



**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL  
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA**

**DIVISIÓN DE EDUCACIÓN**

**ESCUELA DE POSGRADO**

**MAESTRÍA PROFESIONAL EN MANEJO Y GESTIÓN DE CUENCAS  
HIDROGRÁFICAS**

**MODELACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA SIMULAR  
LA PRODUCCIÓN DE AGUA, LOS NIVELES DE EROSIÓN Y  
PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS, CON DIFERENTES COBERTURAS DE  
SUELO EN LA SUBCUENCA AGUNÁ, ESCUINTLA, GUATEMALA**

**TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN SOMETIDO A CONSIDERACIÓN DE LA  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN Y LA ESCUELA DE POSGRADO COMO REQUISITO  
PARA OPTAR AL GRADO DE**

**MÁSTER EN MANEJO Y GESTIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

**ANDRÉS OMAR RAMÍREZ CONTRERAS**


**TURRIALBA, COSTA RICA**

**2020**

Este trabajo de graduación ha sido aceptado en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobado por el Comité Asesor del estudiante, como requisito para optar por el grado de

**Máster en Manejo y Gestión de Cuencas Hidrográficas**

**FIRMANTES:**



---

Ney Ríos, M.Sc.

**Co asesor del Trabajo de Graduación**



---

Bommat Ramakrishna, Ph.D.

**Miembro Comité Asesor**



---

Isabel A. Gutiérrez-Montes, Ph.D.

**Decana de la Escuela de Posgrado**



---

**Candidato**

## DEDICATORIA

A:

- DIOS                    Por darme la dicha de vivir y por ser mi  
                                  fortaleza
- Mis Padres            Braulio Ramírez  
                                  Mery Contreras  
                                  Con mucho amor por estar siempre a mi lado  
                                  en los momentos difíciles, contado con su  
                                  apoyo incondicional, enseñándome andar en  
                                  la vida por el camino correcto.
- Mis Hermanos        César Ramírez  
                                  Astrid Ramírez  
                                  Por su cariño y apoyo incondicional.
- Mi Novia              Milagros Vásquez  
                                  Por tu apoyo en todo momento, palabras de  
                                  aliento y por creer en mi  
                                  Te amo.
- Abuelita Elena      Aunque ya no estés a mi lado, su cariño  
                                  prevalece en mi corazón, su gentileza,  
                                  honestidad y bondad son mi ejemplo a  
                                  seguir.
- Abuelita Irma        Con mucho cariño por siempre preocuparse  
                                  de mí y mostrarme su apoyo incondicional.

## **AGRADECIMIENTOS**

A:

DIOS que me dio la vida, sabiduría y la bendición de superarme académicamente.

Al CATIE, por haberme dado la oportunidad de ser parte de tan prestigiosa institución.

A todo mi comité asesor, por compartirme su conocimiento y ayudarme a alcanzar las metas.

A todos los profesores que me impartieron clases, llevo conmigo grandes enseñanzas y su profesionalismo es una inspiración para mí.

A mis padres, hermanos, tía, sobrinas y abuela, por creer en mí y darme el apoyo necesario.

A mi novia por ser mi confidente y motivo de inspiración para ser una mejor persona.

## ÍNDICE

DEDICATORIA .....	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
RESUMEN .....	X
SUMMARY.....	XI
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Antecedentes .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Justificación .....</b>	<b>2</b>
<b>1.3. Importancia .....</b>	<b>3</b>
<b>1.4. Objetivos.....</b>	<b>4</b>
<b>1.4.1. General .....</b>	<b>4</b>
<b>1.4.2. Especifico .....</b>	<b>4</b>
<b>2. REVISIÓN DE LITERATURA .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1. Ciclo hidrológico.....</b>	<b>5</b>
<b>2.2. Ciclo hidrológico como sistema .....</b>	<b>5</b>
<b>2.3. Cuenca hidrográfica.....</b>	<b>5</b>
<b>2.4. La cuenca hidrográfica como sistema .....</b>	<b>6</b>
<b>2.5. El agua: recurso integrador de la cuenca .....</b>	<b>6</b>
<b>2.6. Manejo integrado de cuencas hidrográficas .....</b>	<b>7</b>
<b>2.7. Capacidad de uso de la tierra .....</b>	<b>7</b>
<b>2.8. Conflicto de uso de tierra .....</b>	<b>8</b>
<b>2.9. Degradación de suelos .....</b>	<b>8</b>
<b>2.10. Deterioro de las tierras en Guatemala .....</b>	<b>9</b>
<b>2.10.1. Erosión potencial por actividades que se desarrollan en tierras sobre utilizadas<sup>10</sup> .....</b>	<b>10</b>
<b>2.11. Erosión hídrica .....</b>	<b>11</b>
<b>2.12. Factores que originan la erosión hídrica.....</b>	<b>11</b>
<b>2.13. Sedimentación .....</b>	<b>12</b>
<b>2.14. Métodos de estimación de erosión hídrica .....</b>	<b>12</b>
<b>2.14.1. Modelo SWAT .....</b>	<b>14</b>
<b>2.16. Erosión de suelos y el cambio climático.....</b>	<b>16</b>
<b>2.17. Límite de tolerancia de pérdida de suelo .....</b>	<b>16</b>
<b>3. METODOLOGÍA .....</b>	<b>18</b>
<b>3.1. Ubicación del área de estudio.....</b>	<b>18</b>
<b>3.2. Descripción general .....</b>	<b>19</b>
<b>3.3. Proceso Metodológico .....</b>	<b>20</b>

3.3.1. Fase de gabinete I .....	20
3.3.2. Fase de gabinete II .....	21
3.3.3. Fase de gabinete III.....	25
4. RESULTADOS.....	30
4.1. Balance Hídrico.....	30
4.1.1. Producción de agua .....	31
4.2. Erosión y Sedimentación Actual.....	34
4.3. Efecto del cambio climático en la producción de agua, erosión y sedimentación .....	38
4.4. Identificación de áreas degradadas.....	40
4.5. Escenarios de cambio de cobertura de suelo.....	41
4.6. Sensibilidad a erosión hídrica bajo escenarios de cambio de cobertura. Escenarios de cambio de cobertura de suelo .....	43
4.7. Análisis estadístico .....	45
4.8. Priorización de microcuencas .....	46
5. ANÁLISIS Y DISCUSION DE LOS RESULTADOS.....	48
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	54
6.1. Conclusiones.....	54
6.2. Recomendaciones.....	55
7. LITERATURA CITADA.....	56

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.	Superficie de las categorías de intensidad de uso de la tierra, áreas urbanas y cuerpos de agua de Guatemala para el año 2003.....	10
Cuadro 2.	Erosión potencial por actividades que se desarrollan en tierras sobre utilizadas.....	10
Cuadro 3.	Clasificación de FAO – PNUMA – UNESCO (1981).....	17
Cuadro 4.	Coordenadas de ubicación, Subcuenca Aguná.....	18
Cuadro 5.	Caracterización climática en la zona cañera de Guatemala.....	19
Cuadro 6.	Uso y cobertura la tierra, subcuenca Aguná y códigos SWAT.....	22
Cuadro 7.	Categorías y descripción de pendientes.....	23
Cuadro 8.	Estación meteorológica seleccionada.....	24
Cuadro 9.	Parámetros climáticos requeridos por SWAT.....	25
Cuadro 10.	Anomalías de cambio de precipitación y temperatura.....	27
Cuadro 11.	Cambio de cobertura propuesta en áreas degradadas en subcuenca Aguná.....	28
Cuadro 12.	Descripción de criterios de categorización de diferencia aritmética de erosión bajo escenarios de cobertura y uso de suelo.....	29
Cuadro 13.	Balance hídrico subcuenca Aguná.....	30
Cuadro 14.	Rango de pendiente y erosión en la subcuenca Aguná.....	35
Cuadro 15.	Producción de agua de línea base y escenario de cambio climático al año 2050, para la subcuenca Aguná.....	38
Cuadro 16.	Erosión hídrica y sedimentación de línea base y escenario de cambio climático al año 2050, para la subcuenca Aguná.....	39
Cuadro 17.	Comparación de escenarios de cambio de cobertura en subcuenca Aguná.....	42
Cuadro 18.	Sensibilidad al cambio de cobertura de suelo en la producción de erosión por microcuenca pertenecientes a subcuenca Aguná.....	44
Cuadro 19.	Análisis de varianza para las variables erosión, sedimentos y la interacción de ambos en la subcuenca Aguná.....	45

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Esquema general sobre la degradación de los suelos.....	9
Figura 2.	Ubicación Subcuenca Aguná.....	18
Figura 3.	Proceso metodológico para el desarrollo del SWAT.....	20
Figura 4.	Polígonos de Thiessen, áreas de influencia estaciones meteorológicas del INSIVUMEH.....	24
Figura 5.	Balance Hídrico subcuenca Aguná.....	31
Figura 6.	Aporte mensual medio de las fracciones del balance hídrico, producción de agua e hidrograma anual en la subcuenca Aguná.....	32
Figura 7.	Microcuencas delimitadas por SWAT pertenecientes a Subcuenca Aguná.....	33
Figura 8.	Producción de agua por microcuenca a una escala mensual en subcuenca Aguná.....	33
Figura 9.	Distribución de Erosión Mensual y estadísticas de datos.....	34
Figura 10.	Distribución de la erosión por cobertura y uso de la tierra en la subcuenca Aguná.....	35
Figura 11.	Escorrentía superficial y erosión por microcuenca.....	36
Figura 12.	Mapa de sedimentación en red de drenaje de subcuenca Aguná.....	37
Figura 13.	Cantidad de sedimentos y caudal por microcuenca y regresión lineal, Subcuenca Aguná.....	37
Figura 14.	Variación porcentual por microcuenca con respecto a la producción de erosión, en subcuenca Aguná.....	39
Figura 15.	Identificación de áreas por microcuenca con pérdida de suelo por arriba del nivel de tolerancia.....	40
Figura 16.	Regresión lineal a) erosión-precipitación, b) sedimentos-precipitación, c) sedimentos-erosión, en la subcuenca Aguná.....	46
Figura 17.	Microcuencas priorizadas de acuerdo con los escenarios de erosión.	47



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

CENGICAÑA - Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña

FAO - Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

HRU – Unidad de Respuesta Hidrológica

IARNA - Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente

ICC - Instituto Privado de Investigación Sobre Cambio Climático

MARN - Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales

MAGA - Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales

MUSLE – Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada

SIG – Sistema de Información Geográfica

SWAT - Soil and Water Assessment Tool

USDA - United States Department of Agriculture

## RESUMEN

La subcuenca Aguná tiene una extensión de 219.05 km<sup>2</sup> y forma parte de la cuenca Coyolate, que pertenece a la vertiente del Océano Pacífico y se encuentra ubicada en el sur de Guatemala en jurisdicción del departamento de Chimaltenango y Escuintla. El objetivo del presente estudio fue estimar la producción de agua, los niveles de erosión y sedimentos utilizando modelación hidrológica y de cambio climático, para la selección de cambios de cobertura/uso del suelo. Para ello se utilizó el modelo hidrológico SWAT (Soil Water Assessment Tool) en la interface QSWAT (versión 1.4). La información disponible relacionada al tipo de suelo, uso y cobertura, topografía y clima alimentó al programa SWAT. Se considera una línea base (situación actual) de 1983 al 2018, un escenario de cambio climático RCP 8.5 utilizando el modelo CCS4 (Community Climate System Model, versión 4) al año 2050 y tres cambios de cobertura de suelo (Eucalipto, Hule y Soya). En la situación actual la subcuenca Aguná es excedentario de agua según el balance hídrico, en donde un 79.4% de la precipitación se convierte en producción de agua, correspondiente a los niveles de erosión es catalogada como moderada, existiendo los mayores niveles de erosión en pendientes arriba del 30%, donde se produce el 81% del total de erosión en la subcuenca, se evidenció que la mayor cantidad de sedimento se deposita en la parte baja de la red de drenaje de la subcuenca. Con respecto a los efectos del cambio climático se prevé una disminución de las variables evaluadas a nivel general, tanto en la producción de agua, erosión y sedimentos, siendo la época lluviosa la más afectada, a pesar de ello algunas microcuencas elevaron su nivel de erosión incidiendo a su degradación. Al verificar los efectos de cambio de cobertura en áreas degradadas, existe mayor sensibilidad al cambio positivo en el escenario de plantaciones de Eucalipto reduciendo hasta 85.10% la erosión del suelo, logrando que esta sea leve o nula en la extensión de la subcuenca. La erosión en la subcuenca está influenciada por el tipo de cobertura y pendiente del terreno, por lo mismo no se constató el efecto que tiene la precipitación sobre la pérdida del suelo. Se sugiere continuar con estudios de modelación hidrológica con SWAT, incluyendo la calibración del modelo con el objetivo de lograr una mayor precisión en los resultados que servirán de base para la toma de decisiones en la planificación y conservación de los recursos de la subcuenca Aguná.

**Palabras claves:** modelación hidrológica, SWAT, balance hídrico, producción de agua, erosión, sedimentos, cambio climático, cambio de cobertura, sensibilidad.

## SUMMARY

The Aguná sub-basin has an extension of 219.05 km<sup>2</sup> and its part of the Coyolate basin, which belongs to the Pacific Ocean slope and is located in southern Guatemala under the jurisdiction of the department of Chimaltenango and Escuintla. The objective of the present study was to estimate water production, erosion and sediment levels using hydrological and climate change modeling, for the selection of changes of cover /land use. For this, the SWAT (Soil Water Assessment Tool) hydrological model was used in the QSWAT interface (version 1.4). The available information related to soil type, use and coverage, topography and climate fed to the SWAT program. A baseline (current situation) from 1983 to 2018, a scenario of RCP 8.5 climate change using the CCS4 model (Community Climate System Model, version 4) to the year 2050 and three changes of land cover (eucalyptus, rubber tree and soybean) are considered. In the current situation, the Aguná sub-basin is surplus water according to the water balance, where 79.4% of the precipitation becomes water production, corresponding to the levels of erosion, it is classified as moderate, with the highest levels of erosion on slopes above 30%, where 81% of total erosion occurs in the sub-basin, it was evident that the greatest amount of sediment is deposited in the lower part of the drainage network of the sub-basin. Regarding the effects of climate change, a decrease in the evaluated variables is expected at a general level, in the production of water, erosion and sediments, being rainy season the most affected, despite this, some micro-basins increased their level of erosion acting in favor of its degradation. When verifying the effects of change of coverage in degraded areas, there is greater sensitivity to the positive change in the eucalyptus plantation scenario, reducing soil erosion to 85.10%, achieving little or no erosion in the extension of the sub-basin. Erosion in the sub-basin is influenced by the type of coverage and slope of the land, therefore the effect of precipitation on soil loss was not verified. It is suggested to continue with hydrological modeling studies with SWAT, including the calibration of the model in order to achieve greater precision in the results that will serve as a basis for decision-making in the planning and conservation of resources in the Aguná sub-basin.

**Key words:** hydrological modeling, SWAT, water balance, water production, erosion, sediments, climate change, change of coverage, sensitivity.



## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. Antecedentes**

La erosión es el desgaste que se produce en la superficie del suelo por la acción de agentes externos (como el viento o el agua) o por la fricción continua de otros cuerpos (Ramakrishna 2019). Uno de los procesos erosivos típicos de las regiones tropicales es la erosión hídrica, causado por la agresividad de la lluvia debido a las características de intensidad, duración y frecuencia asociadas a los eventos pluviométricos. El efecto del agente causal, agua de lluvia, se magnifica cuando se conjugan otras variables, como la pendiente abrupta o escarpada de los terrenos, la ausencia de cobertura vegetal y la condición textural, o el pobre desarrollo estructural de los suelos (Nuñez 2001). En un informe del 2012 del programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, se informó que los métodos actuales de la agricultura aceleran la erosión de los suelos; tales actividades pueden romper el equilibrio de la materia orgánica que se encuentra en este, agotándose la cantidad de carbono que la tierra es capaz de almacenar, lo que produce que el carbono se convierta en dióxido de carbono, un gas de efecto invernadero que es el principal contribuyente al calentamiento global (Guioteca 2012).

En la región sur de Guatemala el cultivo de la caña de azúcar es uno de los mayores usos de suelo que existen. Para ello el Instituto Privado de Investigación Sobre Cambio Climático (ICC), que es financiado en una parte por el gremio agroindustrial azucarero de Guatemala, es una institución de investigación y desarrollo de proyectos para la mitigación y la adaptación al cambio climático. Actualmente su área de intervención son las cuencas de la vertiente del Pacífico, una de sus líneas de trabajo es el manejo integral del agua y suelo a través del programa de manejo integrado de cuencas. Dentro del rubro de conservación de suelo el ICC ha realizado evaluaciones de estas prácticas, por medio de métodos directos (parcelas de escorrentía-erosión) e indirectos (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada –EUPSM–), en los cuales se muestra la contribución en la disminución en la erosión de los suelos y a su vez de forma directa se evita la contaminación de las fuentes de agua, reduce las tasas de sedimentación en cauces de ríos, canales y disminuye el riesgo por inundación a cultivos y poblados (Nelson 2015).

Santos (2014) desarrolló el estudio sobre la erosión hídrica en la parte alta de la zona cañera, en la microcuenca Sujuyes, perteneciente a la cuenca Coyolate, en los meses de mayo a octubre (época lluviosa) utilizando método directo a través de parcelas de escorrentía-erosión, distribuidas en diferentes ubicaciones y usos de la tierra (cultivo de caña de azúcar, plantación forestal y cultivo de hule). Este estudio refleja que el área bajo la cobertura de caña de azúcar presenta la mayor tasa de erosión y el área bajo la cobertura de eucalipto presenta la menor tasa de erosión; sin embargo la estimación de erosión hídrica por medio de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (EUPSM) mostró que las prácticas de conservación de suelo (surcos a desnivel y acequias de ladera), en el cultivo de caña de azúcar se logra disminuir reducir 16 veces la erosión potencial, llegando a un nivel leve o nulo según la clasificación realizada por la FAO, el cual con esta clasificación determina los rangos de pérdida de suelo permisible en sistemas de uso de suelo agrícola que permitan la sustentabilidad productiva.

## 1.2. Justificación

La erosión del suelo afecta negativamente a la ecología y puede conducir a la reducción de productividad de los cultivos, disminuye la calidad del agua, aumenta la sedimentación de los conductos del agua que incrementan el riesgo a inundaciones y destrucción del hábitat. La erosión hídrica es uno de los factores naturales que tienden a degradar el suelo, pero esta erosión aumenta cuando las áreas con altos porcentajes de pendiente son sometidas a usos agrícolas intensivos sin prácticas de conservación de suelos (Park *et al.* 2011).

La subcuenca Aguná tiene una extensión de 219.05km<sup>2</sup> y forma parte de la cuenca Coyolate, que pertenece a la vertiente del Océano Pacífico y se encuentra ubicada al sur de Guatemala en jurisdicción del departamento de Chimaltenango y Escuintla. En su trayecto está compuesto por dos divisiones político administrativas, el municipio de San Pedro Yepocapa y Santa Lucia Cotzumalguapa, que coincide con la parte alta en el caso del municipio de San Pedro Yepocapa y la parte media y baja de la subcuenca en el municipio de Santa Lucia Cotzumalguapa. En el caso del municipio de Santa Lucia Cotzumalguapa, la porción de área que pertenece a la subcuenca Aguná coincide con el casco urbano del municipio donde está asentado el mayor número de habitantes del municipio, y por ser parte baja de la subcuenca, tiene mucha interacción e importancia las prácticas que se realizan en la parte alta y media de la subcuenca, en relación a la utilización del agua y suelo, ya sea para suministro de agua para uso doméstico o para riego.

En la distribución de uso de tierra, predomina el cultivo de caña de azúcar con un 53.81% de la extensión de la subcuenca, el cual es catalogado como un cultivo intensivo. El presente proyecto tiene la finalidad de identificar las áreas que presentan una alta probabilidad de erosión hídrica en la subcuenca Aguná, debido a que este tipo de erosión es el que causa mayor pérdida de suelo en la región. Además de realizar estimaciones y proyecciones de pérdida de suelo utilizando modelos predictivos de cambio climático en aquellas áreas degradadas con el uso actual de suelo, incorporando en el análisis distintos tipos de cobertura/uso de suelo. Con ello se pretende la recuperación de áreas degradadas, proporcionando información suficiente con la cual se pueda direccionar acciones de una manera focalizada y adecuada, obteniendo como resultado un plan basado no solo en la información recolectada de fuentes primarias y secundarias, sino también con datos técnicos que ayuden a mejorar toma de decisiones y que propicie la sustentabilidad productiva del suelo impidiendo su degradación.

### **1.3. Importancia**

El establecimiento de cultivos intensivos como lo es la caña de azúcar en áreas con pendientes fuertes y alta precipitación, propicia al aumento de escorrentía y la tasa de erosión. Además de modificar la capacidad de retención de agua del suelo, alterando el ciclo del agua, causando daños a los ecosistemas de su entorno y a la degradación de otros recursos naturales, además de modificar las propiedades físico-químicas del agua limitando su tipo de utilización adecuado (Adam 2006).

Por su parte Gómez (2002), explica que los efectos principales de la erosión no sólo se traducen en la pérdida de tierras superficiales fértiles y valiosas, la disminución de productividad agrícola y forestal, y elevación del fondo del mar, sino que además, los sedimentos generados dificultan la posibilidad de satisfacer la necesidad de agua potable, por tratarse de agua contaminada.

Debido a que el cultivo de caña de azúcar es el uso de tierra de mayor utilización de la subcuenca, tiene importancia las prácticas agronómicas e hidráulicas que se realizan con el fin de disminuir la erosión del suelo y por ende reducir la cantidad de partículas de suelo arrastradas que incrementan la sedimentación. Por tal motivo la importancia del estudio radica en estimar la erosión y sedimentación del suelo, con fines de preservar los recursos naturales, como garantizar la sustentabilidad productiva del suelo, al mismo tiempo de prevenir posibles riesgos de inundación provocada por la sedimentación en la parte baja de la subcuenca. Además de generar información para tomar medidas de manejo de suelos ya sea de tipo correctivo o preventivo.

El producto que se obtuvo, permitirá a los administradores de las distintas fincas cañeras y de otros cultivos ubicados en la extensión de la subcuenca tomar decisiones ya sea de tipo preventivo o correctivo mediante el cambio de uso de suelo (plantaciones de Eucalipto, Hule y Soya) y así poder reducir las pérdidas de suelos en sus áreas de trabajo. Además de constituir un antecedente del estado de subcuenca Aguná, de modo que se pueda observar la disponibilidad de agua mediante balance hidrológico y estimar los niveles de erosión como la producción de sedimentos actual y mediante modelos de cambio climático predecir los procesos de degradación futuros.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. General**

Estimar la producción actual de agua, los niveles de erosión hídrica y sedimentos utilizando modelación hidrológica y escenario de cambio climático para el año 2050, para la selección de cambio de cobertura/uso de suelo en la subcuenca Aguná, Escuintla, Guatemala.

### **1.4.2. Especifico**

- Estimar la producción de agua, los niveles de erosión hídrica y sedimentos actual y bajo modelo de cambio climático, en escenario de cobertura actual en la subcuenca Aguná.
- Estimar la erosión hídrica y producción de sedimentos en escenario de cambio de cobertura/uso de suelo en áreas degradadas de la subcuenca Aguná.
- Determinar el grado de sensibilidad de las microcuencas bajo escenario de cambio de cobertura correspondiente a los distintos niveles de erosión hídrica estimada.
- Establecer modelos matemáticos para predecir el comportamiento de la erosión y sedimentos en relación a la producción de agua en la subcuenca Aguná.



## **2. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1. Ciclo hidrológico**

Según Campos-Aranda (1984), el ciclo hidrológico es un término descriptivo aplicable a la circulación general del agua en la tierra, el cual se define como la sucesión de etapas que atraviesa el agua al pasar de la atmósfera a la tierra y volver a la atmósfera: evaporación desde el suelo, mar o aguas continentales; condensación de nubes, precipitación, acumulación en el suelo o masas de agua y reevaporación.

El ciclo hidrológico no tiene principio ni fin, es un proceso de circulación del agua entre la atmósfera, la hidrósfera y litósfera. Este proceso puede ser considerado en dos grandes escalas:

- a) Escala global: donde los elementos principales son los océanos (97%), continentes (0,02% como aguas continentales), y la atmósfera (0,001%); y
- b) Escala de cuenca (Mesoescala): donde los elementos principales son entre la atmósfera, la biósfera y la litósfera. La circulación de agua de mesoescala puede ser considerada como la plantilla para la cuantificación de los procesos ecológicos fundamentales (Zalewski y Wagner-Lotkowska 2004).

### **2.2. Ciclo hidrológico como sistema**

Chow et al. (1994) definen sistema como un conjunto de partes conectadas entre sí, que forman un todo. Por lo que el ciclo hidrológico puede tratarse como un sistema cuyos componentes son: precipitación, evaporación, escorrentía y otras fases del ciclo.

El ciclo hidrológico global se representa como un sistema dividido en tres subsistemas:

- a) Sistema de agua atmosférica: lo integran los procesos de precipitación, evaporación, interceptación, y transpiración.
- b) Sistema de agua superficial: lo integran los procesos de flujo superficial, escorrentía superficial, nacimientos de agua subsuperficial y subterránea, y escorrentía hacia ríos y océanos.
- c) Sistema de agua subsuperficial: lo integran los procesos de infiltración, recarga de acuífero, flujo subsuperficial y flujo de agua subterránea.

### **2.3. Cuenca hidrográfica**

La cuenca hidrográfica se define como el área territorial de drenaje natural donde todas las aguas pluviales confluyen a un colector común de descarga. Sus límites están determinados por la línea divisoria de aguas "divortium aquarum". No siempre los límites geográficos (superficiales) suelen coincidir con los límites del acuífero (subterráneo), pudiendo existir transferencias de masas líquidas entre una cuenca y otra adyacente o cercana. La línea de divortium aquarum se inicia y termina en la cota más baja o de salida de la cuenca (Faustino et al. 2006).

