



**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA**

**ESCUELA DE POSGRADO**

*Estimación de la erosión laminar y sedimentación con modelos hidrológicos para la selección de prácticas de conservación de suelos y cambios de cobertura en la Unidad Hidrográfica de Aquin/Saint-Louis Du Sud- Haití*

Por  
María Carla Morales Ascarrunz

Tesis sometida a consideración de la Escuela de Posgrado  
como requisito para optar por el grado de  
*Magister Scientiae* en Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas

**TURRIALBA, 2014**

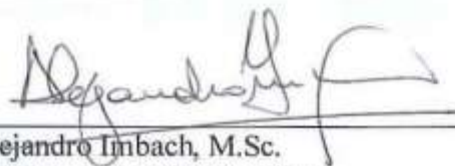
Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y el Programa de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

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

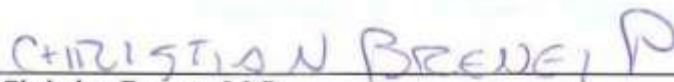
**FIRMANTES:**



Jorge Faustino, Ph.D.  
**Director de tesis**

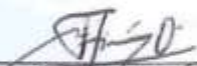


Alejandro Imbach, M.Sc.  
**Miembro Comité Consejero**



Christian Brenes, M.Sc.  
**Miembro Comité Consejero**

Yamileth Astorga, M.Sc.  
**Miembro Comité Consejero**



I. Miley González, Ph.D. / Francisco Jiménez, Dr. Sc.  
**Decano / Vicedecano de la Escuela de Posgrado**



María Carla Morales Ascarrunz  
**Candidata**

## **DEDICATORIA**

Dedicada a Dios, mi familia y amigos

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por darme la fortaleza necesaria para seguir adelante a pesar de las adversidades.

A mi familia por soportar tenerme tanto tiempo lejos y aun apoyarme y quererme.

A la OEA, por la beca de estudios con la cual logre cumplir esta meta

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

Al Dr. Faustino quien desde un principio fue una gran persona conmigo y me dio la oportunidad de realizar esta tesis.

A todo mi comité asesor, increíbles maestros y personas.

Al Ing. Saborío a quien conocí casualmente y se convirtió en una persona importante para el desarrollo de la investigación.

Al IWGCC por que con su financiamiento pude cumplir a cabalidad con los objetivos de este estudio.

A Diana Ulloa y Carlos Zuleta, porque fueron quienes más me ayudaron y apoyaron con sus conocimientos.

A todos los amigos y compañeros que conocí durante este viaje por que sin ellos esta experiencia no hubiera sido la misma.

## CONTENIDO

<b>DEDICATORIA</b>	<b>iii</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>iv</b>
<b>CONTENIDO</b>	<b>v</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>viii</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xi</b>
<b>INDICE DE CUADROS</b>	<b>xi</b>
<b>INDICE DE FIGURAS</b>	<b>xi</b>
<b>INDICE DE ACRONIMOS</b>	<b>xii</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN GENERAL</b>	<b>1</b>
<b>1.1. ANTECEDENTES</b>	<b>1</b>
<b>1.2. JUSTIFICACIÓN</b>	<b>1</b>
<b>1.3. IMPORTANCIA</b>	<b>2</b>
<b>1.4. OBJETIVOS</b>	<b>3</b>
<b>1.4.1. General</b>	<b>3</b>
<b>1.4.2. Específicos</b>	<b>3</b>
<b>1.5. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN</b>	<b>3</b>
<b>II. MARCO CONCEPTUAL</b>	<b>4</b>
<b>2.1. LA EROSIÓN HIDRICA</b>	<b>4</b>
<b>2.1.1. Erosión laminar</b>	<b>4</b>
<b>2.1.2. Erosión en surcos</b>	<b>5</b>
<b>2.1.3. Erosión en cárcavas</b>	<b>5</b>
<b>2.2. MECÁNICA DEL PROCESO DE EROSIÓN HÍDRICA</b>	<b>5</b>
<b>2.2.1. Etapa de desprendimiento</b>	<b>6</b>
<b>2.2.2. Etapa de arrastres o transporte</b>	<b>6</b>
<b>2.2.3. Etapa de deposición o sedimentación</b>	<b>6</b>
<b>2.3. FACTORES QUE ORIGINAN LA EROSIÓN HÍDRICA</b>	<b>6</b>
<b>2.3.1. Precipitación</b>	<b>7</b>
<b>2.3.2. Escurrimiento</b>	<b>7</b>
<b>2.3.3. El suelo</b>	<b>7</b>
<b>2.3.4. La cobertura vegetal</b>	<b>8</b>
<b>2.3.5. La pendiente</b>	<b>9</b>
<b>2.3.6. La actividad humana</b>	<b>9</b>
<b>2.4. ECUACIÓN UNIVERSAL DE PERDIDA DE SUELO (RUSLE)</b>	<b>10</b>
<b>2.4.1. Factor R (erosividad de la lluvia)</b>	<b>11</b>
<b>2.4.2. Factor K (erodabilidad del suelo)</b>	<b>12</b>
<b>2.4.3. Factor LS (longitud y pendiente)</b>	<b>13</b>
<b>a) Longitud de pendiente (L)</b>	<b>14</b>
<b>b) Inclinación de la pendiente (S)</b>	<b>14</b>
<b>2.4.4. Factor C (cobertura vegetal)</b>	<b>15</b>
<b>2.4.5. Factor P (prácticas de control de la erosión)</b>	<b>15</b>

