	<b>BARR</b>	Suelo Desnudo
Matorral-arbustos	<b>FESC</b>	Arbustos
Bosque Seco	<b>FRSD</b>	Bosque caducifolio
Bosque Latifoliado (Húmedo, Nublado, Semihúmedo)	<b>FRSE</b>	Bosque siempre verde
Bosque Intervenido	<b>FRST</b>	Bosque Mixto
Cultivo Forestal	<b>PINE</b>	Bosque Conífero abierto o denso
Matorral	<b>RNGB</b>	Vegetación Herbáceas (Range- Brush)
Pasto - Gramíneas	<b>RYEG</b>	Pastos-Gramíneas
Cultivo caña de azúcar	<b>SUGC</b>	Cultivo Caña de Azúcar
Zona Industrial	<b>UIDU</b>	Zona Industrial

Poblados	<b>URMD</b>	Densidad Residencial Media
Caseríos	<b>URML</b>	Densidad Residencial Baja
Lagos y Lagunas	<b>WATR</b>	Agua
Pantanos	<b>WETF</b>	Humedales - Forestales
Zona Inundable, Mangle	<b>WETL</b>	Humedales Mixtos

Para la información de suelos se obtuvo a partir de la base de datos de tierra y suelos para América Latina y el Caribe (por sus siglas en Inglés, SOTERLAC). SWAT necesita información adicional la cual fue generada empleando diversos programas como SPAW Hydrology 6.02.75 y NumCur. Los parámetros y el método de obtención requeridos por SWAT se visualizan en el Cuadro 4

**Cuadro 4.** Parámetros fisicoquímicos de suelos requeridos por el Modelo SWAT

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>	<b>Método de Obtención</b>
HYDGRP	Grupo Hidrológico	NumCur a partir de datos de textura
ANION_EXCL	Fracción de porosidad desde donde los aniones son excluidos	Se utilizó la constante de 0,5. Valores opcionales
SOL_CRK	Fracción del volumen de rompimiento potencial del suelo	
SOL_BD	Densidad aparente por Horizonte (Mg/m <sup>3</sup> )	
SOL_AWC	Capacidad de disponibilidad de agua en cada horizonte (mm H <sub>2</sub> O/mm suelo)	SPAW Hydrology utilizando datos de textura y % Materia Orgánica
SOL_K	Conductividad Hidráulica Saturada (mm/h)	
TEXTURE	Textura del suelo	
SOL_CBN	Contenido de Carbono orgánico (% de peso del suelo)	Se obtuvo a partir de la Materia orgánica. SOL_CBN=M.O/1,724
USLE_K	Factor USLE de erodabilidad del suelo	Tabla K_USLE.xlsx
SOL_ZMX	Máxima Profundidad con presencia de raíces	
SOL_Z	Profundidad cada horizonte	
CLAY	Contenido de arcilla (% del peso del suelo)	Base de datos SOTERLAC
SILT	Contenido de Limo (% del peso del suelo)	

SAND	Contenido de Arena (% del peso del suelo)
SOL_CAL	Contenido de carbonato de calcio por horizonte
SOL_PH	Medida de acidez o alcalinidad por horizonte del suelo

El Tipo de suelo se extrajo a partir de la Pedología de la Región Hidrográfica de Jaltepeque en el cuadro 5 se detalla a grandes rasgos las características de cada tipo de suelo

**Cuadro 5.** Descripción de los tipos de suelo según Nomenclatura SWAT

<b>Tipo de suelo</b>	<b>Código SWAT</b>	<b>Descripción</b>
Aluviales	<b>AlSv</b>	Son suelos de materiales transportados o depositados en las planicies costeras y valles interiores. Suelos de alta productividad, apto para toda clase de cultivos
Andisoles	<b>AnSv</b>	Suelos originados de cenizas volcánicas. Capacidad productiva es de alta a muy alta productividad, apto para toda clase de cultivos
Grumosoles	<b>GruSv</b>	Son suelos arcillosos, condiciones de humedad (pegajosos y muy plásticos) secos son duros y se cuarteán. Poco Humus, poco permeables (infiltración es lenta) no apto para cultivos permanente
Latosoles Arcillo Rojizos	<b>LaSv</b>	Presencia de óxido de hierro en distintos tipos y grados de oxidación. Suelos aptos para casi todo tipo de cultivos
Litosoles	<b>LiSv</b>	Suelos de muy poca profundidad sobre roca pura, predomina erosión laminar, bajo rendimiento.
Regosoles y Halomórficos	<b>RegHaSv</b>	Suelos profundos, con alto contenido de Materia orgánica, utilizado únicamente para vegetación permanente; suelos salinos de manglar, productividad muy pobre para cultivos agrícolas

Fuente: (Paz 2012)

## 2.4. SWAT Simulación

La Simulación hidrológica y sedimentaria con SWAT, requiere varios procesos indispensables, en los cuales se realiza un tratamiento a cada insumo (cuadro 2) para generar las diversas entradas o inputs que solicita el modelo.

SWAT obtiene la delimitación de la cuenca y subcuencas a partir del MED y la red de drenaje, este módulo es muy versátil y permite agregar diferentes componentes al sistema hidrológico como lo son embalses o puntos de aforo a nuestro sistema, a su vez genera una serie de informes que permite la caracterización del sistema hidrológico mediante los parámetros morfométricos.

A partir de la delimitación, SWAT divide las subcuencas en Unidades de respuesta Hidrológica (HRU) que son áreas de la misma subcuenca que representan homogeneidad en cuanto a tipos de suelo, usos y coberturas vegetales y la pendiente en función de umbrales definidos por el usuario, la división de las subcuencas en unidades menores permite realizar al modelo diferencias de evapotranspiración, generación de escorrentía y tasas de erosión más precisas al igual que realiza la estimación de todas las variables del balance hídrico (Neitsch et al. 2005, Kalcic et al. 2015).

Las variables climáticas de SWAT son la precipitación diaria, temperatura máxima y mínima, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. Sin embargo, en el caso de no disponer de alguno de los anteriores, el programa dispone de modelos avanzados de generación de los datos (Schuol y Abbaspour 2007).

El módulo de SWATinput, permite la edición de los datos de entrada del modelo, a través de esta interfaz se puede modificar las bases de datos necesarias para efectuar SWAT. Cuando se ejecuta el modelo se deben incluir variables como el periodo de simulación, periodo de calentamiento o NYSKIP, método de evapotranspiración potencial, entre otros parámetros que varía su modificación dependiendo de la experiencia del modelador y el conocimiento del área de estudio (Cuadro 6).

Para La Región Hidrológica Estero de Jaltepeque se modificaron los siguientes datos:

**Cuadro 6.** Modificación Variables SWAT

Variable	Valores
Periodo de simulación	1963-1984
Evapotranspiración potencial Método Penman-Monteith	Con base en Hargreaves
NYSKIP	3 años
Almacenamiento Inicial de Agua en el suelo – FFCB	0,6
Valor del canal de Manning CH_N2.rte	0,047

El periodo de simulación corresponde con los datos de inicio y final de las variables climáticas para nuestro caso temperatura y precipitación diaria, el método de evapotranspiración potencial por defecto utilizado por SWAT es Penman-Monteith, este método requiere variables climáticas como radiación solar, temperatura del aire, humedad relativa y velocidad el viento, sin embargo, al solo poseer datos de precipitación y temperatura el método más adecuado es Hargreaves (Neitsch et al. 2005, Jung et al. 2016).

El periodo de calentamiento o equilibrio (NYSKIP), Arnold *et al.* (2012) donde el modelo toma datos para realizar el proceso de balance hídrico a modo de aprendizaje y que no es incluido en la simulación final (Liew y Veith 2010), se estableció para nuestro sistema de 3 años como recomendación según Abbaspour (2015), por el cual el periodo de simulación queda determinado desde 1966-1984.

El almacenamiento inicial de agua en el suelo (FFCB) que expresa la capacidad de campo y varía entre 0 y 1, donde 0 representa el suelo completamente seco y 1 un suelo anegado, es modificado en 0,5 según Arnold *et al* (2012), de igual forma sucede con el valor de rugosidad del canal de Manning el cual expone que la superficie del terreno es lisa y no presenta limitaciones para el flujo del agua, obteniendo un valor por defecto de 0,014 el cual es modificado a 0,047 el cual coloca resistencia al flujo del agua (Me et al. 2015).

## **2.5. Calibración**

El término calibración hace referencia a un procedimiento en el cual el modelo minimiza la diferencia entre los valores observados y los simulados, de esta manera se espera que el modelo regional represente correctamente los procesos reales en el sistema físico (Abbaspour et al. 2017).

El algoritmo SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting), bajo la interfaz SWAT – Calibración y Procedimiento de Incertidumbre (SWAT-CUP) (Abbaspour 2015), se utilizó para el análisis de calibración e incertidumbre. SUFI-2 tiene en cuenta todas las fuentes de incertidumbre, como la incertidumbre en las variables de control, el modelo conceptual, los parámetros y los datos medidos (Abbaspour et al. 2004, 2007)

El grado con el cual se cuantifican todas las incertidumbres se denomina *p-factor* y *r-factor*, el primero indica el porcentaje de datos medios incluidos en la banda de incertidumbre de la predicción del 95% (95PPU) y su valor optimo es 1 (es decir, una simulación del modelo perfecta), por lo tanto,  $1-p\text{-factor}$  puede referirse al error del modelo (Abbaspour et al. 2015); mientras *r-factor*, representa el grosor de la banda del 95PPU teniendo un valor óptimo de 0, es decir, incorpora la incertidumbre al modelo.

Para la evaluación de la eficiencia del modelo en la calibración y validación se utilizó como función objetivo, el coeficiente de eficiencia de Nash Sutcliffe (NSE) el cual explica que tanto se ajustan los datos simulados contra los observados (Moriasi et al. 1983), se estimaron otros coeficientes complementarios como lo es el coeficiente de Determinación ( $R^2$ ), que mide la correlación entre los datos observados y los simulados, donde un  $R^2$  de 1 indica una correlación perfecta, un modelo preciso (Moriasi et al. 2007), Porcentaje de sesgo (PBIAS), que mide la tendencia de los datos simulados para ser mayor o menor que su contraparte (datos observados), el valor óptimo del PBIAS es 0, valores negativos indican tendencia a la sobreestimación y positivos a la subestimación.

Los parámetros representan procesos naturales, para la calibración del caudal se seleccionaron a partir de una revisión de literatura (Arnold et al. 2012, Memarian et al. 2014, Abbaspour et al. 2017, Douglas-Mankin et al. 2010), los rangos de los parámetros se tomaron por defecto del software SWAT-CUP (Cuadro 7).

**Cuadro 7.** Parámetros Iniciales y rangos de calibración en SWAT-CUP.

Parámetro	Descripción – Unidad	Valor Mínimo	Valor Máximo
*r_CN2.mgt	Numero de Curva	-0,2	0,2
**v_ESCO.hru	Factor de Compensación de la Evaporación	0,01	1
v_SURLAG.bsn	Coeficiente de Retardo de la Escorrentía	0,05	24
v_OVN.hru	Facto de Rugosidad n de Manning	0,01	30
v_EPCO.hru	Factor compensación absorción planta	0	1
v_SOL_AWC.sol	Contenido de Agua disponible para la planta – (mm H <sub>2</sub> O/mm suelo)	0	1
v_ALPHA_BF.gw	Factor Alpha flujo base – (1 día)	0	1
v_GWQMN.gw	Nivel umbral freático para que ocurra flujo de retorno – (mm H <sub>2</sub> O)	0	2
v_RCHRG_DP.gw	Factor recarga del acuífero	0	1
v_GW_DELAY.gw	Tiempo de retardo de agua subterránea - (días)	30	450
v_GW_RELAP.gw	Coeficiente de Reabsorción de agua subterránea	0,02	0,2

\*r\_ Valor parámetro existente se debe multiplicar por [1+ (valor dado)]. \*\*v\_ valor del parámetro existente debe reemplazarse por un valor dado (Abbaspour 2015)

Mediante el software SWAT-CUP se realizaron entre 800 – 3000 Simulaciones, mediante la opción de procesamiento paralelo, la cual permite utilizar toda la fuerza computacional habilitando los núcleos del procesador para reducir el tiempo sustancialmente de las simulaciones (Rouholahnejad et al. 2012, Rouholahnejad 2013).

## **2.6. Modelos de Circulación General MCG y Trayectorias de concentración representativas (RCP)**

Los modelos de Circulación general (MCG) son la principal herramienta utilizada por los científicos para proyectar los impactos climáticos sobre el planeta, y son basados en representaciones matemáticas de las leyes físicas que gobiernan el clima de la tierra (Stocker 2013, Hidalgo y Alfaro 2015).

Para el Quinto informe de Evaluación del IPCC, la comunidad científica definió cuatro nuevos escenarios denominados Trayectorias de concentración representativas (RCP por sus siglas en inglés), caracterizados por un cálculo aproximado de forzamiento radiactivo al año 2100 ubicando como referencia 1750 (Stocker 2013), los cuatro escenarios de RCP comprenden un escenario de mitigación a un forzamiento muy bajo (RCP2,5), dos escenarios de estabilización (RCP4,5 Y RCP6,0) y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero (RCP8,5).

Se utilizaron datos de precipitación y temperatura de cuatro modelos de circulación general (MCG) y los RCP4,5 y RCP8,5 (Cuadro 8) para la predicción en la producción de agua y sedimentos para el año 2040, datos obtenidos a partir del generador de clima de *Climate change knowledge Portal* (<https://climateknowledgeportal.worldbank.org/download-data>) de igual forma se obtuvieron las anomalías para precipitación y temperatura.

Las anomalías climáticas son las disminuciones o aumentos en los valores de precipitación o temperatura bajo escenarios climáticos y modelos de circulación general, representando el comportamiento estimado de las variables climáticas para un año determinado.

La elección de los modelos se realizó con base a la Tercera Comunicación Nacional que realiza La Republica de El Salvador ante la Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC).

**Cuadro 8.** Modelos de Circulación General utilizados en la 3<sup>ra</sup> Comunicación Nacional para la elaboración de los escenarios climáticos, Republica de El Salvador

Modelo	Centro de Modelado
MRI-CGCM3	Instituto de Investigación Meteorológica (MRI)
MIROC5	Instituto de Investigación de Océano y Atmosfera (MIROC) (Universidad de Tokio), Instituto Nacional de Estudios Ambientales y Agencia Japonesa de la Marina
GFDL-CM3	Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos (GFDL)
CSIRO-KM3-6-0	Organización de Investigación Científica e Industrial de la Mancomunidad de Naciones en Colaboración con el Centro de Excelencia de Cambio Climático de Queensland (CSIRO-QCCE)

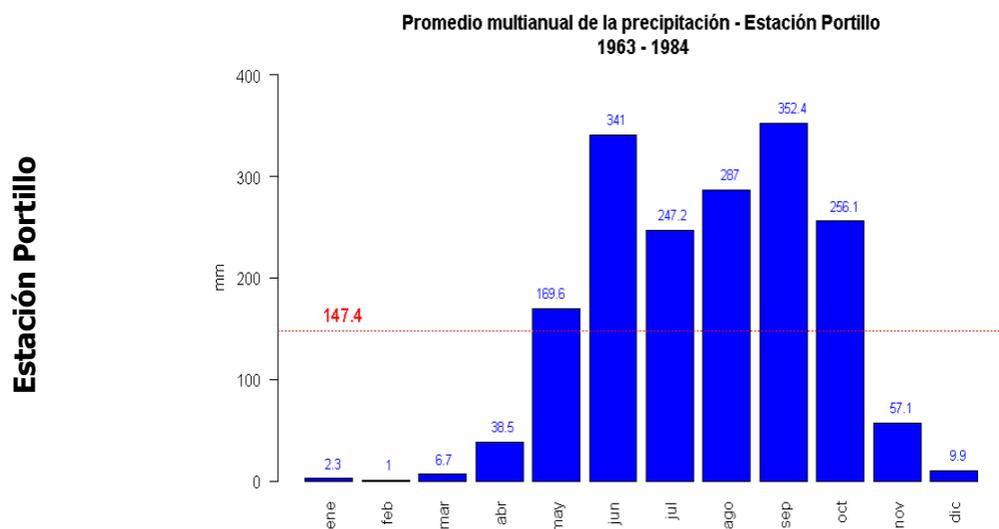
Fuente. (Hidalgo y Alfaro 2015, MARN 2018)

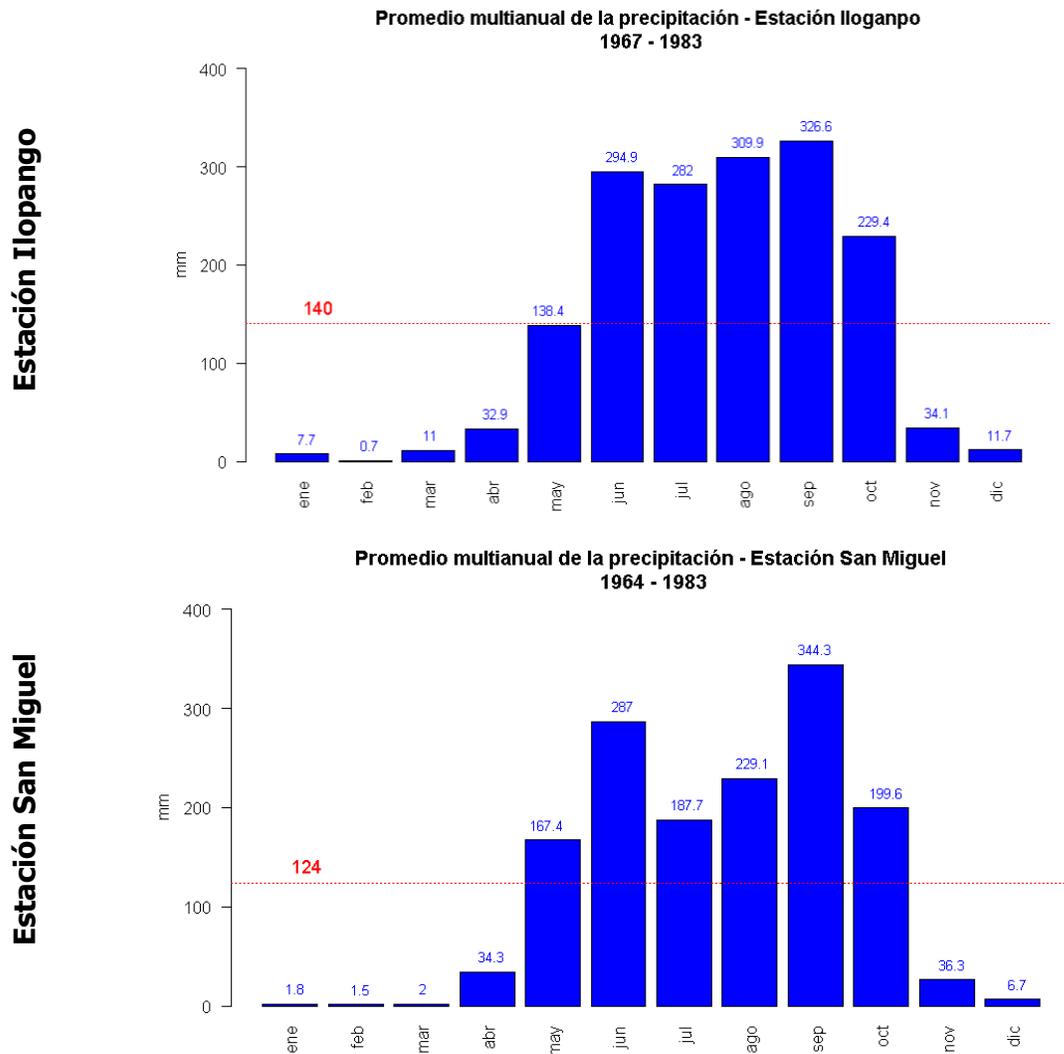
### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Comportamiento Precipitación

El promedio de la precipitación para el área de estudio es de 1753 mm/año, los cuales se distribuyen a lo largo del año en un patrón monomodal, es decir, se identifica un periodo lluvioso y uno relativamente seco (Ver Grafica 1), a partir de noviembre se observa un comportamiento de transición entre periodo lluvioso y seco. En los periodos de noviembre a abril se encuentra acumulada cerca del 15 % de la precipitación caída durante el periodo de estudio, identificando el menor registro en febrero para las tres estaciones y observándose los mayores registros para el mes de septiembre con cerca del 30% de la precipitación del total anual.