Las cuencas hidrográficas son vitales para el desarrollo humano y el establecimiento de la vida en la tierra. Faustino y Jiménez (2000) definen la cuenca hidrográfica como el espacio de terreno limitado por las partes más altas de las montañas, laderas y colinas, en él se desarrolla un sistema de drenaje superficial que concentra sus aguas en un río principal el cual se integra al mar, lago y otro río más grande.

Dentro de las cuencas hidrográficas se ubican los recursos naturales utilizados por el ser humano, como el suelo, agua, vegetación y fauna. Además, todas las actividades humanas en tierra firme se desarrollan dentro de las cuencas hidrográficas. Por tanto, las cuencas sufren los impactos negativos de las acciones del hombre sobre ellas.

#### **2.4. La cuenca hidrográfica como sistema**

De acuerdo con Vision (s.f.), la cuenca hidrográfica es un sistema, y es porque en ella existen entradas y salidas, por ejemplo, permite cuantificar que a la cuenca ingresa una cantidad de agua por medio de la precipitación y otras formas; y luego existe una cantidad que sale de la cuenca, por medio de su río principal en las desembocaduras o por el uso que adquiera el agua. La evaporación y el flujo subsuperficial también pueden considerarse como salidas, pero son muy pequeños comparados con el caudal durante una tormenta (Chow et al. 1994).

Dentro de la cuenca, también se producen interacciones entre sus elementos, por ejemplo, las acciones que se dan en la parte alta tienen una repercusión en la parte baja. También existen interrelaciones, verbigracia, la degradación de sus recursos se asocia a la falta de educación ambiental, falta de aplicación de leyes, tecnologías inapropiadas, etc. A su vez, el sistema está integrado por los siguientes subsistemas:

- a) Biológico, que integran esencialmente la flora y la fauna, y los elementos cultivados por el hombre.
- b) Físico, integrado por el suelo, subsuelo, geología, recursos hídricos y clima (temperatura, radiación, evaporación, etc.).
- c) Económico, integrado por todas las actividades productivas que realiza el hombre, en agricultura, recursos naturales, ganadería, industria; servicios (camino, carreteras, energía, asentamientos y ciudades).
- d) Social, integrado por los elementos demográficos, institucionales, tenencia de la tierra, salud, educación, vivienda, culturales, organizacionales, políticos, etc. (Vision s.f.).

#### **2.5. El agua: recurso integrador de la cuenca**

Para Jiménez (2006), la zona de cabecera de las cuencas hidrográficas garantiza la captación inicial de las aguas y el suministro de estas a las zonas inferiores durante todo el año. Los procesos en las partes altas de la cuenca invariablemente tienen repercusiones en la parte baja dado el flujo unidireccional del agua y, por lo tanto, toda la cuenca se debe manejar de manera integral, como una sola unidad. Al interior de la cuenca, el agua funciona como distribuidor de insumos primarios (nutrientes, materia orgánica, sedimentos) producidos por la actividad sistémica de los recursos.

García et al. (2005) indican que el movimiento del agua de lluvia y los flujos superficiales, a través de la red de drenaje, desde la parte alta de la cuenca hasta la parte baja, promueve el desprendimiento y el arrastre de partículas (sedimentos orgánicos y minerales) e induce la formación de valles, planicies o llanuras de inundación. El sistema hídrico también refleja un comportamiento de acuerdo con cómo se están manejando los recursos agua, suelo y bosque, así como qué actividades o infraestructuras afectan su funcionamiento.

## **2.6. Manejo integrado de cuencas hidrográficas**

El manejo de cuencas tuvo sus inicios en Estados Unidos en 1910 con los experimentos del Servicio Forestal en Wagon Wheel Gap, Colorado. En la década de 1930, durante los años de la Gran Depresión, la economía de Estados Unidos colapsó y simultáneamente el país experimentó grandes inundaciones, erosión severa y grandes tormentas de polvo. Como resultado de estos desastres, se creó el Servicio de Conservación de Suelos (actualmente Natural Resources Conservation Service) (Fallas y Valverde 2008).

Durante la década del 40, se publicaron los resultados de los estudios iniciados en los años 30 y con esto, la ciencia en manejo de cuencas hidrográficas alcanzó su legitimidad. El objetivo de estos primeros estudios era determinar el efecto de diferentes prácticas de manejo forestal y agrícola en el rendimiento hídrico (escorrentía), descarga máxima e instantánea, erosión y transporte de sedimentos (Satterlund, citado por Fallas y Valverde 2008).

Según Fallas y Valverde (2008), las primeras investigaciones en cuencas hidrográficas tenían como objetivo describir, cuantificar y entender las interacciones suelo-agua-cobertura y sus fluctuaciones naturales, así como las causadas por la acción humana a diversas escalas temporales y espaciales. El manejo de cuencas es el proceso complejo que le da orden a un conjunto de acciones dentro de la cuenca hidrológica superficial (hidrográfica) o cuenca hidrológica subterránea, encaminado a lograr un desarrollo social y económico sostenible en el tiempo, además de la protección del medioambiente.

## **2.7. Capacidad de uso de la tierra**

Klingebiel y Montgomery (1961) lo define como la determinación en términos físicos, del soporte que tiene una unidad de tierra de ser utilizada para determinados usos o coberturas y/o tratamientos. Generalmente se basa en el principio de la máxima intensidad de uso soportable sin causar deterioro físico del suelo.

Para ello existen tres categorías de uso de tierra (Ritchers 1995):

- Sobreuso de la tierra: Uso de una unidad de tierra a una intensidad mayor a la que soporta en términos físicos.
- Subuso de la tierra: Uso de una unidad de tierra a una intensidad menor que la que es capaz de soportar en términos físicos.
- Uso correcto de la tierra: Uso que indica que no hay discrepancia entre la capacidad de uso de la tierra y el uso que actualmente se le está dando.

## **2.8. Conflicto de uso de tierra**

El conflicto por el uso del suelo se define como la magnitud de la diferencia existente entre la oferta productiva del suelo y las exigencias del uso actual del mismo, tales diferencias se definen como conflictos. Para establecer niveles o grados de conflicto basta comparar el mapa de oferta productiva del suelo o uso potencial con el uso actual. De dicha comparación pueden resultar tres situaciones (URL 2009):

1. Correspondencia o equivalencia.
2. Subutilización del suelo.
3. Sobreutilización del suelo.

Las excesivas exigencias al suelo por el sobre uso generan degradación o degeneración del suelo por empobrecimiento en nutrientes o por pérdida de espesor debido a procesos erosivos superficiales ocasionados por el uso, afectándose, en este caso, la capacidad de productiva del suelo, limitando su utilización (URL 2009).

## **2.9. Degradación de suelos**

La degradación de los recursos naturales es un problema grave, que exige una atención prioritaria para el desarrollo sustentable de una nación. Con el ahondamiento de los problemas ecológicos, se ha multiplicado la importancia del aspecto ambiental, en los esfuerzos de la planeación económica (Rivera *et al.* 2005).

La degradación ambiental, es un proceso inducido por el comportamiento de las actividades humanas, que daña o altera los recursos naturales y los ecosistemas. Los efectos potenciales son variables y pueden contribuir a incrementar la vulnerabilidad, frecuencia e intensidad de los peligros naturales. La degradación de los suelos, la deforestación, los incendios forestales, la desertificación, la pérdida de la biodiversidad, la contaminación del suelo, aire y agua, el cambio climático y la reducción de la capa de ozono, son ejemplos de la degradación ambiental (Rivera *et al.* 2005).

Vera (2005) menciona que la degradación de suelos (figura 1) es un conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos que afectan la productividad de los ecosistemas. Los cambios producidos en el suelo por este proceso pueden llegar a ser irreversibles y tener consecuencias sociales, económicas, ecológicas y políticas negativas. El proceso de degradación se relaciona íntimamente con el uso inadecuado de los recursos agua, suelo, flora y fauna por el hombre. Al igual de estar relacionado como todo aquel proceso que produce disminución parcial o total de su capacidad productiva (Rivera *et al.* 2005). Existen diferentes factores que causan la degradación del suelo, todos ellos están interrelacionados, como por ejemplo: la erosión causada por el agua o el viento (Rafaelli *et al.* 2010).

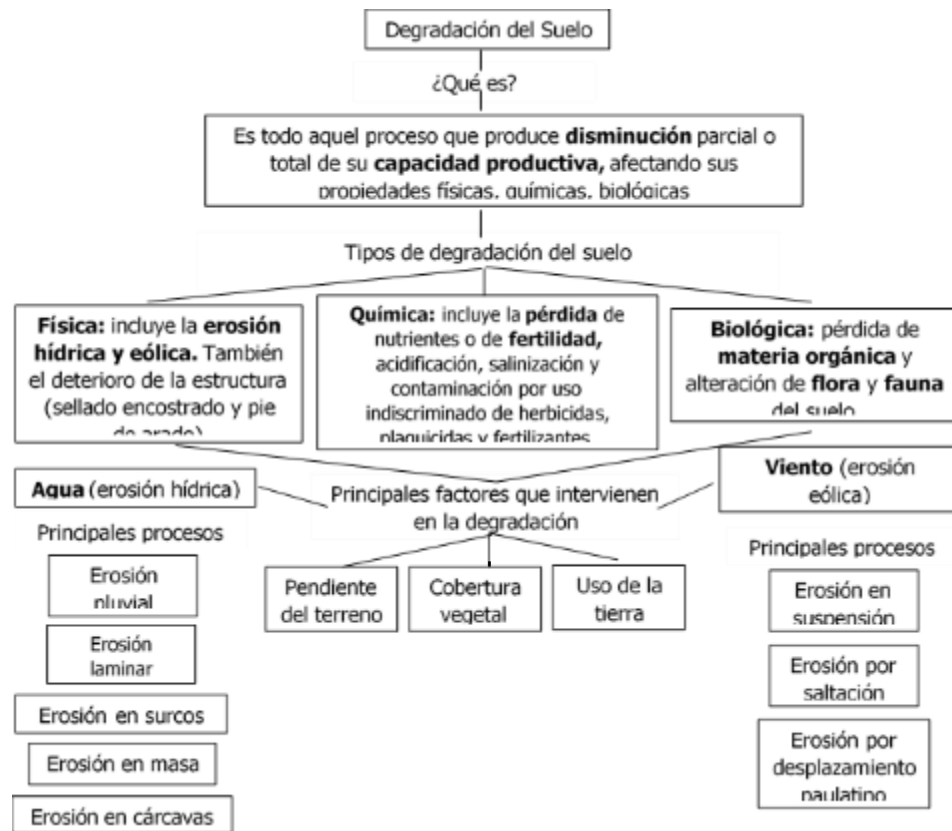


Figura 1. Esquema general sobre la degradación de los suelos.

Fuente: Adaptado de Santos 2014.

## 2.10. Deterioro de las tierras en Guatemala

Las condiciones topográficas, fisiográficas y climáticas de Guatemala han permitido el establecimiento de diversos ecosistemas, según World for Wildlife Fund (WWF 2001) citado por el IARNA (2009) en el país se encuentran 14 ecorregiones terrestres. Ésta diversidad de ecosistemas, representa disponibilidad de bienes naturales para el desarrollo de sistemas productivos y el asentamiento de comunidades. La utilización de estos recursos ha provocado diferentes grados de interacción entre la sociedad y la naturaleza y el uso del territorio (IARNA 2009).

Puesto que al utilizar las tierras más allá de sus capacidades se crean riesgos significativos de pérdida de suelo, el primer indicador que se discute, relacionado con el deterioro de las tierras, es la erosión potencial por sobreuso, un segundo indicador es el de las actividades productivas que potencialmente contribuyen a la erosión. Debido a que la erosión afecta los diferentes componentes del subsistema natural, se agrega como un tercer indicador, la erosión potencial en las ecorregiones del país (IARNA 2009).

El Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (2009) informo que en Guatemala se han perdido 149 millones de toneladas métricas de suelo fértil por erosión; siendo la Vertiente del Pacífico la más erosionada, ya que en esta se encuentra una alta producción agrícola, sujeta a

un proceso de erosión más acentuado (710 T/Ha/año), que la hace tener más del doble de la erosión que la vertiente del golfo de México (330 T/Ha/año) y casi seis veces más que la vertiente del Atlántico (122 T/Ha/año) (MARN 2009). La erosión potencial de la superficie en sobreuso (15%, según cuadro 1) es de 149 millones de toneladas de suelo al año, mientras que en las tierras bien utilizadas y en las subutilizadas la erosión es de 114 millones de toneladas de suelo. Esto quiere decir que el 15% del territorio que está en sobreuso puede ser el causante del casi el 57% de la erosión total del país en las tres categorías (IARNA 2009).

Cuadro 1. Superficie de las categorías de intensidad de uso de la tierra, áreas urbanas y cuerpos de agua de Guatemala para el año 2003.

<b>Categoría</b> <b>Intensidad de uso de la tierra</b>	<b>Área</b>	
	<b>Ha</b>	<b>%</b>
Uso correcto	5002262.00	45.94%
Subuso	4021363.00	36.93%
Sobreuso	1642403.00	15.08%
Áreas Urbanas	118289.00	1.09%
Cuerpos de agua	104038.00	0.96%
No determinada	545.00	0.01%
Total	10888900.00	100%

Fuente: Adaptado de IARNA 2009

### **2.10.1. Erosión potencial por actividades que se desarrollan en tierras sobre utilizadas**

En el cuadro 2 se presenta la erosión potencial por diferentes actividades que se realizan en tierras sobre utilizadas.

Cuadro 2. Erosión potencial por actividades que se desarrollan en tierras sobre utilizadas.

<b>Uso</b>	<b>Área (Ha)</b>	<b>T/Ha/año</b>	<b>Total (T)</b>	<b>% del total de erosión</b>
Cultivo anuales	1009527	102	102122916	68.76%
Cultivos perennes	505533	70	35159000	23.67%
Otros*	10439	260	2719182	1.83%
Pastos	115785	74	8513620	5.73%
Plantaciones forestales	1119	5	5255	0.00%
Total	1642403	911	148519973	100.00%

\* Áreas sin cobertura vegetal (cascos urbanos, extracción de arenas, playas y cimas de volcanes)

Fuente: Adaptado de IARNA, 2009

Se puede observar que el uso que corresponde a la categoría de otros presenta la mayor erosión por superficie, con 260 T/Ha/año. Este valor se debe a que en esa categoría se encuentran áreas sin cobertura vegetal. El segundo valor corresponde a los cultivos anuales

con 102 T/Ha/año que, al mismo tiempo, representa más de 60% de área en sobreuso, lo cual hace que esta actividad contribuya con casi el 69% de la erosión total por sobreuso. Le siguen los pastos, con 74 T/Ha/año, que ocupan el tercer lugar en porcentaje de erosión total con casi 6%. Posteriormente están los cultivos perennes con 70 T/Ha/año pero, por tener mayor área en sobreuso que los pastos, ocupan el segundo lugar en el porcentaje de erosión total, con casi el 24%. Por último están las plantaciones forestales con 5 T/Ha/año y menos del 0.01% de la erosión total (IARNA 2009).

### **2.11. Erosión hídrica**

La erosión hídrica es uno de los procesos de degradación más importantes, que afectan la capacidad de las tierras en pendientes pronunciadas, para la producción de alimentos para el consumo humano o animal; además, la presencia de las plantas y las primeras capas del suelo son imprescindibles para que el agua de las precipitaciones se infiltre, por lo que el aumento en la erosión significa siempre una disminución en la recarga de los acuíferos. Esta erosión hídrica, es un proceso erosivo típico de regiones tropicales, causado por la agresividad de la lluvia, debido a las características de intensidad, duración y frecuencia asociadas a los eventos pluviométricos (Nuñez 2001).

Este tipo de erosión se puede definir como el desprendimiento y arrastre de partículas de suelo por acción del agua. Las gotas de lluvia desprenden el suelo y el agua de escorrentía es la encargada de realizar el transporte y la sedimentación (Hudson 1981). La erosión de los suelos tiene, desde el punto de vista de las ciencias de la Tierra, un aspecto positivo al llevar a los ríos sedimentos y nutrientes, manteniendo de esta forma el necesario equilibrio sedimentario en los cauces y en las playas, a la vez que configura y mantiene espacios muy fértiles (Almorox 2010).

### **2.12. Factores que originan la erosión hídrica**

La erosión está originada por la combinación de varios factores, tales como las pendientes pronunciadas, el clima, las características del suelo, el tipo y estado de cubierta vegetal, su manejo y gestión (Almorox 2010). Aunque sucede sin necesidad de actividades antrópicas, su efecto sí es incrementado por el deterioro de la cobertura vegetal, causada por el hombre (Vargas 2015). Diversos factores intervienen en los procesos de erosión hídricos (FAO et al. 1980):

- **Climáticos** traducido en el potencial erosivo de la lluvia.
- **Edáficos** expresado como la erodabilidad o susceptibilidad del suelo para ser erosionado.
- **Topográficos** manifestados en la longitud, forma y pendiente del terreno.
- **Humanos** representados básicamente por la degradación de la cubierta vegetal, principalmente en el manejo o intervención de sistemas productivos, alterando:
  - El tipo de vegetación
  - El desarrollo de la misma a través del año

- El porcentaje de cobertura
- La rugosidad del terreno
- Las condiciones de la superficie del suelo.

### **2.13. Sedimentación**

El origen de los sedimentos en suspensión, carga de lavado, está fundamentalmente en los procesos de erosión laminar y en regueros del suelo de la cuenca. (TRAGSA 1998). De acuerdo a Neitsch, *et al.* (2005), la erosión es el desgaste de un terreno con el tiempo. Esto involucra la separación, transporte, deposición de partículas del suelo por las fuerzas erosivas de las gotas de la lluvia así como el flujo del agua en la superficie. El impacto de las gotas de la lluvia puede separar partículas de la tierra en superficies desprotegidas de tierra entre riachuelos, e iniciar el transporte de estas partículas hacia los arroyos. Desde los pequeños riachuelos las partículas se mueven hasta los riachuelos más grandes, luego hacia canales efímeros y posteriormente a los ríos. El arrastre y deposición de partículas puede ocurrir en cualquier punto a lo largo del camino.

### **2.14. Métodos de estimación de erosión hídrica**

Los datos sobre la erosión del suelo y los factores que la controlan, pueden tomarse en campo o para condiciones de simulación, en laboratorio. La utilización de datos de campo o de laboratorio depende de los objetivos. Para conseguir datos reales de pérdidas de suelo, las medidas de campo son las más fiables, pero como las condiciones varían temporal y espacialmente, es a menudo difícil determinar con ellas, las causas principales de la erosión o conocer los procesos que actúan. Los experimentos diseñados para obtener una explicación, son mejor interpretados en el laboratorio, donde se pueden controlar los efectos de muchos factores. Sin embargo, a causa de lo artificioso de los experimentos de laboratorio, es deseable alguna confirmación de sus resultados en el campo (Morgan 1997).

#### **a) Métodos cualitativos**

Los métodos cualitativos de estimación de la erosión hídrica, no recurren a valoraciones numéricas-cuantitativas del fenómeno natural, sino adjetivaciones ordinales de los diferentes caracteres que se toman en consideración. Entre los métodos cualitativos, destaca la cartografía de unidades homogéneas, en función de los parámetros principales que controlan el proceso erosivo (erosividad, suelo, vegetación, topografía), y la atribución de valores de cuantificación más o menos subjetivos. Los estados de la erosión real pueden ser determinados mediante la observación con sensores remotos y contrastes de campo. Esta técnica puede ser utilizada para la cartografía de áreas con erosión entre arroyos y arroyos, cárcavas, abarrancamientos y desplazamientos en masa, de forma que, después de la valoración de los estados de erosión, se puede confeccionar el mapa cualitativo de erosión hídrica (Rafaelli *et al.* 2010).



## **b) Métodos cuantitativos**

Los métodos cuantitativos pueden estimar las pérdidas de suelo por erosión mediante evaluaciones directas o indirectas. Las tasas de erosión pueden ser medidas con precisión en experimentos a pequeña escala; para escalas grandes sólo pueden hacerse estimaciones (Lima *et al.* 2002).

### **i. Evaluación directa**

Las medidas de campo pueden clasificarse en dos grupos: las diseñadas para determinar las pérdidas de suelo en áreas relativamente pequeñas o parcelas de erosión, frecuentemente como parte de un experimento, y las diseñadas para evaluar la erosión en áreas más grandes, como una cuenca hidrográfica (Morgan 1997). Los métodos cuantitativos determinan la erosión por medida directa (medidas en cuencas, medida del volumen del flujo de agua y sedimentos, agujas de erosión, estacas, varillas, perfiladores micro topográficos, etc.), en el terreno o la estimación a partir de ensayos (simuladores de lluvias, parcelas de erosión), o por medida de parámetros asociados a los sedimentos o al suelo (materia orgánica, fósforo, etc.) (Rafaelli *et al.* 2010).

### **ii. Evaluación indirecta: modelos de erosión paramétricos**

Este tipo de evaluación se basa en el uso de modelos matemáticos desarrollados sobre bases estadísticas, empíricas o de leyes físicas. La utilización de gran número de variables importantes, relacionadas con los procesos de degradación y sus interacciones, para determinar probabilidades y riesgos de erosión de suelos y su influencia en la producción de cultivos y daños ambientales, puede facilitarse con su integración en modelos (Pla 1994).

Los modelos de erosión del suelo juegan un papel importante, para planificar medidas anti erosivas del suelo, para conservar el recurso agua y en las evaluaciones de las fuentes no puntuales, incluyendo evaluación e inventario de la carga de sedimentos, planificar y diseñar obras de conservación, para el control de los sedimentos y para el avance de estudios científicos. Los monitores y mediciones de la erosión del suelo in-situ, son caros y demandan mucho tiempo, por lo que los modelos matemáticos de erosión son en muchos casos, la única herramienta para evaluar la erosión. En general, todos los modelos existentes pueden relacionarse con unos de los siguientes tres grupos (Taboada 2003):

- 1) Los modelos de erosión que calculan solo la pérdida de suelo, utilizando principalmente la ecuación universal de pérdida de suelo, sin ninguna consideración para los procesos de transporte y deposición.
- 2) Los modelos de erosión basados en ecuaciones empíricas y que en la mayoría de los casos, utilizan también una modificación de la ecuación universal de pérdida de suelo, para calcular la pérdida de suelo. Adicionalmente, los procesos de transporte y deposición son simulados, basados en la información topográfica.

- 3) Los modelos de erosión de procesos orientados, los cuales simulan los efectos de las gotas de lluvia, escurrimiento laminar y otros procesos. El transporte y la deposición son calculados también mediante la información topográfica (EROSION 3-D, WEPP).

### **2.14.1. Modelo SWAT**

SWAT corresponde al acrónimo de "Soil and Water Assessment Tool" lo que podríamos traducir aproximadamente como herramienta para la evaluación del suelo y del agua en el conjunto de una cuenca hidrográfica. Realmente SWAT es una herramienta informática de simulación hidrológica integral a nivel cuenca, la cual fue desarrollada por Dr. Jeff Arnold en los años noventa para el "Agricultural Research Service" (ARS) perteneciente al "United States Department of Agriculture" (USDA) (Neitsch *et al.* 2009).

SWAT se puede definir, por tanto, como un software de modelización hidrológica del impacto que presentan las prácticas de manejo del suelo sobre el ciclo hidrológico, la producción de sedimento y la difusión de sustancias químicas en cuencas grandes o en cuencas de alta complejidad donde se pueden combinar distintos tipos: de suelos, de usos del suelo y de condiciones de manejo de la vegetación durante largos periodos de tiempo. Por tanto, permite conocer la dinámica hídrica de las cuencas bajo escenarios actuales y futuros, permitiendo realizar los análisis territoriales que apoyen la toma de decisiones en las planificaciones vinculadas al cambio de uso del suelo, a las actividades de reforestación y agrarias o en cuanto al establecimiento y explotación de obras hidráulicas (Villarán 2017).

El modelo SWAT se compone de una serie de submodelos o módulos que en su conjunto permiten la recreación de los distintos escenarios de trabajo: módulo meteorológico (incorporación/simulación de los datos básicos meteorológicos), módulo hidrológico (transformación de la precipitación en escorrentía, generación de los balances hídrico y propagación de caudales en la cuenca y en los cauces), módulo sedimentario (destinado a evaluar la erosión hídrica, el transporte y la sedimentación), módulo de simulación de crecimiento de cultivos y de la vegetación, módulo de simulación de los ciclos de nutrientes, módulo de simulación de la dinámica de pesticidas y agentes químicos y el módulo de gestión agrícola o tratamientos culturales del suelo (Villarán 2017).

#### **2.14.1.1. Fundamentos del modelo hidrológico y sedimentario**

El módulo hidrológico de SWAT a su vez se divide en dos grandes componentes: la fase terrestre del ciclo hidrológico, el cual se encarga de simular la cantidad de agua vertida al canal principal de la cuenca por cada subcuenca en la que se haya dividido la cuenca. Y la fase de tránsito, que se encarga de modelizar el movimiento del agua a través de la red de canales hasta su desembocadura o sección de cierre de la cuenca. La fase terrestre se basa en la ecuación general del balance hídrico (Neitsch *et al.* 2009):

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

Dónde:  $SW_t$  es el contenido de agua en el suelo (mm),  $SW_0$  es el contenido inicial de agua en el suelo (mm),  $t$  es el tiempo (día, mes, año),  $R_{day}$  es la precipitación diaria (mm),  $Q_{surf}$  es la escorrentía superficial (mm),  $E_a$  es la evapotranspiración (mm),  $W_{seep}$  es la cantidad de agua acumulada en la zona no saturada del suelo (mm) y  $Q_{gw}$  es la cantidad de agua subterránea que retorna hacia los ríos como flujo base o caudal de base (mm).