2.5.	<b>SEDIMENTACIÓN</b>	<b>16</b>
2.5.1.	<b>Ecuación Universal Modificada de Pérdida de Suelo (MUSLE)</b>	<b>17</b>
2.6.	<b>MODELO SWAT (SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL)</b>	<b>18</b>
2.7.	<b>LUCHA CONTRA LA EROSIÓN DE LOS SUELOS</b>	<b>19</b>
2.8.	<b>LIMITE DE TOLERANCIA DE PERDIDA DE SUELO</b>	<b>19</b>
2.9.	<b>CAMBIO CLIMÁTICO</b>	<b>20</b>
III.	<b>CONTRIBUCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN AL DESARROLLO DENTRO LA UNIDAD HIDROGRÁFICA DE AQUIN/SAINT LOUIS DU SUD HAITÍ</b>	<b>21</b>
IV.	<b>LITERATURA CITADA</b>	<b>23</b>
V.	<b>ARTICULO 1: ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA LAMINAR DE TRES ESCENARIOS RELACIONADOS CON LA COBERTURA VEGETAL Y LAS PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN DE SUELOS EN UNA CUENCA DE LA UNIDAD HIDROGRÁFICA AQUIN/SAINT-LOUIS DU SUD HAITI</b>	<b>29</b>
5.1.	<b>RESUMEN</b>	<b>29</b>
5.2.	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>30</b>
5.3.	<b>MATERIALES Y METODOS</b>	<b>31</b>
5.3.1.	<b>Descripción general del área de estudio</b>	<b>31</b>
5.3.2.	<b>Ecuación universal de pérdida de suelos (RUSLE)</b>	<b>34</b>
5.3.2.1.	<b>Factor R</b>	<b>34</b>
5.3.2.2.	<b>Factor K</b>	<b>35</b>
5.3.2.3.	<b>Factor C</b>	<b>35</b>
5.3.2.4.	<b>Factor LS</b>	<b>38</b>
5.3.3.	<b>ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN CON RUSLE</b>	<b>40</b>
5.3.4.	<b>MODELACIÓN DE TRES ESCENARIOS</b>	<b>40</b>
5.4.	<b>RESULTADOS Y DISCUSIONES</b>	<b>41</b>
5.4.1.	<b>Estimación de la erosión</b>	<b>41</b>
5.4.2.	<b>Modelación de escenarios</b>	<b>49</b>
5.4.3.	<b>Diagnóstico y validación de la información</b>	<b>55</b>
5.4.4.	<b>Discusiones</b>	<b>57</b>
5.5.	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>61</b>
5.5.1.	<b>Conclusiones</b>	<b>61</b>
5.5.2.	<b>Recomendaciones</b>	<b>62</b>
5.6.	<b>LITERATURA CITADA</b>	<b>63</b>
VI.	<b>ARTÍCULO 2: ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS EN DIFERENTES ESCENARIOS Y BAJO MODELOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN</b>	

**UNA CUENCA DE LA UNIDAD HIDROGRÁFICA DE AQUIN/SAINT LOUIS,  
HAITÍ** **67**

<b>6.1. RESUMEN</b>	<b>67</b>
<b>6.2. INTRODUCCIÓN</b>	<b>68</b>
<b>6.3. MATERIALES Y METODOS</b>	<b>69</b>
<b>6.3.1. Área de estudio</b>	<b>69</b>
<b>6.3.2. Obtención de datos climáticos hasta el 2030</b>	<b>70</b>
<b>6.3.3. Modelación de escenarios hasta el 2030</b>	<b>72</b>
<b>6.4. RESULTADOS Y DISCUSIONES</b>	<b>73</b>
<b>6.5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIÓN</b>	<b>79</b>
<b>6.6. LITERATURA CITADA</b>	<b>80</b>

## RESUMEN

En Haití se presentan graves problemas de erosión y sedimentación, donde la lluvia es el principal agente natural causante, además de las pendientes, el manejo inadecuado del suelo y la falta de cobertura vegetal; dejando el suelo desprotegido.

Sin embargo se desconoce la cantidad de pérdida de suelo y la producción de sedimentos; y a pesar que existen diferentes métodos para estimarlos no se han encontrado estudios previos.

Este trabajo se basa en los estudios realizados por el Ministerio de Medio Ambiente - PNUD en 2012 y otros datos recabados de fuentes secundarias para estimar la erosión con la ecuación universal de pérdida de suelos revisada (RUSLE) y la producción de sedimentos con el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tools)

Para la utilización de la RUSLE se determinaron cinco factores: precipitación, suelos, cobertura vegetal, longitud - pendiente y prácticas de conservación; con los cuales se aplicó la fórmula general y obtuvo la erosión. Para el modelo SWAT los factores que se utilizaron también fueron cinco: clima (precipitación y temperatura diarias), suelos, cobertura vegetal, el modelo de elevación digital (elaborado a partir de las curvas de nivel) y ríos.

Con el dato estimado de la cantidad de pérdida de suelo anual, se procedió a la selección de una cuenca tomando en cuenta lo recomendado en el Plan de Cogestión para el Manejo Integrado de la Unidad Hidrográfica, y se aplicó cambios en el Factor P (prácticas de conservación) y el Factor C (cobertura vegetal) creando tres posibles escenarios para simular comportamientos de la erosión.

Estos escenarios se pusieron a consideración de un grupo focal en el área de estudio para ser validados, cuyo resultado final fue un escenario capaz de controlar y disminuir la erosión.

Se utilizó el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tools) que permite modelar con mayor exactitud debido a que requiere datos más detallados; sin embargo el área de estudio es muy limitado en ese aspecto; a pesar de ello se introdujo los datos al modelo para crear los escenarios y analizar la cantidad de sedimentos que generan bajo modelos del cambio climático en un escenario A2 hasta el año 2030.

Se elaboraron los mapas con Arc Gis para presentar la información con una referencia geográfica, con el cual se observó que dentro de la Unidad Hidrográfica de Aquín/Saint Louis la cuenca de Brodequín es prioritaria para el manejo y recuperación de la zona. En la investigación se comprobó que para el control de la erosión y la disminución de producción de sedimentos, tomando en cuenta el cambio climático y proyectado a un futuro cercano es necesaria la aplicación de prácticas de conservación de suelos y también un cambio de



coberturas con un enfoque sostenible (sistemas agroforestales, silvopastoriles, conservación y recuperación de bosques) sobre todo en la cuenca alta y media.