#### Promedio Multianual de Precipitación (1963-1984) Línea Base

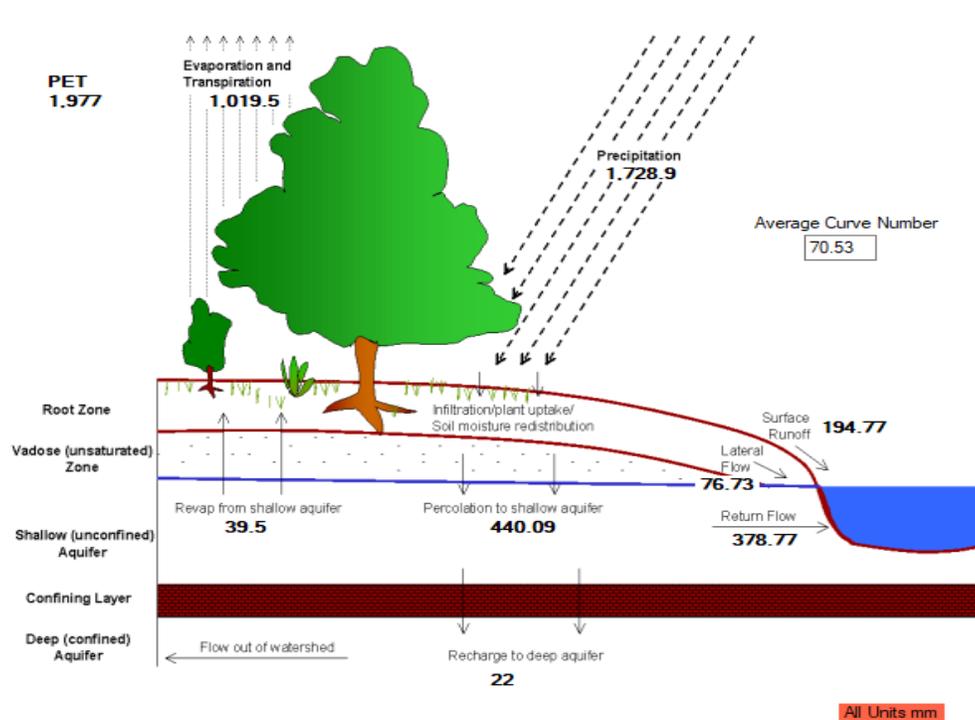




**Gráfica 1.** Distribución multianual de la precipitación

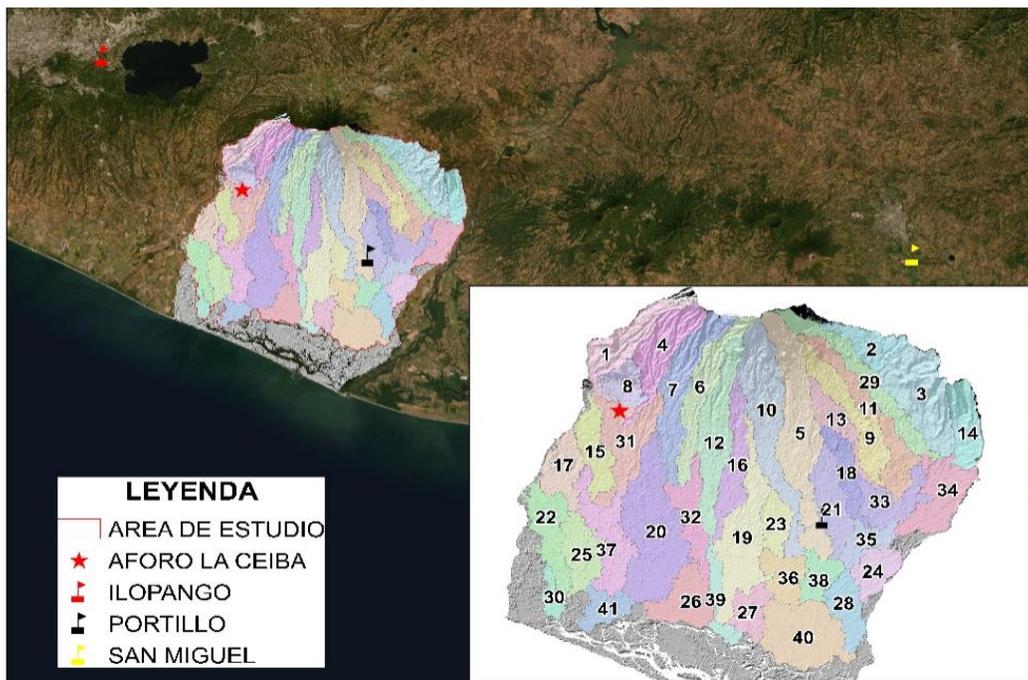
### 3.2. Componentes Balance Hídrico

QSWAT versión 1.8, Dividió la RH Estero de Jaltepeque en 41 microcuencas (Figura 4) y 1808 HRUs, y la definió en un área de 821,6 km<sup>2</sup>, la precipitación media del periodo 1963 – 1984 (NYSKIP=3) considerada como línea base es de 1728,9 mm, Evapotranspiración 1019,5 mm. A su vez, la escorrentía superficial 194,77, el flujo lateral 76,73 mm, flujo de retorno 400,9 mm, producción de agua 672,4 mm y erosión hídrica 22,6 T/Ha. Estos valores corresponden a los componentes del balance hídrico con el modelo calibrado (Figura 3)



**Figura 3.** Componentes del balance hídrico del área de estudio según QSWAT.

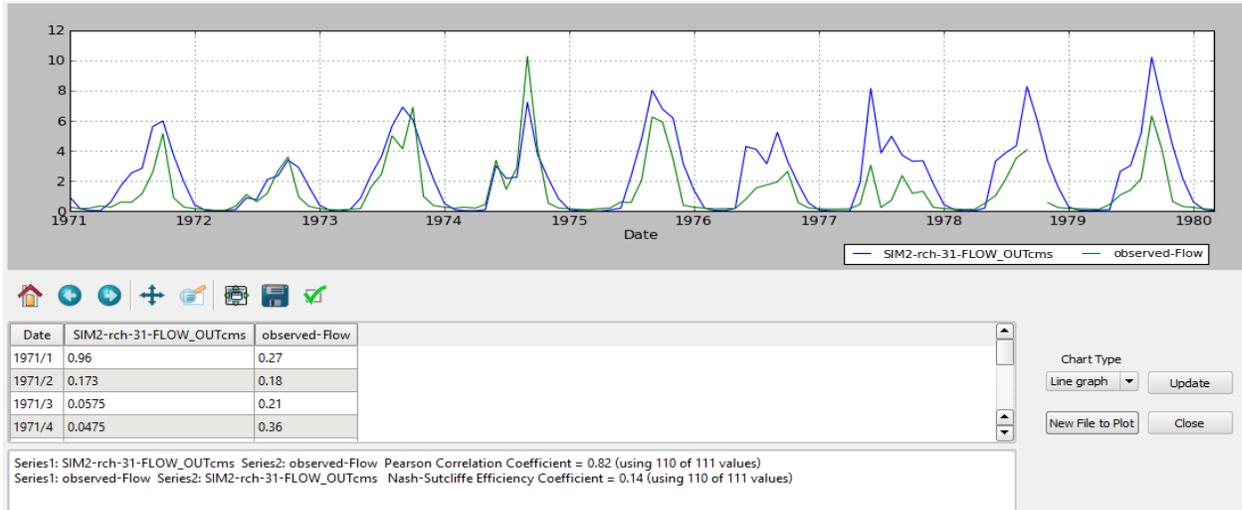
El 59% (1019,5 mm) del total de la precipitación media anual se evapotranspira, la producción de agua de la cuenca es de 672,4 mm de estos, el 28,96% permanece a escorrentía superficial y 71,04 % es flujo base.



**Figura 4.** Delimitación de Región Hidrográfica Estero de Jaltepeque y ubicación de las estaciones meteorológicas

### 3.3. Calibración del modelo SWAT

Con el objetivo de ver el grado inicial de ajuste, se ejecutó QSWAT con los parámetros sin calibrar (interfaz para graph). En la Grafica 2, se observa el comportamiento de las series observada y simulada. El coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) mide el grado de similitud entre las series. Puede tomar valores entre -1 y 1, siendo 1 el caso ideal.



Gráfica 2. Comportamiento datos mensuales del Caudal Observado y Simulado sin calibrar, interfaz QSWAT

En la gráfica 2 se obtiene un coeficiente de correlación de Pearson de 0,82, es decir la correlación entre las variables observadas es del 82% siendo esta positiva, para el caso de nuestro estudio no se utiliza. Mientras que el NSE es de 0,14 el cual es inviable y se debe ajustar con los datos observados de caudal, para disminuir la incertidumbre y representar los procesos reales de la cuenca mediante el ajuste de parámetros.

Se realizó un análisis de sensibilidad para 11 parámetros relacionados con la simulación de caudal (Ver Cuadro 7), de los cuales solamente se utilizaron 4, siendo los más sensibles (Ver Cuadro 9). El análisis de sensibilidad global muestra los parámetros más sensibles en la simulación del flujo de caudal son aquellos que representan las propiedades del suelo, la escorrentía superficial y la recarga del acuífero.

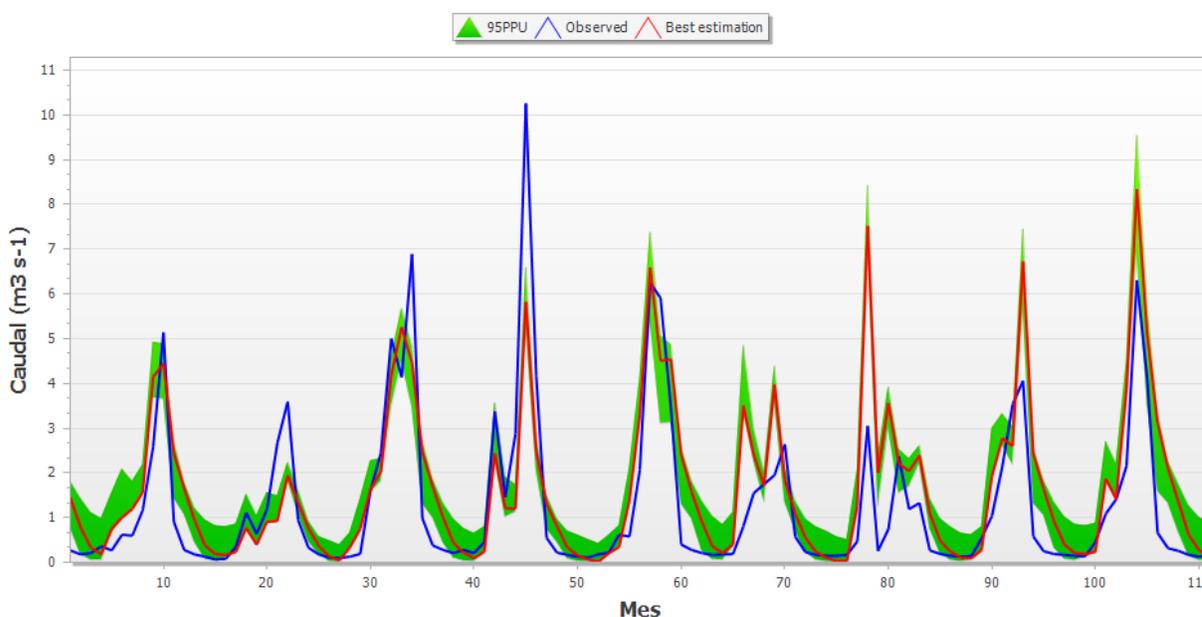
La calibración del modelo se realiza con datos de caudal mensual en la salida de la microcuenca del río Jalponga (microcuenca 31, Ver Figura 4), estación denominada La Ceiba (13° 31'N 88°57'E). Después de obtener los valores ajustados de los parámetros con base en ellos se procede a extenderlos a las demás microcuencas.

**Cuadro 9.** Parámetros más sensibles.

Parámetro	Valor Ajustado	Valor Mínimo	Valor Máximo
v_SOL_AWC.sol	0.499818	0.370875	0.624651
r_CN2.mgt	0.055596	0.008493	0.161259
v_ESCO.hru	0.064644	0.01	0.355118
v_GW_DELAY.gw	62.929283	30	257.098511

Se realizan 3000 simulaciones para poder ajustar la función NSE, y los estadísticos de bondad del ajuste (p-factor y r-factor) sobre la incertidumbre denominada 95PPU (Porcentaje de la Incertidumbre de Predicción). La grafica 3, indica la comparación entre los flujos observados y los simulados para el periodo de 01/01/1971 – 31/04/1980.

El modelo muestra una tendencia positiva durante el lapso evaluado, su evidencia radica en la subestimación de la simulación sobre los datos observados. Durante el principio del análisis de calibración para los caudales pico se observa como la mejor simulación esta debajo del rango propuesto, mientras que para el periodo final se observa como la simulación sobreestima los elevados flujos, es decir la simulación sobrepasa el caudal observado.



**Gráfica 3.** Calibración Región Hidrográfica Estero de Jaltepeque- Estación la Ceiba, microcuenca Rio Jalponga, datos promedio mensuales

Shrestha et al. (2013) describe que  $R^2$  como NSE, son sensibles a los altos flujos, por lo que recomienda Utilizar PBIAS para medir la tendencia promedio de los datos simulados ser mayor o menor que los datos observados. El cuadro 10 resume el valor de las funciones que evalúan el desempeño del modelo la calibración.

**Cuadro 10.** Resultados Estadísticos Calibración Línea Base

Estadístico	Calibración (1966-1984)
P-factor	0,5
R-factor	0,5
NSE	0,57
R <sup>2</sup>	0,65
PBIAS	-29,5
KGE	0,65

La calibración de caudal usando SUFI-2 resultó en un NSE de 0,57 y un coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>) de 0,65 (Cuadro 10 y 11). El modelo posee una tendencia positiva, primero subestima los caudales simulados y luego los sobreestima, PBIAS indica una sobreestimación de 29,5% en la simulación. El análisis de incertidumbre (p-factor y r-factor) está dado por la relación de los estadísticos de la bondad de ajuste, P-factor indica que el 50% de los datos medidos están entre la banda del 95PPU, mientras (r-factor) es el ancho de la banda 95PPU siendo un valor razonable 0,5 los valores de r-factor menores a unos son deseables (Faramarzi et al. 2009). La eficiencia de Kling-Gupta (KGE) fue escogida porque a menudo proporciona un ajuste robusto frente a las observaciones con numerosos caudales pico, al igual que NSE, KGE varía entre - 0 y 1, siendo este último el valor óptimo (Gupta et al. 2009) su valor es de 0,65 simulando los caudales punta de modo aceptable

**Cuadro 11.** Valores Óptimos de desempeño estadístico (Moriasi et al. 2007)

Nivel de desempeño	NSE	PBIAS (%)
<b>Muy Bueno</b>	$0,75 \leq NSE \leq 1,00$	$PBIAS \leq \pm 10$
<b>Bueno</b>	$0,65 \leq NSE \leq 0,75$	$\pm 10 \leq PBIAS \leq \pm 15$
<b>Satisfactorio</b>	$0,50 \leq NSE \leq 0,65$	$\pm 15 \leq PBIAS \leq \pm 25$
<b>Insatisfactorio</b>	$NSE \leq 0,50$	$PBIAS \geq \pm 25$

p-factor y r-factor tiene un valor de 0,5 que es modelo aceptable, puesto explica el 50% de las observaciones están siendo explicadas por el modelo al igual que se incluyen dentro de la banda de incertidumbre 95PPU.

De esta manera, la modelación hidrológica en la RH Estero de Jaltepeque, para el periodo presente y futuro 2040, se realiza a partir de los resultados proporcionados con NSE como función objetivo. Los resultados del análisis de sensibilidad se trasladan a los parámetros hidrológicas a través de la columna "valor ajustado" en el cuadro 6.

### 3.4. Comportamiento hidrológico futuro

Tras el análisis de sensibilidad y calibrar SWAT, este puede ser lanzado en escenarios pasados y futuros debido a que los valores optimizados en los parámetros de la cuenca no varían con el tiempo (Winchell et al. 2013). En coherencia con los objetivos se incorporan en SWAT los escenarios de emisión RCP4,5 y RCP8,5 (año 2040). Las anomalías climáticas (precipitación, temperatura máxima y mínima) se extrajeron de *Climate change knowledge Portal* (<https://climateknowledgeportal.worldbank.org/download-data>).

El cuadro 12 representa los promedios anuales de los componentes del balance hídrico y analiza la respuesta hidrológica de la cuenca en el periodo de la línea base (1966-1984) junto con el corto plazo (2040) como derivación de las proyecciones de cambio climáticas acopladas al modelo SWAT tras evaluar la bondad de este (Mediante el fichero *Output.std*).

Los valores medios de los componentes del balance hídrico se relacionan en mm/año, mientras SYLD media en t Ha/año.

**Cuadro 12.** Línea Base de los componentes hidrológicos y escenarios futuros.

Escenario	Modelo	PREC	ET	SURQ	LATQ	GWQ	WYLD	SYLD
	Línea Base	1728.9	1019.5	194.77	76.73	378.77	672.40	22.6
<b>RCP 4.5</b>	CSIRO_MK_6_0	1763.8	1013.5	244.3	76.33	392.3	712.93	31.98
	GFDL_CM3	1568.2	1004.4	175.42	64.6	283.77	523.79	21.42
	MIROC5	1956.4	1031	305.48	87.67	496.27	889.42	42.59
	MRI-CGCM3	1422.6	981.6	112.76	57.58	232.48	402.82	13.09
<b>RCP 8.5</b>	CSIRO_MK_6_0	1603.8	907.7	241.86	67.82	349.75	659.43	34.43
	GFDL_CM3	1719.3	1039.9	193.22	74.69	372.42	640.33	23.86
	MIROC5	1767.7	1030.9	222.23	77.41	399.77	699.41	28.24
	MRI-CGCM3	1575.5	998.4	164.79	66.39	308.57	539.75	20.6

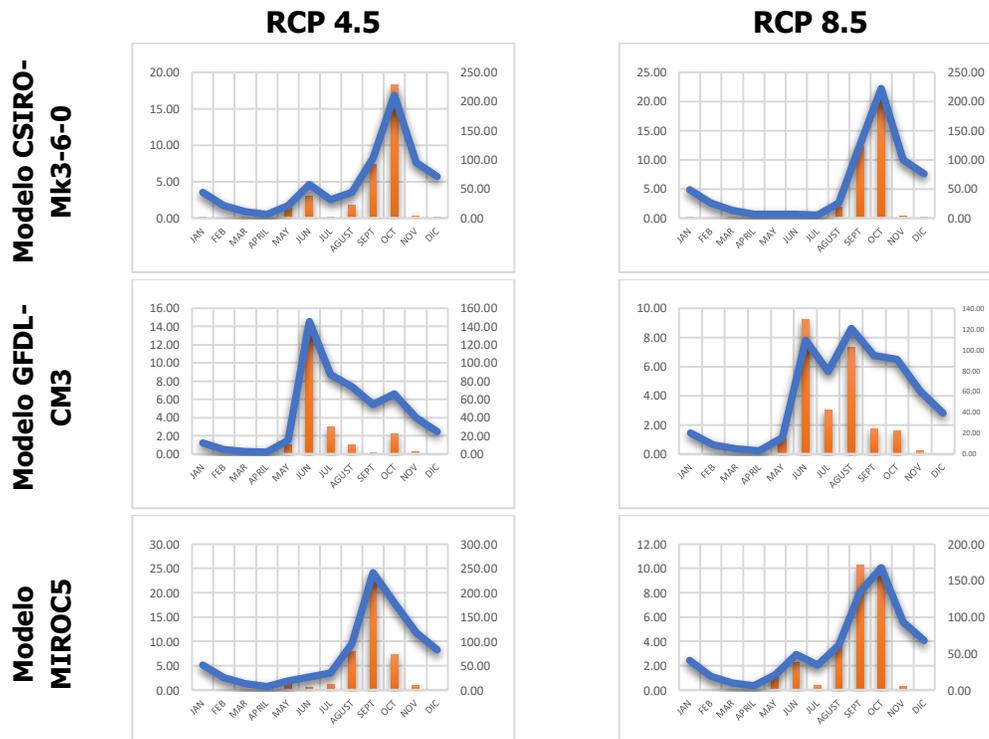
PREC: Precipitación, ET: Evapotranspiración, SURQ: Escorrentía Superficial, LATQ: Flujo lateral, GWQ: Recarga de acuíferos, WYLD: Producción de agua, SYLD: Erosión.

En el Cuadro 13, se indican los promedios anuales que los componentes presentan en los periodos y escenarios futuros con respecto a sus respectivos valores en la línea base. La precipitación disminuye, mientras que la escorrentía y la producción de sedimentos aumenta asociado a la conversión de bosque a otras coberturas menos demandante de recurso hídrico.

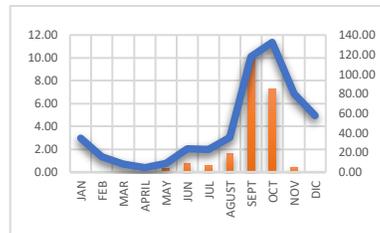
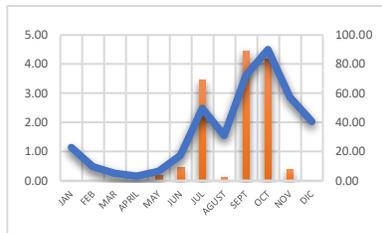
**Cuadro 13.** Respuesta hidrológica de la RH Estero de Jaltepeque en los periodos de estudio.

Variable	LÍNEA BASE	Año 2040	
		RCP4.5	RCP8.5
PREC	1728,9	1677,75 (-2,96%)	1666,57 (-3,60%)
ET	1019,5	1007,6 (-1,16%)	994,2 (-2,48%)
SURQ	194,77	209,5 (+7,26%)	205,5 (+5,52%)
LATQ	76,73	71,54(-6,76%)	71,57(-6,72%)
GWQ	400,9	351,2 (-12,4%)	357,6(-10,7%)
WYLD	672,4	632,24 (-5,97%)	634,7 (-5,60%)
SYLD	22,6	27,27 (+20,66%)	26,7 (+18,51%)

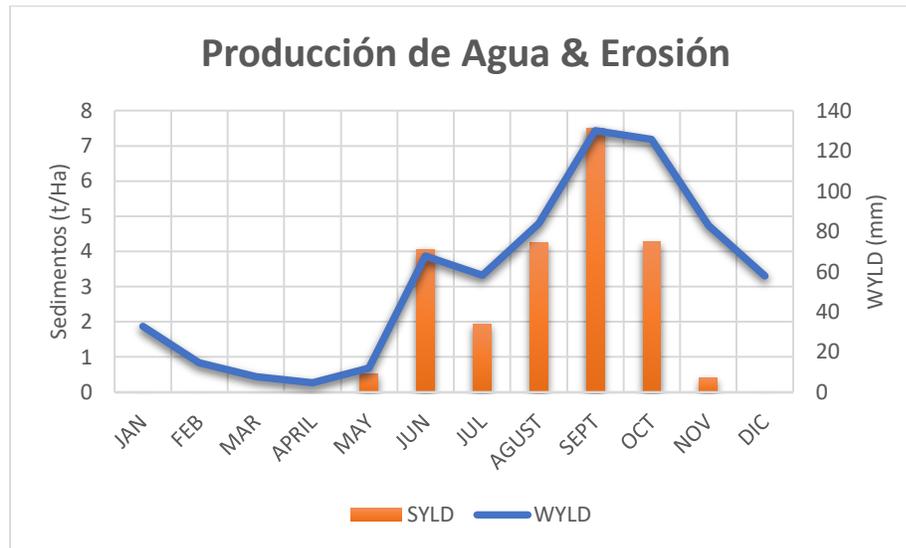
Los resultados obtenidos en la Cuadro 13, aportan valores y tendencias en la Región Hidrográfica Estero de Jaltepeque. Así mismo, los cambios registrados coinciden con las modificaciones mostradas en la Terceras comunicación nacional de El Salvador (MARN 2018), donde obtuvieron un periodo de referencia observada de 1961 – 1990 para cada uno de los escenarios RCP definidos por el IPCC y especificando los resultados en dos de los periodos estimados (Primer periodo: 2021-2050; segundo periodo: (2071-2100), para el estudio actual realizamos las comparaciones con el primer periodo, es decir, que hubo una elección correcta de la función objetivo, la eficiencia de NSE, así como de los parámetros hidrológicos seleccionados para representar el comportamiento hídrico del área.