Al igual que en el apartado anterior, la modelización del módulo sedimentario se puede dividir en dos componentes: la fase erosiva y la fase de transporte. En la fase erosiva se modeliza la producción de sedimentos mediante la ecuación universal modificada de pérdida de suelo (MUSLE) (William 1975).

$$sed = 11,8 \cdot (Q_{surf} \cdot q_{peak} \cdot area_{hru})^{0,56} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot CFRG$$

Dónde:  $sed$  es la tasa de emisión de sedimentos para cada unidad hidrológica de respuesta (HRU) para un día en el que se ha producido escorrentía (toneladas),  $Q_{surf}$  es la escorrentía superficial (mm /ha),  $q_{peak}$  es el caudal punta de cada día que se produce escorrentía (m<sup>3</sup>/s),  $area_{hru}$  es el área de cada HRU (ha),  $K_{usle}$  es el factor de erosionabilidad del suelo estimado según la metodología de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE) (Wischmeier and Smith, 1965, 1978) (t m<sup>2</sup> h/(m<sup>3</sup> t cm)),  $C_{usle}$  es el factor de cultivo de la USLE (adimensional),  $P_{usle}$  es el factor de prácticas de conservación del suelo de la USLE (adimensional),  $LS_{seep}$  es el factor topográfico estimado según la metodología propuesta por la USLE (adimensional) y  $CFRG$  es el factor de pedregosidad del suelo, que actúa como un modificador de la tasa final de sedimentos.

En cuanto a la fase de transporte del modelo sedimentario el programa la divide en dos componentes: deposición y degradación. Las cuales funcionan de forma simultánea, de tal forma que la cantidad de sedimentos finales que llegan a la sección de cierre de una cuenca es estimada como la cantidad de sedimentos que llegan a los cauces de la cuenca menos la cantidad de sedimentos depositados en el cauce más la tasa de degradación del cauce (Villarán 2017).

## 2.15. Cambio climático

Desde 1992 la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) define el cambio climático como un cambio en el clima que se atribuye de manera directa o indirecta a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera del planeta Tierra y que se suma a la variabilidad natural del clima, observadas durante periodos de tiempo comparables. Esta definición persiste en el tiempo, entendiéndose cambio climático como una variación identificable del estado del clima (variación del nivel medio y/o en las variaciones de sus propiedades) debido a procesos naturales o antropogénicos (IPCC 2013), en periodos de tiempo largos, generalmente mayores a 30 años (OMM 2011).

Para analizar las variaciones del clima en un período de tiempo determinado se emplean escenarios de emisiones, conocidos como Trayectorias de Concentraciones Representativas

(RCPs por sus siglas en inglés). Dichas trayectorias se centran en las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero, representando un forzamiento radiactivo total calculado para el año 2100 respecto al 1750 (BID 2015).

Los RCPs se basan en una combinación de modelos de evaluación integrados, modelos climáticos sencillos, modelos de la química atmosférica y modelos del ciclo global del carbono (Espinoza 2016). Las trayectorias incluyen un escenario de mitigación estricto, con emisiones muy bajas (RCP2.6), dos escenarios intermedios, 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) (IPCC 2014).

### **2.16. Erosión de suelos y el cambio climático**

Se estima que la cantidad de carbono orgánico en los suelos es cuatro veces superior a la cantidad de carbono orgánico de la vegetación terrestre y unas tres veces superior al carbono orgánico de la atmósfera (Almorox 2010). Es por esto que se consideran a los suelos agrícolas como uno de los mayores depósitos de carbono del planeta y tienen potencial para expandir el secuestro de carbono y de esta manera mitigar el crecimiento de la concentración atmosférica de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Dentro del contexto del protocolo de Kyoto y las subsiguientes discusiones de la Conferencia de la Partes (COP), hay un cierto número de características que hacen que el secuestro de carbono en las tierras agrícolas y forestales pueda ofrecer posibilidades de estrategias atractivas de mitigar el incremento en la atmósfera de las concentraciones de gases de invernadero (FAO 2002).

A parte de los factores climáticos (principalmente la temperatura) los procesos más importantes que causan pérdidas de carbono del suelo son la erosión y la mineralización de la materia orgánica. La lixiviación del carbono orgánico e inorgánico, es otro mecanismo importante de pérdida de carbono en el suelo (FAO 2002). El control de la erosión de los suelos es otra forma de reducir emisiones de dióxido de carbono desde los suelos. Es un hecho conocido que la erosión actúa arrastrando selectivamente las fracciones más finas (arcilla) del suelo, y también es sabido que la materia orgánica está fuertemente asociada a estas partículas más finas. Los sedimentos enriquecidos en carbono son redistribuidos dentro de la toposecuencia o terminan en corrientes de agua superficiales, en donde la materia orgánica es atacada por microorganismos resultando en liberación de CO<sub>2</sub>. PROCISUR (2001) menciona que la adopción de prácticas que prevengan la erosión puede ser la mejor estrategia a nivel global, para mantener y aun incrementar las cantidades de carbono almacenadas en los suelos.

### **2.17. Límite de tolerancia de pérdida de suelo**

El límite de pérdida de suelo es la tasa máxima de erosión de suelo que permite que sostenga un alto nivel de productividad y la actualidad no existe una base satisfactoria para determinar los valores adecuados de la tolerancia a la pérdida de suelos. La tolerancia a la pérdida de suelo para un suelo específico se utiliza como una guía para la planificación en la conservación de suelos. La ecuación universal de pérdida de suelos se utiliza para estimar la

pérdida de suelo real y para evaluar como los cambios en las prácticas puede aplicarse para reducir la pérdida de suelo por debajo del nivel de tolerancia (Kirkby y Morgan 1984).

De acuerdo a lo descrito por Tragsa (1998), la evaluación de tolerancias de pérdidas de suelos en un terreno, factor básico para la utilización del modelo en la ordenación, depende de diversos factores tales como profundidad del suelo, sus propiedades físicas, desarrollo de los sistemas radicales de la vegetación, reducción de la materia orgánica, pérdidas de nutrientes y sementeras, etc. En el cuadro 3 se presenta la clasificación según los rangos de pérdida de suelo establecidos por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación (FAO).

Cuadro 3. Clasificación de FAO – PNUMA – UNESCO (1980)

<b>Pérdida de Suelo (Ton de suelo/Ha/año)</b>	<b>Grado de erosión hídrica</b>
< 10	Ninguna o ligera
10-50	Moderada
50-100	Alta
> 100	Muy alta

Fuente: Adaptado de 1980.

### **Síntesis**

El suelo es un sistema natural desarrollado a partir de la mezcla de minerales y residuos orgánicos bajo la influencia del clima y del medio, además de servir como soporte para el desarrollo de las plantas y las diferentes actividades antrópicas. Debido a la presión antrópica que realizan sobre ella, tiende a perder de forma progresiva las propiedades físicas, químicas y biológicas, por lo que afecta su productividad y el deterioro de los ecosistemas, a este proceso se conoce como degradación. Unos de los procesos de mayor importancia en la degradación de los suelos es la erosión hídrica, que es catalogado como el desprendimiento y arrastre de partículas del suelo por acción del agua. Al ser arrastrados estas partículas se depositan regularmente en las partes bajas o en pendientes leves de los cauces de los ríos originando el proceso de sedimentación, Almorox (2010) describe este efecto como formación de suelo en las partes bajas de la cuenca ya que se crean espacios fértiles, pero al ser en cantidades que sobre pasen el equilibrio sedimentario en los cauces y en las playas, puede provocar riesgos de desbordamiento de ríos e inundaciones. Diversos factores intervienen en el proceso de erosión de suelo, entre ellos la intervención humana a través de la cobertura o uso de suelo, climático por medio del potencial erosivo de las lluvias y edáfico por tipo de suelo (erodabilidad del suelo) y pendiente de la superficie. El cambio climático tiene ingerencia en la degradación del suelo debido a la variabilidad climática, afectando el balance hídrico en el espacio territorial de la cuenca hidrográfica, el cual es considerado como la unidad territorial que da formación al agua superficial, siendo esta última por medio de la escorrentía que se forma generalmente en las partes altas de la cuenca (pendientes altas), la que favorece el proceso de la erosión del suelo. Ante ello las actividades antrópicas tienen que ir alineadas a la capacidad de uso de la tierra, siendo la cobertura de suelo y prácticas de conservación las que pueden favorecer la preservación y conservación del suelo.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Ubicación del área de estudio

La subcuenca Aguná (figura 2) tiene una extensión de 219.05 km<sup>2</sup> y forma parte de la cuenca Coyolate, que pertenece a la vertiente del Océano Pacífico y se encuentra ubicada en el sur de Guatemala en jurisdicción del departamento de Escuintla y Chimaltenango. En su trayecto está compuesto por dos divisiones político-administrativas, el municipio de Santa Lucía Cotzumalguapa y San Pedro Yepocapa perteneciente al departamento de Escuintla y Chimaltenango respectivamente. Se encuentra en el cuadrante (cuadro 4) con las siguientes coordenadas en la proyección World Geodetic System 1984 (Datum WGS 84):

Cuadro 4. Coordenadas de ubicación, Subcuenca Aguná.

Longitud	Latitud
-91.050417	14.528152
-90.927404	14.476357
-91.041385	14.205651
-91.164398	14.257446

Fuente: Elaboración propia.

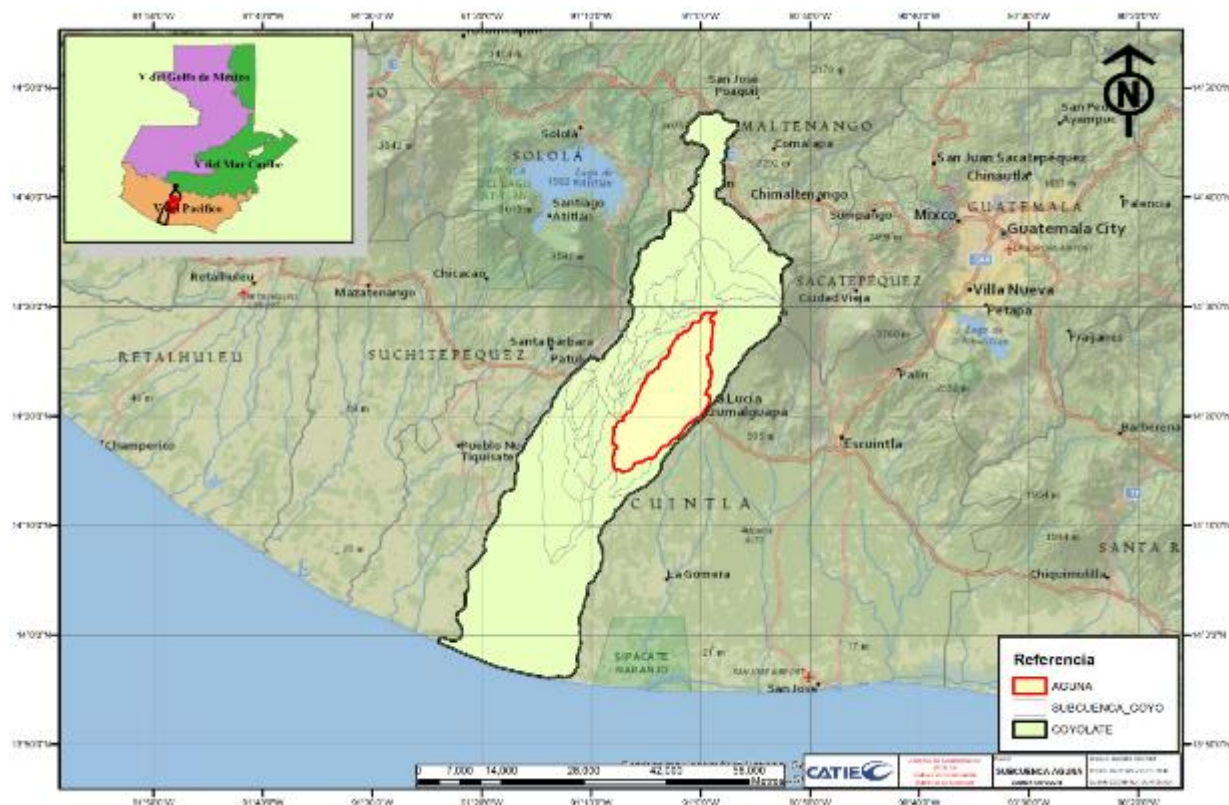


Figura 2. Ubicación Subcuenca Aguná.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2. Descripción general

La subcuenca Aguná está ubicada dentro de la zona cañera de la costa sur de Guatemala, en cuanto a su distribución de uso de tierra predomina el cultivo de caña de azúcar con un 53.81% de extensión de la subcuenca. Tiene un rango altitudinal que va de 88 a 1412 m.s.n.m (metros sobre el nivel del mar). La posición altitudinal en la zona cañera de Guatemala (cuadro 5) está asociada a variaciones climáticas y de suelo, debido a que la fisiografía de la región corresponde a un paisaje natural de planicie de pie de monte, que se inicia con pendientes de 7 a 25% cerca de la cadena montañosa, con relieve ondulado y va descendiendo suavemente hacia la costa del Pacífico con relieve plano, por lo que se ha dividido la zona cañera en cuatro estratos altitudinales donde existen características climáticas y de suelo homogéneas (CENGICAÑA 2012).

Cuadro 5. Caracterización climática en la zona cañera de Guatemala.

Estrato	Altitud (msnm)	Pp (mm/año)	T°(°C)			Radiación solar (MJ/m <sup>2</sup> /día)	Velocidad media del viento (Km/h)
			Min.	Media	Máx.		
Alto	>300	4100	20.2	26.2	32.2	17.7	5.2
Medio	100 - 300	3700	20.5	26.7	32.2	17.3	6.8
Bajo	40 -100	1900	21.2	27.3	33.8	18.4	6.2
Litoral	< 40	1500	21	27.5	33.4	18	8.7

Fuente: Adaptado de CENGICAÑA 2012.

Las lluvias en la zona se distribuyen en dos estaciones: época lluviosa que ocurre entre mayo y octubre; en tanto que junio y septiembre registran la mayor precipitación también, pero un periodo de canícula de 15 días entre julio y agosto. La época seca se marca entre octubre y mayo; los cuales coinciden con el periodo de cosecha de caña de azúcar (CENGICAÑA 2012).

Según el mapa de Zonas de Vida de Holdridge la subcuenca Aguná se encuentra ubicada dentro de la zona de vida "Bosque muy húmedo subtropical" (bmh-ST). La relación que se establece entre la evapotranspiración potencial y los volúmenes de precipitación pluvial promedio para esta zona de vida es de 0.43, lo que significa que de cada milímetro de precipitación que ocurre, se evapotranspiran 0.43 mm, haciendo que este sea considerado como un ecosistema excedentario en agua (IARNA 2009).

Aunque no existe un censo poblacional a nivel cuenca, en el caso del municipio de Santa Lucia Cotzumalguapa, la porción de área que pertenece a la subcuenca Aguná coincide con el casco urbano del municipio donde se estima este asentado un 52% de su población, que equivale a 58,645 según datos aportados por el INDE (2018). En el caso del municipio de San Pedro Yepocapa, la porción de área que pertenece a la subcuenca Aguná, coincide con la zona urbana donde se estima este asentado un 51% de su población, que equivale a 8,960 habitantes, haciendo un aproximado de 67,605 habitantes que están asentados en la subcuenca.

Geológicamente la microcuenca se encuentra dentro de la de la región fisiográfica, conocida como Pendiente volcánica reciente, según el Atlas Nacional, editado por el Instituto Geográfico Nacional; esta región incluye los volcanes de más reciente formación en Guatemala, así como el material asociado que ha sido drenado o depositado hacia la Costa Sur. Dicho material es principalmente de edad cuaternaria, y la actividad que lo produjo está asociada con una zona de falla paralela a la costa, a lo largo de las laderas hacia el sur del altiplano volcánico. Según el mapa de asociaciones de suelos de Guatemala, son suelos volcánicos (Herrera 2006).

### 3.3. Proceso Metodológico

Este trabajo se utilizó el programa QGIS® y la extensión QSWAT. La información espacial en formato digital empleada como punto de partida se obtuvo de las siguientes fuentes:

- Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC)
- Instituto Geográfico Nacional (IGN)
- Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar (CENGICAÑA).
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA).
- Infraestructura de Datos Geospaciales de Guatemala (IDEG).
- Secretaria de Planificación y Programación de la Presidencia (SEGEPLAN).

En la Figura 3 se logra observar de forma general las diferentes etapas que se desarrollan dentro del SWAT para la obtención de variables hidrológicas y de los efectos que este causa como el caso de la erosión y sedimentación:

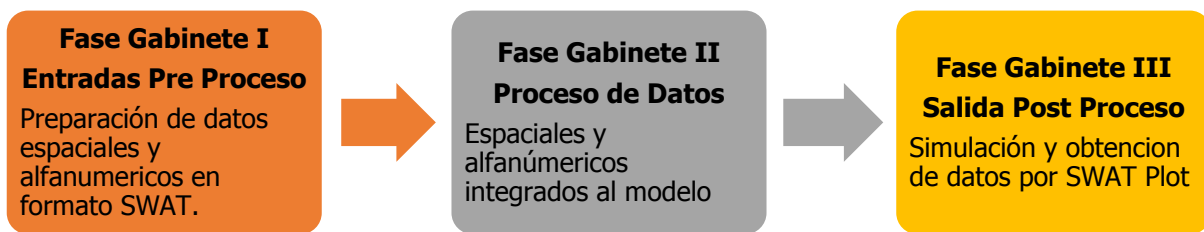


Figura 3. Proceso metodológico para el desarrollo del SWAT.

Fuente: Elaboración propia

#### 3.3.1. Fase de gabinete I

##### 3.3.1.1. Recopilación de información alfanumérica

La primera fase o etapa de la simulación fue la búsqueda y recopilación en fuentes primarias, proporcionados por el INSIVUMEH, proporcionando información histórica de las distintas estaciones meteorológicas que cuenta el país, proporcionando las siguientes variables climatológicas:



- Registros históricos de Precipitación diaria (mm)
- Registros históricos de Temperatura máximas y mínimas (°C)
- Humedad relativa
- Velocidad del viento
- Radiación solar

### **3.3.1.2. Recopilación de información espacial**

Se identificaron fuentes primarias, como fuentes secundarias en instituciones privadas, públicas y no gubernamentales, como se describe a continuación:

- Uso y cobertura de la tierra escala 1:50,000. Fuente INAB, CONAP y MAGA, año 2010.
- Tipo de suelo a partir de la primera aproximación al mapa de clasificación taxonómica de los suelos de la República de Guatemala, escala 1:250,000 desarrollado por el MAGA.
- Modelo de elevación digital (grid), con resolución de 15 metros, IGN.
- Localización de las estaciones meteorológicas, INSIVUMEH.

### **3.3.2. Fase de gabinete II**

La modelización hidrológica y sedimentaria con SWAT de una cuenca requiere de los siguientes pasos:

#### **3.3.2.1. Delimitación de la cuenca**

Es el primer proceso y mediante esta herramienta, partiendo de un modelo digital de elevación (MDE) el programa determina la cuenca y la red de drenaje que compone el sistema hidrológico a modelizar. La cuenca puede ser fraccionada en varias subcuencas, a través de un valor de área umbral, que dependerá del objetivo y exactitud del estudio. Dichas subcuencas poseen una posición geográfica determinada y están relacionadas con las vecinas. Esta se definió, para que el modelo generara 38 subcuencas con un área aproximada de 250 Ha.

La subcuenca generada por el modelo, se subdividió en Unidades de Respuesta Hidrológicas (HRU), que conforman una combinación únicas de tipos de suelo, usos del terreno y cobertura, pendiente, de forma que cada subcuenca posee al menos una HRU. La subdivisión de la cuenca permite al modelo reflejar diferencias en la evapotranspiración, para varios tipos de suelos y coberturas. La escorrentía se predice separadamente para cada HRU y es canalizada en función del modelo digital de elevación para obtener el total en la cuenca. Esto aporta una mayor precisión en la descripción física del balance de agua.

#### **3.3.2.2 Definición de las Unidades de respuesta hidrológica (HRU)**

El módulo HRU, permite a los usuarios ingresar los vectores de los temas uso y características físicas y químicas del suelo al proyecto actual. Dicho módulo permite además, la elaboración de un raster que contiene las características de pendientes y determinar las combinaciones y la distribuciones existentes entre el uso/suelo/pendiente, para la determinación de las unidades de respuesta hidrogeológica (HRU en inglés).

El módulo HRU está dividido en 3 secciones: LandUse Data, Soil Data y Slope. Cada una de estas secciones permitió la reclasificación de las categorías, tanto de Uso y cobertura de suelo, así como en sus características físicas y químicas. En el cuadro 6, se muestra los datos espaciales de Cobertura y uso de suelo, que coincidieron con el código de 5 letras que maneja SWAT.

Cuadro 6. Uso y cobertura la tierra, subcuenca Aguná y códigos SWAT.

<b>Tipo de Uso de Suelo</b>	<b>Código SWAT</b>	<b>Descripción</b>
Agroindustria	UIDU	Industrial
Bosque latifoliado	FRSE	Forest-Evergreen
Café	COFF	Coffee
Caña de Azúcar	SUGC	Sugarcane
Cítricos	ORCD	Orchard
Granos básicos (maíz y frijol)	CORN	Corn
Hule	FRSD	Forest-Deciduous
Lotificaciones	URML	Residential-Med/Low Density
Hortalizas (papa, Lechuga, zanahoria)	POTA	Potato
Palma africana	OILP	Oil Palm
Pasto cultivado	PAST	Pasture
Playas, dunas o arenales	WETN	Wetlands-Non-Forested
Rio	WATR	Water
Tejido urbano continuo	URHD	Residential-High Density
Vegetación arbustiva baja (matorral y/o guamil)	RNGB	Range-Brush
Zonas de extracción minera (canteras)	UTRN	Transportation

Fuente: Elaboración propia.

Para la sección Soil el modelo SWAT requiere una serie de variables para cada uno de los tipos de suelos presentes en la subcuenca las cuales fueron tomadas de la primera aproximación al mapa de clasificación taxonómica de los suelos de la República de Guatemala, escala 1:250,000 desarrollado por el MAGA, tomando en cuenta sus características físicas y químicas. Algunas de las variables ausentes en el estudio de suelos fueron calculadas por métodos alternos (software) como SPAW Hydrology, hoja de cálculo Excel para KUSLE.

A continuación, la descripción de cada una de las variables de entrada requeridas para cada tipo de suelo, tomadas del documento Soil and Water Assessment Tool, Input/Output, Versión 2012 por Arnold et al. (2012):

**HYDGRP<sup>1</sup>**: grupo hidrológico del suelo, definido por (NRCS Soil Survey Staff, citado por Arnold et al. 2012), como un grupo de suelos que tienen potencial de escurrimiento similar bajo condiciones de tormenta y una cobertura similar. La clasificación es la siguiente:

Grupo A: suelos con elevada tasa de infiltración cuando están totalmente húmedos.

Grupo B: suelos con moderada tasa de infiltración cuando están totalmente húmedos.

Grupo C: suelos con lenta tasa de infiltración cuando están totalmente húmedos.

Grupo D: suelos con muy lenta tasa de infiltración cuando están totalmente húmedos.

<sup>1</sup> Calculado por medio de NumCur 2006, por medio del método de textura del suelo.

**SOL\_ZMX:** profundidad máxima de enraizamiento en el perfil del suelo (mm).

**ANION\_EXCL:** es una fracción de la porosidad (espacio vacío) donde los aniones son excluidos.

**SOL\_CRK:** el volumen potencial o volumen máximo de ruptura del perfil del suelo expresado como una fracción del volumen total de suelo (dato opcional).

**TEXTURE:** la textura de la capa de suelo.

**SOL\_Z (layer #):** es la profundidad desde la superficie del suelo hasta la parte inferior de cada capa (mm).

**SOL\_CBN (layer #):** es el contenido de carbono orgánico (% del peso del suelo) en el suelo.

**SOL\_BD (layer #)<sup>2</sup>:** la densidad aparente del suelo (Mg m<sup>-3</sup> o g cm<sup>-3</sup>).

**SOL\_AWC (layer #)<sup>2</sup>:** el agua disponible por las plantas, también llamada capacidad de agua disponible (mmH<sub>2</sub>O\*mmsoil<sup>-1</sup>).

**SOL\_K (layer #)<sup>2</sup>:** la conductividad hidráulica saturada (mmh<sup>-1</sup>).

**CLAY (layer #):** es el contenido de arcilla (% del peso del suelo).

**SILT (layer #):** es el contenido de limo (% del peso del suelo).

**SAND (layer #):** es el contenido de arena (% del peso del suelo).

**ROCK (layer #):** es el contenido de fragmento de roca (% del peso total).

**SOL\_ALB (top layer):** el albedo del suelo húmedo. Esta variable fue calculada para las capas superiores de los diferentes tipos de suelos utilizando la fórmula de (Baumer 1990):

$$A = \frac{0.60}{\exp(0.40 \cdot OM)}$$

Donde:

A= albedo del suelo.

OM= materia orgánica del suelo (%)

**USLE\_K (top layer):** Utilizando el archivo Excel KUSLE utilizando el método de textura de suelo.

La sección slope, se generó a partir del modelo de elevación digital (DEM) con resolución de 15m. En el cuadro 7 se establece la clasificación de pendiente según la FAO (2009), con ello se generó el mapa de pendiente de la subcuenca Agüero.

Cuadro 7. Categorías y descripción de pendientes.

Pendiente %	Descripción
0 - 5	Plano a ligeramente inclinado
5 -15	Inclinado a fuertemente inclinado
15 -30	Moderadamente escarpado
30 - 60	Escarpado
> 60	Muy escarpado

Fuente: Adaptado de FAO (2009).

<sup>2</sup> Calculado con el software SPAW (Soil, Plant, Air, Water Field and Pond Hydrology) Versión 6.02.67

### 3.3.2.3. Incorporación de datos climáticos

SWAT necesita información climática diaria de precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad de vientos y radiación solar para períodos mínimos de cinco años (Arnold et al. 2012). Se requiere de manera obligatoria datos de precipitación y temperatura, las demás variables son opcionales y pueden ser generadas automáticamente por el modelo.

Para identificar el área de influencia de las distintas estaciones meteorológicas administradas por INSIVUMEH relacionadas a la subcuenca Agüero se realizaron polígonos de Thiessen representados en la figura 4, con ello se definió los datos a utilizar para obtener las variables climáticas de la estación meteorológica seleccionada.