A pesar de que los resultados no son concluyentes, se dió una referencia de la situación actual y futura de la zona de estudio y se espera haga tomar cuenta de la importancia de contar con información más profunda y datos exactos que proyecte a investigaciones para mejorar el presente estudio.

**Palabras claves:** Haití, erosión hídrica, prácticas de conservación de suelos, cambio climático, RUSLE, SWAT.

### **ABSTRACT**

Serious problems of erosion and sedimentation are present in Haiti, where rain is the main natural causative agent, beside the acclivities, inadequate soil handling and lack of vegetation coverage.

However, the amount of soil loss and sediment yield is unknown; and although there are different methods to estimate them, no previous studies have been found.

This work is based on studies conducted by the Ministry of Environment - PNUD in 2012 and other data collected from secondary sources to estimate erosion with the revised universal soil loss equation (RUSLE) and sediment yield with the SWAT model (Soil and Water Assessment Tools)

To use the RUSLE, five factors were determined: precipitation, soils, vegetation coverage, length - slope and conservation practices; with which the general formula was applied and obtained erosion. For the SWAT model factors used were also five: climate (daily precipitation and temperature), soil, vegetation coverage, digital elevation model (developed from contour lines) and rivers.

With the estimated data of annual soil loss amount, selection of a basin taking into account the recommendations in the Co-Management Plan for Hydrographic Unit Integrated Management was proceeded, and changes in P Factor (conservation practices) and Factor C (vegetation coverage) were applied, creating three possible scenarios to simulate erosion behavior.

These scenarios were put to consideration of a focus group in the area of study to be validated. The final result was a scenario able to control and reduce erosion.

Model SWAT (Soil and Water Assessment Tools) was used, which allows to model more accurately because it requires more detailed data; however the study area is very limited in that aspect; nevertheless the data was introduced to the model to create the scenarios and

analyze the amount of sediment generated under climate change models in the A2 scenario until 2030.

Maps were developed with Arc Gis to present information with a geographical reference, with which was observed that within the Hydrographic Unit, the Aquín / Saint Louis of Brodequin basin is a priority for the management and recovery of the area. The investigation found that control of erosion and decrease sediment yield, considering climate change and projecting a near future, it is necessary to apply practices of soil conservation and also a change of coverage with a sustainable approach (agroforestry systems, silvopastoral, conservation and restoration of forests), especially in the upper and middle basin.

Although the results are inconclusive, a reference to the current and future situation of the study area was given, and it is expected that it will reinforce the importance of having deeper information and accurate data, in order to have new researches to improve this study.

**Keywords:** Haiti, water erosion, soil conservation practices, climate change, RUSLE, SWAT.

## INDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Influencia de la cobertura vegetal sobre la pérdida de suelos por erosión hídrica	9
<b>Cuadro 2.</b> Códigos de permeabilidad y estructura del suelo en función de su textura	13
<b>Cuadro 3.</b> Factor P de prácticas de conservación	16
<b>Cuadro 4.</b> Descripción de técnicas de conservación	19
<b>Cuadro 5.</b> Clasificación de FAO – PNUMA – UNESCO (1981)	20
<b>Cuadro 6.</b> Datos topográficos de la Unidad Aquin/Saint-Louis du Sud	32
<b>Cuadro 7.</b> Datos altitudinales de la Unidad Aquin/Saint-Louis du Sud	32
<b>Cuadro 8.</b> Descripción e imágenes de la cobertura vegetal	35
<b>Cuadro 9.</b> Cambio de cobertura vegetal	41
<b>Cuadro 10.</b> Prácticas de conservación	41
<b>Cuadro 11.</b> Factor R de la Unidad Hidrográfica de Aquin/Saint Louis	42
<b>Cuadro 12.</b> Factor K de la Unidad Hidrográfica de Aquin/Saint Louis	43
<b>Cuadro 13.</b> Factor C de la Unidad Hidrográfica de Aquin/Saint Louis	46
<b>Cuadro 14.</b> Estimación de la erosión	48
<b>Cuadro 15.</b> Preguntas y comentario de apoyo para el grupo focal	56
<b>Cuadro 16.</b> Cambio de cobertura y prácticas planteadas	61
<b>Cuadro 17.</b> Datos introducidos a SWAT	73
<b>Cuadro 18.</b> Datos introducidos con nueva cobertura vegetal	73

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Monograma para determinar la textura de suelo	13
<b>Figura 2.</b> Flujograma para obtener el mapa de pérdida de suelo	16
<b>Figura 3.</b> Cálculo del Factor R	43
<b>Figura 4.</b> Cálculo del Factor K	45
<b>Figura 5.</b> Cálculo del Factor C	46
<b>Figura 6.</b> Cálculo del Factor LS	47
<b>Figura 7.</b> Cálculo y grado erosión en la Unidad Hidrográfica de Aquin/Saint Louis según FAO-UNESCO	48
<b>Figura 8.</b> Erosión en Brodequin	50
<b>Figura 9.</b> Cambio de cobertura vegetal (Escenario 1)	51
<b>Figura 10.</b> Prácticas de conservación (Escenario 2)	52
<b>Figura 11.</b> Cambio de cobertura y prácticas de conservación (Escenario 3)	53
<b>Figura 12.</b> Recuperación de suelos	54
<b>Figura 13.</b> Erosión anual de suelos por escenario	55
<b>Figura 14.</b> Diagrama de flujo de HRU/subcuencas en SWAT	72
<b>Figura 15:</b> Sedimentación y precipitación (1982 - 2013)	74
<b>Figura 16.</b> Sedimentación y precipitación (2014 – 2030)	74
<b>Figura 17.</b> Producción de sedimentos A (2013 -2030)	75
<b>Figura 18.</b> Producción de sedimentos B (2013 -2030)	76
<b>Figura 19.</b> Mapas de producción de sedimentos B (2013 – 2030)	77