**Modelo MRI-  
CGCM3**



**Línea Base**



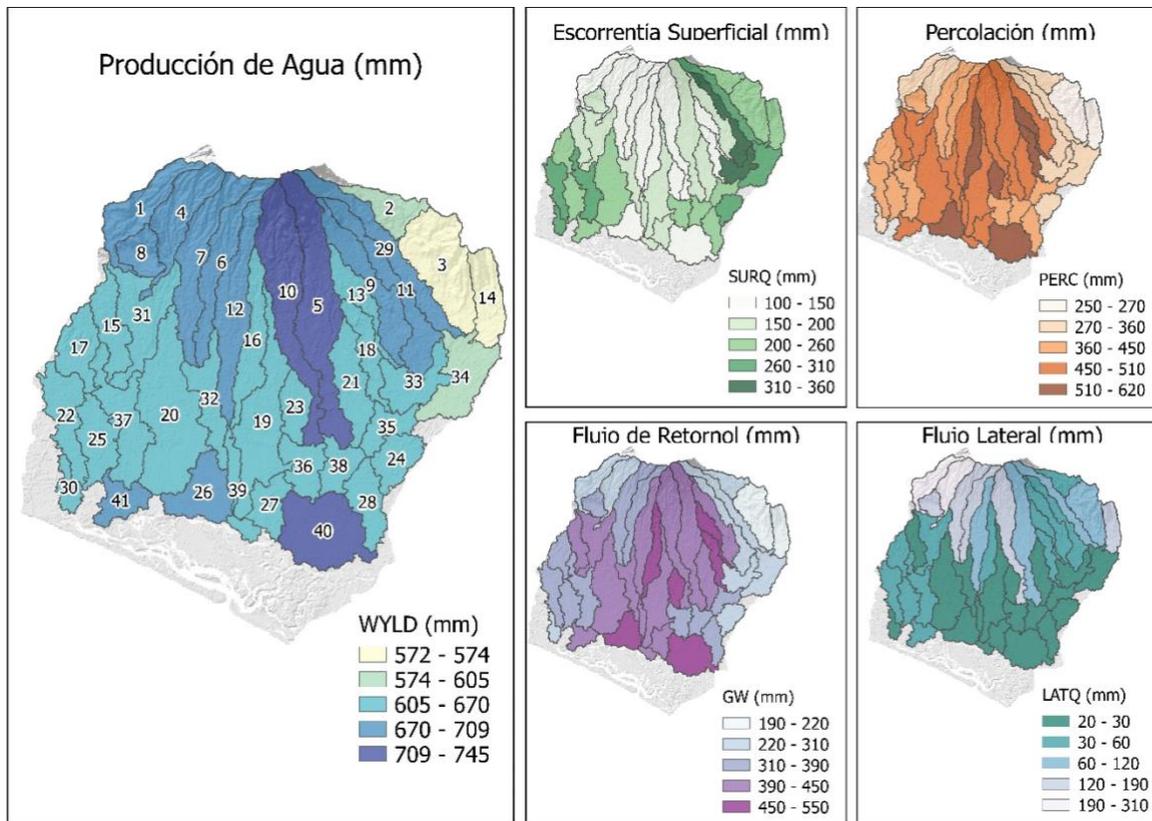
**Gráfica 4.** Comportamiento WYLD y SYLD línea base frente a los diferentes modelos y escenarios climáticos al 2040

La gráfica 4, refleja el comportamiento de la producción de agua y erosión y su compleja relación a lo largo de los diferentes modelos y escenarios climático. Esta conducta propone un tipo de sinergia de los servicios, esto puede deberse a una respuesta simultánea a la precipitación o la posible interacción verdadera entre los servicios. Lo que demuestra que los procesos de erosión y la cantidad de sedimentos dependen de la precipitación, intersección y escorrentía, evapotranspiración y el uso del suelo.

### 3.5. Producción de Agua

La producción de Agua (WYLD Nomenclatura SWAT), es uno de los parámetros más importantes estimados por SWAT (Bansode y Patil 2016, Sathian y Shyamala 2009, Adeogun et al. 2014) para la gestión eficiente del agua y su planificación.

Cuantificar la producción de agua es de vital importancia, debido a que representa el volumen de agua disponible para ser almacenado en un reservorio o presa. Esta producción de agua es el resultado de la suma algebraica de varios componentes del ciclo hidrológico como: Precipitación pluvial, escurrimiento superficial, percolación, flujo subsuperficial y flujo base (Ver Figura 5).



**Figura 5.** Componentes que determinan la Producción de agua en la línea base

La contribución realizada por cada subcuenca en el área de estudio, se efectuó para el modelo calibrado y bajo los escenarios RCP 4,5 y RCP 8,5, tomando los valores medios anuales para realizar la comparación.

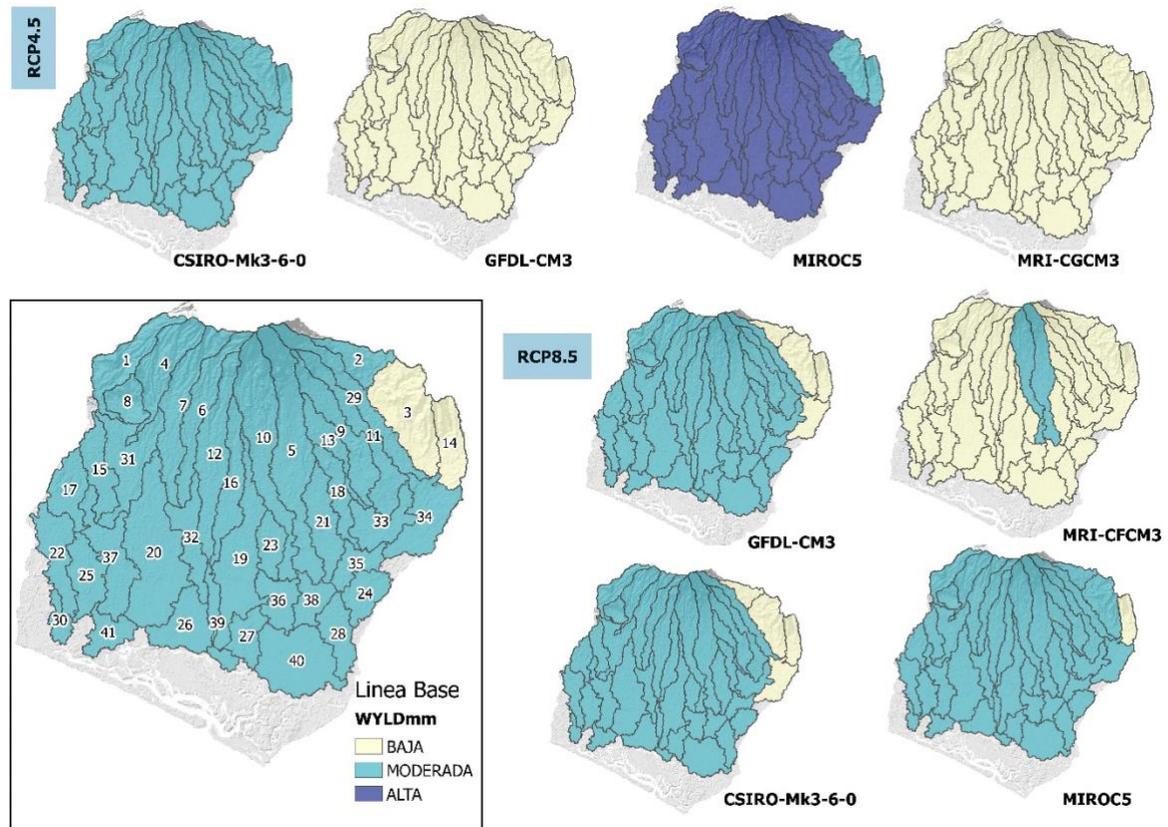
La producción de agua es una variable que depende de la interacción de diversos procesos del funcionamiento de los ecosistemas y de factores como la precipitación, geología, edafología y cobertura vegetal. En la literatura no se encontró una clasificación sobre la producción de agua, por lo cual se realizó una clasificación arbitraria (Cuadro 14) rangos bajo, moderado y alto dependiendo de los resultados que se observaron a lo largo de la interacción de los modelos y escenarios.

**Cuadro 14.** Clasificación Producción de Agua

Producción Agua (mm)	Clasificación
$\leq 500$	Baja
500 – 800	Moderada
$\geq 800$	Alta

Para la línea base de la región hidrográfica el 85 % de la cuenca se clasifica como producción de agua moderada, mientras que el 15% correspondiente para el sector Noreste se clasifica como producción baja.

el 75% de los modelos (6 de 8), se observa una producción de agua menores a 500 mm en las microcuencas 3 y 14 (Ver figura 6), situando estas en el Noreste de la región hidrográficas. Sin embargo, el 50 % de los modelos estima una producción de agua entre los 500 – 800 mm en cerca del 80 % del área de la cuenca. Y solamente el modelo MIROC5 en el escenario RCP4,5 estima una elevada producción de agua superiores a los 800 m en el 80% de la región.



**Figura 6.** Producción de agua anual promedio contribuido por cada subcuenca al año 2040 bajo los escenarios RCP4,5 y RCP8,5, según cuatro modelos de circulación general

### 3.6. Erosión

Los sedimentos no se lograron calibrar porque no existieron datos observados. Sin embargo, SWAT presenta datos coherentes para la erosión (SYLD), debido a la calibración de los caudales (Luzio et al. 2005). No todo el material movilizado por procesos de meteorización y erosivos alcanzan la red de drenaje por lo que se considera como sedimentos al volumen que se transporta hacia los tributarios.

Según, Wischmeier y Smith (1978) citado por (Sanchez-Hernández et al. 2013) La erosión potencial está definida como la pérdida de suelo (desagregación, transporte) que, en cantidad y calidad, se prevé va a tener lugar en el futuro en un área determinada por el efecto combinado de factores como la lluvia, escurrimiento, suelo y topografía.

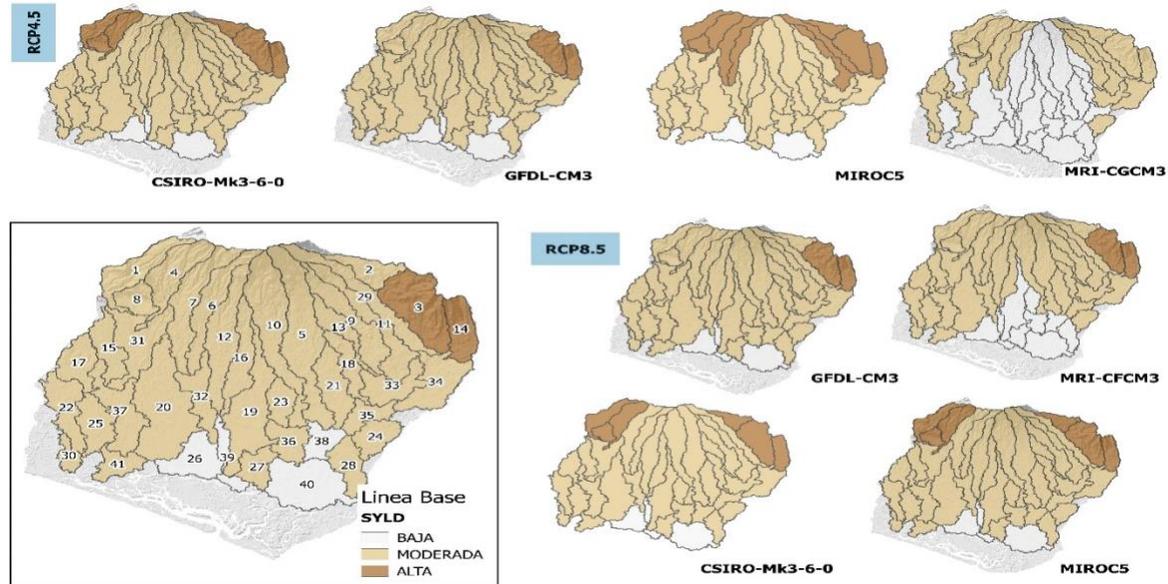
De acuerdo a lo anterior, la erosión es un proceso que sinterizan la compleja relación entre aspectos geológicos, geomorfológicos, climáticos, bióticos (Xu et al. 2009) y comportamiento sociocultural. El nivel de riesgo de erosión que se observa en la cuenca obedece a una combinación de factores que aceleran dicho proceso. Caso específico es el uso de suelo (Pasturas, Bosque), porcentaje de pendiente (>60%), tipo de suelo, así como los regímenes de precipitación que se registran.

La erosión potencial se evaluado a partir de la información suministrada por clasificación FAO-PNUMA-UNESCO (1981) (López Cadenas de Llano y Fernández Tomas 1998) (Cuadro 15 y figura 7)

**Cuadro 15.** Clasificación Perdida Suelo FAO-PNUMA-UNESCO (1981)

Perdida de Suelo (T Ha/Año)	Grado de erosión
$\leq 10$	Baja
10 – 50	Moderada
50 - 200	Alta
$\geq 200$	Muy Alta

Fuente. (López Cadenas de Llano y Fernández Tomas 1998)



**Figura 7.** Proyección de la contribución de Erosión potencial anual promedio por cada subcuenca al año 2040 bajo los escenarios RCP4,5 y RCP8,5, según cuatro modelos de circulación general

La erosión, está representado en la figura 7, donde se observa que en general comparando la línea base con los MCG y los diferentes escenarios de cambio climático, se mantiene un constante aporte similar de erosión de las subcuencas (1, 4, 8, 3 y 14), esto probablemente debido a que estas áreas poseen en común cobertura con cultivos permanentes, pastos y vegetación arbustiva, además de una elevada pendiente (ver figura 2), con alteraciones vinculadas a sobrepastoreo e incendios forestales.

Las coberturas de la cuenca 3 corresponde a (31% Pasturas Introducidas, 29% Bosque Intervenido, 26% Arbustos, 14 % Cultivos agrícolas), mientras que para la cuenca 14 es (42% Bosque Intervenido, 31% Pasturas Introducidas, 23% Cultivos agrícolas, 4% arbustos). Indicando el grado de participación de las diversas practicas efectuadas sobre el territorio causando efectos sobre la respuesta de la cuenca a eventos climáticos.

El 75% (6 de 8 modelos) establecen un grado de erosión potencial clasificada como alta en la parte Noreste de la cuenca, mientras que el 50% establece erosión generalizada en la zona Noreste y Noroeste de la Región, el 87,5% de los modelos establecen una erosión moderada en toda el área de la región, a excepto del Modelo MRI-CGCM3 escenario RPC 4,5 quien establece el escenario más optimo (baja erosión) en la conservación de los suelos de mantenerse las coberturas de suelo

La estimación de SYLD es de 22,6 t Ha/año para la línea base siendo un aporte moderado de acuerdo con la tasa tolerable de perdida de suelo, clasificación FAO-PNUMA-UNESCO (1981) (López Cadenas de Llano y Fernández Tomas 1998). Sin embargo, se debe establecer modelación con datos observados de sedimentos para verificar esta información.

## **4. DISCUSIÓN**

### **4.1. Calibración del Modelo**

Se utilizó la salida de la subcuenca del río Jalponga (microcuenca 31, según delimitación SWAT) con los parámetros calibrados se procedió a extender los resultados a las demás microcuencas. Los ajustes del modelo dependen en gran medida de los datos de entrada y en cuencas muy intervenidas los procesos naturales son secundarios al realizar simulaciones (Vargas 2011, Jackson et al. 2009)

Una variable importante que interviene en los procesos de generación de caudales son los usos del agua, debido a que se supone que existe una disminución del total del agua producida en la cuenca y la que llega al cauce principal, generando ruido o incertidumbre en el modelo (Espinosa Martínez et al. 2016).

El primer paso para la calibración es definir cuáles son los parámetros más sensibles. Sin embargo, Rostamian (2008), explica que la selección de parámetros para la calibración es una tarea difícil debido a que existen distintas soluciones. Para este estudio se eligieron 11 parámetros mediante revisión de literatura y finalmente se identificaron 4 por medio del

análisis de sensibilidad. Estos coinciden con Ghaffari et al (2010) y Singh et al (2013) que detallan una lista de 17 parámetros más sensibles usados para calibrar cuencas en Irán e India respectivamente. Indicando que la selección de parámetros fue la más adecuada y reduciendo la eficiencia computacional.

Varios autores discuten la necesidad de realizar calibraciones multi-sitio con SUFI-2 para estimar las variaciones espaciales dentro de la cuenca (Schuol y Abbaspour 2006, Chien et al. 2013). Sin embargo, Shrestha et al (2016) no encontraron diferencias significativas entre calibrar un solo punto y la calibración multi-sitio.

El valor de NSE para la calibración del modelo es de 0,57 de acuerdo con las pautas de evaluación de (Moriasi et al. 2007), se simuló satisfactoriamente las tendencias de caudal. Sin embargo, estos se registraron a expensas de un p-factor y r-factor de 0.5 (50% modelo explicado), lo que indica un equilibrio del modelo a razón de que si aumenta el grosor de la banda de incertidumbre (r-factor) es muy probable que aumente el porcentaje de datos medidos (p-factor), aumentando la incertidumbre del modelo. (Abbaspour et al. 2007, 2015)

#### **4.2. Comportamiento Precipitación**

La precipitación media anual de la cuenca alcanza en la línea base los 1728,9 mm/año, mientras SWAT estima para el periodo futuro de referencia en el escenario RCP4,5 y RCP8,5 reducciones entorno al 2,96% y 3,6 % respectivamente, esto se ajusta con Gutiérrez y Espinosa (2010) que prevén una disminución sustancial de las precipitaciones e indican un aumento en la frecuencia e intensidad de los eventos extremos.

El 11,2% de la precipitación se convierte en escorrentía superficial media anual de la cuenca, situada en los 194,77 mm/año, en el escenario RCP4,5 aumenta un 7,26%, al igual tendrá un aumento de 5,54% en el escenario RCP8,5, lo anterior reflejado en las elevadas tasas de ET que representa los escenarios 60% y 59,6% PREC se transforman en ET respectivamente, estos cambios desencadenan reducciones en las tasas de retorno de acuíferos y por ende del caudal base o ecológico de los cursos superficiales afectando los ecosistemas asociados (Kløve et al. 2014) aumentando entre un 20,6% y un 18,5% la erosión SYLD para los escenarios RCP4,5 y RCP8,5.

La producción de agua media anual WYLD, tendría una reducción en promedio del 5,8% (39,6mm) para ambos escenarios, esto debido a la disminución sustancial de las precipitaciones, el elevando aumento de la tasa de evapotranspiración, entre otros factores. La disminución del rendimiento hídrico reduce el agua subterránea y los caudales de los principales ríos, con constantes pérdidas de humedad y de productividad para el suelo agrícola (Magrin 2015), mientras que SYLD produce 22,6 t Ha/año en la línea base, lo cual traduce 1.900.000 t en el área de la cuenca en promedio con posibilidad de aumento de un 20% para los demás escenarios.

La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) en el estudio denominado "La economía del cambio climático en Centroamérica" (2012), refleja una disminución paulatina en el régimen de lluvias bimodal, durante el primer trimestre de cada época lluviosa. Esta condición identificada, refleja una tendencia hacia la desaparición del régimen bimodal característico de El Salvador, desplazando la lluvia hacia el trimestre final del año.

Esto afianzado por (MARN 2018), el cual indica que el régimen de lluvias (época seca: Noviembre a abril. Época lluviosa: Mayo a octubre) se alteró sustancialmente en las últimas décadas, debido al registro de diversas anomalías en el patrón temporal y espacial de lluvia, lo que ha derivado en el incremento de fenómenos hidrometeorológicos, tanto por exceso como por déficit de precipitación.

### **4.3. Producción de agua**

El proceso de la evapotranspiración contribuye con una la mayor cantidad de pérdida de agua de la cuenca. Sin embargo, la producción de agua no solo depende del clima, configuración topográfica y geológica, sino también, de la vegetación que las ocupa (Jackson et al. 2009, Nosetto et al. 2012).

Un análisis estadístico realizado en 94 cuencas Bosch y Hewlet 1982 Citado por (Cavelier y Vargas 2002) y 145 cuencas experimentales Sahin y Hall 1996 citados por (Cavelier y Vargas 2002) demostró que una reducción en la cobertura del bosque produce un incremento en la producción de agua anual y no una disminución como generalmente se piensa, es decir que al aumentar la cobertura de bosque existe una disminución en la producción de agua en la cuenca, esto sucede siempre y cuando la precipitación local no disminuya. Sin embargo, las circunstancias observadas en experimentos controlados (corto plazo) pueden diferir de aquellas situaciones del mundo real, que ocurren en el mediano y largo plazo.

Se ha observado que con el tiempo la capacidad de almacenamiento de agua del suelo en cuencas deforestadas se reduce con el tiempo, esto debido a la compactación, oxidación de la materia orgánica y erosión, entre otros factores (Bruijnzeel 2004, citando a Lal 1987) ocasionando la pérdida de la capacidad para almacenar agua en periodos húmedos y mantener el caudal estiaje en épocas de sequía, deteriorando la capacidad reguladora de la cuenca.