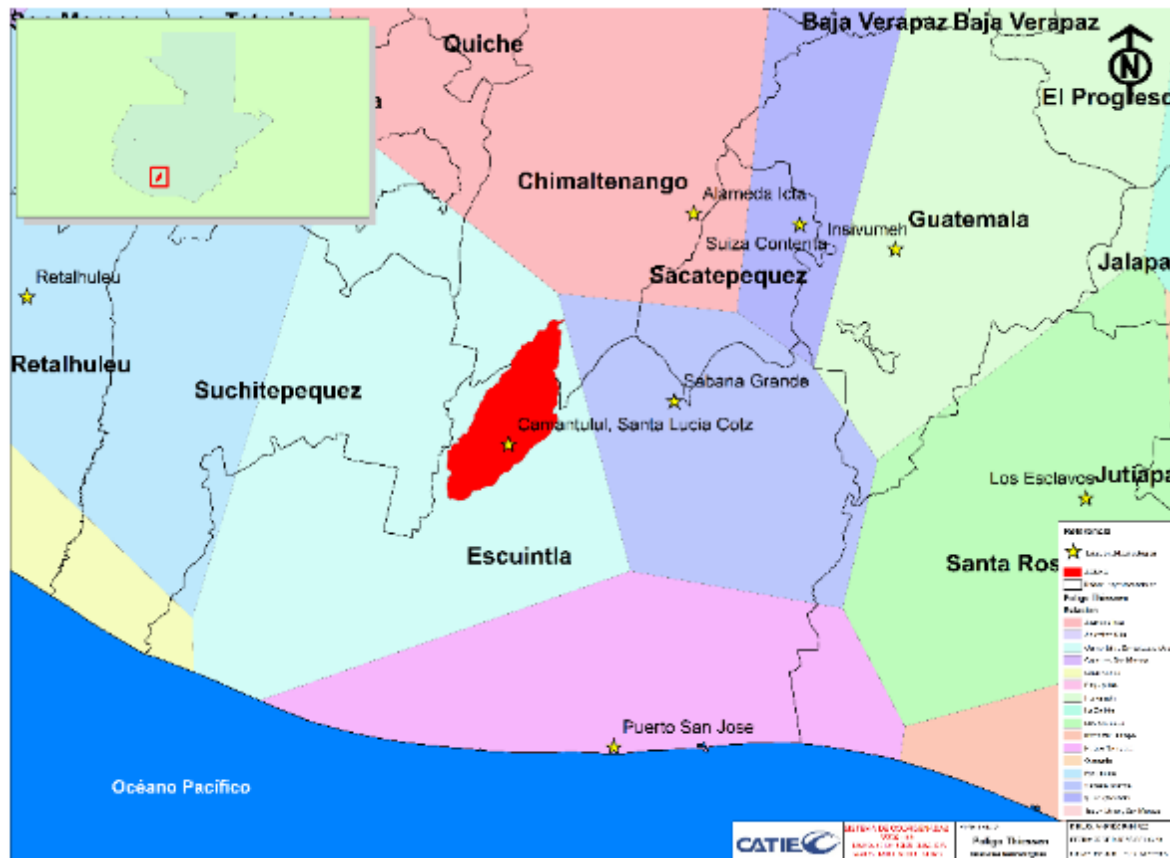


Figura 4. Polígonos de Thiessen, áreas de influencia estaciones meteorológicas del INSIVUMEH.

Fuente: Elaboración propia.

En el cuadro 8 describe la ubicación de la estación meteorológica seleccionada y las variables climáticas utilizadas para la modelación hidrológica con SWAT.

Cuadro 8. Estacion meteorológica seleccionada.

Estación	Longitud	Latitud	Años de información	Escala	Precipitación (mm)	Temperatura Min-Max (°C)	Humedad Relativa (%)	Velocidad del viento (m/s)	Radiación solar (Mj/m2/día)
Camantulul	-91.051	14.325	39	diaria	X	X	X	X	

Fuente: Elaboración propia.

La información climática fue sistematizada y adaptada a la base de datos SWAT empleando el simulador Excel Macro (WGNmaker4.xlsm), de la plataforma oficial de SWAT, esto para la obtención de la tabla que hace referencia a los datos estadísticos de cada variable climática (Cuadro 9), el cual es de vital importancia dentro del proceso de operación del SWAT para la simulación de distintos escenarios dentro del periodo de tiempo el cual fue ingresada información meteorológica.

Cuadro 9. Parámetro climático requeridos por SWAT

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>
TMPMX	Promedio/mes de la temperatura máxima/día (°C)
TMPMN	Promedio/mes de la temperatura mínima/día (°C)
TMPSTDMX	Desviación estándar/mes de la temperatura máxima/ día (°C)
TMPSTDMN	Desviación estándar/mes de la temperatura mínima/día (°C)
PCPMM	Promedio/mes de la precipitación/día (mm H <sub>2</sub> O/día)
PCPSTD	Desviación estándar/mes de la precipitación/día (mm H <sub>2</sub> O/día)
PCPSKW	Coefficiente de asimetría/mes de la precipitación/día
PR_W1	Probabilidad/mes de ocurrencia de 1 día húmedo luego de 1 día seco
PR_W2	Probabilidad de ocurrencia de 1 día húmedo luego de 1 día húmedo
PCPD	Promedio/mes del número de días de lluvia
RAINHHMX	Máxima lluvia de media hora/mes (mm H <sub>2</sub> O)
SOLARAV	Promedio/mes de la radiación solar/día (MJ/m <sup>2</sup> /día)
DEWPT	Promedio/mes de la temperatura del punto de rocío (MJ/m <sup>2</sup> /día)
WNDVAV	Promedio/mes de la velocidad del viento (m/s)

Fuente: Output SWAT

### **3.3.3. Fase de gabinete III**

#### **3.3.3.1. Simulación**

La simulación de la hidrología de la cuenca puede ser separada en dos divisiones mayores: La primera división es la fase de tierra del ciclo hidrológico que controla la cantidad de agua, el sedimento, las cargas de alimento nutritivo y pesticida al principal canal en cada subcuenca. La segunda división es el agua o fase de enrutamiento del ciclo hidrológico, el que puede ser definido como el movimiento del agua, sedimentos a través de la red de canales de la cuenca hidrográfica hacia el vertedero. Esta es la base del modelo para simular otros procesos físicos y químicos, los cuales se ven afectados por el constante movimiento del ciclo hidrológico. En esta fase se realiza la configuración temporal de la simulación duración, lapsus de tiempo deseado.

#### **3.3.3.2. Balance Hídrico**

Otro aspecto planteado en el estudio es el análisis del balance hídrico bajo las condiciones actuales en la subcuenca Aguná. El estudio del balance hídrico se basa en la aplicación del principio de conservación de masas, también conocido como ecuación de la continuidad. La misma establece que, para cualquier volumen arbitrario y durante cualquier período de tiempo, la diferencia entre las entradas y salidas estará condicionada por la variación del volumen de agua almacenada (Sokolov & Chapman, 1981).

De las variables calculadas por el modelo SWAT, se tiene que el agua de entrada está representada por la precipitación en milímetros de agua que ingresan a la subcuenca. El agua de salida está representada por el agua producida (WYLD\_mm), que es la sumatoria de la escorrentía superficial (SURQ\_mm), flujo lateral (LATQ\_mm) y flujo subterráneo (GWQ\_mm), más la evapotranspiración (ET\_mm). El agua almacenada está representada por la recarga del acuífero profundo (DA\_RCHG mm).

### **3.3.3.3. Cambio climático**

El cambio climático puede ser simulado con SWAT manipulando la información climática que es leída al modelo (precipitación, temperatura, radiación solar, humedad relativa, velocidad del viento, evapotranspiración potencial y parámetros de generación climática). Un método de menor consumo de tiempo es el de establecer factores de ajuste para varios valores climáticos.

INSIVUMEH (2018) determinó las proyecciones de cambios climáticos de Guatemala, bajo los escenarios según los Informes Especiales sobre Escenarios de Emisiones (SRES), A2 el cual es un escenario de escala de crecimiento regional y B1 que es un escenario de escala global, esto mediante la regionalización del país donde existen condiciones climáticas homogéneas, en donde la subcuenca Agüero pertenece a la región de la Costa Sur, según este estudio existieron las mayores anomalías en incremento de temperatura y disminución de precipitación en el escenario A2. El patrón de la precipitación no se distribuye de manera uniforme y se rige por los patrones de circulación atmosférica y la humedad disponible. Estos dos factores se ven afectados por la temperatura por lo que se espera que el patrón de la precipitación cambie debido a los cambios de temperatura (Trenberth, K *et al.* 2007).

Oglesby y Rowe 2014 realizaron un estudio que tiene como fundamento estudiar los diferentes modelos climáticos, para tratar de estimar la tendencia futura de la temperatura y la precipitación con base a los escenarios futuros de emisión de gases de efecto invernadero, permitiendo brindar una representación simplificada como un importante insumo para evaluar los posibles efectos de impacto del cambio climático para Guatemala. Ante ello recomiendan el uso de modelos de cambio climático regional debido a que ofrecen más detalle sobre cómo la topografía y los usos de suelo en la localidad afectan las temperaturas y cómo éstas pueden cambiar.

En el caso de la proyección de cambio climático en la subcuenca Aguná se proyectó bajo el escenario A2 para el año 2050 utilizando el modelo CCS4 (Community Climate System Model, versión 4), que es un modelo que está compuesto por cuatro modelos diferentes que simulan simultáneamente la atmósfera, el océano, la superficie terrestre y el hielo marino, y un modelo central de acoplamiento. El escenario de RCP (Sendas Representativas de Concentración) utilizado es el de 8.5, por ser el escenario más crítico del CMIP5 (Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados del AR5), con ellos se presentan el posible resultado más severo de cambio climático para la subcuenca. En el cuadro 10 se presentan las anomalías de temperatura y precipitación mensual utilizadas, obtenidas del generador de datos de clima del World Bank Group.

Cuadro 10. Anomalías de cambio de precipitación y temperatura.

Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temperatura (°C)	1.62	1.52	1.55	1.663	1.54	1.605	1.89	1.962	1.617	1.612	1.75	1.93
Precipitación (%)	-0.02	-0.21	-3.79	-14.01	-17.40	-12.57	-1.14	-17.72	-19.78	-24.06	-5.16	-0.54

Fuente: Portal World Bank Group<sup>3</sup>.

### 3.3.3.4. Identificación de áreas degradadas

Con los resultados del proceso de modelación SWAT, para la variable pérdida de suelo se reclasificaron según los rangos de clasificación de pérdida de suelo permisible descritos en el cuadro 3, en el cual se pueden identificar áreas con erosión potencial, para ello se utilizó la capa de HRU para realizar la identificación de las áreas por arriba de las 10 Ton/Ha/año de pérdida de suelo.

Este criterio de identificación servirá para posterior realizar escenarios de cambio de cobertura de forma focalizada, para ello se definió estandarizar las áreas degradadas con la finalidad de favorecer la toma de decisiones sobre cambios de cobertura a futuro. Se utilizó como criterio agrupar áreas mínimas de 1 Ha circunvecinas a las áreas degradadas, esto debido a que existen HRU con alto nivel de erosión que tienen la dimensión de un pixel de 15 m x 15 m por ello se agruparon HRU dentro de los rangos aceptables de niveles de erosión para complementar el área mínima a considerar como área degradada.

#### 3.3.3.4.1. Escenario de cambio de cobertura para estimar la erosión hídrica y sedimentación

El mayor uso de suelo en la subcuenca Aguná es la caña de azúcar y por ende están establecidos ingenios (empresa agroindustrial dedicada al procesamiento de azúcar) en la región sur del país. Se planteó cambio de cobertura en aquellas áreas con potencial pérdida de suelo por plantaciones que generan interés por parte de los ingenios azucareros, el cual tienen la finalidad de diversificar la producción agrícola y de reenfoque su enfoque de negocio.

Los cultivos propuestos para realizar los cambios de cobertura en áreas degradadas identificadas en el paso anterior, son plantaciones de Eucalipto, Hule y Soya, ya que estos son de intereses tanto de los ingenios como los propietarios de las fincas.

Las plantaciones de Eucalipto son establecidas en áreas no aptas para el cultivo de caña de azúcar (regularmente en pendientes >15%) y tiene un enfoque de bosques energéticos en donde utilizan dicha materia prima los ingenios para distintos procesos industriales dentro de la misma operación de procesamiento de azúcar. Los bosques energéticos (dendroenergía), es catalogada como una fuente de energía primaria renovable, el cual produce energía calórica mediante la combustión. Para ello se seleccionan especies de rápido crecimiento y bajo mantenimiento, en el caso del Eucalipto tiene una tasa de crecimiento de 40 m<sup>3</sup>/Ha/año, y su ciclo de producción es de 5 a 10 años.

<sup>3</sup> [www.climateknowledgeportal.worldbank.org](http://www.climateknowledgeportal.worldbank.org)

Otro de los cultivos de interés son las plantaciones de Hule, aunque están en menor escala en la subcuenca también representan interés a los dueños de fincas cañeras administradas por los ingenios, en el cual establecen plantaciones de Hule en áreas improductivas (orilla de zanjones) y no aptas para el cultivo de la caña de azúcar y es utilizada con el enfoque de diversificación agrícola productiva.

Por último las plantaciones de soya actualmente es utilizado como rotación de cultivos con enfoque de abonos verdes, son plantaciones temporales de leguminosas como lo es *Glycine max*, que tienen como función principal aportar nutrientes al suelo por medio de los nódulos nitrificantes que están en su sistema radicular, además debido a su densidad poblacional ayuda a disminuir los niveles de erosión, en comparación a un suelo descubierto. Estas plantaciones son sembradas en áreas destinadas al cultivo de caña de azúcar el cual ha finalizado su ciclo productivo de 5 años y entran en proceso de renovación en el cual se realizan labores de preparación de suelo y siembra de caña de azúcar, las áreas que se define realizar esta práctica son aquellas que realizan el proceso de preparación de suelo muy próximas al establecimiento de la temporada lluviosa, con problemas de fertilidad o con una merma significativa de producción, para posterior a 6 meses después del establecimiento de abonos verdes, realizan la cosecha del grano de soya, para posterior realizar la incorporación de los rastrojos al suelo y realizar la labor de siembra y establecimiento de caña de azúcar. El interés que existe en este cultivo es con fines de comercializar el grano de soya, el cual es utilizado para el procesamiento de concentrado animal en conjunto con derivados de la caña de azúcar (melaza), ante ello existe la opción de expandir este cultivo con la finalidad de contar con una producción continua y no temporal como actualmente se encuentra.

En el cuadro 11 se muestra los datos espaciales de cobertura y uso de suelo, que coincidieron con el código de 5 letras que maneja SWAT, para el cambio de coberturas propuestas.

Cuadro 11. Cambio de cobertura propuesta en áreas degradadas en subcuenca Aguná.

Tipo de Uso de Suelo	Actual		Propuesto		
	Código SWAT	Descripción	Tipo de Uso de Suelo	Código SWAT	Descripción
			Soya	SOYB	Soy Been
Caña de azúcar	SUGC	Sugarcane	Plantación de Eucalipto	EUCA	Eucalyptus
			Plantación de Hule	RUBR	Rubber Trees

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.3.5. Consideraciones para el análisis de sensibilidad a erosión hídrica bajo escenarios de cambio de cobertura



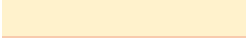



Para la comparación de producción de erosión bajo escenarios de cambio de cobertura se procedió a realizar el cálculo de la diferencia del nivel de erosión actual respecto al escenario de cambio de cobertura propuesto por microcuenca. La categorización de la diferencia de erosión (Ton/Ha/año) bajo escenarios de cambio de cobertura fue: cambio ligero (0-10), cambio moderado (10-50) y cambio alto (50-200). Esta categorización estuvo basada en la clasificación de niveles de erosión de acuerdo con FAO *et al.* (1980).



$$\text{Diferencia Erosión} = \text{Erosión Actual} - \text{Erosión Escenario Propuesto}$$

El cambio fue positivo o negativo dependiendo del resultado de la diferencia. Un resultado positivo indicó que en términos de prevención de erosión el escenario propuesto sería mejor ya que si se hacen modificaciones habría menor producción de erosión respecto a la cobertura actual. Si por lo contrario, el resultado de la diferencia es negativo, el escenario propuesto incrementaría el nivel de erosión respecto a la cobertura actual. En el cuadro 12 se muestran los detalles.

Cuadro 12. Descripción de criterios de categorización de diferencia aritmética de erosión bajo escenarios de cobertura y uso de suelo.

Color	Categorización de diferencia en erosión (Ton/Ha/año)	Descripción
	Diferencia $\geq 50$	Diferencia alta positiva
	$10 \geq \text{Diferencia} < 50$	Diferencia moderada positiva
	$0 \geq \text{Diferencia} < 10$	Diferencia ligera positiva
	$-10 > \text{Diferencia} < 0$	Diferencia ligera negativa
	$-50 > \text{Diferencia} \leq -10$	Diferencia moderada negativa
	Diferencia $\leq -50$	Diferencia alta negativa

Fuente: Adaptado de FAO *et al* (1980).

### 3.3.3.6. Análisis estadístico

Todos los resultados obtenidos de la modelación hidrológica bajo las condiciones actuales fueron trasladados de la base de datos SWAT a hojas de cálculo Excel y se enfocó en variables de interés: erosión, caudales, precipitación y sedimentos. Las variables fueron sometidas a análisis estadísticos con el paquete Minitab versión 19<sup>4</sup> generando inicialmente estadísticas descriptivas para cada una de estas, luego un análisis de regresión lineal.

Los datos de precipitación total anual, la erosión media expresada en ton/ha/año y los datos de sedimentos en Ton/año se emplearon para construir tres modelos de regresión lineal para erosión media anual, para sedimentos y la interacción de erosión media anual con sedimentos; los cuales permitieron explicar la relación entre las variables precipitación-erosión-sedimentos y, a la vez, mediante el modelo estadístico-matemático generado, predecir el proceso de erosión y producción de sedimentos en la cuenca con un buen nivel de confianza (95%). Para cumplir con dicho objetivo, se empleó la fórmula siguiente (Balzarini et al. 2008):

$$Y = X\alpha + \epsilon$$

Y: es el vector de observaciones

X: es la matriz que contiene a las variables regresoras

$\alpha$ : es un vector de parámetros que serán estimados a partir de los datos y

$\epsilon$ : es el vector de términos de error aleatorios

<sup>4</sup> <http://www.minitab.com>

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Balance Hídrico

Las variables climáticas se obtuvieron mediante la estación meteorológica Camantulul que se encuentra ubicada dentro la extensión de la subcuenca Aguná, obteniendo datos a escala diaria durante el periodo de tiempo de 1980 – 2018, obteniendo 39 años con información. Debido a que el modelo SWAT, recomienda establecer un periodo de calentamiento o equilibrio (NYSKIP), el cual permite que el usuario pueda excluir los datos generados durante el periodo de equilibrio de los archivos de salida. Además de no grabar los datos en el archivo de salida, el promedio anual no se calcula para los años omitidos. Las simulaciones hidrológicas necesitan un periodo de calentamiento o de equilibrio. Este periodo es igual de importante al periodo de simulación. Según el manual, para periodos de simulación mayor de 30 años un periodo de equilibrio es opcional, pero comparando los resultados obtenidos de un periodo de simulación sin calentamiento, el caudal base en los primeros años es muy bajo, por lo que se decidió dejar la etapa de calentamiento en 3 años, obteniendo información de salida de 36 años.

De las variables calculadas por el modelo SWAT, se tiene que el agua de entrada está representada por la precipitación en milímetros de agua que ingresan a la subcuenca. El agua de salida está representada por el agua producida (WYLDQ\_mm), que es la sumatoria de la escorrentía superficial (SURQ\_mm) 62.91% (2,363.64 mm), flujo lateral (LATQ\_mm) 1.47% (55.27 mm) y flujo subterráneo (GWQ\_mm) 15.02% (564.50 mm), más la evapotranspiración (ET\_mm) 16.76% (629.55 mm). El agua almacenada está representada por la recarga del acuífero profundo (DA\_RCHG mm) 0.83% (31.13 mm) y el restante 3.01% (31.13 mm) es una ganancia o recarga sin salida de aguas subterráneas en la subcuenca como lo indica Sokolov y Chapman (1981). En el cuadro 13 se presenta el balance hídrico:

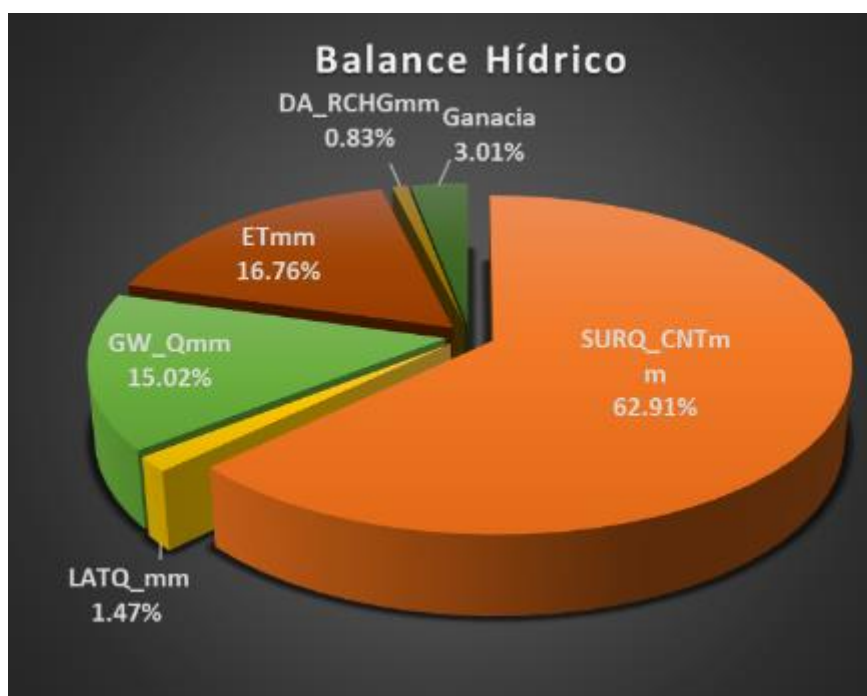
Cuadro 13. Balance hídrico subcuenca Aguná.

MES	Agua de Entrada PRECIP mm	Agua de Salida				Agua Almacenada DA_RCHG mm	Agua Producida WYLD_Q mm	Ganancia mm
		SURQ_CNT mm	LATQ mm	GW_Q mm	ET mm			
Enero	19.25	1.76	2.86	26.06	24.56	0.81	30.68	-36.81
Febrero	32.27	5.83	2.10	7.69	24.39	0.34	15.62	-8.08
Marzo	59.85	9.10	2.04	3.31	44.61	0.27	14.45	0.51
Abril	184.75	76.01	2.20	5.04	64.44	0.53	83.25	36.53
Mayo	434.08	253.22	3.48	17.21	75.03	1.69	273.91	83.44
Junio	544.52	361.19	5.07	41.88	69.30	3.23	408.14	63.86
Julio	488.75	310.80	6.08	66.45	68.94	4.12	383.33	32.36
Agosto	574.22	388.38	6.55	77.94	60.34	4.45	472.87	36.55
Septiembre	626.26	434.30	7.02	84.43	59.12	4.76	525.75	36.63
Octubre	586.63	415.20	7.73	94.94	58.51	5.19	517.87	5.06
Noviembre	169.47	93.44	5.99	83.41	48.18	3.73	182.84	-65.28
Diciembre	37.14	14.41	4.15	56.14	32.13	2.00	74.70	-71.70
<b>Totales</b>	<b>3757.17</b>	<b>2363.64</b>	<b>55.27</b>	<b>564.50</b>	<b>629.55</b>	<b>31.13</b>	<b>2983.41</b>	<b>113.08</b>

Fuente: Elaboración propia.

La evapotranspiración máxima se obtuvo en el mes de mayo con 75.03 mm donde coincide con la transición entre la época seca con la época lluviosa en el país. La evapotranspiración mínima se obtuvo en el mes de febrero con 24.39 mm en donde es uno de los meses más secos del año y el dato de evapotranspiración está relacionado con la cubierta vegetal que existe en la extensión de la subcuenca donde en su mayoría es el cultivo de la Caña de Azúcar y Café que son catalogados como cultivos intensivos, por lo que en la mayoría de tiempo existe cubierta vegetal que demanda requerimiento hídrico dependiendo las distintas etapas fenológicas del cultivo.

Datos evidencian que el 79.40% del total de entrada de agua al sistema (precipitación) se convierte en flujo o caudal (Figura 5). En un contexto de balance hídrico global, los valores estimados por el modelo SWAT son distintos a los reportados por L'vovich y Ponce citados por Ponce (2007), en donde la producción de agua suma el 40%, la evapotranspiración 58% y el agua almacenada en el acuífero profundo 2%.



Dónde: **SURQ**=Escorrentía superficial. **LATQ**= Flujo lateral **GW**=Flujo base o flujo de agua subterránea. **ET**= Evapotranspiración en mm. **DA\_RCHG**= Recarga del acuífero profundo en mm.

Figura 5. Balance Hídrico subcuenca Aguná.

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.1. Producción de agua

La estimación realizada por SWAT sobre la producción de agua simula el ciclo hidrológico basándose en la ecuación de balance hídrico (Neitsch et al. 2011). Esta se halla compuesta principalmente por la sumatoria del flujo lateral, flujo de retorno y escorrentía superficial. El flujo lateral fluye subsuperficialmente hasta alimentar canales de drenaje, quebradas y ríos, el flujo de retorno es el agua subterránea originada en el manto freático y la escorrentía superficial es aquella que fluye sobre las laderas hasta llegar al cauce (Ordoñez 2011).

La producción total de agua (WYLD), considerado como la cantidad de agua que sale de las HRU y que ingresa al canal principal durante un período (Arnold et al. 2012), fue de 2983.41 mm anuales, septiembre y octubre son los meses con mayor producción de agua, característicos del régimen de precipitación bimodal que se presenta en la región (Vargas 2001). El caudal anual promedio de los 36 años simulados, basados en cálculos de caudales diarios, se estimó en 21.48 m<sup>3</sup>/s.

Para efectos comparativos, se realizó un análisis de regresión lineal entre el caudal de salida de la subcuenca Aguná con la precipitación, con la finalidad de verificar la interacción entre estas dos variables tanto de entrada como de salida en el sistema existiendo una correlación aceptable ( $R^2=0.95$ ), por lo que se evidencia que el caudal de salida es dependiente de la precipitación que existen en la extensión de la subcuenca. En la figura 6 se presentan las variables que integran el balance hídrico y el caudal de salida de la subcuenca.