## **INDICE DE ACRÓNIMOS**

RUSLE: Revised universal soil loss equation (ecuación universal de pérdida de suelos)

SWAT: Soil and water assessment tool

PNUD: Programa de la naciones unidas para el desarrollo

MDE-PNUD: Ministerio de medio ambiente de Haití y Programa de la naciones unidas para el desarrollo

PNUMA: Programa de la naciones unidas para el medio ambiente

CFSR: Climate Forecast System Reanalysis

DEM: Digital elevation model (modelo de elevación digital)

## **I. INTRODUCCIÓN GENERAL**

### **1.1. ANTECEDENTES**

El desarrollo de las regiones se centra en el bienestar de sus habitantes, y los tiempos modernos plantean retos, que deben cumplir con las demandas por nuevos suelos, como consecuencia del rápido crecimiento de la población, el desarrollo económico y los mercados globales, que exigen un cambio sin precedentes en el uso de la tierra.

Durante los últimos 20 años, la expansión exponencial de la tierra cultivable se redujo, y la tierra se usa de una manera más intensa. En la década de 1980, una hectárea de tierra cultivable producía en promedio 1.8 toneladas de alimento, mientras que ahora, tiene una producción general de 2.5 toneladas. Más de la mitad de la población mundial vive en ciudades y crece con mucha rapidez sobre todo en los países en vías de desarrollo (PNUMA, 2007).

De acuerdo al Plan de Cogestión elaborado por el Ministerio de Medio Ambiente, la República de Haití, al igual que muchos países de América Latina y el mundo, basa su desarrollo económico en los recursos naturales. Es evidente que la falta de políticas apropiadas y los factores socioeconómicos limitantes, han propiciado que muchos recursos naturales sean explotados de manera excesiva, hecho que genera contaminación ambiental, conflictos y bajas perspectivas sociales para superar la pobreza por una mejor calidad de vida. (MDE-PNUD, 2012)

Un aspecto relevante presente en la República de Haití es la degradación de las cuencas debido a la deforestación, erosión del suelo, contaminación, deslizamientos de tierra, inundaciones, escasez de agua y falta de oportunidades para mejorar la calidad de vida; por tanto la planificación del uso de la tierra a nivel cuenca es importante porque se integran procesos de construcción social, desarrollo económico y conservación de los recursos.

### **1.2. JUSTIFICACIÓN**

La erosión y la degradación del suelo, son parte del desarrollo de los horizontes del suelo mediante el desprendimiento físico, transporte y deposición de partículas del mismo. El desprendimiento es la dislocación de partículas de suelo de la masa misma del suelo por agentes erosivos como el viento y agua. El transporte es el desplazamiento de sedimentos desde el lugar de origen (Foster et al, 1982).

La erosión del suelo afecta negativamente a la ecología y puede conducir a la reducción de productividad de los cultivos, menor calidad del agua, depósitos que reducen los niveles de agua, las inundaciones y la destrucción del hábitat (Park et al., 2011).

Muchas actividades humanas son importantes factores que afectan la capacidad del suelo de sostenerse ante las fuerzas erosivas y en ese sentido la deforestación, el sobrepastoreo y las malas prácticas de cultivo son actividades comunes en muchas cuencas del mundo, y la

zona de estudio no es la excepción, tal como lo explica el MDE-PNUD (2012) en el plan de cogestión desarrollado para la Unidad Hidrográfica de Aquin/Saint Louis du Sud, el cual se enmarca en la política del gobierno de Haití para cambiar la dinámica de la grave degradación ambiental y la reducción de la pobreza a nivel cuenca, planteando el aumento de la cobertura vegetal en las zonas degradadas, al igual que la productividad agrícola y la producción con la participación de todos los actores (estatales, socio-políticos, las personas beneficiarias) que operan en la unidad.

Para resolver muchos problemas de los cultivos, el suelo y el manejo de cuencas, se requiere hacer estimaciones de la erosión, ya que este último es un problema significativo a nivel del país con diferentes grados de severidad (MDE-PNUD, 2012).

Por tal motivo, es necesario dar un manejo adecuado a los recursos naturales, tratando de ejercer sobre ellos la menor presión posible, proporcionando información suficiente con la cual se pueda direccionar los programas y proyectos de una manera 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 una mejor toma de decisiones.

### **1.3. IMPORTANCIA**

Hasta la fecha más de dos terceras partes de la población haitiana, especialmente en las zonas rurales del país, dependen en gran medida de los recursos naturales que constituyen la base de sus actividades. Sin embargo, la rápida degradación de estos recursos acarrea un grave peligro debido al impacto negativo sobre el futuro del país, ya que conduce al empobrecimiento de la población rural. La deforestación amenaza el medio ambiente de Haití, principalmente a causa de la producción de carbón de leña, que corresponde al 80 % de la energía en este país, que se transformó en un recurso alternativo financiero para los agricultores haitianos (MDE-PNUD, 2012).

La deforestación, en áreas río arriba, produce un aumento de la escorrentía y la tasa de erosión. Acelerar la erosión del suelo, la precipitación y modifica el ciclo del agua, además, reduce la capacidad del suelo para retener el agua durante los períodos de lluvia. La deforestación contribuye a la reducción de la productividad agrícola, al aumento de riesgo por inundaciones, la sedimentación de los ríos y las aguas costeras (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.