El área noreste de la cuenca está controlada en su mayoría por Bosque, forestación mixta y pasturas, lo que genera una reducción en la producción de agua por factores como la pendiente y la escorrentía, además de la extracción continua de agua por medio de las raíces profundas de los árboles (Schenk y Jackson 2002).

Un área degradada por sobrepastoreo y/o labores del suelo que cambia su uso de cobertura a pasturas y sistemas de forestación con especies de rápido crecimiento puede favorecer la infiltración para evitar pérdidas de agua por escorrentía y de esta manera aumentar el caudal base, en estos casos WYLD total no aumenta (habitualmente tiende a disminuir) (Istedt et al. 2007) a cambio de una oferta más estable de agua en épocas de verano (Jobbágy et al. 2013, Istedt et al. 2007).

#### **4.4. Erosión**

Diversos son los factores que pueden influir en la estimación de sedimentos en una cuenca, aunque nuestro estudio no posee datos de sedimentos observados por consiguiente no se ejecutó la calibración. Sin embargo, SWAT presenta datos para la erosión derivados de la calibración que se efectuó con los datos de caudal observados (Luzio et al. 2005).

Arabi Et al. (2006), comprobaron que la producción de sedimentos y de nutrientes es muy sensible al nivel de subdivisión (número y tamaño de cuencas) determinados por SWAT.

Otros estudios han demostrado que la resolución del DEM tiene un efecto en la delimitación de las subcuencas, como en el cálculo de parámetros topográfico y parámetros físicos de la cuenca (dirección del flujo, la red de drenaje y las pendientes de drenaje), lo cual modifica la erosión y la producción de sedimentos. Buakhao y Kangrang (2016), informan que una resolución Baja produce una mayor segmentación de una cuenca hidrográfica (proporciona más subcuencas para la misma área), mientras que con un conjunto de datos de mayor resolución permiten una mejor delineación de áreas planas.

Un factor que influye en la producción de erosión y sedimentos en la región hidrográfica del estero de Jaltepeque, es la cantidad de precipitación que recibe la cuenca. Duru et al. (2017) señala que solamente la precipitación no puede explicar complejos procesos físicos relacionados con la hidrología del sitio y la geología. Sin embargo, en el área de estudio se puede relacionar que en las áreas de mayor erosión corresponden a las zonas donde menor producción de agua existe correspondiente al Noroeste de la Cuenca.

Un efecto a corto plazo de la remoción de bosques es un aumento en el volumen anual de escurrimiento (Quintero 2010). Ataroff y Rada (2000), concluyeron en un estudio de cambios de bosque a pastos, que los pastizales sometidos a pastoreo intensivo disminuyen su intercepción y transpiración aumentando el escurrimiento. Esto se debe a que la conversión de bosque a otro uso de tierra, generalmente menos demandante de agua, hace que exista más agua disponible en el suelo y se produzcan incrementos en el volumen anual de escorrentía (Quintero 2010).

La conversión de Bosque a Pasturas y la variación de las precipitaciones en intensidad y duración afectan directamente el desempeño de la cuenca para infiltrar el agua de lluvia por

lo que el agua no se transfiere a la atmosfera y pasa a ser parte del escurrimiento aumentando la erosión y los riesgos de deslizamiento.

López y Romero (1992) señalan que las lluvias en grandes volúmenes e intensidad liberan enormes cantidades de energía que se ven reflejadas en elevadas pérdidas de suelo (alta Erosividad). Igualmente la topografía y el grado de pendientes son factores que aceleran la perdida de suelo; de acuerdo con Alvarado-Cardona et al. (2015) las parte de la cuenca que tengas pendientes mayores al 25% representan las mayores áreas de erosión. A los factores antes mencionados se añaden las actividades antropogénicas, como la variable que modifica el paisaje, con el consecuente impacto sobre el clima, los ciclos del agua, la emisión de gases de efecto invernadero y la biodiversidad.

## **5. CONCLUSIONES**

El modelo representa un ajuste adecuado para la calibración de caudales y resultados coherentes para la producción de sedimentos. Sin embargo, el modelo sobreestima los caudales pico (altos flujos; PBIAS negativo) asociados a las fuertes precipitaciones, lo que indica que el modelo sobrevalora la erosión potencial y por consiguiente la producción de sedimentos.

El modelo calibrado (reduce la incertidumbre,  $NSE=0.57$ ) se utilizó para estudiar los efectos del comportamiento hidrológico bajo diferentes escenarios de cambio climático y su repercusión en la producción de agua y erosión. La erosión en el noroeste de la cuenca se incrementará para los escenarios climáticos proyectados al tiempo que aumenta la evapotranspiración y disminuye el rendimiento hídrico para el área de estudio

De acuerdo con la modelación, y tomando como periodo histórico o línea base (1963-1984) y los escenarios RCP4,5 y RPC8,5 al año 2040 bajo los diferentes modelos de circulación global se estima una reducción en la precipitación de 2,96% (51,2 mm/año) y 3,6%(62,3mm/año) para los respectivos escenarios, al igual que reducción en la reducción promedio de la producción de agua en 5,8% (39,6mm) y un aumento en erosión del 20,6% (4,67 t/Ha/año) y 18,5% (4,18 t/Ha/año) frente a los 22,6 t/Ha/año de la línea base.

Para explicar la producción de agua y erosión se define que el cambio de cobertura vegetal incide directamente en las características físicas e hidráulicas del suelo, lo que puede llevar en la pérdida del efecto de esponja, la remoción del bosque se traduce en amento del escurrimiento y por consiguiente la erosión.

## 6. RECOMENDACIONES

Establecer estaciones de aforo granulométricas y/o trampa de sedimentos (topobatimetrías, técnica caudales-sólidos) en áreas de las cuencas para poder tener datos observados que permitan robustecer el modelo.

Utilizar la línea base como un diagnóstico para la configuración de herramientas que permitan establecer programas para la identificación de áreas de recarga hídrica, conservación del suelo y niveles freáticos elevados para establecer áreas potencialmente de recarga de acuífero y establecer mejores caudales base.

Implementar técnicas de Hidrología Isotópica para rastrear e identificar la distribución de la precipitación en los diferentes componentes del balance hídrico y de esta manera velar por la seguridad del agua y la sostenibilidad de los recursos hídricos en la región hidrológica del estero de Jaltepeque, El Salvador.

Para la incorporación de anomalías en los escenarios futuros se aconseja realizar una reducción de escala para obtener resultados más adecuados y de esta manera reducir la incertidumbre de los modelos climáticos

## 7. LITERATURA CITADA

- Abbaspour, K; Vaghefi, S; Srinivasan, R; Abbaspour, KC; Vaghefi, SA; Srinivasan, R. 2017. A Guideline for Successful Calibration and Uncertainty Analysis for Soil and Water Assessment: A Review of Papers from the 2016 International SWAT Conference (en línea). *Water* 10(1):6. DOI: <https://doi.org/10.3390/w10010006>.
- Abbaspour, KC. (2015). SWAT-CUP SWAT Calibration and Uncertainty Programs (en línea). s.l., s.e. Disponible en [https://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual\\_swatcup](https://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual_swatcup)
- Abbaspour, KC; Johnson, CA; van Genuchten, MT. 2004. Estimating Uncertain Flow and Transport Parameters Using a Sequential Uncertainty Fitting Procedure (en línea). *Vadose Zone Journal* 3(4):1340-1352. DOI: <https://doi.org/10.2113/3.4.1340>.
- Abbaspour, KC; Rouholahnejad, E; Vaghefi, S; Srinivasan, R; Yang, H; Kløve, B. 2015. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model (en línea). *Journal of Hydrology* 524:733-752. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2015.03.027>.
- Abbaspour, KC; Yang, J; Maximov, I; Siber, R; Bogner, K; Mieleitner, J; Zobrist, J; Srinivasan, R. 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT (en línea). *Journal of Hydrology* 333(2-4):413-430. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2006.09.014>.
- Adeogun, AG; Sule, BF; Salami, AB; Daramola, MO. 2014. Validation of SWAT Model for Prediction of Water Yield and Water Balance: Case Study of Upstream Catchment of Jebba Dam in Nigeria (en línea). *International Scholarly and Scientific Research & Innovation* 8:2(ISNI:0000000091950263). Disponible en

- <https://www.semanticscholar.org/paper/Validation-of-SWAT-Model-for-Prediction-of-Water-of-Adeogun-Sule/5b932eb786b67f55ee730d7ab873c1956b764bde>.
- Arabi, M; Govindaraju, RS; Hantush, MM; Engel, BA. 2006. ROLE OF WATERSHED SUBDIVISION ON MODELING THE EFFECTIVENESS OF BEST MANAGEMENT PRACTICES WITH SWAT (en línea). *Journal of the American Water Resources Association* 42(2):513-528. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2006.tb03854.x>.
- Arnold, J; Srinivasan, R; Muttiah, R; Williams, J. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *Journal of the American Water Resources Association* 34(1):73-89.
- Arnold, JG; Allen, PM. 1996. Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds (en línea). *Journal of Hydrology* 176(1-4):57-77. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02782-3](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02782-3).
- Arnold, JG; Kiniry, JR; Srinivasan, R; Williams, JR; Haney, EB; Neitsch, SL. 2013. SWAT 2012 Input/Output Documentation (en línea). Consultado 3 jun. 2019. Disponible en <https://oaktrust.library.tamu.edu/handle/1969.1/149194>.
- Ataroff, M; Rada, F. 2000. Deforestation Impact on Water Dynamics in a Venezuelan Andean Cloud Forest (en línea). *AMBIO: A Journal of the Human Environment* 29(7):440-444. DOI: <https://doi.org/10.1579/0044-7447-29.7.440>.
- Ayivi, F; Jha, MK. 2018. Estimation of water balance and water yield in the Reedy Fork-Buffalo Creek Watershed in North Carolina using SWAT (en línea). *International Soil and Water Conservation Research* 6(3):203-213. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ISWCR.2018.03.007>.
- Bansode, S; Patil, K. 2016. Water Balance Assessment using Q-SWAT Rheological Properties of Nanoclay Modified Bitumen View Project Water Balance Assessment using Q-SWAT (en línea). Article in *International Journal of Engineering Research*. DOI: <https://doi.org/10.17950/ajar/v5s6/620>.
- Batjes, NH. 2016. Harmonized soil property values for broad-scale modelling (WISE30sec) with estimates of global soil carbon stocks (en línea). *Geoderma* 269:61-68. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2016.01.034>.
- Benegas Negri, L. 2017. Priorización de áreas para implementar buenas prácticas de manejo en cuencas costeras (en línea). s.l., s.e. 64 p. Consultado 2 jun. 2019. Disponible en [http://201.207.189.89/bitstream/handle/11554/8716/Priorizacion\\_de\\_areas\\_para\\_implementar\\_buenas.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://201.207.189.89/bitstream/handle/11554/8716/Priorizacion_de_areas_para_implementar_buenas.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- Bennett, EM; Peterson, GD; Gordon, LJ. 2009. Understanding relationships among multiple ecosystem services (en línea). *Ecology Letters* 12(12):1394-1404. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01387.x>.
- Bermudes, F; Auncion, M. 1992. Génesis y consecuencias erosivas de las lluvias de alta intensidad en la región mediterránea (en línea). *Cuadernos de investigación geográfica / Geographical Research Letters*, ISSN 0211-6820, N° 18-19, 1992-1993, págs. 7-28 (18):7-28. Consultado 10 sep. 2019. Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=81497>.

- Brenes, C.; Benavides, R; Ballesteros, D. 2013. SEASONAL SIGNATURES IN THE PHYSICAL PROPERTIES OF A TROPICAL ESTUARY IN THE CENTRAL AMERICA PACIFIC (en línea). UNICIENCIA 27(1101 –0275):15. Disponible en <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/uniciencia/article/view/4949/4743>.
- Buakhao, W; Kangrang, A. 2016. DEM Resolution Impact on the Estimation of the Physical Characteristics of Watersheds by Using SWAT (en línea). Advances in Civil Engineering 2016:1-9. DOI: <https://doi.org/10.1155/2016/8180158>.
- Cardona, MA; Robles, JAC; Almegua, M de la LV. 2015. Alvarado Cardona, Miguel; Colmenero Robles, J. Aurelio; Valderrábano Almegua, Ma. de la Luz (en línea). s.l., Universidad Autónoma del Estado de México, vol.14. 317-326 p. Consultado 10 sep. 2019. Disponible en <https://cienciaergosum.uaemex.mx/article/view/7151>.
- Cavelier, J; Vargas, G. 2002. Procesos Hidrológicos. In *Guariguata, M; Kattan, G (eds.)*. Cartago, Costa Rica, Libro Universitario Regional. p. 145-165.
- Chien, H; Yeh, PJ-F; Knouft, JH. 2013. Modeling the potential impacts of climate change on streamflow in agricultural watersheds of the Midwestern United States (en línea). Journal of Hydrology 491:73-88. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.03.026>.
- Corvalán, C (Carlos); Hales, S; McMichael, AJ (Anthony J.; Millennium Ecosystem Assessment (Program); World Health Organization. 2005. Ecosystems and human well-being: health synthesis (en línea). s.l., World Health Organization. 53 p. Disponible en [https://books.google.co.cr/books?hl=en&lr=&id=vKIXuZZ-9QsC&oi=fnd&pg=PR3&ots=uyDJIoXamf&sig=wxMQvvrar7on1h6FldJbIr6xhs&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.co.cr/books?hl=en&lr=&id=vKIXuZZ-9QsC&oi=fnd&pg=PR3&ots=uyDJIoXamf&sig=wxMQvvrar7on1h6FldJbIr6xhs&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false).
- Douglas-Mankin, KR; Srinivasan, R; Arnold, JG. 2010. Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Model: Current Developments and Applications (en línea). Transactions of the ASABE 53(5):1423-1431. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.34915>.
- Duru, U; Wohl, E; Ahmadi, M. 2017. Factors Controlling Sediment Load in The Central Anatolia Region of Turkey: Ankara River Basin (en línea). Environmental Management 59(5):826-841. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00267-016-0818-8>.
- EL-SADEK, A; İRVEM, A. 2014. Evaluating the impact of land use uncertainty on the simulated streamflow and sediment yield of the Seyhan River basin using the SWAT model (en línea). TURKISH JOURNAL OF AGRICULTURE AND FORESTRY 38:515-530. DOI: <https://doi.org/10.3906/tar-1309-89>.
- Espinosa Martínez, S; Custodio, E; Custodio, E. 2016. Estimación de la escorrentía superficial para el cálculo de la recarga a los acuíferos del macizo kárstico de los Ports de Beseit (Tarragona, España) combinando balance de agua en el suelo y análisis de hidrogramas de caudales (en línea). Estudios Geológicos 72(1): e045. DOI: <https://doi.org/10.3989/egeol.42132.374>.
- FAO. (2009). Guía para la descripción de suelos (en línea). Roma, s.e. Disponible en <http://www.fao.org/3/a-a0541s.pdf>.
- Faramarzi, M; Abbaspour, KC; Schulin, R; Yang, H. 2009. Modelling blue and green water resources availability in Iran (en línea). Hydrological Processes 23(3):486-501. DOI:

- <https://doi.org/10.1002/hyp.7160>.
- Foley, JA; Defries, R; Asner, GP; Barford, C; Bonan, G; Carpenter, SR; Chapin, FS; Coe, MT; Daily, GC; Gibbs, HK; Helkowski, JH; Holloway, T; Howard, EA; Kucharik, CJ; Monfreda, C; Patz, JA; Prentice, IC; Ramankutty, N; Snyder, PK. 2005. Global consequences of land use. (en línea). *Science (New York, N.Y.)* 309(5734):570-4. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1111772>.
- Ghaffari, G; Keesstra, S; Ghodousi, J; Ahmadi, H. 2010. SWAT-simulated hydrological impact of land-use change in the Zanzanrood basin, Northwest Iran (en línea). *Hydrological Processes* 24(7):892-903. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.7530>.
- Gómez Varela, GI; González Rodríguez, EE. 2012. Aplicación de la legislación relativa a las áreas naturales protegidas. Caso: Estero de Jaltepeque (en línea). Consultado 2 jun. 2019. Disponible en <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/2788/>.
- Gupta, M; Wei, G-Y; Gupta, MS; Rivers, JA; Bose, P; Brooks, D. 2009. Tribeca: Design for PVT variations with local recovery and fine-grained adaptation (en línea). DOI: <https://doi.org/10.1145/1669112.1669168>.
- Gutiérrez, ME; Espinosa, T. (2010). Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático Diagnóstico inicial, avances, vacíos y potenciales líneas de acción en Mesoamérica (en línea). s.l., s.e. Disponible en [www.iadb.org](http://www.iadb.org).
- Haverkamp, S; Fohrer, N; Frede, H-G. 2005. Assessment of the effect of land use patterns on hydrologic landscape functions: a comprehensive GIS-based tool to minimize model uncertainty resulting from spatial aggregation (en línea). *Hydrological Processes* 19(3):715-727. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.5626>.
- Hidalgo, HG; Alfaro, EJ. 2015. Skill of CMIP5 climate models in reproducing 20th century basic climate features in Central America (en línea). *International Journal of Climatology* 35(12):3397-3421. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.4216>.
- Ilstedt, U; Malmer, A; Verbeeten, E; Murdiyarsa, D. 2007. The effect of afforestation on water infiltration in the tropics: A systematic review and meta-analysis (en línea). *Forest Ecology and Management* 251(1-2):45-51. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2007.06.014>.
- J. G. Arnold, JG; D. N. Moriasi, DN; P. W. Gassman, PW; K. C. Abbaspour, KC; M. J. White, MJ; R. Srinivasan, R; C. Santhi, C; R. D. Harmel, RD; A. van Griensven, A van; M. W. Van Liew, MW Van; N. Kannan, N; M. K. Jha, MK. 2012. SWAT: Model Use, Calibration, and Validation (en línea). *Transactions of the ASABE* 55(4):1491-1508. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.42256>.
- J. R. Williams, JR; H. D. Berndt, HD. 1977. Sediment Yield Prediction Based on Watershed Hydrology (en línea). *Transactions of the ASAE* 20(6):1100-1104. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.35710>.
- Jackson, RB; Jobbágy, EG; Noretto, MD. 2009. Ecohydrology Bearings-Invited Commentary Ecohydrology in a human-dominated landscape (en línea). *ECOHYDROLOGY Ecohydrol* 2:383-389. DOI: <https://doi.org/10.1002/eco.81>.
- Jobbágy, EG; Acosta, AM; Noretto, MD. 2013. Rendimiento hídrico en cuencas primarias bajo pastizales y plantaciones de pino de las sierras de Córdoba (Argentina) (en

- línea). *Ecología Austral* 023(02):087-096. Disponible en [https://digital.bl.fcen.uba.ar/collection/ecologiaaustral/document/ecologiaaustral\\_v023\\_n02\\_p087](https://digital.bl.fcen.uba.ar/collection/ecologiaaustral/document/ecologiaaustral_v023_n02_p087).
- Jung, C-G; Lee, D-R; Moon, J-W. 2016. Comparison of the Penman-Monteith method and regional calibration of the Hargreaves equation for actual evapotranspiration using SWAT-simulated results in the Seolma-cheon basin, South Korea (en línea). *Hydrological Sciences Journal* 61(4):793-800. DOI: <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.943231>.
- Kalcic, MM; Chaubey, I; Frankenberger, J. 2015. Defining Soil and Water Assessment Tool (SWAT) hydrologic response units (HRUs) by field boundaries (en línea). *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 8(3):69-80. DOI: <https://doi.org/10.25165/IJABE.V8I3.951>.
- Kløve, B; Ala-Aho, P; Bertrand, G; Gurdak, JJ; Kupfersberger, H; Kværner, J; Muotka, T; Mykrä, H; Preda, E; Rossi, P; Uvo, CB; Velasco, E; Pulido-Velazquez, M. 2014. Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems (en línea). *Journal of Hydrology* 518:250-266. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2013.06.037>.
- Larios, S. 2012. Gakko annai gakuan: Koko juken no tame no sogo johoshi. 2013-Kanagawakenban. (en línea). s.l., Kyoikushuppan'yudekku. 75-83 p. Consultado 3 jun. 2019. Disponible en <https://revistas.una.ac.cr/index.php/perspectivasrurales/article/view/5598>.
- Liew, MW Van; Veith, TL. (2010). Guidelines for Using the Sensitivity Analysis and Auto-calibration Tools for Multi-gage or Multi-step Calibration in SWAT (en línea). s.l., s.e. Disponible en <https://www.researchgate.net/publication/268344153>.
- Luzio, M Di; Arnold, JG; Srinivasan, R. 2005. Effect of GIS data quality on small watershed stream flow and sediment simulations (en línea). *Process* 19:629-650. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.5612>.
- Magrin, GO. (2015). Adaptación al cambio climático en América Latina y el Caribe (en línea). s.l., s.e. Disponible en [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/39842/S1501318\\_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/39842/S1501318_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- MARN. (2013). 2ºComunicación Nacional sobre Cambio Climático (en línea). s.l., s.e. Consultado 2 jun. 2019. Disponible en [www.marn.gob.sv](http://www.marn.gob.sv).
- Me, W; Abell, JM; Hamilton, DP. 2015. Effects of hydrologic conditions on SWAT model performance and parameter sensitivity for a small, mixed land use catchment in New Zealand (en línea). *Hydrol. Earth Syst. Sci* 19:4127-4147. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-19-4127-2015>.
- Memarian, H; Balasundram, SK; Abbaspour, KC; Talib, JB; Boon Sung, CT; Sood, AM. 2014. SWAT-based hydrological modelling of tropical land-use scenarios (en línea). *Hydrological Sciences Journal* 59(10):1808-1829. DOI: <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.892598>.
- Moriasi; Arnold, J; ... MVL-T of the; 2007, U. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations (en línea).