Figura 6. Aporte mensual medio de las fracciones del balance hídrico, producción de agua e hidrograma anual en la subcuenca Aguná.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 7 se presentan las microcuencas delimitadas por SWAT, que se encuentran dentro de la extensión de la subcuenca Aguná, para ello se utilizó como criterio delimitar áreas tributarias no menores a 2.50 km<sup>2</sup> con ello se obtuvieron 38 microcuencas que aportan agua al Rio Aguná. Siendo las microcuencas 4 y 27 las que tienen mayor extensión con un 8.35% (18.30 km<sup>2</sup>) cada una.

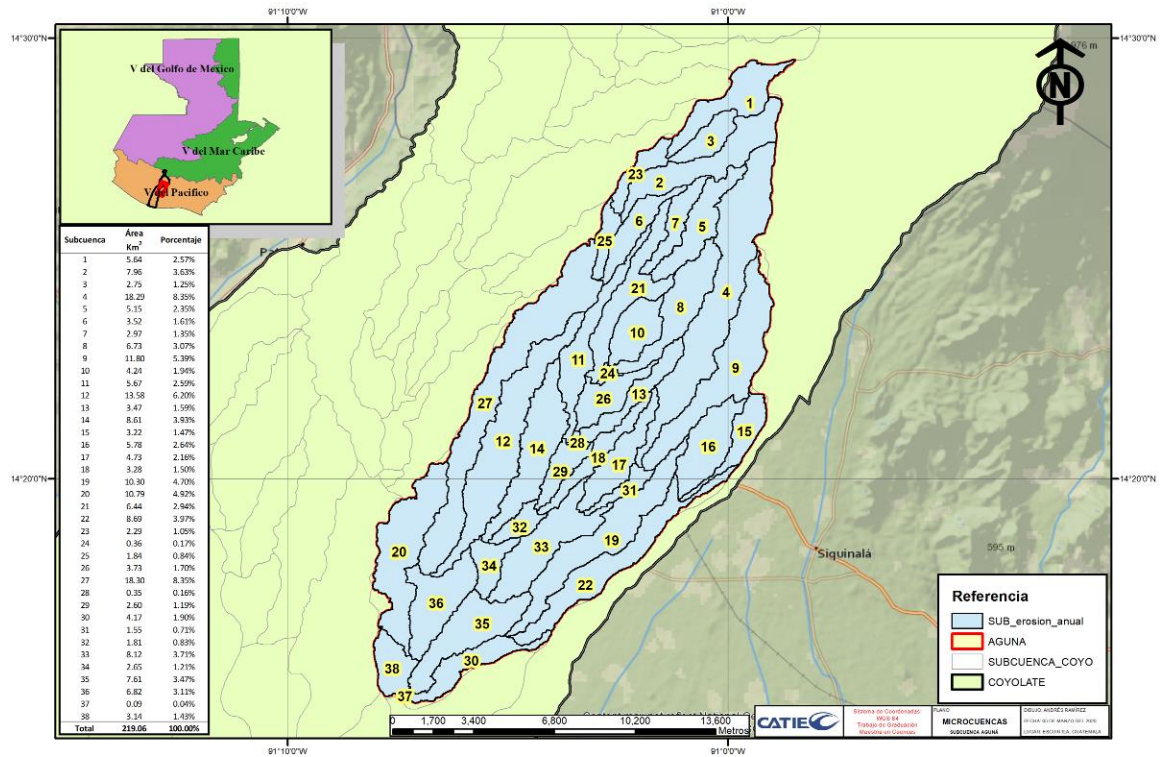


Figura 7. Microcuencas delimitadas por SWAT pertenecientes a Subcuenca Aguná.

Como se observa en la Figura 8, se realizó una gráfica para interpretar las variables relacionadas con la producción de agua a nivel microcuenca, con la finalidad de evidenciar su comportamiento de producción de agua, teniendo como resultado que su comportamiento es muy similar. Se logró evidenciar que las microcuencas 22, 30, 35, 36, 37 y 38 producen menor cantidad de agua que el resto de microcuencas, aunque sus áreas son variadas se asume a que es un factor importante para la disminución de agua producida por tener menor área de captación.

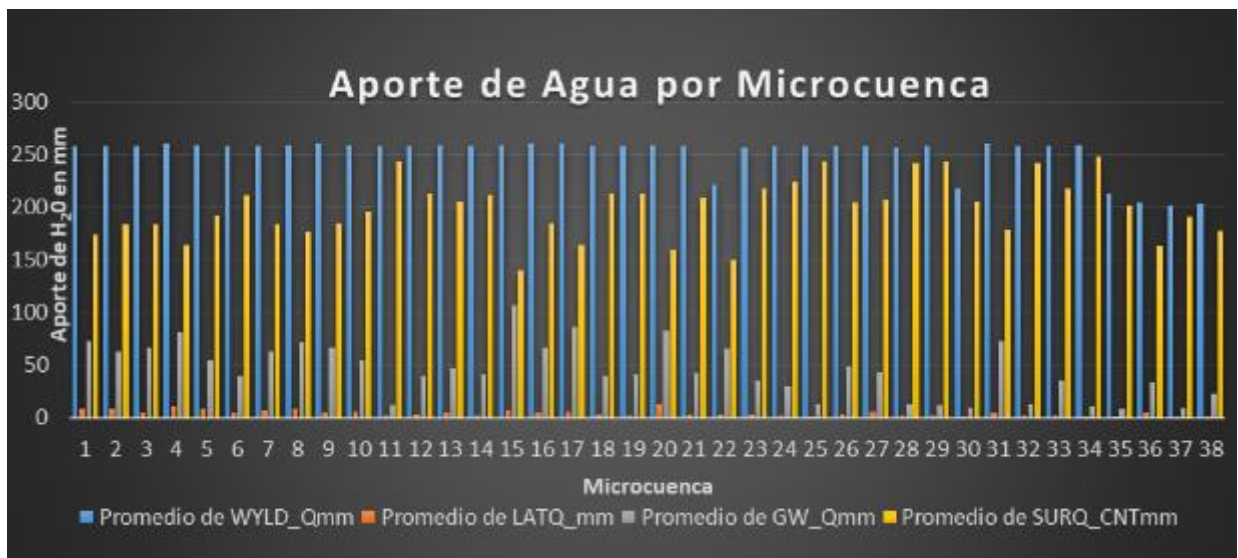


Figura 8. Producción de agua por microcuenca a una escala mensual en subcuenca Aguná. Fuente: Elaboración propia

## 4.2. Erosión y Sedimentación Actual

Se estimó una erosión anual promedio de 29.15 Ton/Ha/año, para la subcuenca Aguná, un valor 1.27 menor a lo reportado por Santos (2014) en la microcuenca Sujuyes que es perteneciente a la subcuenca bajo estudio. En la Figura 9 se presenta la erosión a escala mensual, octubre es el mes con mayor erosión (9.55 Ton/Ha) y enero es el mes con menor tasa de erosión (0.05 Ton/Ha). Debido a que se visualiza poca relación entre la erosión y la precipitación se determinó el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) obteniendo un valor de 0.3978. El  $R^2$  indica la proporción de los datos observados que se explica a través del modelo de simulación. Tiene un rango de 0 a 1, valores más cercanos a 1 indican menor varianza del error. Santhi *et al* (2001) consideran de predicción "no aceptable o pobre" cuando el  $R^2$  son cercanos a 0. El  $R^2$  tiene el inconveniente que solo cuantifica la dispersión de los datos y puede dar valores cercanos a 1 aun cuando el modelo genere predicciones sobreestimadas o subestimadas, además de ser muy sensible a valores atípicos. Al verificar los distribución de los datos de erosión mensual los datos por arriba de las 6.72 toneladas son considerados como atípicos, por lo tanto el dato de erosión del mes de octubre es considerado como atípico y ocasiona que el coeficiente sea bajo y no tenga relación con la precipitación.

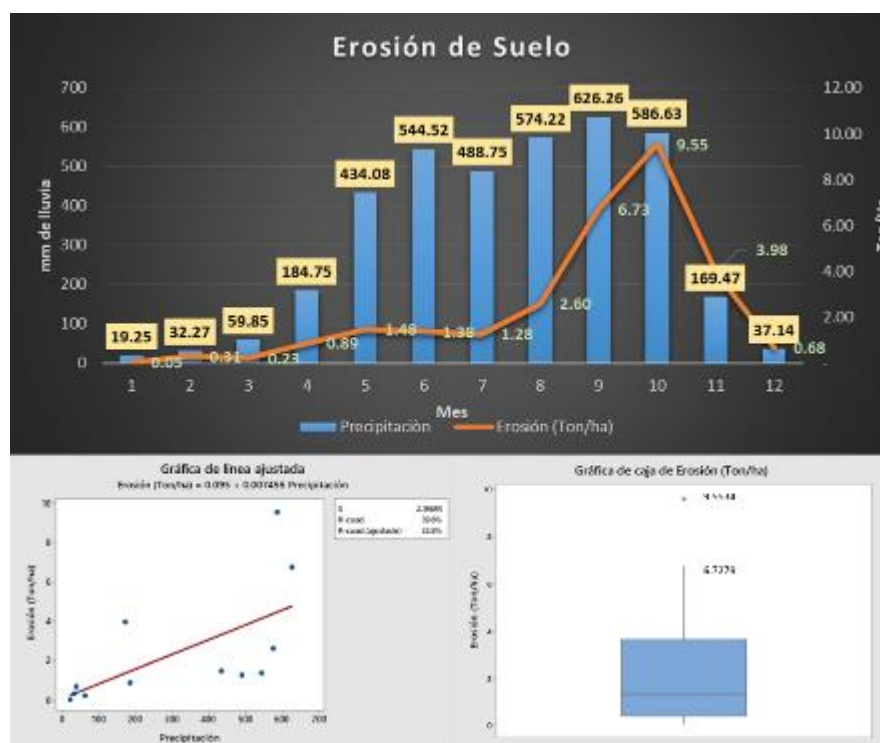


Figura 9. Distribución de Erosión Mensual y estadísticas de datos.

Fuente: Elaboración propia.

Con relación a la erosión bajo diferentes coberturas/uso de tierra, se encontró que los aportes más altos de erosión son coberturas de hortalizas, maíz y bosques latifoliados en 0.01% (142 Ton/Ha/año); 0.68% (83.49 Ton/Ha/año) y 8.62% (70.06 Ton/Ha/año) respectivamente en la extensión de área de la subcuenca Aguná (Figura 10). Mientras que el aporte de erosión en cobertura de caña de azúcar fue el más bajo en el 53.81% (0.38 Ton/Ha/año) de la extensión de la subcuenca.

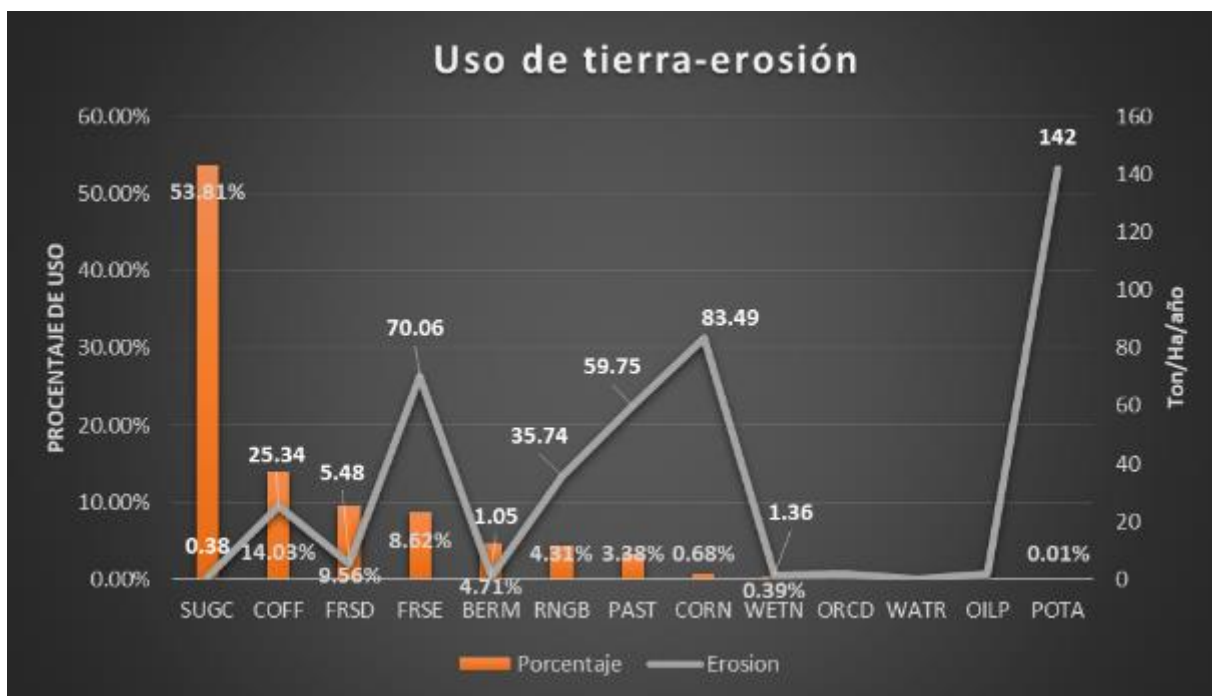


Figura 10. Distribución de la erosión por cobertura y uso de la tierra en la subcuenca Aguná. Fuente: Elaboración propia.

En el cuadro 14 se describen los rangos de pendiente donde se originó erosión, obteniendo mayores pérdida de suelo en pendientes mayores al 30% (escarpado a muy escarpado), produciendo hasta un 81% del total de erosión de la subcuenca, en donde estos rangos tienen una cobertura del 17.16% de la extensión de la subcuenca. Mientras que en pendientes de 0% al 5% (Plano a ligeramente inclinado) se obtuvo la menor tasa de erosión de suelo en el 38.22% (0.36 Ton/Ha/año) de la extensión de la subcuenca.

Cuadro 14. Rango de pendiente y erosión en la subcuenca Aguná

Pendiente %	Descripción	Erosión Promedio Ton/Ha/año	Área Km <sup>2</sup>	%
0 - 5	Plano a ligeramente inclinado	0.35	83.72	38.22%
5 -15	Inclinado a fuertemente inclinado	11.61	70.76	32.30%
15 -30	Moderadamente escarpado	20.46	26.99	12.32%
30 - 60	Escarpado	40.30	21.16	9.66%
> 60	Muy escarpado	96.57	16.42	7.50%

Fuente: Modificado de FAO (2009).

La escorrentía ocurre cuando la intensidad de las lluvias es mayor que la tasa de infiltración, y depende de la intensidad de las lluvias, tipo de suelo y estado en el que se encuentre; de la cobertura vegetal y de la pendiente (Chow 1994). La escorrentía superficial es la principal causante de la erosión hídrica. Cuanto más negativas prácticas y más desprotección tenga el suelo el área será más sensible a erosión (Cartes et al. 2009).

En la Figura 11 se muestra la relación que existe entre el escurrimiento superficial y la erosión, aunque no existe evidencia de la interacción entre estas variables para la subcuenca Aguná, la escorrentía superficial, el tipo de cobertura, tipo de suelo y pendiente propician la erosión del suelo. En el caso de la subcuenca Aguná se aduce que la erosión del suelo está relacionada más a la cobertura/uso de suelo y al tipo de pendiente. Por lo que es importante las practicas agronómicas y de conservación de suelo para la sostenibilidad del mismo.

La microcuenca 23 produce la mayor cantidad de erosión (124.59 Ton/Ha/año), tiene una escorrentía de 2,695 mm anuales, en dicha microcuenca existe plantaciones de café y bosques latifoliados los cuales cubren un área del 44.10% y 33.26% de la extensión de la microcuenca, como lo muestra la Figura 10 este tipo de cobertura son las que más propician la erosión del suelo, en relación al rango de pendiente se encuentra en un 33.78% de su extensión con pendientes muy escarpadas por lo que es otro factor que favorece la erosión. Mientras que la microcuenca 34 fue la que obtuvo menor erosión (0.49 Ton/Ha/año) en 2957.40 mm anuales de escorrentía superficial, en relación al tipo de cobertura predomina el cultivo de la caña de azúcar en el 99.54% de extensión y tiene pendiente ligeramente inclinada en un 42.94% de su extensión.

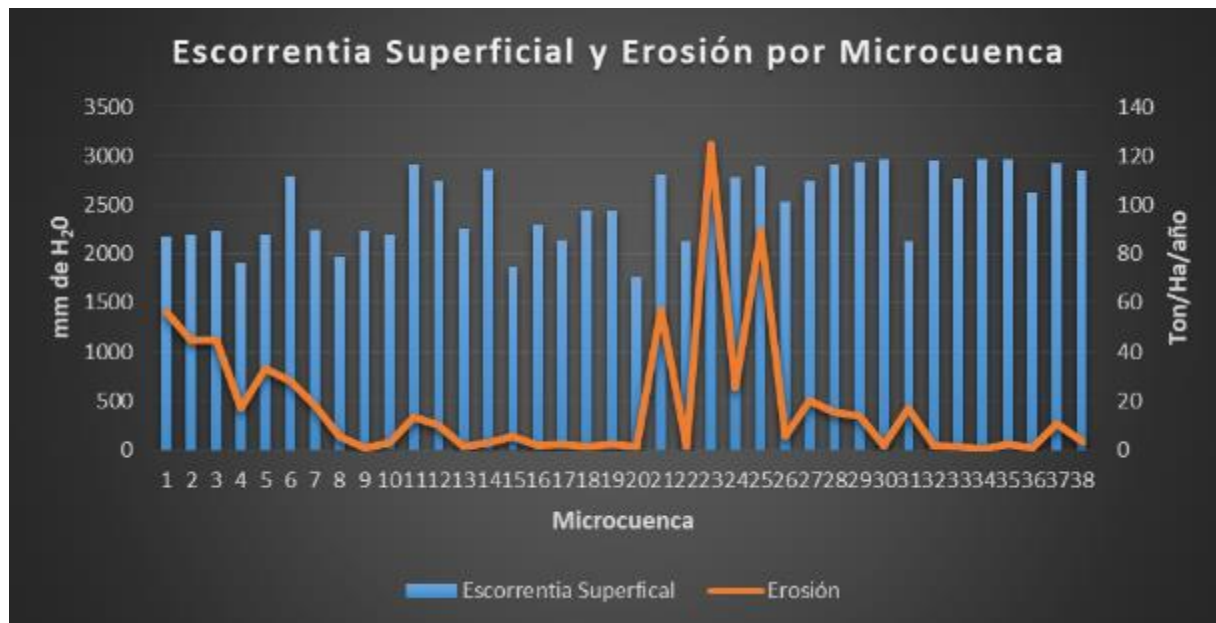


Figura 11. Escorrentía superficial y erosión por microcuenca.  
Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la producción de sedimentos (Figura 12), basado en las salidas y base de datos generada por el modelo SWAT, se estimó que en el punto de salida del Rio Aguná se tiene una descarga anual promedio de 144,983.61 toneladas de sedimentos. La mayor cantidad de sedimentos se acumulan en la parte baja de la red de drenaje de la cuenca, en donde existe la relación entre el suelo erosionado en la parte alta de la cuenca y la sedimentación de este material en la parte bajas de la cuenca, se hace mención que el casco urbano de Santa Lucia



Cotzumalguapa está próximo a esta área de sedimentación, por lo tanto es importante corroborar el comportamiento de estos sedimentos y los efectos que pueden causar en planes de control y mitigación de riesgos.

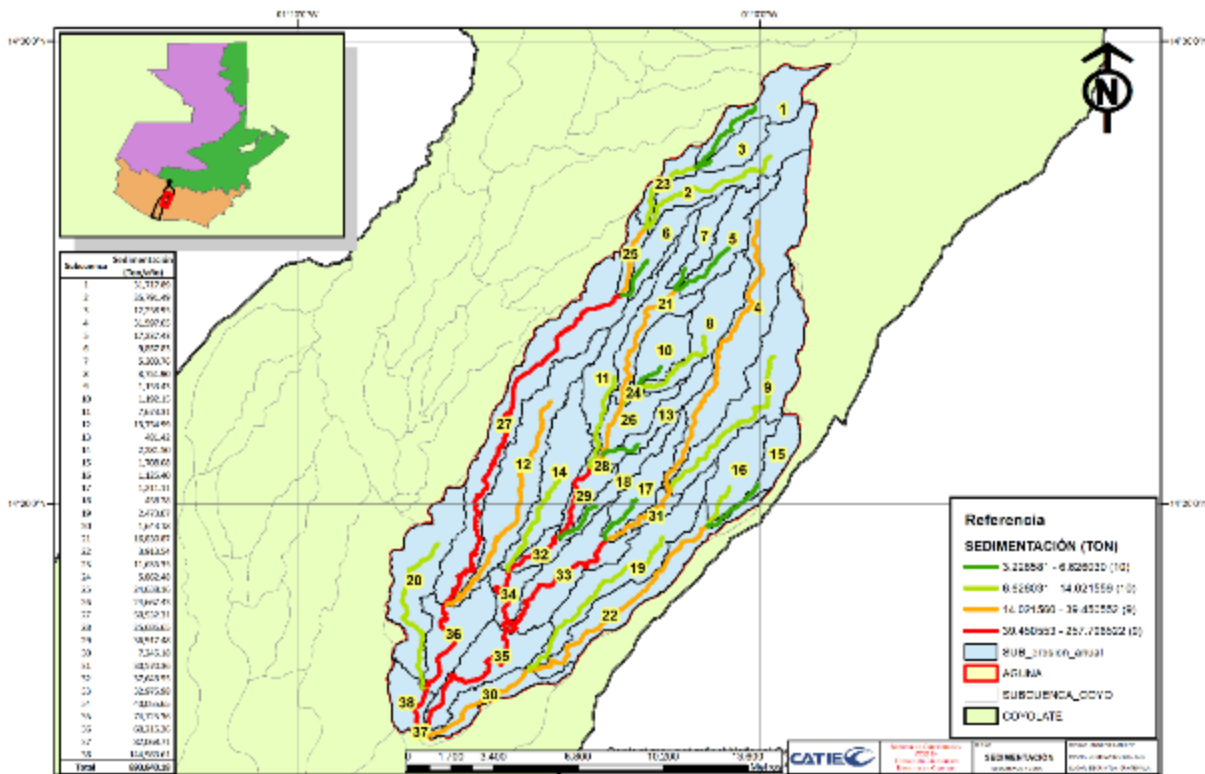


Figura 12. Mapa de sedimentación en red de drenaje de subcuenca Aguná. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 13 se realizó la comparación entre la variable sedimentación y caudal por microcuenca, existiendo relación entre ambas variables ( $R^2=0.88$ ), por lo que se evidencia que la cantidad de sedimentos es dependiente del caudal producido de cada subcuenca. Se aduce que a mayor el caudal es mayor la capacidad de arrastre del material erosionado que se deposita en las pendientes más ligeras del cauce de los ríos, que regularmente se encuentran en las partes bajas de las cuencas.

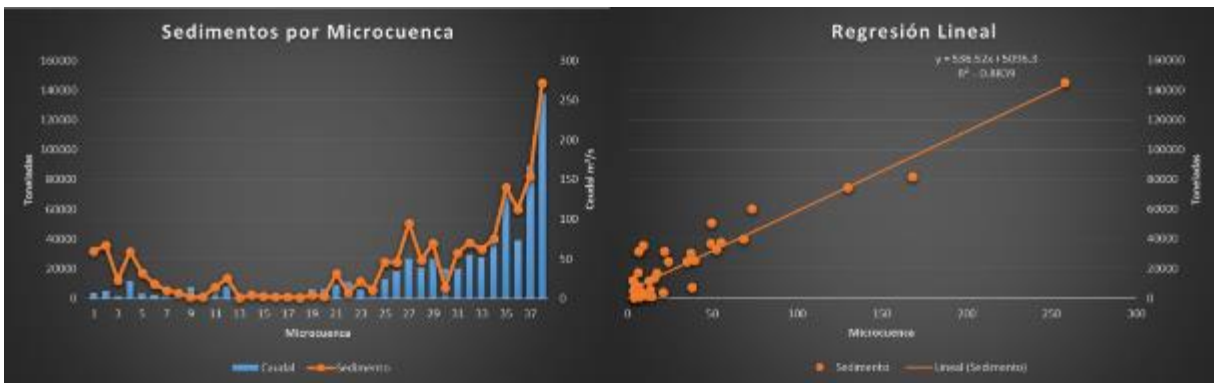


Figura 13. Cantidad de sedimentos y caudal por microcuenca y regresión lineal, Subcuenca Aguná.

Fuente: Elaboración propia.

### 4.3. Efecto del cambio climático en la producción de agua, erosión y sedimentación

Para evaluar el efecto del cambio climático futuro se comparó las salidas del modelo hidrológico SWAT de la línea base (1983-2018), y el escenario futuro RCP 8.5 al año 2050 bajo el modelo con reducción de escala. Se considera que la distribución espacial de la precipitación y temperatura se mantienen a futuro, y no hay cambio de uso y cobertura de la tierra. Para el año 2050 se estima una reducción anual del 14.81% con respecto a la precipitación. El cuadro 15, describe la comparación entre la línea base y el escenario de cambio climático relacionado a la producción de agua, en donde el mes donde existe mayor disminución es octubre (25.61%) que coincide con la finalización de la época lluviosa del país y es uno de los meses con mayor cantidad de precipitación. Los meses de la época seca no tuvieron mayor cambio esto relacionado a que existe menor precipitación y por ende menor cantidad de producción de agua. A nivel general se prevé una disminución del 17.09% de producción para el año 2050.

Cuadro 15. Producción de agua de línea base y escenario de cambio climático al año 2050, para la subcuenca Aguná.