La importancia del estudio radica en la posibilidad de ser aplicado en cualquier cuenca, generar información para tomar medidas de manejo de suelos ya sea de tipo correctivo o preventivo. Además, constituye un antecedente del estado de las cuencas, de modo que se

observa tanto la erosión como la producción de sedimentos en los años próximos para mitigar los procesos de degradación existente en el lugar, las inundaciones en la cuenca baja, reducir la vulnerabilidad a riesgos de la población, mejorar la producción y conservar los recursos naturales.

## 1.4. OBJETIVOS

### 1.4.1. General

Estimar la erosión laminar y la sedimentación con modelos hidrológicos para la selección de prácticas de conservación de suelos y cambios de cobertura en la Unidad Hidrográfica de Aquin/Saint-Louis Du Sud- Haití

### 1.4.2. Específicos

- Estimar la erosión hídrica laminar de tres escenarios relacionados con la cobertura vegetal y las prácticas de conservación de suelos en una cuenca de la Unidad Hidrográfica Aquin/Saint-Louis Du Sud.
- Estimar la producción de sedimentos de tres escenarios y bajo modelos de cambio climático en una cuenca de la unidad hidrográfica de Aquin/Saint Louis Du Sud.
- Realizar un diagnóstico y validación de la información secundaria.

## 1.5. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

OBJETIVOS ESPECÍFICOS	PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN
<p><b>Obj. 1:</b> Estimar la erosión hídrica laminar de tres escenarios relacionados con la cobertura vegetal y las prácticas de conservación de suelos en una cuenca de la Unidad Hidrográfica Aquin/Saint-Louis Du Sud en Haití</p>	<p>¿Cuál es la zona de mayor erosión laminar dentro la Unidad Hidrográfica Aquin/Saint-Louis Du Sud?</p> <p>¿Qué cobertura vegetal y prácticas de conservación son las recomendables para disminuir la erosión laminar dentro la cuenca seleccionada?</p>
<p><b>Obj. 2:</b> Estimar la producción de sedimentos de tres escenarios y bajo modelos de cambio climático en una cuenca de la unidad hidrográfica de Aquin/Saint-Louis Du Sud en Haití</p>	<p>¿Cuál escenario estima menor cantidad de sedimentos hasta el año 2030 tomando en cuenta el cambio climático en un escenario A2?</p>
<p><b>Obj. 3:</b> Realizar un diagnóstico y validación de la información secundaria</p>	<p>¿Cuáles son los resultados obtenidos del taller con el grupo focal?</p>

## **II. MARCO CONCEPTUAL**

En el siguiente apartado se describen las bases conceptuales sobre las que se enmarca el presente trabajo de investigación.

### **2.1. LA EROSIÓN HÍDRICA**

La erosión hídrica es un proceso físico definido 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; Paulet, 1974)

Este tipo de erosión puede presentarse en forma laminar en surcos y cárcavas. La erosión laminar es menos evidente y a veces más dañina, al lavar el suelo más fértil y que contiene los fertilizantes que se aplican en el cultivo (FAO, 1967)

La erosión hídrica constituye la mayor fuente de erosión en el mundo. En la erosión hídrica se dan los siguientes fenómenos:

- Erosión laminar
- Erosión en surcos
- Erosión en cárcavas

#### **2.1.1. Erosión laminar**

De acuerdo a Vahrson (1991) la erosión laminar está directamente relacionada con la salpicadura de la lluvia, a lo que se puede agregar, que en laderas más de la mitad de la salpicadura desciende por la misma. Si esta corriente se mantiene como una delgada lámina, el tipo de erosión que produce se conoce como erosión laminar. La erosión laminar y en surcos pequeños es la forma de erosión que más afecta la agricultura por degradación y pérdida del horizonte A de los suelos, y a la vez afecta más significativamente a la producción de sedimentos en los ríos.

Morgan (1997), describe a la erosión como un proceso de desgaste del suelo generalmente lento, debido a la influencia de algún factor físico o agente erosivo de los cuales el agua y aire son los principales causantes. Este proceso mecánico consta de dos fases, una de ellas es el desprendimiento de las partículas del suelo y el otro consiste en el arrastre de estas partículas, teniendo efectos directos sobre la fertilidad del suelo, ya que en las capas superficiales es donde se concentran gran parte de los nutrientes; pérdidas de recurso hídrico, ya que al no haber nutrientes, no crecen las plantas que son quienes ayudan a retener agua en el subsuelo; riesgos de inundaciones, debido a que al disminuir la capacidad del suelo de retener agua aumenta la escorrentía superficial, escorrentía que aumenta las cargas sólidas que van a ser depositadas en cuerpos de agua muchas veces



desviando sus cursos. Este proceso afecta directamente la vulnerabilidad de las poblaciones, a los ecosistemas y productividad.

### **2.1.2. Erosión en surcos**

La erosión en surcos es la forma de erosión más fácilmente perceptible, tiene su origen a causa del escurrimiento superficial del agua que se concentra en sitios irregulares o depresiones superficiales del suelo desprotegido o trabajado inadecuadamente. (FAO, 2000)

Este fenómeno es producto de pequeñas irregularidades de las pendientes del terreno, la escorrentía se concentra en algunos sitios hasta adquirir volumen y velocidad suficientes para hacer cortes y formar surcos (Suárez, 1980, citado por Farfán, 2002)

En la medida que aumenta la velocidad del flujo, el agua incide en el suelo y se forman los arroyuelos, que son canales continuos de anchura reducida y escasa profundidad, pudiendo ser eliminados por la labranza agrícola (Lal, 1980 citado por Valcarcel, 1989).