- elibrary.asabe.org. Disponible <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=23153>.
- Moriasi, DN; Arnold, JG; Liew, MW Van; Bingner, RL; Harmel, RD; Veith, TL. (1983). MODEL EVALUATION GUIDELINES FOR SYSTEMATIC QUANTIFICATION OF ACCURACY IN WATERSHED SIMULATIONS (en línea). 50. s.l., s.e. Consultado 1 jun. 2019.
- Neitsch, SL; Arnold, JG; Kiniry, JR; Williams, JR. (2005). SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL THEORETICAL DOCUMENTATION VERSION 2005 (en línea). s.l., s.e. Disponible en <https://swat.tamu.edu/media/1292/SWAT2005theory.pdf>.
- Paz, B. (2012). Clasificación de suelos por división política de El Salvador, C.A. San Salvador, El Salvador, s.e.
- Quintero, M. (2010). Estado del conocimiento, la acción y la política para asegurar su provisión mediante esquemas de pago por servicios ambientales SERIE PANORAMA ANDINO Servicios Ambientales Hidrológicos en la Región Andina (en línea). Lima, s.e.
- Ramsar. 2013. Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (en línea). :86. Disponible en [http://www.marn.gob.sv/descargas/Menu/Temas/Biodiversidad/AreasNaturalesProtegidas/Humedales/ComplejoBarra de Santiago.pdf](http://www.marn.gob.sv/descargas/Menu/Temas/Biodiversidad/AreasNaturalesProtegidas/Humedales/ComplejoBarradeSantiago.pdf).
- Ricketts, TH; Regetz, J; Steffan-Dewenter, I; Cunningham, SA; Kremen, C; Bogdanski, A; Gemmill-Herren, B; Greenleaf, SS; Klein, AM; Mayfield, MM; Morandin, LA; Ochieng', A; Viana, BF. 2008. Landscape effects on crop pollination services: are there general patterns? (en línea). Ecology Letters 11(5):499-515. DOI: [https://doi.org/10.1111/J.1461-0248.2008.01157.X@10.1111/\(ISSN\)1461-0248.YEAR-OF-BIODIVERSITY](https://doi.org/10.1111/J.1461-0248.2008.01157.X@10.1111/(ISSN)1461-0248.YEAR-OF-BIODIVERSITY).
- Rivera, CG. 2013. Manejo pesquero sostenible de *Ucides occidentalis* ("punche"), recurso hidrobiológico de la cuenca baja del Río Lempa, Bahía de Jiquilisco, departamento de Usulután (en línea). Consultado 2 jun. 2019. Disponible en <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/3530/>.
- Rodríguez, E. (2012). Documento De Diagnostico del Bajo Lempa y Estero de Jaltepeque (en línea). s.l., s.e. Consultado 2 jun. 2019. Disponible en [https://rimisp.org/wp-content/files\\_mf/1366383044DiagnosticoBajoLempaEsteroJaltepequeElSalvador.pdf](https://rimisp.org/wp-content/files_mf/1366383044DiagnosticoBajoLempaEsteroJaltepequeElSalvador.pdf)
- ROSTAMIAN, R; JALEH, A; AFYUNI, M; MOUSAVI, SF; HEIDARPOUR, M; JALALIAN, A; ABBASPOUR, KC. 2008. Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran (en línea). Hydrological Sciences Journal 53(5):977-988. DOI: <https://doi.org/10.1623/hysj.53.5.977>.
- Rouholahnejad. 2013. Modeling the hydrology of the Black Sea Basin and assessing the impacts of climate change and land use change on water resources (en línea). DOI: <https://doi.org/10.3929/ethz-a-010164357>.
- Rouholahnejad, E; Abbaspour, KC; Vejdani, M; Srinivasan, R; Schulin, R; Lehmann, A. 2012. A parallelization framework for calibration of hydrological models (en línea). Environmental Modelling & Software 31:28-36. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.12.001>.
- Sánchez-Hernández, R; Palacios, J de R; De la Cruz Reye, J. 2013. Mapa de erosión potencial

- en la cuenca hidrológica Grijalva-Usumacinta México mediante el uso de SIG (en línea). *Universidad y Ciencia* 29:153-161. Disponible en <http://www.redalyc.org/pdf/154/15428946005.pdf>.
- Sathian, K; Shyamala, P. 2009. Application of GIS integrated SWAT MOdel for Basin Level Water Balance. *Indian Journal of Soil Conservation* 37:100-105.
- Schuol, J; Abbaspour, KC. 2006. Calibration and uncertainty issues of a hydrological model (SWAT) applied to West Africa (en línea). *Advances in Geosciences* 9:137-143. DOI: <https://doi.org/10.5194/adgeo-9-137-2006>.
- Schuol, J; Abbaspour, KC. 2007. Using monthly weather statistics to generate daily data in a SWAT model application to West Africa (en línea). *Ecological Modelling* 201(3-4):301-311. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ECOLMODEL.2006.09.028>.
- Shen, ZY; Chen, L; Chen, T. 2012. Analysis of parameter uncertainty in hydrological and sediment modeling using GLUE method: a case study of SWAT model applied to Three Gorges Reservoir Region, China (en línea). *Hydrol. Earth Syst. Sci* 16:121-132. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-16-121-2012>.
- Shrestha, MK; Recknagel, F; Frizenschaf, J; Meyer, W. 2016. Assessing SWAT models based on single and multi-site calibration for the simulation of flow and nutrient loads in the semi-arid Onkaparinga catchment in South Australia (en línea). *Agricultural Water Management* 175:61-71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.02.009>.
- Stocker, T. 2013. *Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (en línea). s.l., s.e. 1535 p. Disponible en [https://books.google.co.cr/books?hl=en&lr=&id=o4gaBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR1&ots=Wgpv8RAwSg&sig=ssJbPjEWKe2yOM3JcFL7I3iDoHE&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.co.cr/books?hl=en&lr=&id=o4gaBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR1&ots=Wgpv8RAwSg&sig=ssJbPjEWKe2yOM3JcFL7I3iDoHE&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false).
- Vargas, O. 2011. Restauración ecológica, biodiversidad y conservación (en línea). s.l., *Acta Biológica Colombiana*, vol.16. 221-246 p. Disponible en <https://revistas.unal.edu.co/index.php/actabiol/article/view/19280/28009>.
- Willemen, L; Drakou, EG; Schwarz, N. 2019. Modelling how people and nature are intertwined (en línea). *Ecography: ecog*.04747. DOI: <https://doi.org/10.1111/ecog.04747>.
- Williams, J. 1975. Sediment Yield Prediction with Universal Equation Using Runoff Energy Factor, in *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources*. ARS-S-40 (USDA): USDA.
- Winchell, M; Srinivasan, R; Di Luzio, M; Arnold, JG. (2013). *Arcswat Interface for SWAT2012: User's Guide*. Texas, s.e.
- Wischmeier, WH; Smith, DD. 1978. Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning. (en línea). *Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning*. :62-67. Disponible en <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19786726437>.
- Xu, ZX; Pang, JP; Liu, CM; Li, JY. 2009. Assessment of runoff and sediment yield in the Miyun Reservoir catchment by using SWAT model (en línea). *Hydrological Processes*

- 23(25):3619-3630. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.7475>.
- Zhang, Y; Degroote, J; Wolter, C; Sugumaran, R. 2009. Integration of modified universal soil loss equation (MUSLE) into a gis framework to assess soil erosion risk (en línea). *Land Degradation & Development* 20(1):84-91. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.893>.
- Zhu, Q; Tian, Y; Zhao, J. 2006. An efficient depression processing algorithm for hydrologic analysis (en línea). *Computers & Geosciences* 32(5):615-623. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.CAGEO.2005.09.001>.

## **CAPITULO III**

### **ARTICULO II. Análisis de la dinámica de servicios ecosistémicos hídricos mediante el uso de insumos de cobertura generados por el traductor de portafolio del software RIOS utilizando la plataforma InVEST.**

#### **RESUMEN**

Los servicios ecosistémicos (SE) son los beneficios que percibe la sociedad del funcionamiento de los ecosistemas, y su estrecha relación con la seguridad alimentaria es un argumento convincente para la puesta en marcha de herramientas que permitan la inversión de recursos en cuencas hidrográficas. Para la Región Hidrográfica del Estero de Jaltepeque se utilizó Sistema de Optimización de Inversión de Recursos (RIOS) y la suite de Valoración Integrada de Ecosistemas e Intercambios Ambientes (InVEST) mediante el modelo de distribución de sedimentos (SDR). Los datos de entrada los proporciono la Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua (SWAT). Se utilizaron tres modelos hidrológicos para la elaboración de un portafolio de inversiones más efectiva y menos costosa destinada al beneficio de las cuencas hidrográficas. RIOS genera prácticas en las áreas de mayor exportación de sedimentos priorizadas por el modelo SDR para realizar control de la erosión. La práctica que transforma la mayor cantidad de área es la siembra en curvas de nivel y plantaciones en contorno 35% (1761.75 Ha) corresponde a la conversión, seguido del uso de semillas mejoradas con un 30% (1509.03 Ha), la actividad menos rentable es la restauración ecológica de manglares con 21.87 Ha intervenidas equivalente al 0.43%. Con el portafolio se logra intervenir en un horizonte de 3 años, sumando un total de aproximadamente 5086.8 Ha de un total de 82160 Ha. El portafolio de inversión priorizado para el área reduce la exportación de sedimentos especialmente en las áreas donde se incluyen las practicas con reducciones entre 337 y 759 Ton/subcuenca.

#### **ABSTRACT**

Ecosystems Services (ES) are the benefits society receives from ecosystem functions. The direct relation of ES with food security is a convincing argument to use tools that allow the use of watershed management resources investment. For the Jaltepeque Hydrographic Estuary Region in El Salvador the Resource Investment Optimization System (RIOS) and the Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST) were used in the Sediment Delivery Ratio (SDR) model. The input data was provided by Soil Water Assessment Tool (SWAT). Three hydrological models were used for a cost-effective portfolio of investments. To benefit the watershed and the communities that use it. RIOS generated practices in the areas of greater sediment export according to the SDR model to perform erosion control. The practice that transforms the greatest area is the agricultural and tree planting in contour lines covering 35% of the area (1761.75 Ha) that corresponds to a conversion. Followed using enhanced seeds with a 30% (1509.03 Ha). The least feasible practice is the ecological restoration of mangroves equal to 0.43% (21.87 Ha). With the portfolio the intervention of 5086,8 Ha in a three-year timeframe was possible, adding a

proximate total of 82160 Ha. The investment portfolio prioritized for the area reduces Sediment Exportation, specifically in the areas where the practices with reductions between 337 and 759 Ton/ Sub-watershed.

## **2. INTRODUCCIÓN**

En América Latina y el Caribe, las zonas costeras han sido poco integradas al desarrollo socioeconómico y ambiental. Normalmente sufren impactos del inadecuado manejo de las cuencas hidrográficas que reciben sedimentos, residuos sólidos, aguas contaminadas. Lo que ocurre en la cuenca, aguas arriba, repercute aguas abajo deteriorando paulatinamente los ecosistemas de manglar, estuarios entre otros afectando de paso a las comunidades humanas.

De acuerdo con Aguilar *et al* (2005), el cambio climático está ejerciendo presión sobre los ecosistemas, especialmente al componente hídrico debido a los cambios en los patrones de distribución de la precipitación. Esto afecta directamente los sistemas de producción y medio de vida de la sociedad y los obliga a tomar decisiones sobre la gestión del agua y el manejo y uso de la tierra.

El impacto del deterioro no solo se refleja en los ecosistemas propiamente afectados, sino también en la oferta de servicios ecosistémicos como la provisión de recurso hídrico para consumo humano y uso de la agricultura (Whelchel y Beck 2016), así como el control de la erosión y sedimentación para evitar el colapso de sistemas de tratamiento de agua potable (Setegn et al. 2010, Gellis y Walling 2011, Keeler et al. 2012) y la recarga de acuíferos como mecanismo de regulación de los caudales y aprovisionamiento de agua potable (Diaw et al. 2012, Dillon 2005).

De acuerdo con GIRH, los recursos hídricos son un componente esencial de los ecosistemas de tal manera que la gestión y planificación de servicios hídricos se está volviendo más difícil como consecuencia de las incertidumbres sobre el cambio climático. El manejo de cuencas pretende elaborar planes, estrategias y acciones para garantizar un flujo continuo de agua y servicios ecosistémicos de calidad (Guerrero et al. 2006).

Sin embargo, la planificación del territorio es clave para buscar la sostenibilidad de los ecosistemas (Ovalles et al. 2008), donde se deben dar arreglos y configuraciones del uso de la tierra bajo un enfoque adaptativo y de cogestión de cuencas con el fin de que los actores locales respondan y contribuyan motivados principalmente por intereses y necesidades económicas (Shuhuai et al. 2001).

La planificación del territorio explora otros enfoques como es el de la utilización de herramientas espaciales que abren la posibilidad de realizar mapeo de servicios

ecosistémicos (Latterra et al. 2017) en espacio y tiempo lo cual permite evaluar la dinámica y patrones de cambio del territorio (Esse et al. 2014, Egoh et al. 2008).

Para el área de estudio de la región hidrográfica del estero de Jaltepeque se realizó un ejercicio de planificación territorial sobre los servicios ecosistémicos de regulación (Control de la erosión y mejoramiento de la recarga de acuíferos) con el Sistema de Optimización de Inversiones en Recursos (RIOS) plataforma que permite generar un portafolio de inversión en actividades de restauración previamente evaluadas. Además, se realizó la valoración de la distribución de sedimentos a través del modelo (SDR) InVEST.

Estas dos herramientas SIG de licencia abierta, fueron desarrollados por el grupo Natural Capital Project, en acompañamiento de la universidad de Minnesota y la Universidad de Stanford, The Nature Conservancy y World Wildlife Fund (Vogl et al. 2016). Creadas como instrumentos para la elaboración de portafolios de servicios que permitan mapear, evaluar, cuantificar y valorar los bienes y servicios del ecosistema transformando de esta manera datos en información para la toma de decisiones.

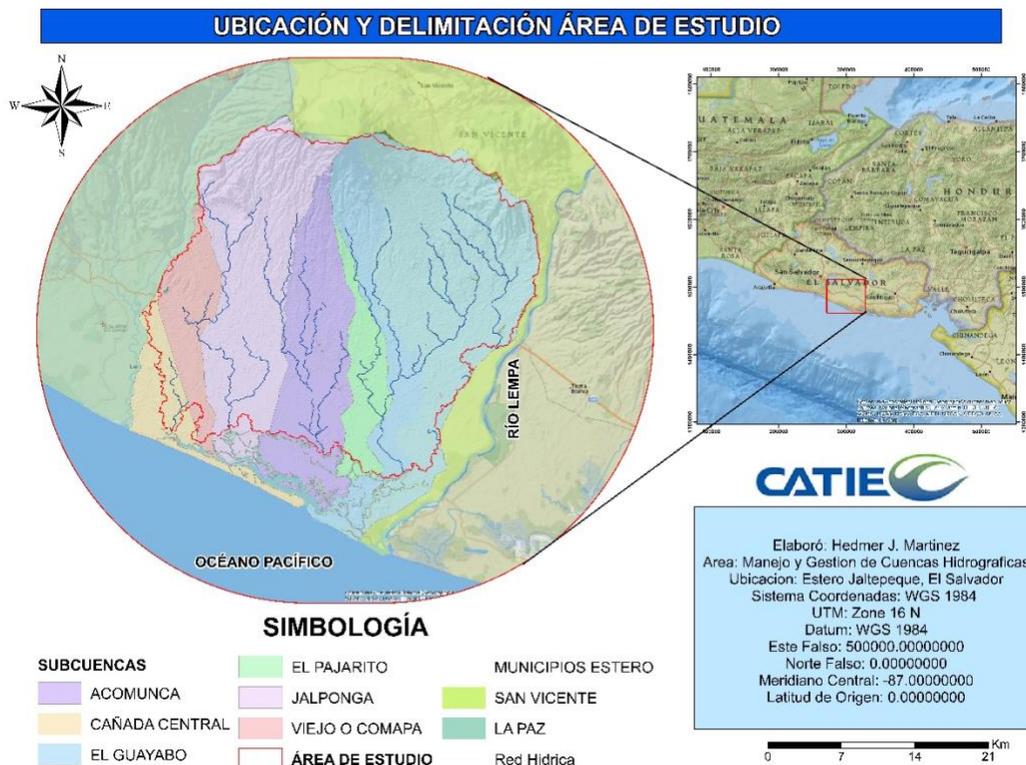
### **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **2.2. Área de Estudio**

La Región Hidrográfica Estero de Jaltepeque (El Salvador) (13°20'33.4" N, 88° 56'48.9" O), ubicado en la parte central de la República de El Salvador, comprende la Zona de Vida de Holdridge del Bosque Húmedo Subtropical, la cual constituye el 85,6% de la superficie del territorio que se extiende desde la cadena volcánica hasta las planicies costeras donde hay predominio de suelos aluviales (Reyna et al., 1996).

El área total es de 821,6 km<sup>2</sup> con un espejo de agua igual a 15 km<sup>2</sup> que se está rellenando con los sedimentos fluviales de los ríos Lempa y Jiboa y 6 subcuencas que drenan el área (Cañada Central, Viejo o Comapa, Jalponga, El Pajarito, El Guayabo y Acomunca) (MARN 2013), El régimen de precipitación es monomodal, identificándose un periodo lluvioso (mayo - octubre) y seco (noviembre a abril) y presenta un rango altitudinal de 0 – 2181 msnm, cerca del 74% del área total de la región comprende entre el 0 y 5% de pendiente.

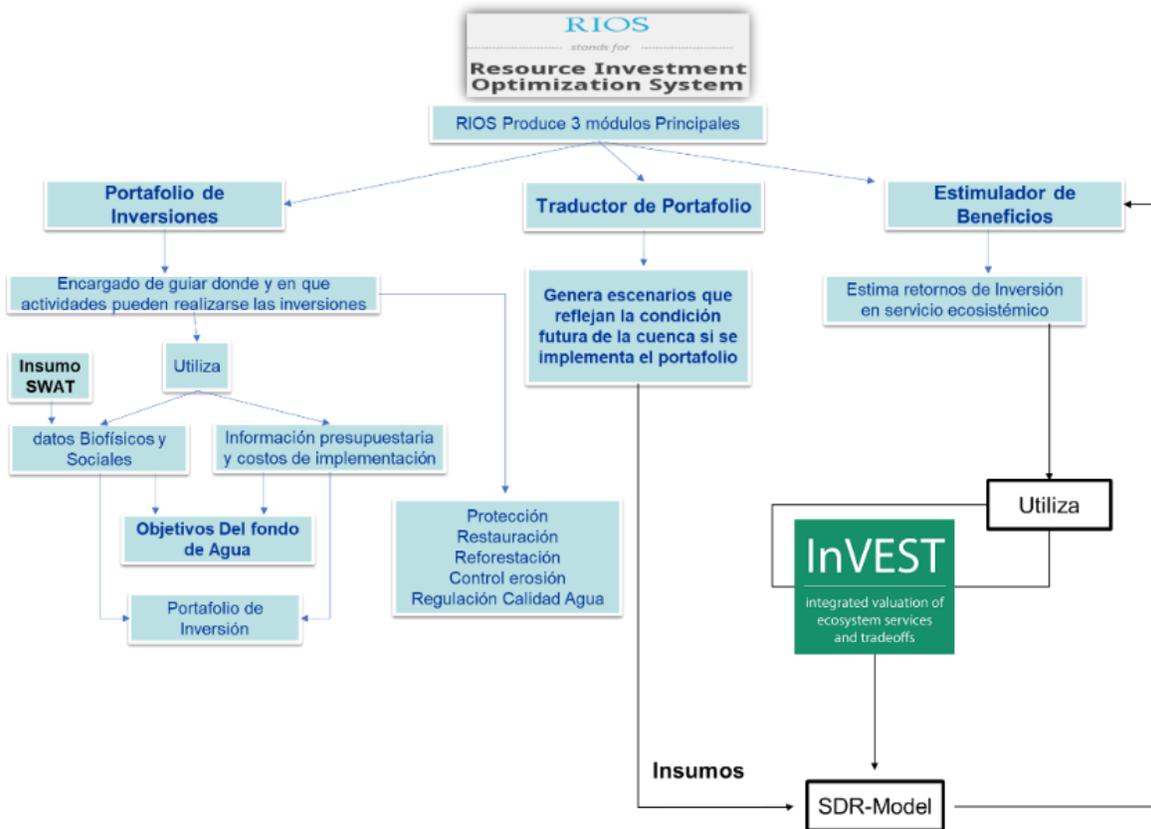
Se encuentra limitado al Norte por el Volcán San Vicente o Chinchontepec (2181 msnm), al Noroeste por el Lago de Ilopango y las estribaciones orientales de la Sierra del Bálsamo. en el Oeste por la cuenca baja del río Jiboa y en el extremo Este por la cuenca baja del río Lempa que lo divide del sitio Ramsar bahía de Jiquilisco (MARN 2013) y al sur por el complejo del estero de Jaltepeque (Sitio Ramsar 2011) y el Océano Pacífico (Gómez Varela y González Rodríguez 2012) Ver Figura 8.



**Figura 8.** Ubicación, subcuencas y Red hídrica Región Hidrográfica Estero de Jaltepeque, Fuente (Ramsar 2013)

## 2.1. Acoplamiento Modelo SDR-InVEST y RIOS

De acuerdo con Vogl (2016), el modelo SDR-InVEST y RIOS son íntegramente compatibles, es decir, los outputs del traductor de portafolios del módulo RIOS, se pueden utilizar como Inputs sin ningún tratamiento adicional para el modelo en cuestión de InVEST como se muestra en la gráfica 5 y cuadro 18 para estimar el retorno en servicios ecosistémicos de la inversión del portafolio.



**Gráfica 5.** Proceso Modelo RIOS e InVEST

## 2.2. Sistema de Optimización de Inversión en Recursos – RIOS

RIOS fue desarrollado por *The Natural Capital Project* (NatCap) y *The Nature Conservancy* (TNC), es una herramienta de software de código abierto y gratuita, diseñada para conservar y proteger los servicios ecosistémicos mediante la priorización de las inversiones en infraestructura verde en cuencas hidrográficas (Vogl et al. 2016, Hunink y Droogers 2015), identifica sitios donde las actividades de protección o conservación pueden producir al menor costo los mayores beneficios para las personas y el medio ambiente.