MES	Producción de Agua (mm)		
	Línea Base	Cambio Climático 2050	% Variación
Enero	30.68	28.55	-6.95%
Febrero	15.62	14.97	-4.14%
Marzo	14.45	13.58	-6.00%
Abril	83.25	65.85	-20.90%
Mayo	273.91	209.85	-23.39%
Junio	408.14	345.91	-15.25%
Julio	383.33	376.47	-1.79%
Agosto	472.87	383.07	-18.99%
Septiembre	525.75	411.91	-21.65%
Octubre	517.87	385.26	-25.61%
Noviembre	182.84	168.07	-8.08%
Diciembre	74.70	69.97	-6.34%
Total	2,983.41	2,473.47	-17.09%

Fuente: Elaboración propia.

En el cuadro 16, se presenta el comportamiento de la erosión y sedimentación bajo el escenario de cambio climático. Con respecto a la erosión se prevé una disminución en la erosión del 8.70% anual, siendo mayo el mes con mayor disminución de erosión (46.15%), donde coincide con el inicio de la época lluviosa del país, por lo que se asume que existirá un retardo en el inicio de dicha época ante la merma de erosión. Para el mes de agosto se estima un aumento en la erosión (52.62%), producto de la variabilidad climática. Con respecto a la sedimentación existe una disminución del 15.35% anual, siendo octubre el mes con mayor disminución en sedimentación (26.54%) y el único mes que mostro un aumento de erosión fue julio (4.94%) probablemente debido a que se acorte el periodo de canícula que es característico de la región y aumente levemente la cantidad de precipitación para este mes, aunque como se

menciona anteriormente debido a los efectos del cambio climático, existe variabilidad climática, por lo que los eventos climáticos varían tanto en tiempo como espacio.

Cuadro 16. Erosión hídrica y sedimentación de línea base y escenario de cambio climático al año 2050, para la subcuenca Aguná.

MES	Erosión (Ton/ha)			Sedimentación (Toneladas)		
	Línea Base	Cambio Climático 2050	% Variación	Línea Base	Cambio Climático 2050	% Variación
Enero	0.05	0.06	20.02%	581.22	545.20	-6.20%
Febrero	0.31	0.31	2.30%	452.79	451.53	-0.28%
Marzo	0.23	0.16	-30.31%	490.36	446.85	-8.87%
Abril	0.89	0.56	-37.34%	4,666.56	3,514.17	-24.69%
Mayo	1.48	0.80	-46.15%	13,983.00	10,447.33	-25.29%
Junio	1.38	1.06	-23.37%	18,543.89	16,123.06	-13.05%
Julio	1.28	1.52	18.61%	16,020.28	16,812.22	4.94%
Agosto	2.60	3.97	52.62%	20,746.67	18,567.78	-10.50%
Septiembre	6.73	6.30	-6.37%	27,492.22	22,817.22	-17.00%
Octubre	9.55	7.16	-25.03%	30,566.67	22,454.72	-26.54%
Noviembre	3.98	3.99	0.25%	9,094.72	8,313.89	-8.59%
Diciembre	0.68	0.74	8.63%	2,344.61	2,235.56	-4.65%
Total	29.15	26.62	-8.70%	144,982.99	122,729.52	-15.35%

Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, se determinó la variación que existe con escenarios de cambio climático con respecto a la cantidad de erosión producida por microcuenca (Figura 14). Las microcuencas 21, 23 y 24 son las que presentan un aumento en la erosión en un 92.56%, 24.88% y 29.11% respectivamente. Los planes de mejora y priorización deben de ir enfocados a estas microcuencas, esto en relación a lo representado en la Figura 11 donde estas microcuencas son las que bajo las condiciones actuales producen mayor cantidad de erosión en la subcuenca Aguná. En el resto de microcuencas se prevé una disminución de erosión atribuido a la disminución de precipitación que existirá en la zona.

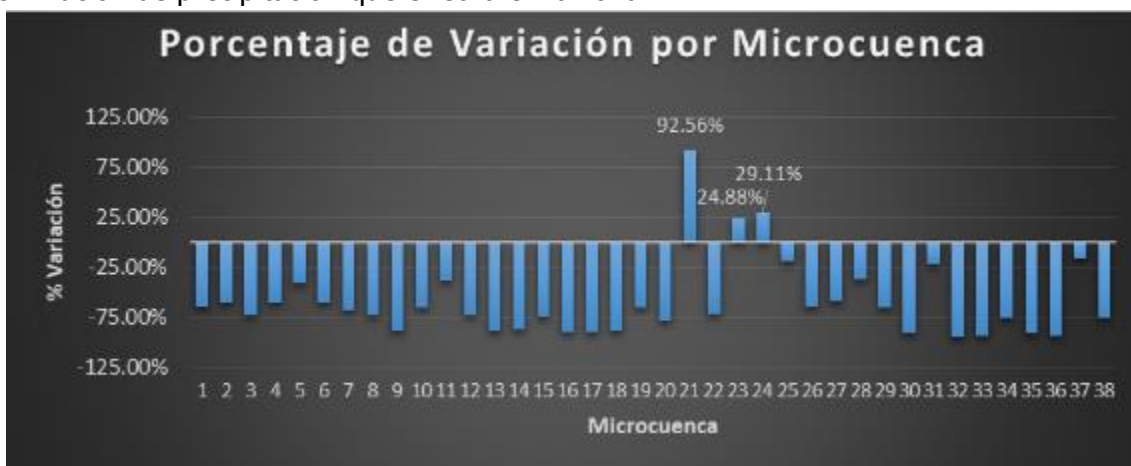


Figura 14. Variación porcentual por microcuenca con respecto a la producción de erosión, en subcuenca Aguná.

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.4. Identificación de áreas degradadas.

Mediante los datos de salida del modelo SWAT se utilizó el escenario actual correspondiente a erosión anual por cada unidad de repuesta hidrológica (HRU) para realizar la categorización de pérdida de suelo descritos en el cuadro 3, tomando como criterio identificar áreas con mayor pérdida de suelo de 10 Ton/Ha/año, esto debido a que esta tasa se definen como el límite de pérdida de suelo que permite que sostenga un alto nivel de productividad por lo cual debajo de esta tasa de pérdida de suelo se encuentran bajo los niveles de tolerancia permisibles.

En la Figura 15 se identifican las áreas por encima del nivel de tolerancia (>10 Ton/Ha/año). A nivel general existe un 25.75% del área de subcuenca Aguná, con cierto grado de degradación del suelo. Siendo las microcuencas 3, 1, 23 y 25 las que tiene la mayor cantidad de área degradada en un 97.85% (2.69 Km<sup>2</sup>), 97.35% (5.49 Km<sup>2</sup>), 96.39% (2.21 Km<sup>2</sup>), 90.90% (1.67%) de extensión respectivamente. La subcuenca Aguná se encuentra en un 74.25% de su extensión con niveles de erosión nulos o leves, por lo que se aduce que favorecería la creación de planes de acción relacionados al ordenamiento territorial y al uso de suelo, con la finalidad de disminuir los niveles de erosión del suelo ya que se harían de una manera focalizada abarcando la menoría de extensión de la subcuenca.

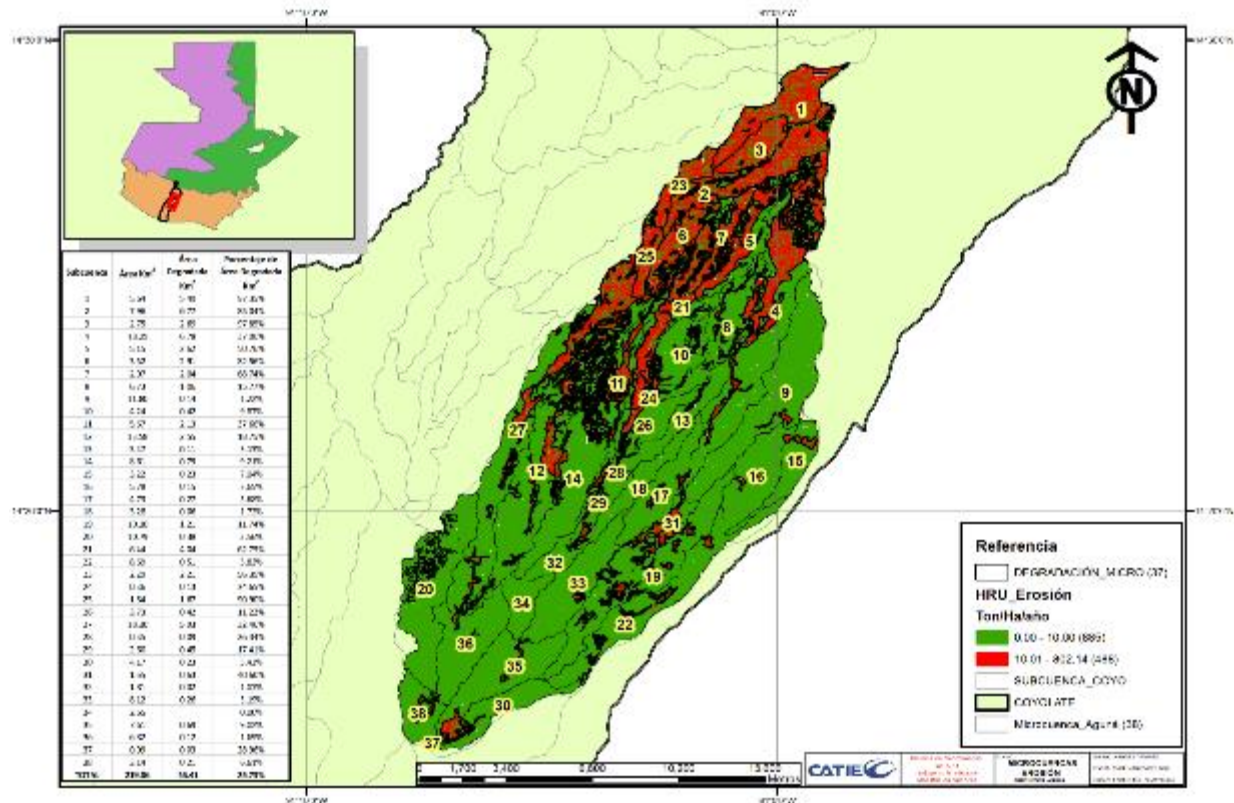


Figura 15. Identificación de áreas por microcuenca por pérdida de suelo por arriba del nivel de tolerancia.

Fuente: Elaboración propia.

#### **4.5. Escenarios de cambio de cobertura de suelo**

De la misma forma que se evaluó el efecto del cambio climático en la respuesta hidrológica, erosión y sedimentación, en el efecto del cambio de uso y cobertura de la tierra se comparó las variables de la línea base (escenario actual) contra tres escenarios de cambio de cobertura en áreas degradadas (plantaciones de Eucalipto, Hule y Soya). Se considera que se mantienen las condiciones de línea base, es decir la distribución espacial y temporal, y cantidad de precipitación pluvial; lo mismo para las temperaturas. Ante ello el cuadro 17 presenta la comparación de los diferentes escenarios a una escala anual.

En el escenario del cultivo de Soya existió una disminución en la recarga de acuíferos en un 6.54% respecto al escenario actual, esto debido a que también obtuvo la mayor lamina de escorrentía y caudal de salida en un 2.05% y 0.23% respectivamente. Se aduce a que esta cobertura vegetal no logra disminuir el impacto de las gotas de lluvia que al tener contacto con el suelo, ocasiona el efecto de salpicadura, esta energía conjugado con otros factores intrínsecos del área como la pendiente favorece la escorrentía del agua y el arrastre de material, ocasionando la erosión y sedimentación, en este escenario también tuvo un aumento con respecto al actual en un 65.92% y 22.77%, respectivamente. Correspondiente a las variables de aporte de Nitrógeno y Fosforo de forma orgánica el cultivo de soya presento la mayor variación (18.97% y 22.56%) con respecto al resto de escenarios, el aporte de estos nutrientes es debido a procesos biológicos por medio de bacterias que se encuentran en los nódulos nitrificantes en el sistema radicular de las leguminosas, el cual cumplen la función de fijar el Nitrógeno atmosférico al suelo, además debido a su alta biomasa (22.66% respecto al actual), al incorporar el rastrojo que es fácilmente mineralizado, contribuye a modificar la dinámica de Nitrógeno en el suelo, ante ello este escenario ayuda a mejorar la fertilidad del suelo, pero ante los elevados niveles de erosión este escenario favorece a la degradación del suelo.

Existen varios estudios los cuales evidencian que los bosques disminuyen la erosión de los suelos (FAO 2015). Por otro lado, la deforestación, sobre pastoreo e inadecuado uso de la tierra puede causar problemas de erosión y llegar a afectar la economía del lugar. Sin embargo, si a las áreas con producciones agrícolas se aplican buenas prácticas, la erosión podría reducirse de manera importante. En cambio la ampliación de zonas urbanas pueden aumentar los niveles de erosión producto de las distintas actividades antropogénicas del sitio (FAO 2002).

La cobertura vegetal con una densidad adecuada es la mejor defensa natural de un suelo contra la erosión, ya que disminuye los impactos de las gotas de lluvia, interceptándolas y absorbiendo la energía antes que actúa en ella. Las plantaciones de hule y eucalipto son considerados bosques, al tener diferentes estratos de vegetación causan el efecto de interceptar las gotas de lluvia reduciendo su energía de impacto y protegiendo al suelo de la erosión.

Correspondiente a las variables hidrológicas, el escenario de plantaciones de Hule aumento la cantidad de evapotranspiración en un 1.02%. Al hacer la comparación de la evapotranspiración entre plantaciones de hule y eucalipto son bastante similares, existe una

pequeña diferencia a favor de las plantaciones de hule, esto posiblemente debido a que existe mayor área superficial de las hojas con respecto al eucalipto, por lo que la cantidad de traspiración de la planta es mayor. En el caso específico del escenario de plantaciones de hule reduce la producción de agua y el caudal de la subcuenca Aguná en un 0.62% y 0.17% respectivamente, al igual que para las variables erosión y sedimentación donde también existió una disminución del 39.87% y 11.29%. Correspondiente a la cantidad de Nitrógeno y Fosforo disminuyen en 14.50% y 20.74% respectivamente. i

El escenario de plantaciones de eucalipto obtuvo la menor tasa de erosión (4.35 Ton/Ha/año) con respecto al resto de escenarios, logrando reducir en un 85.10% la erosión actual, y por ende se redujo la sedimentación que se deposita en los cauces de los ríos. Al realizar la comparación con las otras variables del escenario actual existió una leve disminución, por lo que este escenario de cambio de cobertura es el más conservador y el que obtuvo los mejores resultados para impedir la degradación del suelo, logrando obtener una tasa de erosión dentro del límite de tolerancia permitido. Aunque para la variable de cantidad de Nitrógeno y Fosforo aportado de forma orgánica existe una disminución considerable correspondiente al escenario actual (25.00% y 33.41% respectivamente). Este cambio de cobertura de suelo puede introducirse en áreas correspondientes según la capacidad de uso de tierra, como una práctica de manejo sostenible y de uso adecuado del suelo, y no de forma generalizada ya que reduce la fertilidad del suelo.

Cuadro 17. Comparación de escenarios de cambio de cobertura en subcuenca Aguná.

Variable	Unidad	Escenarios				% de Cambio de B vrs A	% de Cambio de C vrs A	% de Cambio de D vrs A
		Actual (A)	Eucalipto (B)	Hule (C)	Soya (D)			
ET	mm	629.60	636.05	637.85	624.71	1.02%	1.31%	-0.78%
DA_RCHG	mm	31.18	31.11	31.09	29.14	-0.24%	-0.31%	-6.54%
WYLD_Q	mm	3,014.67	2,997.63	2,995.89	3,009.40	-0.57%	-0.62%	-0.17%
SURQ_CNT	mm	2,363.68	2,357.03	2,355.75	2,412.12	-0.28%	-0.34%	2.05%
FLOW_OUT	m <sup>3</sup> /s	21.48	21.45	21.44	21.53	-0.13%	-0.17%	0.23%
SYLDt_ha	Ton/Ha/año	29.19	4.35	17.55	48.42	-85.10%	-39.87%	65.92%
SED_OUTtons	Ton	144,982.99	93,310.09	161,344.88	177,996.26	-35.64%	11.29%	22.77%
ORG_N	Kg/Ha	22.03	16.52	18.84	26.21	-25.00%	-14.50%	18.97%
ORN_P	Kg/Ha	2.20	1.47	1.75	2.70	-33.41%	-20.74%	22.56%
BIOM	Ton/Ha	21.72	24.65	22.45	26.64	13.51%	3.37%	22.66%

**ET=Evapotranspiración Actual; DA\_RCHG=Recarga de acuífero; WYLD\_Q=Producción de agua; SURQ\_CNT=Escorrentía superficial; FLOW\_OUT=Caudal de salida; SYLDt\_ha= Erosión hídrica; SED\_OUTtons= Sedimentación; ORG\_N=Producción de Nitrógeno; ORG\_P=Producción de Fosforo; BIOM=Biomasa**

Fuente: Elaboración propia.

#### **4.6. Sensibilidad a erosión hídrica bajo escenarios de cambio de cobertura. Escenarios de cambio de cobertura de suelo**

Al comparar el escenario actual con respecto al escenario de plantaciones de eucalipto (Cuadro 18) existe una disminución en producción de erosión en las 38 microcuencas. Con este escenario el 9.34% del área bajo estudio tendría un cambio alto positivo, un 60.62% percibiría cambio moderadamente positivo y un 30.03% del área de estudio tendría un cambio ligeramente positivo con respecto a la producción de erosión, en promedio se estaría disminuyendo 24.84 Ton/Ha/año de pérdida de suelo en este escenario.

En cambio al comparar el escenario actual con el escenario de plantaciones de hule, se disminuiría en 27 de las 38 microcuencas la producción de erosión. Con este escenario el 40.96% percibiría cambio moderadamente positivo, un 41.17% tendría un cambio ligeramente positivo y un 17.88% del área bajo estudio sufriría un cambio ligeramente negativo con respecto a la producción de erosión, en promedio se estaría disminuyendo 11.64 Ton/Ha/año de pérdida de suelo en este escenario. Con respecto al cultivo de soya al realizar la comparación se estaría aumentando la producción de erosión en las 38 microcuencas que pertenecen a la subcuenca Aguná. Con este escenario el 11.40% tendría un cambio altamente negativo, un 54.47% tendría un cambio moderadamente negativo, un 32.91 tendría un cambio ligeramente negativo y escasamente un 1.21% de la extensión del área bajo estudio tendría un cambio ligeramente positivo.

Ante ello el escenario de plantaciones de eucalipto obtuvo los mejores resultados con respecto a la disminución de erosión bajo las condiciones climáticas y edáficas del escenario actual. Estudios realizados por Santos (2014), en la estimación potencial y real de pérdida de suelo en la microcuenca Sujuyes (perteneciente a cuenca Coyolate) en cultivos de Caña de Azúcar, Hule y Eucalipto, utilizando método directo a través de parcelas de escorrentía-erosión e indirecto por medio de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (EUPSM), presento la misma tendencia en resultados, en donde las plantaciones de forestales de Eucalipto disminuyen los niveles de erosión hídrica, seguido de plantaciones de Hule, esto debido a la disminución de escorrentía que se produce con este tipo de plantaciones.

Cuadro 18. Sensibilidad al cambio de cobertura de suelo en la producción de erosión por microcuenca pertenecientes a subcuenca Aguná.

Microcuenca	Erosión				Diferencia A vrs B	Diferencia A vrs C	Diferencia A vrs D
	Ton/Ha/año						
	Actual A	Eucalipto B	Hule C	SOYA D			
1	85.84	11.85	57.05	170.70	73.99	28.79	-84.85
2	77.52	9.56	45.14	128.61	67.96	32.38	-51.09
3	88.74	17.40	85.56	247.16	71.34	3.19	-158.41
4	35.29	3.64	13.22	40.46	31.64	22.07	-5.17
5	45.85	6.32	28.47	79.89	39.53	17.38	-34.04
6	41.58	6.74	29.18	78.39	34.84	12.39	-36.82
7	33.71	8.78	40.49	113.31	24.93	-6.78	-79.61
8	18.55	3.27	13.45	40.08	15.28	5.09	-21.53
9	8.20	2.10	5.56	15.97	6.10	2.64	-7.77
10	8.93	3.66	14.00	39.03	5.27	-5.08	-30.10
11	20.05	6.67	28.15	72.05	13.38	-8.10	-52.00
12	38.51	4.95	21.17	59.50	33.56	17.34	-20.99
13	10.65	3.73	13.24	36.15	6.92	-2.59	-25.50
14	20.16	4.58	19.84	54.96	15.58	0.32	-34.81
15	19.94	2.01	7.13	22.39	17.93	12.81	-2.45
16	19.29	2.41	6.93	20.51	16.88	12.36	-1.22
17	24.02	3.05	14.33	47.73	20.96	9.69	-23.72
18	10.16	3.30	11.18	27.45	6.86	-1.02	-17.29
19	6.96	1.28	4.05	12.33	5.68	2.91	-5.37
20	6.83	1.20	2.93	8.13	5.62	3.90	-1.31
21	25.02	6.24	28.01	74.79	18.78	-2.99	-49.78
22	4.49	1.77	3.07	7.01	2.72	1.42	-2.52
23	88.83	9.91	48.15	132.25	78.92	40.68	-43.42
24	17.51	4.83	19.34	49.07	12.69	-1.83	-31.56
25	92.12	9.90	48.43	126.42	82.22	43.70	-34.29
26	13.67	4.32	16.44	41.07	9.35	-2.77	-27.40
27	42.35	5.19	22.79	62.45	37.16	19.56	-20.10
28	21.88	5.74	24.00	61.47	16.14	-2.12	-39.59
29	36.30	5.25	20.58	51.76	31.05	15.72	-15.46
30	24.15	6.44	14.70	35.26	17.70	9.45	-11.11
31	22.05	2.65	10.57	33.89	19.40	11.47	-11.84
32	26.87	6.39	28.06	72.44	20.48	-1.19	-45.57
33	19.81	3.01	11.13	30.89	16.80	8.68	-11.08
34	1.46	1.46	1.46	1.46	0.00	0.00	0.00
35	22.58	4.77	15.02	40.32	17.81	7.56	-17.74
36	11.83	2.65	11.92	33.47	9.18	-0.09	-21.64
37	14.05	2.55	6.91	18.48	11.50	7.14	-4.44
38	11.77	1.62	4.67	12.69	10.15	7.11	-0.92
<b>Total</b>	<b>29.19</b>	<b>4.35</b>	<b>17.55</b>	<b>48.42</b>	<b>24.84</b>	<b>11.64</b>	<b>-19.24</b>

Diferencia alta positiva

Diferencia moderada positiva

Diferencia ligera positiva

Diferencia ligera negativa

Diferencia moderada negativa

Diferencia alta negativa

Fuente: Elaboración propia.



#### 4.7. Análisis estadístico

En relación con el análisis de varianza (Cuadro 19) y regresión lineal (Figura 16) para las variables erosión media, sedimentos y erosión-sedimentos, los resultados se describen a continuación:

Los modelos de regresión generados, mostraron una bondad de ajuste del 43.18% ( $R^2$  Ajustado=0.42) para erosión media, 79.24% ( $R^2$  Ajustado=0.79) para sedimentos y 66.2% ( $R^2$  Ajustado=0.66) para la interacción de erosión y sedimentos. Lo que indica que los modelos explican la mayoría de los datos observados. Asimismo, los coeficientes de los modelos indican que existe una correlación positiva entre la variable explicativa precipitación anual y los valores de sedimentos, al igual que para la interacción entre erosión y sedimentos. Se observa que la variable explicativa precipitación anual es altamente significativa ( $p < 0.0001$ ), para la variable sedimento, por lo que su producción es influenciada por la variable precipitación anual, en el caso de la relación que existe en la cantidad de erosión producida también tiene injerencia positiva en la cantidad de sedimento producido, por lo que se puede afirmar que el sedimento es dependiente de la cantidad de suelo erosionado producido.

En cuanto a la erosión media no existió una correlación positiva con la variable precipitación, por lo que no se puede afirmar que para el caso de subcuenca Aguná, la precipitación influya en la cantidad de erosión. Como ha mencionado FAO (2000), la lluvia es uno de los factores de clima que más influyen sobre la erosión. Para la subcuenca Aguná se aduce que influyen agentes pasivos para la producción de erosión tales como cobertura/uso de suelo, tipo de suelo y longitud y grado de pendiente del terreno.

Cuadro 19. Análisis de varianza para las variables erosión, sedimentos y la interacción de ambos en la subcuenca Aguná.

Análisis de Varianza						
Variable	Fuente	GL	SC	MC	F	P
Erosión	Regresión	1	2870.87	2870.87	27.6	0
	Error	34	3536.31	104.01		
	Total	35	6407.18			
Sedimentos	Regresión	1	4.10E+10	4.10E+10	134.61	0.00000
	Error	34	1.04E+10	3.05E+08		
	Total	35	5.14E+10			
Erosión y Sedimentos	Regresión	1	3.45E+10	3.45E+10	69.54	0
	Error	34	1.69E+10	4.96E+08		
	Total	35	5.14E+10			

Fuente: Elaboración propia.