### **2.1.3. Erosión en cárcavas**

Se denomina cárcava al estado más avanzado de la erosión en surcos. En función de la pendiente y de la longitud de la ladera del terreno, el flujo concentrado de agua provoca el aumento de las dimensiones de los surcos formados inicialmente, hasta transformarse en grandes zanjas llamadas *cárcavas* (FAO, 2000)

La erosión en cárcava, consiste en el vaciado de las partículas del suelo o sustrato por un flujo concentrado que da lugar a estrechas incisiones, de mayor tamaño y profundidad que un reguero, y que generalmente llevan agua sólo durante e inmediatamente después de fuertes precipitaciones (Osterkamp, 2008).

La formación de una cárcava por flujo superficial frecuentemente aparece ligada a un incremento en la escorrentía. Dicho incremento, puede deberse a varias causas: cambios en el uso del suelo, modificaciones en el área de drenaje motivadas por el hombre, eventos de precipitación de características extremas, etc. (Nyssen et al., 2002).

Al respecto Morgan (1997), señala que al comparar estas depresiones con los cauces permanentes, relativamente llanos y cóncavos en su perfil, las cárcavas se caracterizan por tener cabeceras y saltos a lo largo del curso. Además poseen mayor profundidad, menor anchura que los cauces estables y transportan una mayor cantidad de sedimentos.

## **2.2. MECÁNICA DEL PROCESO DE EROSIÓN HÍDRICA**

Según Wischmeier (1959), el proceso de erosión hídrica comienza primeramente por el desprendimiento de las partículas de suelo, de las partes elevadas de un terreno. El desprendimiento de estas partículas puede ser llevado a cabo por la lluvia y por el escurrimiento superficial, ya que ambos pueden llegar a poseer la suficiente energía para

desprender partículas del suelo. La lluvia y el escurrimiento además de llevar a cabo la función de desprendimiento, también realizan la función de transporte de suelo.

Sánchez, mencionado por Asturias (1986), indica que la mecánica del proceso de erosión hídrica consta de tres etapas:

- Desprendimiento
- Arrastres o transporte
- Deposición o sedimentación

### **2.2.1. Etapa de desprendimiento**

Consiste en el desprendimiento de las partículas del suelo por la acción del impacto de las gotas de lluvias en la superficie, y por el constante choque de las mismas, que mantienen en suspensión las partículas finas y en rodamiento las gruesas. La dispersión de las partículas sella los poros superficiales, lo que disminuye la capacidad de infiltración del agua.

En esta etapa tiene importancia la cubierta vegetal, ya que suelos desprovistos de vegetación son susceptibles al desprendimiento.

### **2.2.2. Etapa de arrastres o transporte**

El arrastre de partículas, sucede cuando el agua no se filtra en el suelo y se produce el escurrimiento superficial. La capacidad erosiva de este último está determinado por la cantidad, intensidad y distribución de las gotas de lluvia.

### **2.2.3. Etapa de deposición o sedimentación**

Ocurre cuando la velocidad del flujo disminuye y las partículas en suspensión se sedimentan en la superficie del suelo.

## **2.3. FACTORES QUE ORIGINAN LA EROSIÓN HÍDRICA**

Bergsma (1998), indica que los procesos de erosión dependen de la precipitación, del material, de la posición relativa en el paisaje (sobreflujo y humedad antecedente), de la forma de la pendiente, del uso y manejo del suelo.

Para Dourojeanni, et. al. (1976), los principales factores que se relacionan al proceso de la erosión hídrica son: precipitación, cobertura vegetal, suelo y topografía; y los clasifica en factores de acuerdo a su acción (activos y pasivos):

Factor activo: precipitación

Factor pasivo: cobertura vegetal, suelo y topografía

### **2.3.1 Precipitación**

La erosión hídrica es el resultado de la energía producida por el agua al precipitarse sobre la tierra y al fluir sobre la superficie de los terrenos. La lluvia ejerce su acción erosiva sobre el suelo mediante el impacto de las gotas, la cual desprende y dispersa las partículas de suelo. Mientras mayor sea la velocidad de la gota, mayor será la cantidad de suelo esparcido (Bisal, citado por Kirkby, 1984).

Según Kirkby (1984), las interacciones del tamaño, velocidad y forma de las gotas de lluvia, la duración de la tormenta y la velocidad del viento controlan la fuerza erosiva de la lluvia.

Para Gunn y Kinzer citados por Kirkby (1984), a medida que las gotas de lluvia aumentan de tamaño, su velocidad terminal también aumenta. A mayor velocidad terminal, habrá mayor energía cinética y por lo tanto mayor poder erosivo. Considerando velocidad terminal como la máxima velocidad que alcanza una gota de lluvia al momento de hacer contacto con la superficie del suelo.

### **2.3.2. Escurrimiento**

Es la parte de la precipitación que escurre por el suelo y luego regresan al mar o fuentes de agua (Chow et al, 1994). La esorrentía sucede cuando la intensidad de lluvias excede la tasa de infiltración, es decir cuando el suelo está saturado y depende de la intensidad de las lluvias, tipo de suelo y su estado superficial, de la cobertura del suelo y de la pendiente (Scherrer y Naef, 2003).

Ríos (1987), indica que el escurrimiento superficial ocurre cuando la intensidad de lluvia es mayor que la capacidad de infiltración de suelo. Este flujo de agua tiene la capacidad de remover y transportar las partículas de suelo, la cual está en función de la velocidad del flujo que depende de la pendiente del terreno y de la profundidad de la lámina de agua.

Según Wischmeier (1959), el escurrimiento cumple con dos funciones en el proceso de erosión, estas son: la de desprendimiento de partículas de suelo (fuerza cortante) y la de transporte.

### **2.3.3. El suelo**

Es evidente el importante papel que juega el suelo en la cubierta vegetal, siendo por tanto necesario su conocimiento tanto para establecer un mejor aprovechamiento como para evitar deterioros irreversibles de la misma o la aparición de fenómenos degradatorios derivados de su inadecuado uso, y que toda ordenación de cuencas trata de evitar o corregir. Otro papel importante del suelo en los fenómenos que aborda es el componente que representa en el régimen hidrológico (Grupo TRAGSA, 1998).