RIOS posee un enfoque basado en la ciencia, que utiliza datos biofísicos, sociales y económicos para priorizar actividades de protección y restauración en áreas específicas de la cuenca, su fin principal es crear un portafolio o esquema de inversiones destinado a garantizar el máximo rendimiento ecológico de la inversión. Generalmente trabaja con fondo de Agua.

## 2.3. Como Funciona RIOS

RIOS ayuda a la priorización de actividades (en cuanto a cuáles actividades en cual parte de la cuenca) para proteger o aumentar los servicios ecosistémicos bajo estrategias de

conservación (Ver cuadro 16) más importante para el fondo. Es importante destacar que hay una variedad de actividades que pueden ser eficaces para promover una estrategia de conservación (Guerrero y Herrera 2018). Por ejemplo, la educación ambiental, guardaparques, o pagos por servicios ambientales todos pueden promover a mantener la vegetación existente (Frantz y Mayer 2014)(Frantz y Mayer 2014, de Groot et al. 2002).

**Cuadro 16.** Servicios ecosistémicos modelados por RIOS y estrategias de Conservación

<b>SERVICIOS MODELADOS - OBJETIVOS</b>	<b>ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN</b>
CONTROL DE EROSIÓN PARA AGUA DE CONSUMO HUMANO Y PARA EL MANTENIMIENTO DE EMBALSES. RETENCIÓN DE FÓSFORO RETENCIÓN DE NITRÓGENO MITIGACIÓN DE INUNDACIONES RECARGA DE ACUÍFEROS MANTENIMIENTO DEL CAUDAL	Aumento de la diversidad y cobertura de cultivos  Mantener vegetación existente Modificación de la estructura del paisaje Revegetación asistida o natural Disminuir entradas agrícolas Manejo de Pastoreo

La estructura de RIOS, consta de un ambiente denominado "Pre-processing" en ArcGIS y tres módulos de interfaz en software (ver cuadro 17). El "Pre-processing" es necesario para generar datos biofísicos que requieren los módulos.

**Cuadro 17.** Módulos RIOS

<b>Módulos de RIOS</b>	<b>Asesor Portafolio de inversiones</b>	<b>Traductor de Portafolio</b>	<b>Estimador de Beneficios</b>
	utiliza datos biofísicos (Uso/cobertura de suelo, Topografía, Erosividad, Erodabilidad, ubicación cuenca), sociales (que actividades son factibles, costo oportunidad, preferencia de actores), económicos (Costo de actividades por área) y un presupuesto total del fondo del agua.	Representan el estado futuro de la cuenca si se implementa el portafolio de inversión.	Estima el retorno de la inversión en cuanto a control de erosión, y retención de nutrientes, usando el modelo InVEST.
<b>Finalidad</b>	Producir un portafolio de inversiones (mapa de actividades) que indican donde y en que invertir.		

## 2.4. Requerimiento Datos Espaciales Modelo – RIOS

Para el ambiente Pre-processing se utilizó *ArcGIS10.3* y versión de *RIOS 1.1.16*. la información para La Región Hidrográfica del Estero de Jaltepeque, fue suministrada por el Proyecto WATERCLIMA.LAC (Cuadro 18), adicional se introdujo insumos provenientes del modelo SWAT ejecutado previamente. Para modelar los objetivos que persigue RIOS (Cuadro 16) son necesarios una serie de datos espaciales biofísicos (Vogl et al. 2016, 2016), en este estudio se persiguen los objetivos de recarga de acuíferos y control de la erosión.

**Cuadro 18.** Datos espaciales para modelar los objetivos de recarga de acuíferos y control de la erosión

TIPO DE DATO	FUENTE DE INFORMACIÓN	CARACTERÍSTICAS DEL DATO
<b>MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN – DEM</b>	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) – El Salvador	<ul style="list-style-type: none"> <li>El DEM fue corregido utilizando el software ArcGIS 10.3 y el algoritmo <i>Fill</i> de la caja de herramientas "<i>Hydrology</i>" para ubicar y corregir los sumideros que pudiera presentar el DEM (Zhu et al. 2006)</li> <li>Tamaño de celda 30*30 m</li> <li>Proyección WGS 1984 UTM Zona 16N</li> <li>Formato ráster contiene el valor o coeficientes biofísicos de la clase LULC (<i>rios_default_lulc_coefficients.csv</i>) que más se asimila al tipo de cobertura o uso del suelo compartido por MARN</li> </ul>
<b>USO DEL SUELO</b>	MARN – El Salvador	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tamaño de la celda 30*30 m</li> <li>Proyección WGS 1984 UTM Zona 16N</li> </ul>
<b>RIOS TABLA DE COEFICIENTES BIOFISICOS</b>	<i>Natural Capital Project</i> . Guía de uso RIOS, paso a paso (Vogl et al. 2016)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tabla en formato <i>.csv</i> estos coeficientes representan las clases de cobertura o los usos, las prácticas y las condiciones de manejo</li> <li>Este índice caracteriza la agresividad de la precipitación, y se calcula con la ecuación del índice modificado de Fournier (Sauerborn et al. 1999, Angulo-Martínez y Beguería 2009):</li> </ul>
<b>EROSIVIDAD POR LLUVIA FACTOR R</b>	Elaboración propia a partir de la base de datos climáticas histórica (1963-1984) introducidas al modelo SWAT	$IFM = \sum_{i=1}^{12} \frac{p_i^2}{P}$ <p>Donde:  <i>IFM</i> índice de Fournier modificado en mm  <i>P<sub>i</sub></i> ... precipitación del mes <i>i</i> en mm  <i>P</i> es la precipitación total anual en mm</p>

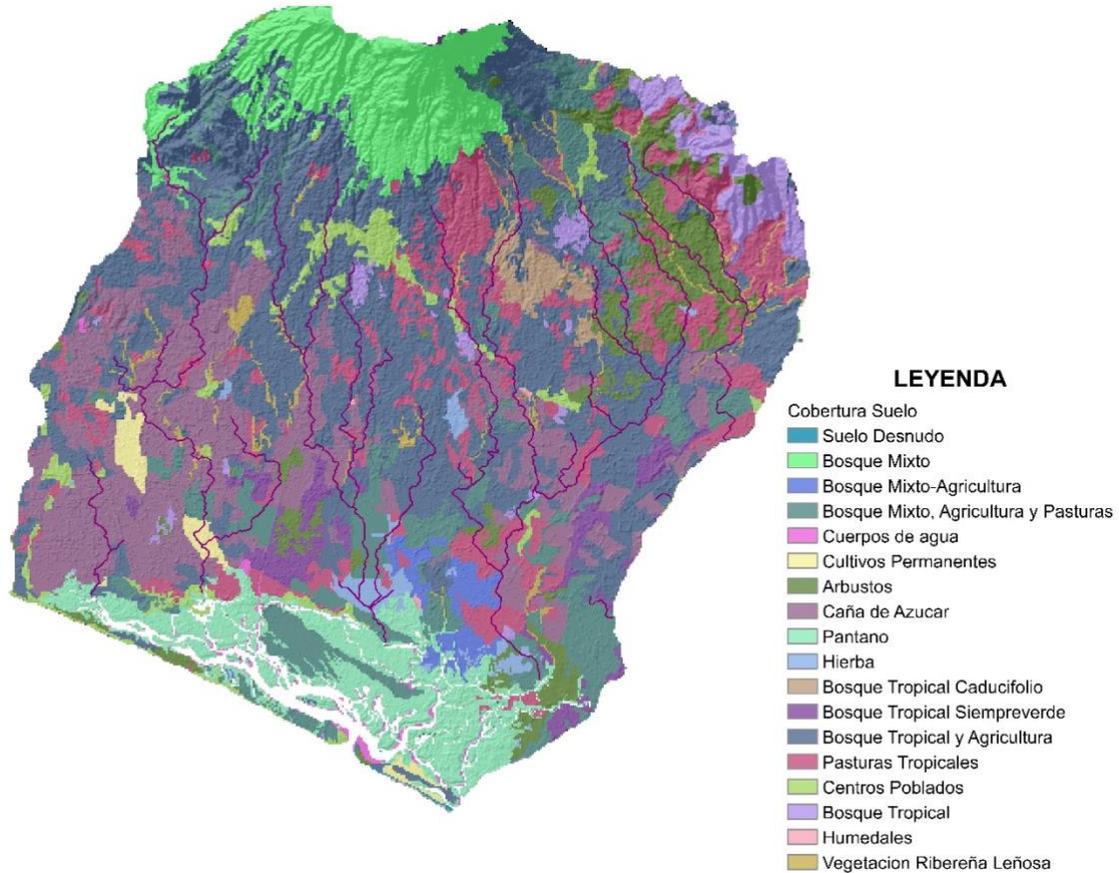
<p><b>ERODABILIDAD DEL SUELO FACTOR K</b></p>	<p>Elaboración propia a partir de la base "Useroil" del modelo WAT</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>El índice para estimar el Factor K está dado por la fórmula del Grupo Tragsa (1998), (Chikhaoui et al. 2016):  <math display="block">K = [10^{-4} * 2.71 * M^{1.14} * (12-mo) + 4.20 (s-2) + 3.23 (p-3)] / 100</math> </li> </ul> <p>Donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>K = Factor de erodabilidad del suelo, expresado [t*m<sup>2</sup>*hr/ha*J*cm]</li> <li>MO = Materia orgánica [%]</li> <li>s = Código de la estructura del suelo</li> <li>p = Código de permeabilidad</li> </ul>
<p><b>PROFUNDIDAD DEL SUELO</b></p>	<p>Elaboración propia a partir de la base "Useroil" del modelo SWAT</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>M = Producto de las fracciones del tamaño de las partículas primarias o (%limo+%arena) *(100-%arcilla)</li> <li>Formato ráster que indica la profundidad del suelo</li> <li>Tamaño de la celda 30*30 m</li> <li>Información edáfica proporcionada por MARN e información secundaria (<i>soterlac</i>)</li> <li>Proyección WGS 1984 UTM Zona 16N</li> </ul>
<p><b>TEXTURA DEL SUELO</b></p>	<p>Elaboración propia a partir de la base "Useroil" del modelo SWAT</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Formato ráster, que indica el índice de textura de suelo, que va de liviano a pesado con base en el contenido porcentual de arena, limo y arcilla</li> </ul>
<p><b>EVAPOTRANSPIRACIÓN ACTUAL</b></p>	<p>Elaboración propia a partir de los resultados de las simulaciones del modelo SWAT</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Formato ráster que indica la evapotranspiración generada para el modelo SWAT por el método de Hargreaves</li> </ul>
<p><b>PRECIPITACIÓN DEL MES MÁS LLUVIOSO</b></p>	<p>Elaboración propia a partir del registro histórico climático para el modelo SWAT</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Formato ráster que expresa el promedio de precipitación del mes más lluvioso</li> </ul>
<p><b>PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL</b></p>	<p>Elaboración propia a partir del registro histórico climático para el modelo SWAT</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Formato ráster que expresa la media de la precipitación anual</li> </ul>
<p><b>CUENCA HIDROGRÁFICA</b></p>	<p>MARN – El Salvador</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Archivo en formato <i>Shapefile</i> el cual define los límites de la región</li> </ul>

- Hidrográfica del estero de Jaltepeque y lo organiza en 6 subcuencas
- Proyección WGS 1984 UTM Zona 16N

Los códigos de uso de suelo fueron reclasificados según la tabla de coeficientes biofísicos de RIOS (Figura 9), utilizando la metodología descrita por El- Sadek e İrvem (2014). Estos coeficientes representan las clases de cobertura o los usos, las prácticas y las condiciones de manejo (Cuadro 19).

**Cuadro 19.** Nomenclatura Cobertura de suelos RIOS

<b>Cobertura de Suelo</b>	<b>Nomenclatura RIOS</b>	<b>Cobertura de Suelo</b>	<b>Nomenclatura RIOS</b>
Cultivos Agrícolas	Bosque Mixto y Agricultura	Matorral	Hierba
Agricultura familiar	Cultivos agrícolas	Pastos-Gramíneas	Pastos-Gramíneas
Área erosionada	Suelo Desnudo	Cultivo caña de azúcar	Caña de Azúcar
Matorral-arbustos	Pasturas Tropicales	Zona Industrial	Centros Poblados
Bosque Seco	Bosque Tropical caducifolio	Poblados	Centros Poblados
Bosque Latifoliado (Húmedo, Nublado, Semihúmedo)	Bosque Tropical	Caseríos	Centros Poblados
Bosque	Bosque Tropical Siempre Verde	Lagos y Lagunas	Cuerpos De Agua
Bosque Conífero abierto o denso	Bosque Coníferas	Humedal con bosque	Vegetación ribereña leñosa
Humedal	Humedal		



*Figura 9.* Uso de suelos según los coeficientes biofísicos de RIOS

Dado que las actividades definidas por el usuario deben asignarse a las transiciones respaldadas por RIOS, se debe asignar peso (valores de 0 a 1; relación de prioridad 0 no existe, 1 papel más importante) a la relación interna del sistema y son componentes que están estrechamente relacionado con el funcionamiento de los pixeles en los objetivos como flujo pendiente arriba (upslope flow), pixel fuente (on-pixel source), retención de pixel (on-pixel-retention) (CATIE 2017). Después se debe asignar pesos a variables (requisitos datos espaciales cada objetivo) que dominan los objetivos frente las actividades y las transiciones, sugiriendo que las características del paisaje hacen que los pesos en las actividades tengan un valor solido independientemente de los parámetros que resulten representar los parámetros en la realidad (Bryanr et al. 2015).

## **2.5. Valoración Integrada de Servicios e Intercambios Ambientales – InVEST**

La herramienta computacional InVEST comprende varios modelos de Servicios que permite cuantificar, mapear y valorar servicios ambientales. Desarrollado por el Proyecto Capital Natural (NatCap), (Kareiva et al. 2011, Nelson et al. 2009), y un equipo interdisciplinario de la universidad de Stanford, The Nature Conservancy, Fondo Mundial para la Vida Silvestre,

y la Universidad de Minnesota (Toft et al. 2019). El Proyecto tiene como objetivo integrar los valores de la naturaleza en todas las decisiones importantes que afectan el medio ambiente y el bienestar humano (Goldman-Benner et al. 2012).

Para este estudio se utilizó el modelo *de Relación de Suministro de Sedimentos* (por sus siglas en Ingles, SDR) InVEST, en adelante SDR, el objetivo de esta herramienta es cuantificar y mapear por medio de modelos la generación de sedimentos en el territorio (Sharp et al. 2018) asociados a las coberturas de la tierra y las características del paisaje (Clima, Suelo, Geomorfología, Coberturas de la tierra, entre otras). el proceso de la erosión y generación de sedimentos se genera en todos los ambientes terrestres. Sin embargo, las dinámicas de cambio del paisaje y uso del suelo, son determinantes en la magnitud del proceso(Canqiang et al. 2012, Bagstad et al. 2013).

La valoración del servicio ambiental de generación de sedimentos logra visibilizar las áreas más vulnerables y las que brinden mejor retención, debido a que este fenómeno afecta directamente la estructura del suelo y las fuentes hídricas superficiales.

## 2.6. Requerimiento Datos Espaciales *Modelo de Relación de Suministro de Sedimentos - InVEST*

Se utilizo el modelo SDR-InVEST 3.6.0. La información suministrada procede del modelo RIOS, excepto los valores de  $SDR_{max}$ ,  $K_b$  e  $IC_0$ . (ver Cuadro 20). Para el modelo SDR- InVEST se utilizan los coeficientes biofísicos de RIOS.

**Cuadro 20.** Insumos del modelo SWAT

TIPO DE DATO	FUENTE DE INFORMACIÓN	CARACTERÍSTICAS DEL DATO
<b>MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN – DEM</b>	Insumo RIOS	<ul style="list-style-type: none"> <li>Utiliza el insumo generado para el modelo RIOS</li> </ul>
<b>USO DEL SUELO</b>	Traductor de Portafolio-Modulo RIOS	<ul style="list-style-type: none"> <li>Utiliza el insumo generado por el modelo RIOS</li> </ul>
<b>EROSIVIDAD POR LLUVIA FACTOR R</b>	Insumo RIOS	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se utiliza el factor r generado como insumo para el modelo RIOS</li> </ul>
<b>ERODABILIDAD DEL SUELO FACTOR K</b>	Insumo RIOS	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se utiliza el factor K generado como insumo para el modelo RIOS</li> </ul>
<b><math>IC_0</math> AND <math>K_B</math></b>	Son parámetros de calibración que definen la relación entre el índice de conectividad y el sedimento entrega (SDR) (Vigiak et al. 2012).	

**SEDIMENT  
DELIVERY  
RATIO - SDR**

**CUENCA  
HIDROGRÁFIC  
A**

Sus valores por defecto ( $IC0 = 0.5$  y  $kb = 2$ ) (Vigiak et al. 2012, Hamel et al. 2016)

Fracción de partículas del suelo superficial más finas que la arena gruesa (Vigiak et al. 2012). Su valor predeterminado es 0.8 (Sharp et al. 2018)

Modelo RIOS

- Archivo en formato *Shapefile* el cual define los límites de la región Hidrográfica del estero de Jaltepeque y lo organiza en 6 subcuencas
- Proyección WGS 1984 UTM Zona 16N

Fuente: (Vogl et al. 2016, Toft et al. 2019, Sharp et al. 2018)

## 2.7. Metodología Obtención Buenas Practicas

La metodología para obtener información sobre la selección de objetivos de RIOS (cuadro 21) y las buenas prácticas se basó en la revisión del Plan de Desarrollo Local Sostenible (PDL): *región hidrográfica y sitio Ramsar Estero de Jaltepeque* (2017) y el desarrollo del estudio "Identificación y costeo de buenas prácticas para la adaptación al cambio climático" (WaterClima-LAC 2017), realizados recientemente por CATIE y la Asociación de Municipios los Nonualcos en el marco del proyecto *WaterClima -LAC*, Gestión de zonas costeras.

**Cuadro 21.** Objetivos Identificados para la creación de portafolio de inversiones RIOS

Objetivo	Descripción
Control de erosión para la calidad de agua potable	Según RIOS se refiere a la regulación de la erosión laminar, en surcos y cárcavas. La inversión en infraestructura verde puede prevenir las excesivas pérdidas de suelo
Mejoramiento recarga acuíferos	RIOS se refiere a la capacidad de los ecosistemas de facilitar el movimiento del agua hacia los acuíferos subterráneos y de esta manera mantener los niveles freáticos

El coste de las buenas prácticas (cuadro 22) se obtuvo mediante la identificación y valoración monetaria, a precios de mercado, de las actividades e insumos que se requieren para su implementación.

**Cuadro 22.** Prácticas y costos de implementación del portafolio RIOS

	Buenas Prácticas para la Adaptación al Cambio Climático	Costo (US\$/Ha)	Distribución % presupuesto	Asignación anual (US\$)
P1	Labranza de conservación con coberturas del suelo y cultivos de cobertura	162,80	15	50.000,00
P2	Terrazas de formación lenta	220,20	7	23.333,33

<b>P3</b>	Siembra de cultivos en curvas de nivel (siembra en contorno)	<b>113,80</b>	20	66.666,67
<b>P4</b>	Siembra de materiales mejorados y adaptados a condiciones climáticas	<b>200,00</b>	10	33.333,33
<b>P5</b>	Manejo integrado de Nutrientes del Suelo (MIN)	<b>452,60</b>	5	16.667,67
<b>P6</b>	Sistemas agroforestales para la restauración	<b>1.257,05</b>	5	16.667,67
<b>P7</b>	Sistemas silvopastoriles para la restauración	<b>466,80</b>	5	16.667,67
<b>P8</b>	Técnicas para el uso eficiente del agua (reservorios, estanques y riego por goteo)	<b>1.021,43</b>	15	50.000,00
<b>P9</b>	Restauración de bosques en áreas críticas de protección hídrica	<b>687,00</b>	10	33.333,33
<b>P10</b>	Restauración Ecológica de Manglares (REM)	<b>3.443,75</b>	8	26.666,67
Subtotal			100	<b>333.336,34</b>
Contrapartida (20% del total=US\$ 200.000,00)				<b>66.667,00</b>
Total, anual				<b>400.000,00</b>
Total, proyecto (3 años)				<b>\$1.200.000,00</b>

Fuente: (WaterClima-LAC 2017)

Se utilizó un presupuesto total de USD 1.200.000 para invertir en buenas prácticas durante el periodo de 3 años (CATIE 2017). Esto incluye una contrapartida del 20% del total para gestionar los recursos externos. De igual forma, se asignó una reasignación proporcional cuando el dinero de la actividad no puede ser gastado (Vogl et al. 2016).