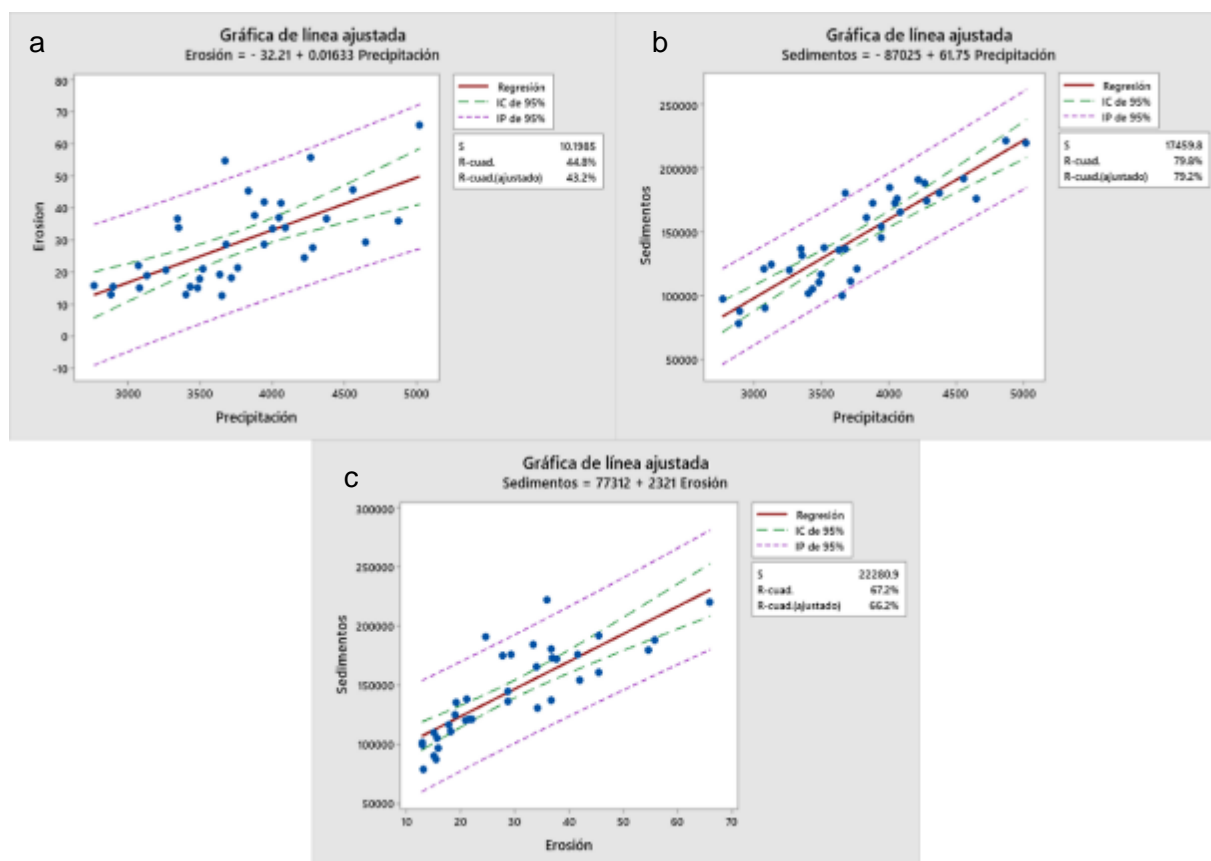


Figura 16. Regresión lineal a) erosión-precipitación, b) sedimentos-precipitación, c) sedimentos-erosión, en la subcuenca Aguná.

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.8. Priorización de microcuencas

Luego de la identificación y delimitación de microcuencas es necesario seleccionar las prioritarias, considerando que no siempre es posible intervenir en todas las microcuencas. Las prioridades podrían variar según el objetivo y las limitaciones identificadas en las áreas (FAO 2007), en este caso el criterio de priorización es la erosión de suelos. Se identificó que las microcuencas 1, 3, 23 y 25 presentan la mayor cantidad de área degradada en el escenario actual en un 97.35% (5.49 Km<sup>2</sup>), 97.85% (2.69 Km<sup>2</sup>), 96.39% (2.21 Km<sup>2</sup>), 90.90% (1.67 Km<sup>2</sup>) de cada extensión respectivamente. Mientras que con escenarios de cambio climático las microcuencas 21, 23 y 24 son las que presentan un aumento en la erosión en un 92.56%, 24.88% y 29.11% respectivamente. Los planes de mejora y priorización deben de ir enfocados a estas microcuencas (Figura 17) que abarcan un 8.82% de la extensión de área, que coincide con la parte alta de subcuenca Aguná, con la finalidad de reducir los niveles de erosión y degradación del suelo.

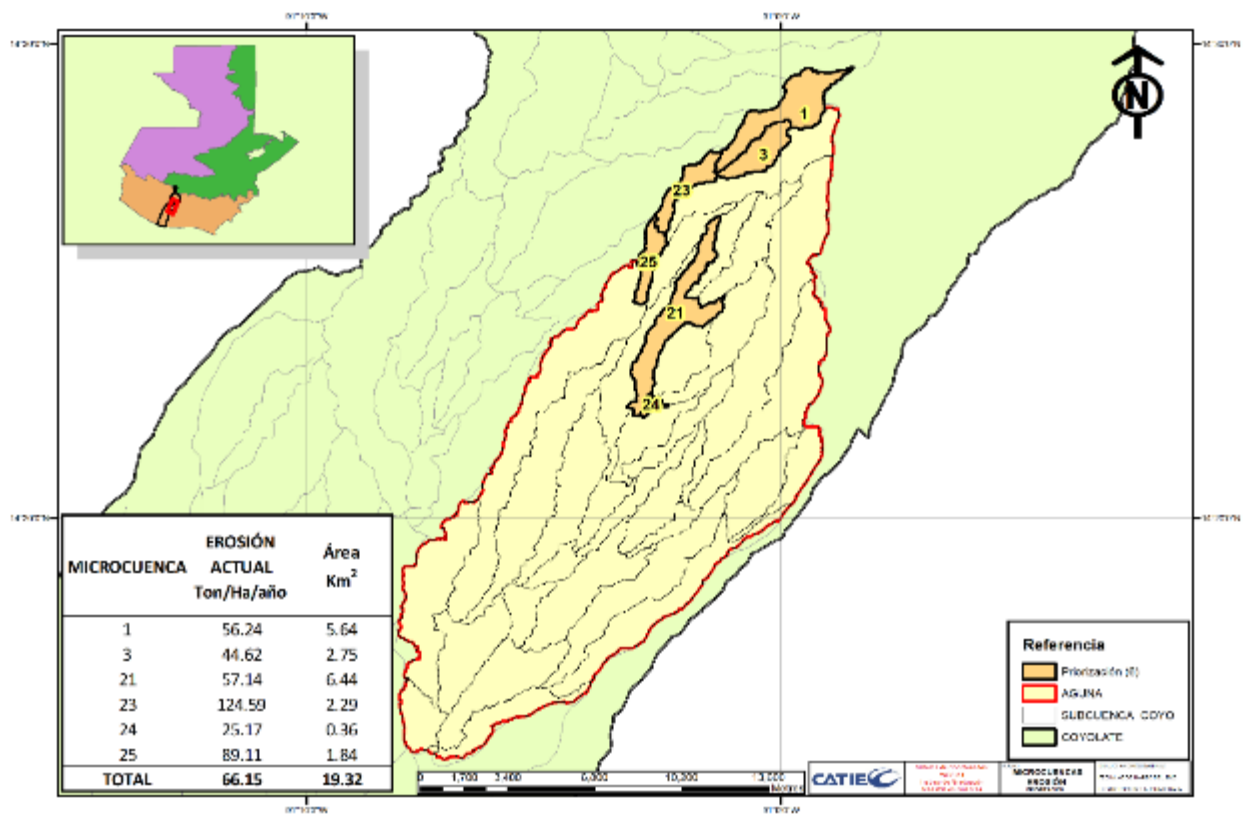


Figura 17. Microcuencas priorizadas de acuerdo con los escenarios de erosión.  
Fuente: Elaboración propia.

## 5. ANÁLISIS Y DISCUSION DE LOS RESULTADOS

La falta de ajuste y calibración del modelo aumentan la incertidumbre de los datos de salida proporcionados por SWAT. Un ajuste del modelo depende de los datos de entrada y en cuencas muy intervenidas los procesos naturales son secundarios al realizar simulaciones (Vargas 2011). Una variable importante que interviene en los procesos de generación de caudales son los usos del agua, ya que esto supone que haya una disminución del total de agua producida previo a la llegada al cauce principal (Cabrera 2012).

SWAT es una herramienta muy utilizada debido a su gran potencial predictivo y la facilitación del proceso de análisis espacial territorial de variables físicas relevantes que aportan información a los tomadores de decisiones. Sin embargo, es evidente que como modelo tiene limitantes y una de ellas es la cantidad de información requerida para obtener simulaciones con menor incertidumbre (Iroumé 2014).

Los resultados obtenidos en la modelación hidrológica con SWAT muestran que la subcuenca Aguná, es excedentaria de agua. Esto debido a que la precipitación (3,757.17 mm) es mayor a la evapotranspiración (629.55 mm) y el 79.40% del total de precipitación se convierte en flujo de salida o caudal, como promedio anual. Los resultados evidencian una dependencia del caudal de salida con respecto a la precipitación ( $R^2=0.95$ ), siendo los meses de agosto, septiembre y octubre los que concentran el 50.83% del agua producida anualmente en la subcuenca, estos resultados coinciden a lo expresado por Basterrechea (2017), al mencionar que Guatemala es un país rico en recurso hídrico pero posee la limitante en cuanto a su distribución tanto en tiempo como en espacio, esto debido a que en la época seca existe déficit de agua superficial y en la época lluvia existe excedente de agua, donde se calcula que el 25% de agua producida en territorio nacional es utilizada dentro del país, el resto de agua se traslada a los países vecinos, por lo que los esfuerzos deben de ir alineados en la identificación de zonas deficitarias de agua (corredor seco) para el almacenamiento, distribución y utilización eficiente del agua.

En varios estudios SWAT sobreestima la producción de agua (Sánchez et al. 2017), lo que es probable que ocurra en este trabajo por causa de la sobreestimación de caudales de la microcuenca delimitadas. La sobreestimación es positiva cuando el objetivo del trabajo se orienta hacia el control de inundaciones o de erosión por aumento de escorrentía superficial, pero desfavorece cuando el enfoque está más vinculado con la escasez del recurso hídrico (BID 2017).

Considerando lo anterior y que el área de estudio está en la sección alta de la cuenca Coyolate y por tanto no se han encontrado registros de problemas por inundaciones, los resultados de producción de agua serán más valiosos interpretando el componente de escorrentía superficial y el efecto que este puede causar en la producción de erosión y el arrastre de sedimentos que se depositan en los cauces de los afluentes de las microcuencas que conforman la subcuenca Aguná.

En bosques tropicales la pérdida de suelo por erosión hídrica es baja (Mozo 1967), sin embargo, en este caso se obtuvo en promedio un grado de erosión moderado (29.15

Ton/Ha/año). Siendo el cultivo de Caña de Azúcar el que abarca la mayor cantidad de extensión de la subcuenca (53.8%) y tiene una de las menores tasas de erosión de suelo (0.38 Ton/Ha/año). Este efecto podría deberse a la densidad poblacional que ofrece este cultivo, en donde contrarresta la fuerza erosiva de la escorrentía, al proporcionar un buen anclaje en la capa superficial del suelo impide su desprendimiento. Mientras que cultivos como hortalizas (142 Ton/Ha/año) y maíz (83.49 Ton/Ha/año) tienen las mayores tasas de erosión de suelo. Los valores medios anuales de erosión por tipo de cobertura coinciden con los rangos de erosión superficial estimados por Wiersum, citado por Bruijnzeel (2004) en un estudio similar sobre erosión superficial bajo diversos sistemas agroforestales. Similares resultados reportan Sánchez y Ataroff (1997) sobre pérdidas de suelo por erosión, en donde valores altos de erosión coincidieron con cultivos de hortalizas y maíz en asociación con frijol.

En relación a la producción de erosión anual, el mes de octubre presenta la mayor tasa de erosión (9.55 Ton/Ha), donde coincide con el mes con mayor precipitación, pero al realizar análisis de regresión lineal para corroborar su interacción se tiene un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.3978, por lo que no se puede afirmar su relación. Se aduce que en el caso de subcuenca Aguná el nivel de erosión está relacionado más al tipo de cobertura y pendiente de terreno, que a la cantidad de precipitación, aunque este último es la principal variable que ocasiona la erosión hídrica, por medio de la escorrentía. Esto se afirma al verificar la producción de erosión según la clasificación de rangos de pendiente, en donde hasta un 81% de la erosión en la subcuenca se produce en pendientes mayores del 30%, que se encuentran regularmente en la parte alta de la cuenca. Ante ello las microcuencas 21, 23 y 25 son las más productoras de erosión de suelo, esto debido a que en su extensión están cubiertas por cultivos que propician la erosión (Café, hortalizas, maíz, bosques latifoliados, etc.), al igual que están en pendientes escarpadas, donde favorece la formación de escorrentía y el desprendimiento y arrastre del suelo.

Con respecto a la producción de sedimento se estima una descarga anual de 144,983.61 Ton. que en su mayoría es depositado en la parte baja de la subcuenca. Es importante establecer el efecto que puede causar a futuro esta acumulación de sedimento, en vista que esta próximo el casco urbano del municipio de Santa Lucia Cotzumalguapa a esta área donde existe la deposición del material erosionado, por lo que podría ocasionar la reducción de la capacidad hidráulica de los ríos, causando su posible desbordamiento y activación de antiguas madres viejas.

Al incorporar las anomalías de precipitación y temperatura de un escenario de clima futuro (RCP 8.5) se esperaría que los otros componentes del ciclo del agua se modifiquen, ya que la precipitación es el principal componente de este ciclo y básicamente le da movilidad (Vörösmarty 2005). Por otro lado la temperatura, es uno de los componentes que gobierna la evapotranspiración, y la fracción transpiración es el proceso de mayor pérdida de agua del sistema cuenca (Fetter 2000). Es por ello que, al realizar un cambio en estos impulsores, los componentes del balance hídrico también se modifican.

Estos cambios en la temperatura y la precipitación en la subcuenca Aguná, sugieren que provocarán cambios en la disminución de los componentes del ciclo hidrológico evaluados. Es

decir, la tasa de evapotranspiración se reducirá porque habrá una reducción de la capacidad de agua disponible en el suelo para las plantas, debido a la reducción de la precipitación pluvial, considerando que no habrá cambio del uso y cobertura de la tierra. Es decir, el impacto sobre los componentes hidrológicos será lineal ante dichas anomalías climáticas.

En la subcuenca Aguná, se estima una disminución en la producción de agua en escenarios de cambio climático al 2050 del 17.09% con respecto a la producción actual, esto debido a que se prevé una disminución en la precipitación anual del 14.81%. Siendo el mes de octubre el que se pronostica tener la mayor disminución en producción de agua existiendo una reducción de 132.61 mm, en la época seca no existe mucha variación debido a que las precipitaciones son escasas, aunque es probable que se prolongue la época seca, lo que podría provocar estrés hídrico y escasez de agua, cambio en la aptitud agrícola e impactos en el suministro de agua potable.

Otros estudios sugieren respuestas hidrológicas variables de los elementos del ciclo hidrológico, ante el efecto de escenarios de cambio climático futuro alrededor del mundo. Por ejemplo Chien et al. (2013) sugieren una reducción del caudal anual entre 41.1% y 45.2% para el período 2051-2060 en cuatro cuencas del oeste medio de los Estados Unidos. Luo et al. (2013) sugieren que el cambio de  $\pm 10\%$  de la precipitación resultaría en un cambio del 13% del caudal anual, debido al cambio en escorrentía superficial durante el invierno en California. Qi et al. (2009) indica que al incrementar  $2.8^{\circ}\text{C}$  la temperatura la evapotranspiración real y producción de agua cambiaría en  $+6.2\%$  y  $-13.9\%$ , respectivamente. En Chile, Stehr et al. (2010) modelaron la respuesta hidrológica ante el cambio climático en dos subcuencas del río Biobío, donde la disminución del 30% de precipitación sugiere una reducción de 45% y 32% en el caudal de cada subcuenca.

Con respecto a los efectos de cambio climático en la subcuenca Aguná con respecto a la erosión hídrica se prevé que continúe siendo moderada (26.62 Ton/Ha/año) según la clasificación de FAO et al. (1980), generando la producción de sedimento de 122,729.52 Ton, ocasionando una disminución del 8.70% y 15.35% respectivamente en comparación a la situación actual. La cantidad e intensidad de lluvia son los factores de mayor importancia que controlan los cambios de erosión bajo cambio climático (Nearing et al. 2004). Otro impacto que se muestra ante cambio climático es el incremento significativo de la erosividad de la lluvia. Es así como se explica que la lluvia favorece la erosión del suelo, desde el desprendimiento de partículas de suelo hasta la contribución de escorrentía superficial que origina erosión laminar (Morgan 1997).

Si bien existió una disminución en general de la cantidad de erosión producida en la subcuenca, en las microcuencas 21, 23 y 24 aumento los niveles de producción en un 92.56%, 24.88% y 29.11% respectivamente. Se aduce que estas microcuencas sufren una degradación más fuerte debido al tipo de cobertura/uso de suelo y al grado de pendiente de la superficie de las microcuencas. Lo que favorezca el incremento en la producción de erosión aunque exista una disminución en las precipitaciones de la región. Prácticas de conservación del suelo pueden jugar un rol protagónico en el control de las fases erosivas de desprendimiento y transporte de suelo (Morgan 1997). Por ejemplo, los residuos vegetales que cubren el suelo (mulch) reducen

las pérdidas de suelo por erosión, también otras medidas agronómicas que favorezcan mantener e incrementar la densidad de cobertura vegetal (Fullen et al. 2014). Las medidas de manejo del suelo, como lo es el subsolado, que al combinarse o no con cobertura de residuos vegetales reduce las pérdidas de suelo e incrementan la cantidad nutrientes al suelo especialmente nitrógeno mediante la mineralización del rastrojo incorporado (Jin et al. 2008). También en casos específicos la siembra directa con mínima labranza conjugado con un plan de manejo y fertilización puede favorecer a que existan una buena densidad poblacional que ocasione una disminución en los niveles de erosión al existir condiciones intrínsecas del área que impidan el desprendimiento de las partículas del suelo por acción del agua. O en casos viables el cambio de cultivo puede ser una decisión que favorezca la preservación del suelo y permita un uso sustentable del suelo y que vaya alineado con la capacidad productiva de los suelos, favoreciendo su preservación y recuperación.

En relación al escenario hipotético de cambio de cobertura propuestos, en áreas degradadas. En esta dinámica existen cambios anidados de los componentes del ciclo hidrológico, por ejemplo, la evapotranspiración real de la cubierta vegetal (ET), porque según Neitsch et al. (2005) en el modelo SWAT esta es calculada en función de la evaporación del agua interceptada por el dosel, máxima tasa de transpiración vegetal y máxima tasa de evaporación del suelo. Es decir, existe relación entre el uso y cobertura y la evapotranspiración.

Por otro lado, Morán-Tejeda *et al.* (2014) señalan que la evapotranspiración "es el elemento clave para entender el efecto del cambio de uso de la tierra sobre la producción de agua". Por tal motivo, se debe saber y entender los elementos que constituyen la evapotranspiración. De este modo, varios autores mencionan que la evapotranspiración se ve afectada por diversos factores, tales como: temperatura, albedo de la superficie, radiación neta, advección, déficit de presión de vapor, resistencia estomática o del dosel, transporte turbulento, área foliar, profundidad radicular y capacidad de agua disponible para la planta superficial y del subsuelo (Zhang et al. 2001).

Por tales razones, el escenario planteado de cultivo de Soya, disminuye el área foliar potencial en la subcuenca Aguná, y se asume que será afectado la intercepción de la precipitación, reduciendo la cantidad de evapotranspiración. Esto se debe a que según Zhang et al. (1999) "el área foliar afecta la intercepción de precipitación, radiación y define el área disponible para evapotranspiración". Por lo tanto, el agua que se dejó de evapotranspirar (-0.78%), favoreció los otros flujos del ciclo del agua, incrementando la escorrentía superficial (+2.05%) y consecuentemente favoreció al desprendimiento y arrastre de suelo ocasionando que aumentara la erosión hídrica (65.92%) y la producción de sedimento (22.77%) en relación a datos actuales.

De esta manera el aumento de la cobertura de bosque (plantaciones de eucalipto y hule) representó cambio en los flujos del balance contrarios a los detallados anteriormente. En el caso de plantaciones de Hule la evapotranspiración incrementó (+1.31%) por el aumento del área foliar y por defecto se incrementó la intercepción de la precipitación, esto provocó la reducción de la escorrentía superficial y erosión del suelo en -0.34% y -39.87%

respectivamente. Al igual existio una leve disminuci3n en la recarga de agua al acuífero de 0.31%, posiblemente debido al aumento en la evapotranspiraci3n, sin embargo los bosques favorecen la infiltraci3n del agua y la recarga de los acuíferos mediante las cavidades que dejan algunas raíces muertas que favorecen al aumento de la porosidad del suelo, aunque segun los resultados para este escenario no se presento alguna evidencia de este efecto.

En el caso del escenario de plantaciones de eucalipto se presentaron los mejores resultados, existiendo un aumento en la evapotranspiraci3n en un 1.02%, adem1s de reducir la erosi3n y sedimentaci3n en un 85.10% y 35.64% respectivamente al realizar la comparaci3n con respecto al escenario actual. Esto debido a la disminuci3n de escorrentía y producci3n de agua, por lo que se asume que aumenta el agua que es absorbida por la cobertura vegetal al existir una mayor demanda, posiblemente esta sea la causa en la disminuci3n de la recarga del acuífero de 0.24% respecto al actual. En otras partes del mundo hallazgos del impacto del cambio de uso y cobertura de la tierra en los componentes del balance hídrico se han evidenciado. Por ejemplo en Estados Unidos, Schilling *et al.* (2008) sugiere que ante la dinámica de pastizales a maíz, la escorrentía superficial cambiaría de 84 mm a 91mm (+8.3%), la producci3n de agua de 193 mm a 209 mm (+8.3%), y la evapotranspiraci3n real de 610 mm a 594 mm (-2.6%). Qi *et al.* (2009) muestra la reducci3n en 7% de la evapotranspiraci3n y un incremento del 14% de producci3n de agua, si se da un cambio completo de cobertura boscosa a cultivos y pastizales.

Los bosques aumentan la capacidad de infiltraci3n y por ende reduce la fuerza erosiva de la lluvia, favoreciendo menor tasa de erosi3n; en comparaci3n con las tierras de cultivos (Nunes *et al.* 2011). Otra raz3n, tal como la expone Morgan (1997) es que "la cobertura bosque es la m1s efectiva en reducir la erosi3n, no obstante el tener una cubierta herb1cea densa puede tener casi la misma eficiencia". Los cambios en la respuesta de sedimentos y erosi3n pueden ser m1s sensibles si se da una dinámica entre pasturas o bosque y cultivos agrícolas ya que las tierras de cultivo son m1s propensas a erosi3n que el bosque en lugares de pendiente pronunciada (Bakker *et al.* 2008).

En relaci3n a las variables relacionadas al aporte nutricional del suelo, el escenario de soya presento los mejores resultados al incrementar el aporte de Nitrogeno y Fosforo al suelo (18.97% y 22.56% respectivamente), esto debido al efecto que causan las bacterias que se localizan en los n3dulos nitrificantes en el sistema radicular, que mediante procesos biol3gicos fijan el Nitrogeno atmosférico al suelo, de forma orgánica, al igual existio un aumento en la biomasa del 22.66% respecto al actual, lo que favorece mediante la incorporaci3n al suelo del rastrojo este sea f1cilmente mineralizado, para posterior mediante procesos de nitrificaci3n hacen que este nitr3geno sea disponible y absorbido por las plantas. Esto favorece fertilidad del suelo y favorece a los sistemas agrícolas productivos al disminuir la dependencia de fertilizantes químicos que en grandes cantidades pueden provocar la contaminaci3n del agua. Mientras que para el caso de los escenarios forestales existio una disminuci3n en el aporte de Nitrogeno y Fosforo, provocando a que se modifique el balance nutricional del suelo al existir mayor demanda de nutrientes que aporte de los mismos. Este efecto es negativo desde el punto de vista nutricional debido a que limita la disponibilidad de uso de la tierra en casos extremos.



Al conjugar las variables relacionadas al aporte nutricional y pérdida de suelo, se puede plantear que el escenario de soya no es recomendable que exista como monocultivo debido a los altos indicadores de pérdida de suelo, pero realizando prácticas como cultivos en asocio o rotación de cultivos, la soya puede favorecer considerable el aporte nutricional del suelo, beneficiando los sistemas agrícolas intensivos, al disminuir la dependencia de fertilizantes químicos, por lo tanto el uso actual que tiene este cultivo utilizándolo como rotación de cultivo en plantaciones de caña de azúcar se puede definir como uso correcto. Mientras que el escenario de plantaciones de Eucalipto a pesar que obtuvo los mejores resultados en relación a la disminución de erosión reduce en gran medida el aporte de nutrientes al suelo. Este efecto a futuro puede ocasionar la degradación nutricional del suelo, limitando su utilización o que exista mayor dependencia de agroquímicos para cambios de uso a futuro. Por lo tanto este tipo de plantaciones es recomendable que se establezcan dependiendo de estudios de capacidad de uso de la tierra y no de manera generalizada, en áreas donde pueda soportar su intensidad de uso sin causar deterioro físico del suelo.

El realizar los análisis estadísticos se corroboró que la erosión en subcuenca Aguná es más influenciado por el tipo de cobertura/uso de tierra y por la pendiente, siendo la primera el cual se puede tener injerencia. Esto debido a que existió poca relación estadística entre la precipitación y los niveles de erosión. En el caso de los sedimentos si están influenciados por la precipitación, donde se aduce que esto es debido a la relación que existe entre la precipitación y la formación de escorrentía que sirve como transporte de los sedimentos que se depositan en las pendientes bajas y leves de los cauces de los ríos que generalmente se encuentran en la parte baja de las cuencas. Mientras que al verificar la relación que existe entre la erosión y producción de sedimento existió una alta dependencia de este último con respecto al primero, esto debido a que la erosión origina la formación de sedimento que es arrastrado por la escorrentía.

Al verificar la sensibilidad al cambio de cobertura con respecto a los niveles de erosión por microcuenca, la plantación de eucalipto obtuvo una disminución considerable en las 38 microcuencas que conforman la subcuenca Aguná, logrando disminuir en promedio 24.84 Ton/Ha/año de pérdida de suelo en este escenario. Ante ello este escenario se propone como un cultivo potencial a ser cultivado en aquellas áreas degradadas, esto dependiendo estudios complementarios sobre capacidad de uso del suelo, pero sirve como indicador para los tomadores de decisiones con respecto a los buenos resultados proyectados a obtener, previendo los escenarios a futuro con respecto al cambio climático, donde existen áreas con alta probabilidad a incrementar su degradación. Se propone priorizar las microcuencas 1, 3, 21, 23, 24 y 25 que abarcan un 8.82% de la extensión de subcuenca Aguná. Esto debido a que no siempre es posible intervenir en todas las microcuencas, por lo que se definieron estas microcuencas como prioritarias, tomando como criterio que son las que actualmente y a futuro presentan los mayores niveles de erosión.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1. Conclusiones

La herramienta de evaluación de agua y suelo (SWAT) permitió evidenciar el comportamiento de las distintas variables del ciclo hidrológico y los efectos que producen relacionados a la producción de erosión y sedimentación de subcuenca Aguná. A pesar de no contar con datos observados que permitieran la calibración del modelo, permite obtener una aproximación de las condiciones actuales. La modelación de los escenarios futuros, cambio climático y cambio de cobertura/uso de suelo, permite ser un instrumento de toma de decisiones sobre el manejo y gestión del recurso hídrico, además de ser una herramienta prospectiva de planificación en la subcuenca Aguná.