Según la FAO (1980), la degradación, en términos de productividad, es un proceso que rebaja la capacidad actual y potencial del suelo para producir (cualitativa y/o cuantitativamente) bienes o servicios.

La erodabilidad del suelo es su vulnerabilidad o susceptibilidad a la erosión. Un suelo con erodabilidad elevada sufrirá más erosión que un suelo con erodabilidad baja si ambos están expuestos al mismo tipo de lluvia. Dentro de los factores que influyen en la erodabilidad están en primer lugar las características físicas del suelo, es decir, el tipo edáfico, y en segundo lugar, el manejo a que se le haya sometido. Entonces desde el punto de vista para su control, interesan aquellas propiedades que incrementan su capacidad de infiltración, ya que serán importantes para reducir la escorrentía, y aquellas que aumentan la resistencia a su dispersión y transporte para que ésta sea mínima (Kirkby y Morgan, 1984).

El agua que un suelo retiene depende en parte de su contenido de materia orgánica, cuyo papel en el mejoramiento de la estructura es muy importante. Además, actúa como formador de agregados aumentando la porosidad y la velocidad de infiltración. En términos generales la permeabilidad es un indicador de la resistencia a la erosión, superficial, ya que la infiltración, la escorrentía y la erosión son procesos muy relacionados entre sí (Baver et al. 1983).

#### **2.3.4. La cobertura vegetal**

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. El efecto de los bosques se debe principalmente a los diferentes estratos de vegetación que interceptan la lluvia reduciendo su energía y la presencia de un mantillo protector del suelo (FAO, 1967). EN los bosques tropicales las pérdidas de suelo por erosión hídrica son muy bajas (Mozo, 1967).

Por otra parte, la vegetación al morir y descomponerse, aumenta el contenido de materia orgánica y de humus del suelo y con ellos la porosidad y capacidad de retención de agua de los terrenos (Paulet, 1974, Suárez de Castro, 1980).

Ayres, citado por Suarez de Castro (1980), indica que la vegetación protege al suelo contra la erosión, relacionando el aumento en la infiltración con la protección directa contra el impacto de las lluvias. Estas influencias de la vegetación varía según los cultivos, el suelo, el clima y con el tipo de material vegetativo, particularmente las raíces, la altura de las plantas y los residuos vegetales.

Según Bergsma (1998) el efecto de la cobertura influye en la erosión de la siguiente manera:

**Cuadro 1.** Influencia de la cobertura vegetal sobre la pérdida de suelo por erosión hídrica

<b>Vegetación</b>	<b>Densidad aparente (g/cc)</b>	<b>Escurrentía de la precipitación (%)</b>	<b>Transporte de suelo (mm/año)</b>	<b>Pérdida de suelo (t/ha/año)</b>
Bosque	1.2	0.8	0.01	0.1
Pradera	1.8	4	0.05	0.5
Suelo desboscado	1.5	8	0.1	1.5
Barbecho	1	49	24.5	336
Suelo arado				
Perpendicular a la pendiente	1.3	47	11	159
Paralelo a la pendiente	1.4	58	30	447

Fuente. Bergsma (1998)

### **2.3.5. La pendiente**

De acuerdo a Morgan (1997) sobre una superficie plana las gotas de lluvia salpican las partículas del suelo aleatoriamente en todas direcciones, mientras que en un terreno en pendiente, más partículas de suelo son salpicadas pendiente abajo, aumentando así la proporción en función de la inclinación de la pendiente.

A medida que aumenta la pendiente y el largo de la pendiente, aumenta la velocidad y el volumen del agua de escurrentía, y su poder erosivo (Cubero, 1994 citado por Vargas, 2010).

Generalmente, sobre las lomas de gran longitud, los perjuicios de la erosión pueden resultar más cuantiosas que en lugares de pendiente corta (FAO, 1967).

### **2.3.6. La actividad humana**

Se manifiesta en las actividades que conllevan fenómenos como la degradación de las propiedades resistentes del suelo y el aumento de escurrentía superficial. Las prácticas inadecuadas de cultivo, la agricultura en terrenos inclinados, la deforestación, el sobrepastoreo y el mal diseño en la construcción de carreteras y caminos, entre otras obras civiles, son elementos que favorecen el fenómeno erosivo (Gómez, 2002).

Debe mencionarse, como contraparte, la aplicación de todas aquellas técnicas que contribuyen al mejoramiento y protección de los suelos. Así, si se logra mejorar la capacidad de infiltración de los mismos y encauzar las aguas de escurrentía, de modo que no generen el lavado del suelo; se actúa de forma directa sobre el problema (Marchamalo, 2007 citado por Vargas, 2010).

Dentro de la actividad humana se pueden citar prácticas mecánicas como las acequias de ladera, las terrazas individuales, las terrazas de huerto, prácticas agronómicas-culturales como la siembra en contorno, la rotación de cultivos, las barreras vivas y muertas y prácticas forestales-agrológicas, por ejemplo: el establecimiento de pastura con fines de protección, el

manejo de vegetación natural, los sistemas agroforestales y el pastoreo sistematizado (Gutiérrez, 1987).

Faustino mencionado por Gutiérrez (1987), señala que en general las prácticas de conservación de suelos pueden dividirse en:

- Prácticas mecánicas – estructurales: prácticas que se basan en el movimiento de tierras y requieren de conocimiento de ingeniería. Normalmente estas medidas están destinadas a disipar la energía y/o controlar la descarga del agua, como acequia de ladera, terrazas individuales, terrazas de huerto.

- Prácticas agronómicas – culturales: que tienen como objetivo principal disminuir la velocidad del agua de escorrentía, interceptar y retener el suelo que aquella arrastra, y se puede realizar por medio de labranza mínima, siembra en contorno, rotación de cultivos, barreras vivas y muertas.