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Portafolio de Inversiones Priorizado

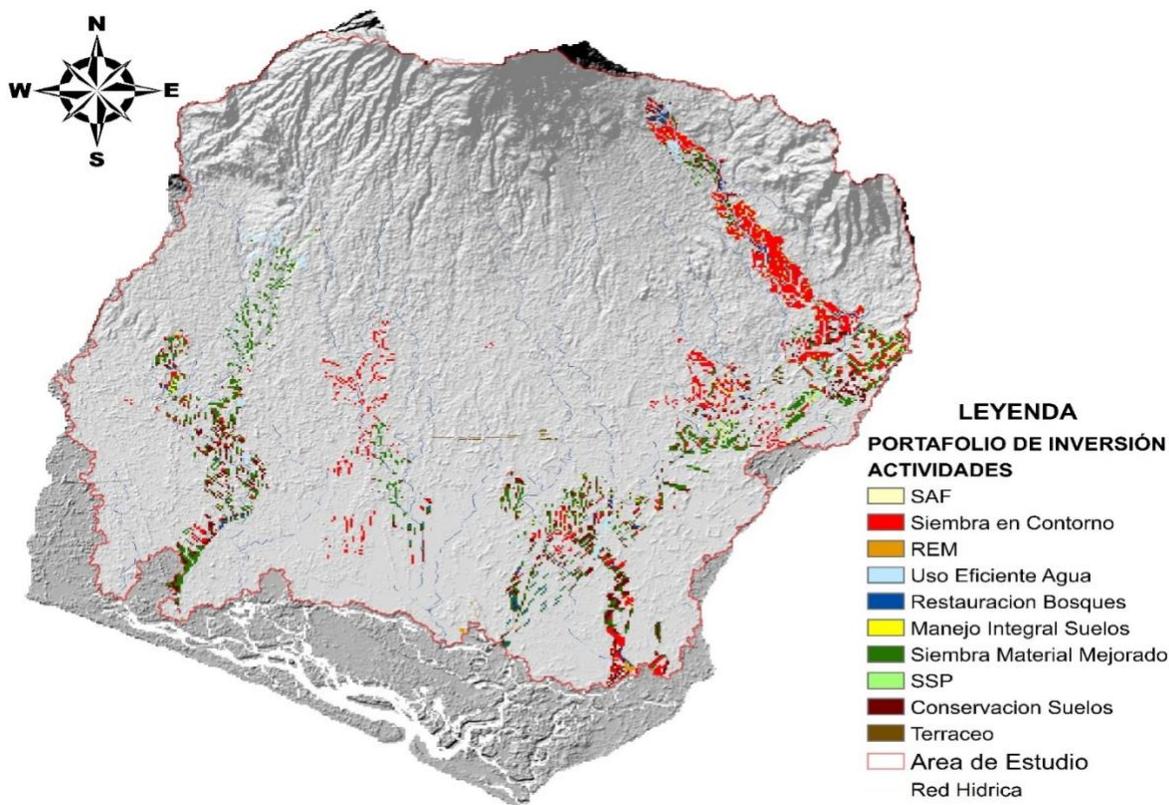
Con el portafolio de servicios priorizado se planea intervenir para los 3 años siguientes alrededor de 5086,8 Ha de las 82160 Ha del área de estudio, de las cuales el 35% (1761,75 Ha) corresponde a la conversión con actividades de siembra en curvas de nivel y plantaciones en contorno, seguido del uso de semillas mejoradas con un 30% (1509,03 Ha) y la conservación de suelos con 924,21 Ha que corresponden al 18,17%. mientras que la actividad menos rentable para el área fue la restauración ecológica de manglares con 21,87 Ha intervenidas equivalente al 0,43% del total (ver Cuadro 23).

Un análisis más detallado evidencia que la siembra en curvas de nivel y plantaciones en contorno es la actividad menos costosa para su implementación con 113,8 US\$/Ha y representa la mayor área de transformación (Figura 10), lo que indica que debe ser una práctica prioritaria para el manejo de la región hidrográfica del estero de Jaltepeque.

**Cuadro 23.** Portafolio de Servicios Priorizado por RIOS

<b>Tipo de Actividad</b>	<b>Gasto Real</b>	<b>Presupuesto Total</b>	<b>Área Convertida (Ha)</b>
<i>Presupuesto Flotante</i>	N/A	200001,0	N/A
<i>SAF</i>	48874,104	5001,0	38,88
<i>Siembra en Contorno</i>	200487,15	200001,0	1761,75
<i>REM</i>	75314,8125	80001,0	21,85
<i>Uso eficiente Agua</i>	153888,6438	150000,0	150,66
<i>Restauración Bosque</i>	98495,19	99999,0	143,37
<i>Manejo Integral Suelo</i>	49491,81	50001,0	109,35
<i>Siembra Material Mejorado</i>	301806,0	99999,0	1509,03
<i>SSP</i>	51044,58	50001,0	109,35
<i>Conservación Suelos</i>	150461,388	150000,0	924,21
<i>Terraceo</i>	70096,266	69999,0	318,33
<b>Total</b>	<b>1199959,9443</b>	<b>1200003,0</b>	<b>5086,8</b>

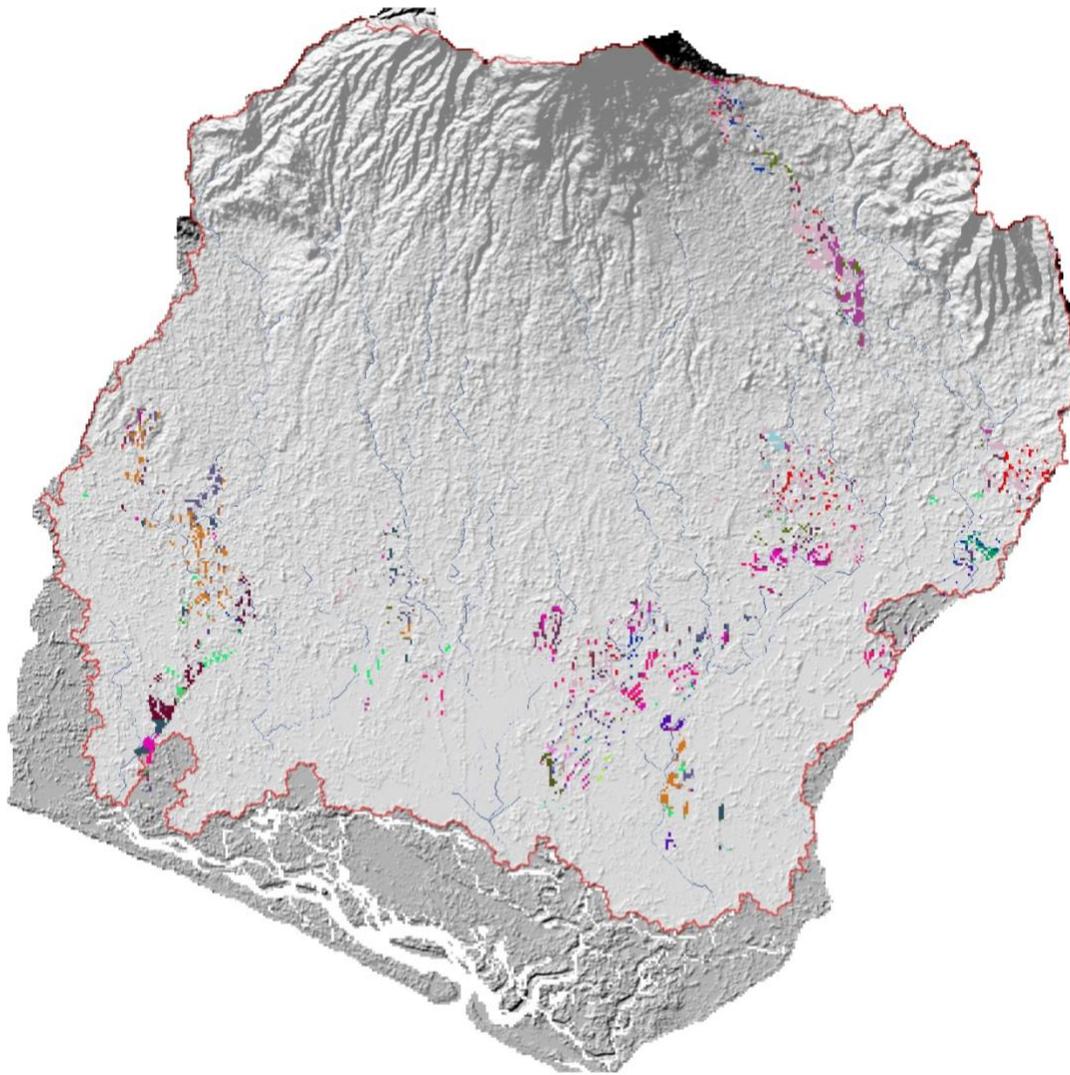
El Cuadro 23 corresponde a la tabla de atributos de la figura 10, donde se representa la distribución del portafolio en el área de estudio.



**Figura 10.** Representación espacial del Portafolio Priorizado

### **3.2. Traductor de portafolio**

La segunda salida de RIOS, generada por el Traductor de Portafolio contiene dos escenarios de cobertura del suelo. El escenario de cobertura original o inicial (Figura 9) y un escenario de transición que muestra las transformaciones en la cubierta vegetal causada por el portafolio de servicios priorizado (Figura 11). En la figura 11 se observan las coberturas que hicieron las transiciones y por ende realizaron una conversión en la cobertura del suelo. El traductor de portafolio tiene un horizonte de evaluación de 8 años siendo un periodo donde el establecimiento de las prácticas y actividades de conservación pueden evaluarse.



### LEYENDA

#### Transición

- Bosque Mixto, Agricultura-Pastura
- Bosque Mixto, Agricultura-Pastura>Bosque Mixto y Agricultura
- Bosque Mixto, Agricultura-Pastura>Bosque tropical caducifolio
- Bosque Mixto>Bosque Mixto y Agricultura
- Bosque Mixto, Agricultura-Pastura> Bosque mixto-agricultura
- Bosque Mixto, Agricultura-Pastura>Agroforesteria
- Bosque Mixto>Bosque de Pantano
- Bosque Mixto>Hierba de Pantano
- Bosque Mixto>Bosque Tropical Caducifolio
- Arbusto>Vegetacion Ribereña Leñosa
- Hierba>Bosque Tropical Caducifolio
- Cultivos Permanentes>Agricultura tropical/subtropical
- Arbustos>Bosque Mixto, Agricultura-Pastura
- Arbusto> Pastura Tropical
- Caña de Azucar > Caña de Azucar
- Caña de Azucar> Bosque Mixto

- Caña de Azucar >Agroforesteria
- Caña de Azucar > Bosque Tropical Caducifolio
- Caña de Azucar > Bosque Mixto Tropical/subtropical
- Caña de Azucar>Vegetacion Ribereña Leñosa
- Bosque Tropical Caducifolio>Bosque Mixto y Agricultura
- Agricultura Mixta Tropical>Bosque Mixto y Agricultura
- Agricultura Mixta Tropical> Agricultura Mixta Tropical
- Agricultura Mixta Tropical>Bosque Mixto, Agricultura - Pastura
- Agricultura Mixta Tropical>Bosque de Pantano
- Agricultura Mixta Tropical >Bosque Tropical y Agroforesteria
- Agricultura Mixta Tropical>Vegetacion Ribereña Leñosa
- Agricultura Mixta Tropical>Agroforesteria
- Agricultura Mixta Tropical > Bosque de Pantano
- Agricultura Mixta Tropical > Bosque Tropical caducifolio
- Agricultura Mixta Tropical> Bosque Mixto Tropical-Subtropical
- Pastura Tropical > Bosque Mixto, Agricultura, Pastura
- Tropical Pasturas >Vegetacion Ribereña Leñosa

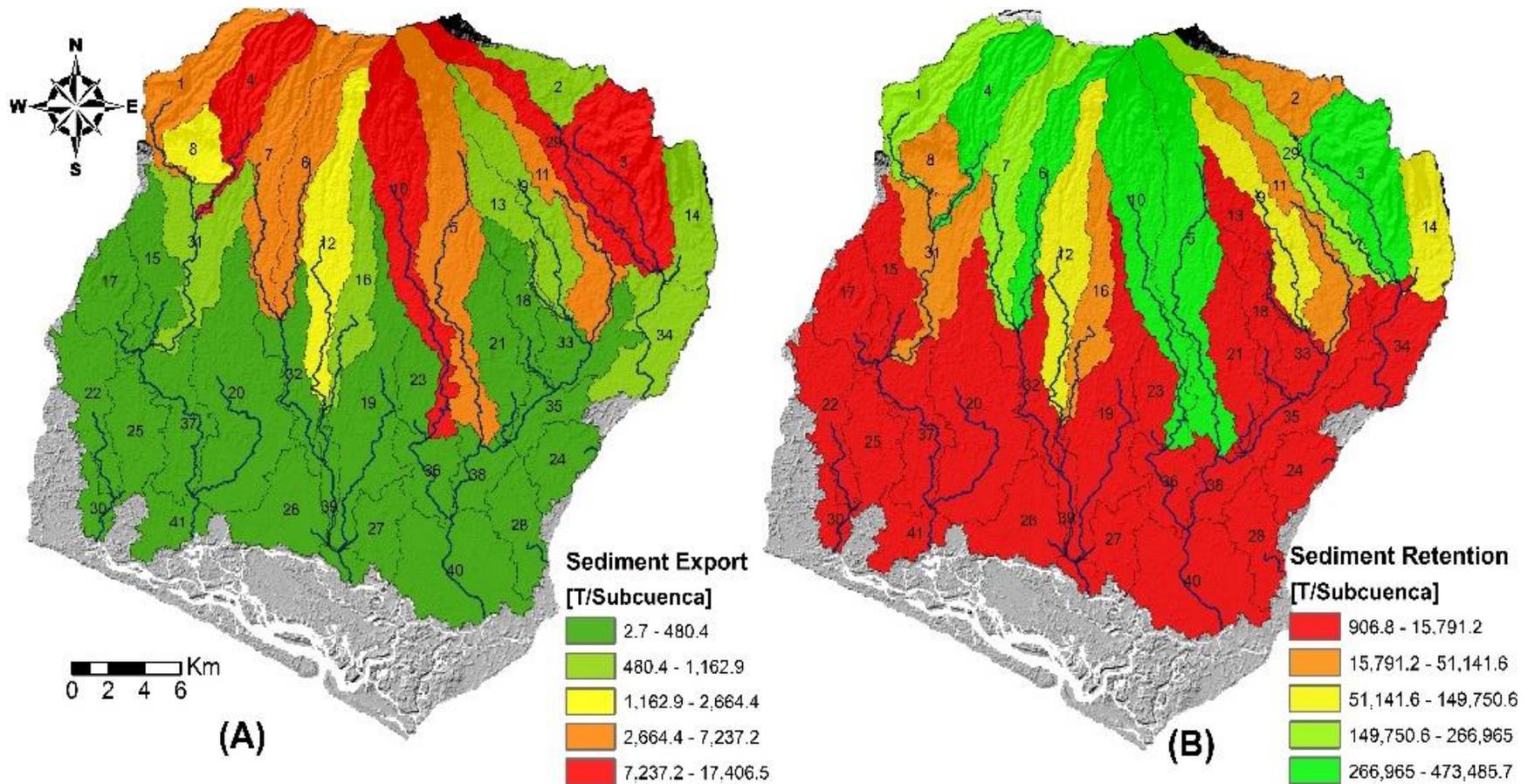
- Area de Estudio
- Red Hidrica

**Figura 11.** Escenario de Transiciones de la cubierta vegetal causadas por el portafolio de servicios.

### **3.3. Modelo SDR-InVEST**

Esta cartera se ejecutó a través del modelo InVEST SDR, cuya salida principal cuantifica la cantidad de sedimento que se erosiona del paisaje y se exporta a la corriente (Hamel et al. 2015). SDR estima la exportación y retención de sedimentos para cada subcuenca (Figura 12). La exportación de sedimentos en toneladas por subcuenca (lado izquierda figura 12) es más alta en las subcuencas 4, 3, 10 y 29 (resultados muy similares SWAT artículo I, Figura 6 Línea base). La retención de sedimentos (lado derecho figura 12) expresado en toneladas por subcuenca, se estima en referencia a una cuenca degradada con suelo desnudo (Sharp et al. 2018).

El valor de la retención de sedimentos se basa en la diferencia entre la exportación de sedimentos de la cuenca hidrográfica del suelo desnudo y el escenario de entrada (Lüke et al. 2018, Sharp et al. 2018), esto puede ser la razón por la cual la retención de sedimentos es más alta en las subcuencas 3,4, 10, aunque estas son las subcuencas con mayor exportación de sedimentos a la corriente. Debido al cálculo de retención de sedimentos a una cuenca hidrográfica de suelo desnudo, estas subcuencas se consideran áreas de retención, porque la pérdida del suelo por el cobertura actual de la tierra es mucho menor que la pérdida de suelo de una cuenca hidrográfica de suelo desnudo (Lüke et al. 2018).

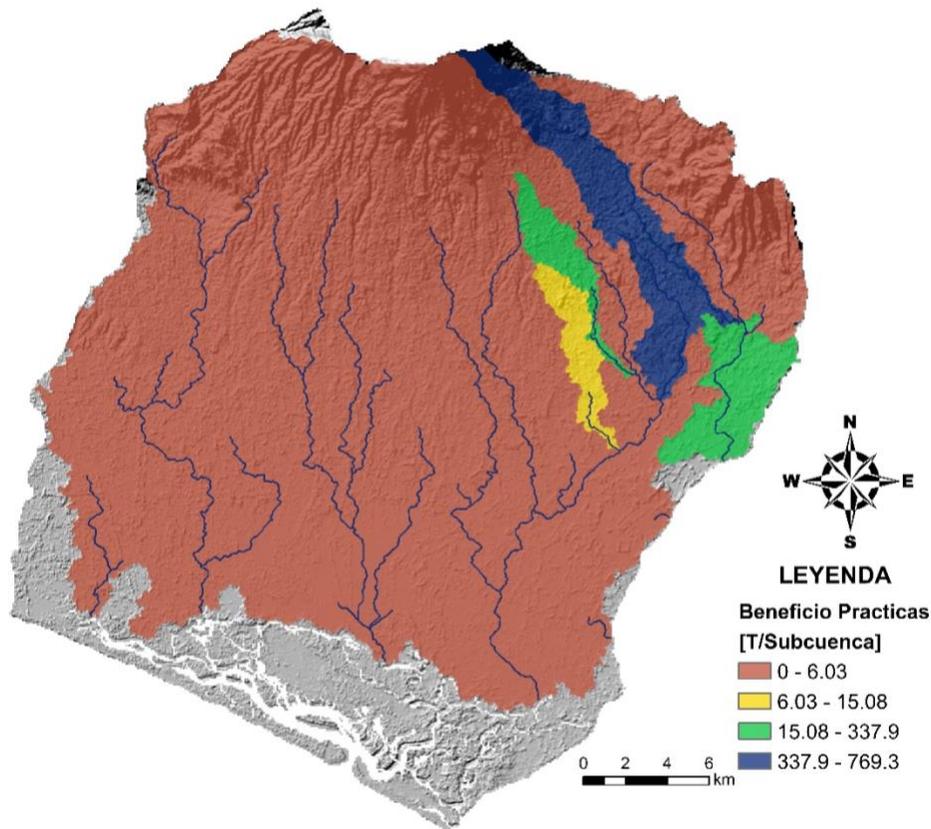


**Figura 12.** Salida Modelo InVEST SDR escenario Actual (A): exportación de sedimentos; (B): retención sedimentos.

### 3.4. Estimador de Beneficios

Este módulo es la utilización de herramientas SIG “modelos de servicios ecosistémicos” para determinar el retorno de los servicios ecosistémicos del portafolio seleccionado, es decir los beneficios. En este caso se aprovecha el modelo SDR-InVEST debido a que RIOS genera todos los archivos de entrada requeridos y de esta manera se evita la generación de datos adicionales (Vogl et al. 2016, Bryanr et al. 2015).

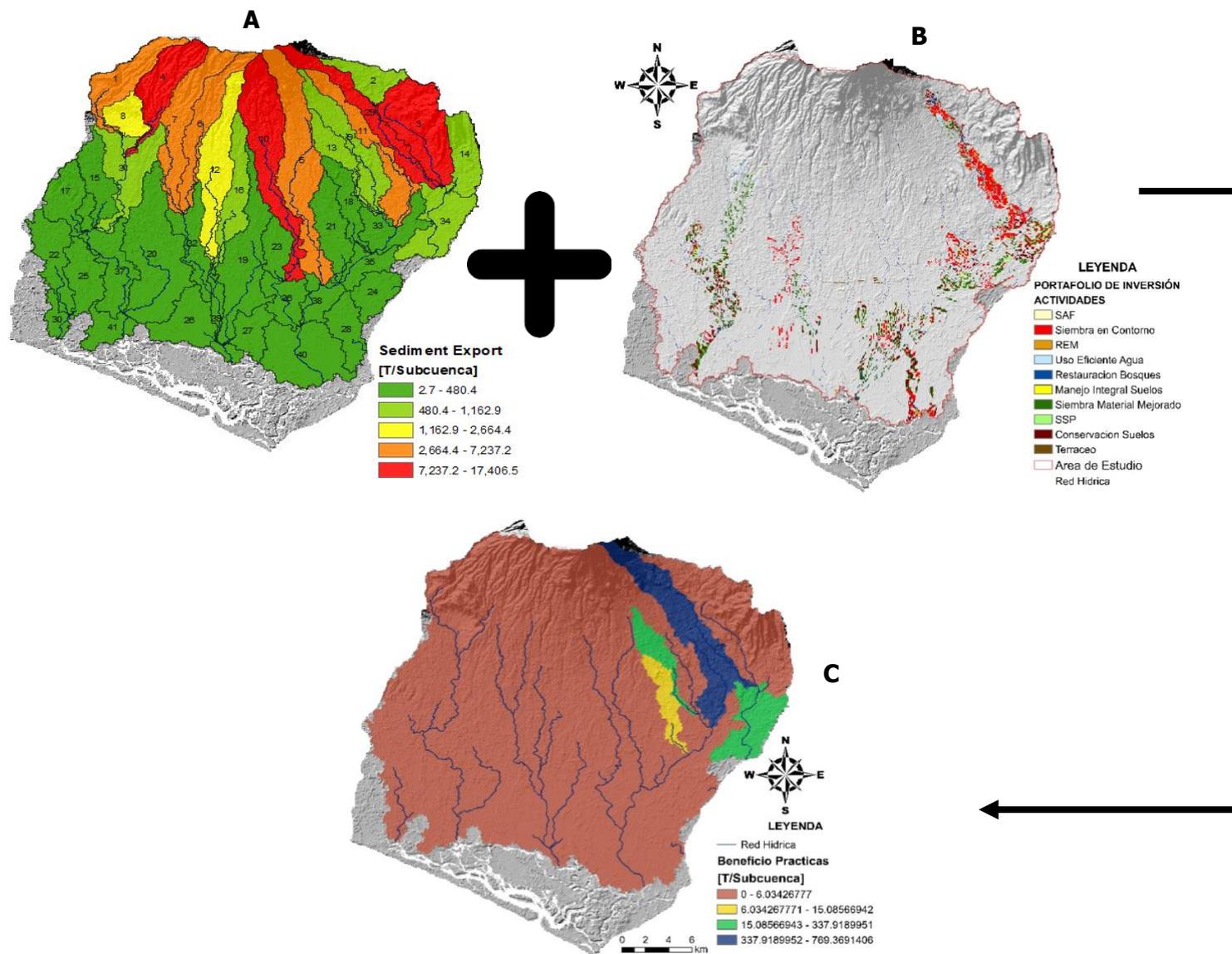
En la figura 13, se visualiza las áreas donde ocurre una disminución sustancial de exportación de sedimentos (T/subcuenca) ligada estrechamente a las áreas donde se establecen las prácticas de manejo de cuencas hidrográficas, es decir, el portafolio de inversión (figura 10). Lo que sugiere que el establecimiento del portafolio de inversiones reduce la exportación de sedimentos, el cual evita la colmatación en los ecosistemas terminales de la cuenca.