La subcuenca Aguná presenta un nivel de erosión moderado, presentando las mayores tasas de erosión en coberturas con fines agrícolas de ciclos cortos (hortalizas y maíz), aunado a que son cultivados en pendientes fuertes (> 15%). El cultivo de caña de azúcar presenta bajos niveles de pérdida de suelo en la mayoría de extensión de la subcuenca Aguná, evidenciando ser una buena cobertura de suelo para las condiciones de la subcuenca.

En escenarios de cambio climático extremo (RCP 8.5) para el año 2050 ante anomalías de temperatura y precipitación en la subcuenca Aguná, la respuesta hidrológica sufre una reducción de los componentes del balance hídrico y a su vez disminuyen los niveles de erosión y producción de sedimentos a nivel general, por lo que se podría definir que el cambio climático afectaría la disponibilidad del agua pero beneficiaría el recurso suelo, aunque al verificar por microcuenca existen algunas las cuales se ven afectadas debido al aumento de tasas de erosión, producción de sedimentos y disminución de producción de agua, favoreciendo su degradación.

Por otra parte los escenarios de cambio de cobertura/uso de suelo en áreas degradadas, sugieren una disminución en los niveles de erosión en coberturas forestales, siendo las plantaciones de eucalipto los que alcanzan la mayor disminución en un 85.10% con respecto al uso actual. Logrando así estar en un rango de erosión leve o nula, favoreciendo su potencial productivo y realizando un uso de manera sostenible. Con respecto al escenario cultivo de soya, favorece la producción de agua, pero aumenta la degradación del suelo aumentando los niveles de erosión y producción de sedimento.

La subcuenca Aguná está influenciado en la producción de erosión por unidad de superficie en gran medida por la cobertura vegetal y pendientes escapadas arriba del 30%. Al no existir estadísticamente una correlación entre la precipitación y la erosión, esto producto de la dispersión de datos de niveles de erosión influenciados por el tipo de cobertura y pendiente del terreno, no se puede evidenciar el efecto que causa en la producción de erosión y degradación de los suelos. Aunque existe una leve correlación estadística se demuestra la dependencia en la producción de sedimento y los niveles de erosión.

## 6.2. Recomendaciones

Continuar con la modelación hidrológica y validación del modelo SWAT para la subcuenca Aguná con el objetivo de lograr una mayor precisión en los resultados que servirán de base para la toma de decisiones en la planificación, diseño y ejecución de acciones que contribuyan al resguardo y la conservación de los recursos de la subcuenca.

Se recomienda utilizar las cuencas como espacio territorial de intervención tanto para la realización de estudios como la implementación de proyecto que favorezcan su manejo, con fines de preservar los recursos naturales ya que de lo contrario se agotaran o habrá una demanda insatisfecha por parte de la población, generando una degradación acelerada de los recursos naturales y falta de soberanía alimentaria.

Realizar estudio de capacidad de uso de tierra, que servirá como base para la implementación de políticas y normativas que busquen el ordenamiento territorial en la subcuenca y con ello se logre mitigar la degradación del suelo y los ecosistemas.

El cultivo de soya incrementan el aporte nutricional al suelo, por lo que realizando prácticas de cultivos en asocio y rotación de cultivos, puede favorecer el desarrollo de plantaciones de interés, no se recomienda su utilización como monocultivo debido a que favorece la erosión y sedimentación del suelo. Mientras que plantaciones forestales tiene un efecto inverso. Al obtener buenos resultados correspondientes a la disminución de erosión y sedimentación en el escenario de eucalipto se recomienda su utilización en áreas aptas según estudios de capacidad de uso de la tierra.

Al realizar la modelación con SWAT en cuencas con alta intervención, específicamente de cultivos intensivos es necesario agregar el calendario de cultivo con la finalidad de considerar las distintas etapas fenológicas del cultivo y las repercusiones que genera en los datos a obtener.

Implementar prácticas de conservación del suelo que integren medidas agronómicas, métodos del suelo y mecánicos; principalmente en tierras de cultivos agrícolas y granos básicos, dadas las características de relieve pronunciado de la subcuenca. Con estas medidas se logrará reducir las pérdidas de suelo por erosión y el coeficiente de esorrentía, favoreciendo la infiltración.

Para próximos estudios utilizando SWAT es importante mencionar que el programa es poco sensible ante pendientes leves o nulas, por lo que es imperativo ante estas situaciones realizar el proceso de calibración del modelo para reducir la incertidumbre de los datos de salida.

## 7. LITERATURA CITADA

- Adam, P. 2006. Hidrología y perforación del agua. Tomo 1. Presses Nationales d' Haiti, 178 p.
- Almorox, AJ. 2010. La degradación de los suelos por erosión hídrica: métodos de estimación. Murcia, Universidad de Murcia. 384 p.
- Alvarado, M; Guerra, A. 2006. De la Sierra de las Minas al valle de San Jerónimo: acciones locales para la gestión integrada del agua: Fondo del agua del Sistema Motagua Polochic. Costa Rica, s.e. 103 p.
- Arnold, J; Kiniry, J; Srinivasan, R; Williams, J; Haney, E; Neitsch, S. 2012a. Soil & Water Assessment Tool Input/Output Documentation (En línea). Texas US, Consultado 15 febrero. 2020. Disponible en <http://swat.tamu.edu/media/69296/SWAT-IO-Documentation-2012.pdf>.
- Bakker, MM; Govers, G; van Doorn, A; Quetier, F; Chouvardas, D ; Rounsevell, M. 2008. The response of soil erosion and sediment export to land-use change in four areas of Europe: the importance of landscape pattern. *Geomorphology* 983:213-226.
- Balzarini, M; Gonzáles, M; Tablada, M; Casanoves, F; Di Rienzo, J; Robledo, J. 2008. Infostat: manual de usuario. Ed. Brujas. 335 p. Consultado 15 de febrero 2020. Disponible <https://www.researchgate.net/publication/283491340>.
- Basterrechea, M. 2017. Administracion del Recurso Hídrico de la Cuenca a los Ríos: Caso del Río Naranjo. Antigua Guatemala, Guatemala: Asociacion de Tecnicos Azucareros de Guatemala.
- BID (Banco Interamericano de Desarrollo). 2015. Modelos de circulación general (GCM) (en línea). Ideas sobre adaptación al cambio climático. Consultado 27 de marzo 2020. Disponible en <https://sector.iadb.org/es/adaptacion/pages/modelosclim%C3%A1-ticos>.
- BID (Banco Interamericano de Desarrollo). 2017. Estudio de impacto ambiental y social: proyecto de ampliación del cauce del Río Areco aguas debajo de la RN8 y la ampliación de puentes RN8 y RP41 (en línea). Buenos Aires, Argentina. 318 p. Consultado 11 de febrero. 2020. Disponible en [http://www.mosp.gba.gov.ar/sitios/hidraulica/informacion/EIAS\\_Proyecto\\_Ampliacion\\_CauceRioAreco\\_AguasAbajo\\_RN8\\_RP41.pdf](http://www.mosp.gba.gov.ar/sitios/hidraulica/informacion/EIAS_Proyecto_Ampliacion_CauceRioAreco_AguasAbajo_RN8_RP41.pdf).
- Bruijnzeel, S. 2004. Los Bosques Tropicales y los Servicios Ambientales: ¿Acaso los árboles impiden ver el Terreno? (en línea). Ámsterdam, Holanda. 45 p. Consultado 19 de febrero 2020. Disponible en [http://www.ccmss.org.mx/descargas/los\\_bosques\\_tropicales\\_y\\_los\\_servicios\\_ambientale\\_acaso\\_los\\_arboles\\_impiden\\_ver\\_el\\_terreno.pdf](http://www.ccmss.org.mx/descargas/los_bosques_tropicales_y_los_servicios_ambientale_acaso_los_arboles_impiden_ver_el_terreno.pdf).

- Cabrera, J. 2012. Calibración de modelos hidrológicos. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Civil. Perú. 7 p. Consultado 20 de febrero 2019. Disponible en [http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas\\_interes/modhidro\\_2.pdf](http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_2.pdf).
- Campos-Aranda, D. 1984. Procesos del ciclo hidrológico. (En línea). 3 ed. México, UASLP. Consultado 4 nov. 2015.
- Cartes, E.; Rubilar, R. y Mardones, O. 2009. Comparación de erosión hídrica en plantaciones forestales y bosque nativo, en suelo granítico de la región del Bío-Bío, Chile (en línea). XIII Congreso Forestal Mundial. Buenos Aires, AR. pp. 18-23. Consultado 20 de febrero 2020. Disponible en [http://www.cfm2009.org/es/programapost/resumenes/uploads/Erosion\\_hidrica\\_FD.pdf](http://www.cfm2009.org/es/programapost/resumenes/uploads/Erosion_hidrica_FD.pdf).
- CENGICAÑA (Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar, GT). 2012. El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala. Guatemala. 512 p.
- 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. *Journal of Hydrology* 491:73-88.
- Chow, VT; Maidment, DR; Mays, LW. 1994. Hidrología aplicada. Bogotá, CO, McGraw-Hill, Bogotá. 584 p.
- Fallas, J; Valverde, C. 2008. Manejo y Priorización de Cuencas Hidrográficas (En línea). Heredia, CR, Consultado 20 febrero 2020. Disponible en [http://biblioteca.catie.ac.cr/cursocuenas/documentos/Manejo\\_y\\_priorizacion\\_de\\_cuenas\\_hidrograficas\\_2008.pdf](http://biblioteca.catie.ac.cr/cursocuenas/documentos/Manejo_y_priorizacion_de_cuenas_hidrograficas_2008.pdf).
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación), 1997. Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y la escorrentía. Roma, Italia, FAO. 161 p.
- FAO, 2009. Guía para la descripción de suelos. (En línea). Trads. R Vargas Rojas; A Arias Jiménez; PV Straaten; P Lavelle; S Zonn; P Ibish; S Buol; R Graham; P Rc Mcdaniel; A Vessel. Cuarta ed. Roma, IT, FAO, Roma (Italia). 99 p. Consultado 19 febrero 2020. Disponible en <http://www.fao.org/3/a-a0541s.pdf>
- FAO, 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Roma, Italia, FAO. 83 p.
- FAO. 2000. Los principales factores ambientales y de suelos que influyen sobre la productividad de los suelos (en línea). 7 p. Consultado 19 de febrero 2020. Disponible en <https://www.uv.mx/-personal/tcarmona/files/2010/08/FAO-2000.pdf>.

- FAO. 2007. Guía metodológica para el manejo participativo de microcuencas (en línea). Guatemala. 76 p. Consultado 7 de jul. 2019. Disponible en [https://coin.fao.org/coinstatic/cms/media/3/12647138247290/guia\\_manejo\\_microcuencas.pdf](https://coin.fao.org/coinstatic/cms/media/3/12647138247290/guia_manejo_microcuencas.pdf).
- FAO. 2015. Los bosques y suelos forestales contribuyen de manera esencial a la producción agrícola y la seguridad alimentaria mundial (en línea). Consultado 21 de jun. 2019. Disponible en <http://www.fao.org/soils-2015/news/news-detail/es/c/285875/>
- FAO-PNUMA-UNESCO. 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Roma: FAO.
- Fetter, CW. 2000. Applied hydrogeology. Prentice hall.
- Fullen, MA; Guerra, AJ; Jorge, MdCO ; Alexandre, ST. 2014. Soil Erosion and Conservation in Brazil. Anuário do Instituto de Geociências.
- García, A; Campos, J; Villalobos, R; Jiménez, F; Solórzano, R. 2005. Enfoques de manejo de recursos naturales a escala de paisaje: convergencia hacia un enfoque ecosistémico. (En línea). Turrialba, CR, 55 p. (Turrialba, CR, CATIE. Serie Técnica, Informe Técnico). Consultado 18 febrero 2020. Disponible en [http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/11554/1635/1/Enfoques\\_de\\_manejo\\_de\\_recursos.pdf](http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/11554/1635/1/Enfoques_de_manejo_de_recursos.pdf)
- Gómez, F. 2002. Evaluación de la erosión potencial y producción de sedimentos en tres cuencas de Costa Rica. UCR. 191 p.
- Guioteca, 2012. Erosión: el nuevo fantasma del cambio climático. (en línea). España. Consultado 17 Julio 2019. Disponible <http://www.guioteca.com/medio-ambiente/erosion-el-nuevo-fantasma-del-cambio-climatico/>
- Herrera Ibáñez, Isaac. 2006. Geología de Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía. 134 p.
- Hudson, N. 1981. Soil conservation, Ithaca, New York, Cornell University Press, 324 p. Instituto Caribeño de Recursos Naturales. 2008, Cambio climático y reducción de riesgos de desastres. Reporte técnico N° 386. Consultado el 12 Julio 2019. Disponible en: <http://www.canari.org/documents/TechDocno386-Spn.pdf>
- IARNA (Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente, GT). 2009. Síntesis del perfil ambiental de Guatemala (en línea). Guatemala. Consultado 12 Julio 2019. Disponible en [http://biblio3.url.edu.gt/IARNA/serie\\_amb/8.PDF](http://biblio3.url.edu.gt/IARNA/serie_amb/8.PDF)

- INDE (Instituto Nacional de Estadística). 2018. XII Censo Poblacional y VII de vivienda. (en línea). Guatemala. Consultado 17 febrero del 2020. Disponible en <http://www.censopoblacion.gt>
- INSIVUMEH (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala). 2018. Variabilidad y Cambio Climático de Guatemala. Ciudad de Guatemala, Guatemala. 148 p.
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2013: Glosario (en línea). Planton, S. En: Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América. Consultado 27 de marzo 2020. Disponible en [https://www.ipcc.ch/pdf/assessmentreport/ar5/wg1/WGI\\_AR5\\_glossary\\_-ES.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessmentreport/ar5/wg1/WGI_AR5_glossary_-ES.pdf).
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático). 2014. Cambio climático 2014: informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza. 157 p.
- Iroumé, A. 2014. Uso del modelo SWAT para estudiar los efectos de cambio de uso de suelo en la hidrología, transporte de sedimento fino y en las fuentes de aporte de sedimentos en cuencas experimentales del sur de Chile (en línea). Universidad Austral de Chile. 20 p. Consultado 24 de febrero 2020. Disponible en <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/-2014/bmfcir684u/doc/-bmfcir684u.pdf>.
- Jiménez, F. 2005. El bosque como regulador del ciclo hidrológico (Diapositivas). s.l, CATIE. (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE. Costa Rica).
- Juárez, A. 2016. Plan de nomenclatura municipal de la Gomera, Escuintla. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. 226 p.
- Kirkby, M. Morgan, R. 1984. Erosión de suelos. Ed. Limusa. México. 375 p.
- Klingebiel, A., Montgomery. P.H. 1961. Land capability classification. Agricultural Handbook 210. USDA. Soil Conservation Service. Washington, D.C., EE.UU.
- Lima, S., Q. de Jong, G. Sparovek y D. Flanagan, 2002: "Erosion database interface, a Computer program for georeferenced application of erosion prediction models". Computers & Geoscience, USA. 661-668 p.

- Luo, Y; Ficklin, DL; Liu, X ; Zhang, M. 2013. Assessment of climate change impacts on hydrology and water quality with a watershed modeling approach. *Science of the total environment* 450:72-82.
- MARN (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales). 2009. Informe ambiental del estado: GEO Guatemala. Guatemala, MARN. 286 p.
- Morán-Tejeda, E; Zabalza, J; Rahman, K; Gago-Silva, A; López-Moreno, JI; Vicente-Serrano, S; Lehmann, A; Tague, CL ; Beniston, M. 2014. Hydrological impacts of climate and land-use changes in a mountain watershed: uncertainty estimation based on model comparison. *Ecohydrology* 88:1396-1416.
- Morgan, R. 1997. *Erosión y conservación del suelo*. Barcelona, España, Aedos. 342 p.
- Morgan. L. 2009. *Soil Erosion and Conservation*. London, UK: Blackwell Publishing.
- Mozo, T. 1967. Conservación del suelo a través del bosque. *Revista Nacional de Agricultura*.
- Nearing, M; Pruski, F ; O'neal, M. 2004. Expected climate change impacts on soil erosion rates: a review. *Journal of Soil and Water Conservation* 59:43-50.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., and Williams, J.R. 2005. *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation*. Version 2005. Grassland, soil and water research service, Temple, Texas.
- Neitsch, S.L., Williams, J.R., Arnold, J.G., Kiniry, J.R. 2011. *Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009*. Texas, United States of America, Texas Water Resources Institute. 618 p.
- Nelson, J. 2015. Estimación de la erosión hídrica a través de modelación mediante un SIG, en la zona cañera de la vertiente del pacifico de Guatemala. Universidad Rafael Landívar. Escuintla, Guatemala. 65p.
- Nunes, AN; De Almeida, AC ; Coelho, CO. 2011. Impacts of land use and cover type on runoff and soil erosion in a marginal area of Portugal. *Applied Geography* 312:687-699.
- Núñez, J. 2001. *Manejo y conservación de suelos*. San José, Costa Rica, EUNED. 267 p.
- Oglesby, R ; Rowe, C. 2014. Impactos climáticos para Guatemala: Resultados preliminares de los modelos climáticos regionales y globales IPCC AR5. (en línea). Guatemala, 35 p. p. Consultado 01 nov 2015. Disponible en <http://www.marn.gob.gt/Multimedios/1442.pdf>



- OMM (Organización Meteorológica Mundial). 2011. Guía de prácticas climatológicas (en línea). No. 100. 128 p. Consultado 27 de marzo 2020. Disponible en [https://library.wmo.int/pmb\\_ged/wmo\\_100\\_es.pdf](https://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_100_es.pdf).
- Ordoñez, J. 2011. Ciclo hidrológico (en línea). Cartilla técnica. Sociedad geográfica de Lima. Perú. 44 p. Consultado 14 de marzo 2020. Disponible en [https://www.gwp.org/globalassets/global/gwpsam\\_files/publicaciones/varios/ciclo\\_hidrolgico.pdf](https://www.gwp.org/globalassets/global/gwpsam_files/publicaciones/varios/ciclo_hidrolgico.pdf).
- Park, S., Oh, C., Jeon, S., Jung, H., Choi, C., 2011. Soil erosion risk in Korean watersheds, assessed using the revised universal soil loss equation. *Journal of Hydrology* 399 (3–4), 263–273 p.
- Pla, I. 1994: Soil degradation and climate-induced risks of crop production in the tropics. Acapulco, México, 125 p.
- Ponce, V. 2007. Rendimiento Sostenible del Agua Subterránea (En línea). Consultado 18 febrero 2020. Disponible en [http://rendimiento.sdsu.edu/agua\\_subterranea\\_rendimiento\\_sostenible.html#inicio](http://rendimiento.sdsu.edu/agua_subterranea_rendimiento_sostenible.html#inicio).
- PROCISUR (Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico Agroalimentario Agroindustrial del Cono Sur, MV). 2001. Siembra directa en el Cono Sur. Montevideo, Instituto Interamericano de Cooperación para la agricultura. 450 p.
- Qi, S; Sun, G; Wang, Y; McNulty, S ; Myers, JM. 2009. Streamflow response to climate and landuse changes in a coastal watershed in North Carolina. *Transactions of the ASABE* 523:739-749.
- Rafaelli, S; López, FB; Almorox, AJ. 2010. La degradación de los suelos por erosión hídrica: métodos de estimación. España, Editum. 384 p.
- Ramakrishna, B. 2019. Degradación de suelo: Erosión hídrica importancia, conceptos, causas, etapas, formas. Turrialba, Costa Rica. 30 p.
- Rivera, F; Gutiérrez López, A; Val Segura, R; Mejía Zermeño, R; Sánchez Ruiz, PA; Aparicio Mijares, J. 2005. La medición de sedimentos en México. México, IMTA. 318 p.
- Ritchers J. 1995. Manejo del uso de la tierra en América Central: hacia el aprovechamiento sostenible del recurso tierra. San José, C.R. IICA. 440 p. (Documento no. 28).
- Sánchez, L; Ataroff, M. 1997. Pérdidas de suelo en cultivos hortícolas, Río Arriba, El Cobre, Edo. In (En línea). Venezuela Consultado 21 febrero 2020. Disponible en <http://www.ciencias.ula.ve/icae/publicaciones/agroecologia/pdf/sanchez1997.pdf>

- Sánchez, M; Fernández, D; Marínez, M; Granados, R; Ríos, J. 2017. Modelo hidrológico de la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México con SWAT. 27 p. Consultado 21 de febrero 2020. Disponible en <https://imta.gob.mx/tyca/descargas/preprint/Vol.VIIINo.5Septiembre-Octubre2017/Art%C3%ADculo%200322NS%20Versi%C3%B3n%20final.pdf>.
- Santhi, C; Arnold, JG; Williams, JR; Dugas, WA; Srinivasan, R ; Hauck, LM. 2001. validation of the swat model on a large RWER basin with point and nonpoint sources1.
- Santos, A. 2014. Estudio de la erosión hídrica en la parte alta de la zona cañera, micro cuenca Los Sujuyes, diagnóstico y servicios en el Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático, Santa Lucia Cotz., Escuintla. Guatemala: ICC-FAUSAC. 199 p.
- Schilling, KE; Jha, MK; Zhang, YK; Gassman, PW ; Wolter, CF. 2008. Impact of land use and land cover change on the water balance of a large agricultural watershed: Historical effects and future directions. *Water resources research* 447.
- Sokolov, A; Chapman, T. 1981. Métodos de cálculo del balance hídrico (En línea). Madrid ES, Consultado 10 marzo 2020. Disponible en <http://unesdoc.unesco.org/images/0013/001377/137771so.pdf>. (Guía internacional de métodos de investigación (versión en Español). Instituto de Hidrología de España-UNESCO).
- Stehr, A; Debels, P; Arumi, JL; Alcayaga, H ; Romero, F. 2010. Modelación de la respuesta hidrológica al cambio climático: experiencias de dos cuencas de la zona centro-sur de Chile (en línea). *Tecnología y ciencias del agua*. Vol. 1. No. 4. Consultado 05 de marzo 2020. Disponible en [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222010000400002](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222010000400002).
- Taboada, J. 2003. Dinámica de sedimentos en cuencas hidrográficas. Montecillos, México, Universidad de Chapingo. 117 p.
- TRAGSA. 1998. Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de erosión. Coord., López, Filiberto. Segunda edición. Agustín de Bethencourt. Madrid. Grupo TRAGSA. 945 p.
- Trenberth KE, Smith L, Qian T, Dai A, Fasullo J (2007b) Estimates of the global water budget and its annual cycle using observational and model data. *Hydrometeorology* 8:758–769 p.
- URL (Universidad Rafael Landivar). 2009. Conflicto por el uso de la tierra. Nuevas expresiones de la conflictividad agraria en Guatemala. Instituto de Transformación de la conflictividad agraria en Guatemala. Guatemala. 172 p.
- Vargas, G. 2001. Las lluvias en América Central: una climatología geográfica. (En línea). *Anuario de Estudios Centroamericanos* 272:7-19. Consultado 17 de febrero 2020. Disponible en <http://www.redalyc.org/pdf/152/15227201.pdf>

- Vargas, J. 2015. Estimación de la erosión hídrica actual y potencial de la subcuenca de Sayula, Jalisco, México. Universidad de Guadalajara. Jalisco, Mexico. 79 p.
- Vargas, O. 2011. Restauración ecológica, biodiversidad y conservación (en línea). Acta biológica colombiana. Vol. 16. No. 2. Pp 221-246. Consultado 18 de enero 2020. Disponible en <https://revistas.unal.edu.co/index.php/actabiol/article/view/19280/-28009>.
- Vera, J. (2015). Evaluación de los factores de riesgo producidos por la degradación de los suelos por cultivos de café en la vereda El Cascajo, Municipio de Concordia (Antioquia). Cuaderno Activa, 7, 85-97
- Villarán, R. 2017. Utilización del Programa SWAT para la estimación de la emisión de sedimentos en cuencas. Universidad de Huelva. Huelva, España. 12 p.
- Vision, W. s.f. Manual Manejo de Cuencas (En línea). s.l, 104 p. Consultado 22 de enero 2020. Disponible en [http://biblioteca.catie.ac.cr/cursocuencas/documentos/Manual\\_de\\_Manejo\\_de\\_Cuencas\\_Vision\\_Mundial\\_mod.pdf](http://biblioteca.catie.ac.cr/cursocuencas/documentos/Manual_de_Manejo_de_Cuencas_Vision_Mundial_mod.pdf)
- Vörösmarty, CJ; Léveque, C; Revenga, C; Bos, R; Caudill, C; Chilton, J; Douglas, EM; Meybeck, M ; Prager, D. 2005. Fresh Water. In M. H. Rashid; R. Scholes; A. Neville. eds. Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends: Findings of the Condition and Trends Working Group of the Millennium Ecosystem Assessment. Washington, United States of America. p. 165-207.
- Williams J. 1975. Sediment Yield Prediction with Universal Equation Using Runoff Energy Factor, U.S. Department of Agriculture. Agricultural Research Service (A.R.S.), U.S.A. Department of Agriculture, 244-252.
- WWF (World Wildlife Fund). 2001. Terrestrial ecoregions of the world: a new map of life on Earth. (en línea). Washington DC. Consultado el 12 Julio 2019. Disponible en <http://www.worldwildlife.org/ecoregions/index>
- Zalewski, M; Wagner-Lotkowska, I. 2004. Integrated watershed mangement: ecohydrology & phytotechnology. Manual. UNESCO.
- Zhang, L; Dawes, W ; Walker, G. 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. Water resources research 373:701-708.