**Figura 13.** Estimación de Beneficios del establecimiento del Portafolio de inversión.

En la subcuenca 29 se alcanza una reducción de sedimentos con un rango entre 337 y 759 T Ha/año siendo esta en el área que se concentra las mayores actividades de restauración. Sin embargo, en el resto de la cuenca se observa reducciones entre 0 y 337 t Ha/año, existiendo una amplia cantidad de subcuencas con un umbral de reducción de 0-6 T donde el portafolio no priorizo intervenciones.

La figura 14, ofrece el flujo de trabajo para la evaluación del beneficio de la implementación de las practicas, donde se estima la capacidad de exportación de sedimentos de la cobertura actual del suelo (línea base) (A) y después se provee el control de sedimentos que realizan las actividades ejecutadas en la zona (B). Por último, la diferencia entre ambos escenarios (C) es la reducción que se estima pueden llegar a tener el área implementando las practicas priorizadas.



**Figura 14.** Metodología espacial InVEST - RIOS-Estimación de Beneficios.

#### **4. DISCUSIÓN**

El uso de modelos hidrológicos tiene como finalidad simular y estimar el comportamiento de los fenómenos que ocurren en la realidad. Sin embargo, no existe un modelo que simule perfectamente los complejos procesos hidrológicos, debido a la presencia de errores de diferentes orígenes denominados incertidumbres (Hensel et al. 2011). Estos errores pueden ser minimizados mediante un adecuado proceso de calibración. Sin embargo, RIOS no posee un módulo para realizar la calibración, salvo el adecuado análisis de calidad de datos para la correcta elaboración de los insumos.

Para el modelo SDR-InVEST, existe un módulo de calibración. Sin embargo, al no poseer datos observados de sedimentos no se aplica. Evaluando la predicción del modelo espacial.

La exportación de sedimentos del modelo SDR InVEST es similar al modelo SWAT, sugieren que la zona Noreste de la cuenca es la que aporta la más alta exportación de sedimentos, es decir posee baja retención de sedimentos, pero las condiciones actuales proporcionan una mayor capacidad de retención que un suelo desnudo degradado (Lüke et al. 2018). Para este entorno RIOS coincide con la ubicación del portafolio de servicios y sugiere unas prácticas especialmente la siembra en curvas de nivel y plantaciones en contorno como mecanismo de control de la erosión.

Los resultados de RIOS (transiciones de uso de suelos sugeridas) son evaluadas por el modelo InVEST SDR en la estimación de beneficios, modelando la disminución en la exportación de sedimentos en la parte Noreste de la cuenca. Por lo tanto, InVEST y SWAT ofrecen predicciones consistentes sobre la capacidad de retención de sedimentos (Villa et al. 2014).

El modelo SWAT ofrece insumos a RIOS y este a InVEST, debido a la diferencia de datos y requerimientos biofísicos de los modelos es difícil realizar una comparación directa de los resultados de la modelación (Lüke et al. 2018).

RIOS es especialmente útil para localizar áreas de preferencia de actividades para el manteniendo y la restauración de múltiples servicios ecosistémicos ofreciendo una herramienta para la toma de decisiones (Vogl et al. 2016). Utilizando datos biofísicos, económicos y sociales para la generación de cartografía y valoración de los ecosistemas. Posteriormente los efectos de las actividades implementadas se pueden evaluar con InVEST para cuantificar los posibles cambios en los servicios de los ecosistemas.

## **5. CONCLUSIONES**

El portafolio de inversiones utiliza un presupuesto total de \$1.200.000 durante un periodo de 3 años (\$400.000) anuales en el establecimiento de actividades para el control de la erosión y mejoramiento de la recarga de acuíferos. De igual manera, indica que se debe invertir preferiblemente en siembras de cultivos en curvas de nivel (siembra en contorno), siembra de materiales mejorados al cambio climático y técnicas de conservación de suelos, siendo estas las actividades que más áreas transforman.

El portafolio también indica que preferiblemente se debe invertir en la zona Noreste de la cuenca, siendo esta donde se presentan la mayor erosión potencial tanto en el modelo SWAT, como en InVEST-SDR

El portafolio de inversión del modelo RIOS, se convierte en una herramienta útil para demostrar de manera técnico-científica donde, como y cuando invertir. De esta manera es más atractivo para los actores dentro del área de influencia que se sumen con inversiones directas que se van a traducir en un aumento en la calidad y cantidad de servicios ecosistémicos para sus procesos productivos.

La exportación de sedimentos del modelo SDR InVEST y la capacidad de generación de sedimentos generada por SWAT muestra que ambos modelos ofrecen resultados muy similares evidenciando un deterioro de la parte Noreste de la cuenca hidrográfica. Sin embargo, a diferencia de SWAT, InVEST genera un escenario de retención de sedimentos.

## **6. RECOMENDACIONES**

Realizar cartografía social con el portafolio de inversión de RIOS en el cual se pueda extraer información de las comunidades del área el estudio sobre las ventajas y desventajas de intervenir las áreas priorizadas.

Ejecutar nuevamente el modelo RIOS, incluyendo nuevos objetivos y cambiando los pesos de los valores en la relación de objetivos y transiciones esperadas, para establecer un nuevo portafolio de inversiones.

Se recomienda ejecutar el modelo SWAT utilizando las practicas priorizadas por el portafolio de inversión para evaluar el comportamiento del balance hídrico

Realizar un control adecuado sobre las incertidumbres del modelo (mejorar eficiencia del modelo). SWAT la realiza mediante la calibración (SWAT-CUP) y la optimización de una función matemática denominada "función objetivo". RIOS no posee un módulo de calibración, mientras que InVEST necesita datos observados para ajustar la función que permita minimizar los errores del modelado.

## 7. LITERATURA CITADA

- Aguilar, E; Peterson, TC; Obando, PR; Frutos, R; Retana, JA; Solera, M; Soley, J; García, IG; Araujo, RM; Santos, AR; Valle, VE; Brunet, M; Aguilar, L; Álvarez, L; Bautista, M; Castañón, C; Herrera, L; Ruano, E; Sinay, JJ; Sánchez, E; Oviedo, GIH; Obed, F; Salgado, JE; Vázquez, JL; Baca, M; Gutiérrez, M; Centella, C; Espinosa, J; Martínez, D; Olmedo, B; Espinoza, CEO; Núñez, R; Haylock, M; Benavides, H; Mayorga, R. 2005. Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961–2003 (en línea). *Journal of Geophysical Research* 110(D23): D23107. DOI: <https://doi.org/10.1029/2005JD006119>.
- Angulo-Martínez, M; Beguería, S. 2009. Estimating rainfall erosivity from daily precipitation records: A comparison among methods using data from the Ebro Basin (NE Spain) (en línea). *Journal of Hydrology* 379(1-2):111-121. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2009.09.051>.
- Bagstad, KJ; Semmens, DJ; Winthrop, R. 2013. Comparing approaches to spatially explicit ecosystem service modeling: A case study from the San Pedro River, Arizona (en línea). *Ecosystem Services* 5:40-50. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ECOSER.2013.07.007>.
- Benegas Negri, L. 2017. Priorización de áreas para implementar buenas prácticas de manejo en cuencas costeras (en línea). s.l., s.e. 64 p. Consultado 2 jun. 2019. Disponible en [http://201.207.189.89/bitstream/handle/11554/8716/Priorizacion\\_de\\_areas\\_para\\_implementar\\_buenas.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://201.207.189.89/bitstream/handle/11554/8716/Priorizacion_de_areas_para_implementar_buenas.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- Brenes, C.; Benavides, R; Ballester, D. 2013. SEASONAL SIGNATURES IN THE PHYSICAL PROPERTIES OF A TROPICAL ESTUARY IN THE CENTRAL AMERICA PACIFIC (en línea). *UNICIENCIA* 27(1101 –0275):15. Disponible en <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/uniciencia/article/view/4949/4743>.
- Bryan, P; Wonlly, S; Vogl, A. 2015. Understanding RIOS sensitivities, strengths, and weakness (en línea). Stanford University. Disponible en [https://www.dropbox.com/s/r4fzu9hvjzt14as/RIOS\\_SA\\_guidance\\_v3\\_FINAL\\_2015-08-14\\_clean.pdf](https://www.dropbox.com/s/r4fzu9hvjzt14as/RIOS_SA_guidance_v3_FINAL_2015-08-14_clean.pdf).
- Canqiang, Z; Wenhua, L; Biao, Z; Moucheng, L. 2012. Water Yield of Xitiaoxi River Basin Based on InVEST Modeling (en línea). *Journal of Resources and Ecology* 3(1):50-54. DOI: <https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2012.01.008>.
- CATIE. (2017). Priorización de áreas para implementar buenas prácticas de manejo en cuencas costeras (en línea). Turrialba-Costa Rica, s.e. Disponible en [http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/8716/Priorizacion\\_de\\_areas\\_para\\_implementar\\_buenas.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/8716/Priorizacion_de_areas_para_implementar_buenas.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- Chikhaoui, M; Naimi, M; Raclot, D. 2016. Impact Du Changement Climatique Sur L'évolution De L'érosivité Des Pluies Dans Le Rif Occidental (Nord Du Maroc) (en línea). Article in *European Journal of Scientific Research*. DOI: <https://doi.org/10.19044/esj.2016.v12n32p79>.
- de Groot, RS; Wilson, MA; Boumans, RM. 2002. A typology for the classification, description

- and valuation of ecosystem functions, goods and services (en línea). *Ecological Economics* 41(3):393-408. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(02\)00089-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00089-7).
- Diaw, M; Faye, S; Stichler, W; Maloszewski, P. 2012. Isotopic and geochemical characteristics of groundwater in the Senegal River delta aquifer: implication of recharge and flow regime (en línea). *Environmental Earth Sciences* 66(4):1011-1020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0710-4>.
- Dillon, P. 2005. Future management of aquifer recharge (en línea). *Hydrogeology Journal* 13(1):313-316. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0413-6>.
- Egoh, B; Reyers, B; Rouget, M; Richardson, DM; Le Maitre, DC; van Jaarsveld, AS. 2008. Mapping ecosystem services for planning and management (en línea). *Agriculture, Ecosystems & Environment* 127(1-2):135-140. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2008.03.013>.
- EL-SADEK, A; İRVEM, A. 2014. Evaluating the impact of land use uncertainty on the simulated streamflow and sediment yield of the Seyhan River basin using the SWAT model (en línea). *TURKISH JOURNAL OF AGRICULTURE AND FORESTRY* 38:515-530. DOI: <https://doi.org/10.3906/tar-1309-89>.
- Esse, C; Valdivia, P; Encina-Montoya, F; Aguayo, C; Guerrero, M; Figueroa, D. 2014. Modelo de análisis espacial multicriterio (AEMC) para el mapeo de servicios ecosistémicos en cuencas forestales del sur de Chile (en línea). *Bosque (Valdivia)* 35(3):289-299. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0717-92002014000300004>.
- Frantz, CM; Mayer, FS. 2014. The importance of connection to nature in assessing environmental education programs (en línea). *Studies in Educational Evaluation* 41:85-89. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.STUEDUC.2013.10.001>.
- Gellis, AC; Walling, DE. 2011. Sediment Source Fingerprinting (Tracing) and Sediment Budgets as Tools in Targeting River and Watershed Restoration Programs (en línea). DOI: <https://doi.org/10.1029/2010GM000960>.
- Goldman-Benner, RL; Benitez, S; Boucher, T; Calvache, A; Daily, G; Kareiva, P; Kroeger, T; Ramos, A. 2012. Water funds and payments for ecosystem services: practice learns from theory and theory can learn from practice (en línea). *Oryx* 46(1):55-63. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0030605311001050>.
- Gómez Varela, GI; González Rodríguez, EE. 2012. Aplicación de la legislación relativa a las áreas naturales protegidas. Caso: Estero de Jaltepeque (en línea). Consultado 2 jun. 2019. Disponible en <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/2788/>.
- Guerrero, E; De Keizer, O; Córdoba Editores, R. (2006). *Unión Mundial para la Naturaleza La Iniciativa del Agua y la Naturaleza de la UICN i* (en línea). s.l., s.e. Consultado 31 jul. 2019. Disponible en [www.iucn.org/mesoamerica](http://www.iucn.org/mesoamerica).
- Guerrero, M; Herrera, B. (2018). *Agua Tica: una alianza público-privada para la conservación del recurso hídrico* (en línea). San José, Costa Rica, s.e. Disponible en [https://www.researchgate.net/publication/330224904\\_Agua\\_Tica\\_una\\_alianza\\_publico-privada\\_para\\_la\\_conservacion\\_del\\_recurso\\_hidrico](https://www.researchgate.net/publication/330224904_Agua_Tica_una_alianza_publico-privada_para_la_conservacion_del_recurso_hidrico).
- Hamel, P; Chaplin-Kramer, R; Sim, S; Mueller, C. 2015. A new approach to modeling the sediment retention service (INVEST 3.0): Case study of the Cape Fear catchment,

- North Carolina, USA (en línea). *Science of The Total Environment* 524-525:166-177. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2015.04.027>.
- Hamel, P; Falinski, K; Auerbach, DA; Sanchez-Canales, M; Sharp, R; Sánchez-Canales, M; James Denny-Frank, P. 2016. Sediment delivery modeling in practice: Comparing the effects of watershed characteristics and data resolution across hydroclimatic regions Optimal management of Land Based Sources of Pollution for Coral Reefs in West Maui, Hawaii View project Sediment delivery modeling in practice: Comparing the effects of watershed characteristics and data resolution across hydroclimatic regions (en línea). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.103>.
- Hunink, JE; Droogers, P. (2015). Impact Assessment of Investment Portfolios for Business Case Development of the Nairobi Water Fund in the Upper Tana River, Kenya (en línea). Wageningen, The Netherlands, s.e. Disponible en [www.futurewater.nl](http://www.futurewater.nl).
- Kareiva, PM; Tallis, H; Ricketts, T; Daily, G; Polansky, S. 2011. Natural Capital: Theory and Practice of Mapping Ecosystem Services. (en línea). *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 35(5):701-704. DOI: <https://doi.org/10.1177/0309133311417953>.
- Keeler, BL; Polansky, S; Brahman, KA; Johnson, KA; Finlay, JC; O'Neill, A; Kovacs, K; Dalzell, B. 2012. Linking water quality and well-being for improved assessment and valuation of ecosystem services (en línea). *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109(45):18619-18624. DOI: <https://doi.org/10.1073/PNAS.1215991109>.
- Larios, S. 2012. Gakko annai gakuan: Koko juken no tame no sogo johoshi. 2013-Kanagawakenban. (en línea). s.l., Kyoikushuppan'yudekku. 75-83 p. Consultado 3 jun. 2019. Disponible en <https://revistas.una.ac.cr/index.php/perspectivasrurales/article/view/5598>.
- Lattera, P; Martín-López, B; Mastrángelo, M; Garibaldi, LA. 2017. Servicios Ecosistémicos en Latinoamérica. De la investigación a la acción (en línea). *Ecología Austral* 27(1bis):094-098. DOI: <https://doi.org/10.25260/EA.17.27.1.1.611>.
- Lüke, A; Hack, J; Lüke, A; Hack, J. 2018. Comparing the Applicability of Commonly Used Hydrological Ecosystem Services Models for Integrated Decision-Support (en línea). *Sustainability* 10(2):346. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10020346>.
- MARN. (2013). 2ºComunicación Nacional sobre Cambio Climático (en línea). s.l., s.e. Consultado 2 jun. 2019. Disponible en [www.marn.gob.sv](http://www.marn.gob.sv).
- Nelson, E; Mendoza, G; Regetz, J; Polasky, S; Tallis, H; Cameron, Dr; Chan, KM; Daily, GC; Goldstein, J; Kareiva, PM; Lonsdorf, E; Naidoo, R; Ricketts, TH; Shaw, Mr. 2009. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales (en línea). *Frontiers in Ecology and the Environment* 7(1):4-11. DOI: <https://doi.org/10.1890/080023>.
- Ovalles, Y; Méndez, E; Ramírez, G. 2008. Ordenación de cuencas hidrográficas. Un reto al conocimiento, la acción y la gestión (en línea). *La Revista Forestal Venezolana* 52(2):241-253. Consultado 31 jul. 2019. Disponible en <https://go.galegroup.com/ps/anonymous?id=GALE%7CA303756947&sid=googleScholar&v=2.1&it=r&linkaccess=abs&issn=05566606&p=IFME&sw=w>.

- Ramsar. 2013. Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (en línea). :86. Consultado 2 jun. 2019. Disponible en <http://www.marn.gob.sv/descargas/Menu/Temas/Biodiversidad/AreasNaturalesProt egidas/Humedales/Complejo Barra de Santiago.pdf>.
- Rivera, CG. 2013. Manejo pesquero sostenible de *Ucides occidentalis* ("punche"), recurso hidrobiológico de la cuenca baja del Río Lempa, Bahía de Jiquilisco, departamento de Usulután (en línea). Consultado 2 jun. 2019. Disponible en <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/3530/>.
- Rodríguez, E. (2012). Documento De Diagnóstico del Bajo Lempa y Estero de Jaltepeque (en línea). s.l., s.e. Consultado 2 jun. 2019. Disponible en [https://rimisp.org/wp-content/files\\_mf/1366383044DiagnosticoBajoLempaEsteroJaltepequeElSalvador.pdf](https://rimisp.org/wp-content/files_mf/1366383044DiagnosticoBajoLempaEsteroJaltepequeElSalvador.pdf).
- Sauerborn, P; Klein, A; Botschek, J; Skowronek, A. 1999. Future rainfall erosivity derived from large-scale climate models — methods and scenarios for a humid region (en línea). *Geoderma* 93(3-4):269-276. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(99\)00068-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(99)00068-3).
- Setegn, SG; Dargahi, B; Srinivasan, R; Melesse, AM. 2010. Modeling of Sediment Yield from Anjeni-Gauged Watershed, Ethiopia Using SWAT Model <sup>1</sup> (en línea). *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 46(3):514-526. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2010.00431.x>.
- Sharp, R; Tallis, HT; Ricketts, T; Guerry, AD; Wood, SA; Chaplin-Kramer, R; Nelson, E; Ennaanay, D; Wolny, S; Olwero, N; Vigerstol, K; Pennington, D; Mendoza, G; Aukema, J; Foster, J; Forrest, J; Cameron, D; Arkema, K; Lonsdorf, E; Kennedy, C; Verutes, G; Kim, CK; Guannel, G; Papenfus, M; Toft, J; Marsik, M; Bernhardt, J; Griffin, R; Glowinski, K; Chaumont, N; Perelman, A; Lacayo, M; Mandle, L; Hamel, P; Vogl, AL; Rogers, L; Bierbower, W; Denu, D; Douglass, J. (2018). *InVEST 3.6.0 User's Guide*. s.l., s.e.
- Shuhuai, D; Zihui, G; Gregersen, HM; Brooks, KN; Ffolliott, PF. 2001. PROTECTING BEIJLNG'S MUNICIPAL WATER SUPPLY THROUGH WATERSHED MANAGEMEN AN ECONOMIC ASSESSMENT (en línea). *Journal of the American Water Resources Association* 37(3):585-594. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2001.tb05495.x>.
- Toft, M; Marsik, J; Bernhardt, M. (2019). *InVEST 3.6 User's Guide. The Natural Capital Project* (en línea). s.l., s.e. Disponible en [http://naturalcapitalproject.stanford.edu/pubs/InVEST\\_2.0beta\\_Users\\_Guide.pdf](http://naturalcapitalproject.stanford.edu/pubs/InVEST_2.0beta_Users_Guide.pdf).
- Vigiak, O; Borselli, L; Newham, LTH; McInnes, J; Roberts, AM. 2012. Comparison of conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio (en línea). *Geomorphology* 138(1):74-88. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2011.08.026>.
- Vogl, A; Tallis, H; Douglass, J; Sharp, R; Wolny, S; Veiga, F; Benitez, S; León, J; Game, E; Petry, P; Guimerães, J; Lozano, JS. (2016). *Resource Investment Optimization System Introduction & Theoretical Documentation* (en línea). s.l., s.e.

- Disponible en  
[http://data.naturalcapitalproject.org/rios\\_releases/RIOSGuide\\_Combined\\_v1.1.16\\_30May2016.pdf](http://data.naturalcapitalproject.org/rios_releases/RIOSGuide_Combined_v1.1.16_30May2016.pdf).
- Vogl, AL; Hamel, P; Silver, J; Griffin, R; Wood, SA; Verutes, G; Rogers, L; Chaplin-Kramer, B; Arkema, KK. (2016). INCORPORATING CLIMATE CHANGE SCENARIOS INTO InVEST AND RIOS (en línea). s.l., s.e. Disponible en <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/wp-content/uploads/2016/02/Incorporating-climate-change-scenarios-into-InVEST-and-RIOS-2016-01-11.pdf>.
- WaterClima-LAC, gestión de zonas costeras. (2017). Identificación y costeo de buenas prácticas para la adaptación al cambio climático. s.l., s.e.
- Whelchel, AW; Beck, MW. 2016. Decision Tools and Approaches to Advance Ecosystem-Based Disaster Risk Reduction and Climate Change Adaptation in the Twenty-First Century (en línea). s.l., Springer, Cham. p. 133-160 DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-43633-3\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-43633-3_6).
- Zhu, Q; Tian, Y; Zhao, J. 2006. An efficient depression processing algorithm for hydrologic analysis (en línea). Computers & Geosciences 32(5):615-623. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.CAGEO.2005.09.001>.