- Prácticas forestales – agrostológicas: cuyo objetivo es la protección del suelo contra el impacto de la lluvia y control del escurrimiento favoreciendo la infiltración del agua, y se puede realizar por medio del establecimiento de pastura con fines de protección, manejo de vegetación natural, sistemas agroforestales y pastoreo sistematizado.

#### **2.4. ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELO (RUSLE)**

Wischmeier y Smith (1978) condujeron a la formulación del modelo de predicción de pérdida de suelo. Esta investigación para la predicción de erosión de suelos se consolidó en un esfuerzo cooperativo que tenía por objeto superar muchas de las desventajas inherentes a los proyectos de investigación local o regional. Se compilaron datos de investigación de la erosión en las 8250 parcelas-año de 36 localidades de EEUU. Se hizo una reevaluación de los diversos factores que afectaban la pérdida de suelo, en la denominada ecuación universal de pérdida de suelo. La cual es representada por:

$$A=R * K * L * S * C * P$$

Dónde:

**A:** Promedio anual de pérdida de suelo, en [t/ha/año]. Puede ser computada sobre una base de probabilidades tales como una vez en dos años, una vez en cinco años y otros. Pero para esto, el factor R debe ser calculado con igual frecuencia.

**R:** Es el factor de erosividad de la lluvia. Es el producto acumulado para el período de interés (en planificación agropecuaria generalmente un año) con cierta probabilidad de ocurrencia (normalmente 50% o promedio) de la energía cinética por la máxima intensidad en 30 minutos de las lluvias. Sus dimensiones son [ $J/m^2*cm/hr/año$ ], según Grupo Tragsa (1998), aunque por simplicidad conviene pensar en energía por unidad de superficie.

**K:** Es el factor erodabilidad del suelo. Es la cantidad promedio de suelo perdido por unidad de factor R, [ $t \cdot m^2 \cdot hr / J \cdot ha \cdot cm$ ] según Grupo Tragsa, (1998), cuando el suelo en cuestión es mantenido permanentemente desnudo, con laboreo secundario a favor de la pendiente (22.13 m de largo, 9% pendiente, en barbecho y labranza continua).

Los demás factores son relaciones a estándares y no tienen dimensiones:

**L:** Es el factor de longitud de la pendiente. Es la relación entre la erosión con la longitud de pendiente dada y la que ocurre en el estándar de 22.1 m de longitud, a igualdad de los demás factores.

**S:** Es el factor de inclinación de la pendiente. Es la relación entre la erosión con una inclinación de pendiente dada y la que ocurre en el estándar de 9% de inclinación, a igualdad de los demás factores.

**C:** Es el factor de uso y manejo. Es la relación entre la erosión de un suelo con un determinado sistema de uso y manejo y la que ocurre en el mismo suelo puesto en condiciones estándar en que se definió el factor K, a igualdad de los demás factores.

**P:** Es el factor de práctica mecánica de apoyo de conservación. Es la relación entre la erosión que ocurre con una determinada práctica mecánica de apoyo, como cultivo en contorno, barreras vivas, o cultivo en terrazas y la que ocurre con la condición estándar de laboreo a favor de la pendiente, a igualdad de los demás factores.

#### **2.4.1. Factor R (erosividad de la lluvia)**

Wischmeier y Smith (1959) presentaron un índice de erosividad o factor R basado en la relación directa entre: la energía cinética (E) y la intensidad de la lluvia (I).

##### **a) Energía cinética de la lluvia (E)**

La energía cinética representa el trabajo por golpeteo y salpicadura de las gotas de lluvia caídas sobre la superficie del suelo. Obtuvieron una alta correlación entre la intensidad de las lluvias y su energía.

##### **b) Máxima intensidad en 30 minutos**

Indican que cuando el computo de energía de la lluvia, es multiplicada por la máxima intensidad de las lluvias con duración de 30 minutos, se obtienen altas correlaciones con las pérdidas de suelo.

Una vez conocida la energía cinética total y la máxima intensidad en 30 minutos de la lluvia se calcula el índice EI30 de acuerdo a la siguiente expresión:

$$EI_{30} = Ec * I_{30}$$

Dónde:

$E_c$  = Energía cinética total de lluvia en  $\text{Kg/m}^2$

$I_{30}$  = Máxima intensidad en 30 minutos en  $\text{mm/hr}$

Este producto fue denominado índice de erosividad y significa que el potencial erosivo de la lluvia está en función de la cantidad de la misma y de su máxima velocidad de caída sobre la superficie del suelo. Representa los efectos totales del impacto de las gotas de lluvia.

#### **2.4.2. Factor K (erodabilidad del suelo)**

Wischmeier, et. al. (1979) definieron, que el factor es función del porcentaje de limo y arena fina, del porcentaje de arena gruesa, de la estructura del suelo, de su permeabilidad, y del porcentaje de materia orgánica que posee.

De acuerdo al Grupo Tragsa (1998), el factor K del suelo se evaluó de forma experimental en las parcelas tipo. Para cada suelo se mide la relación entre el peso de suelo perdido ( $\text{t/ha}$ ) y el número de unidades del índice de erosión pluvial correspondientes, en condiciones de barbecho continuo. Con el conjunto de los valores obtenidos se calcula el promedio de K para cada suelo, a partir del suelo se establece una ecuación de regresión en función de las variables representativas de sus propiedades físicas.

La regresión establecida viene expresada por la ecuación:

$$K = [10^{-4} * 2.71 * M^{1.14} * (12 - mo)^* + 4.20 (s - 2) + 3.23 (p - 3)] / 100$$

Dónde:

**K** = Factor de erodabilidad del suelo [ $\text{t} * \text{m}^2 * \text{hr/ha} * \text{J} * \text{cm}$ ]

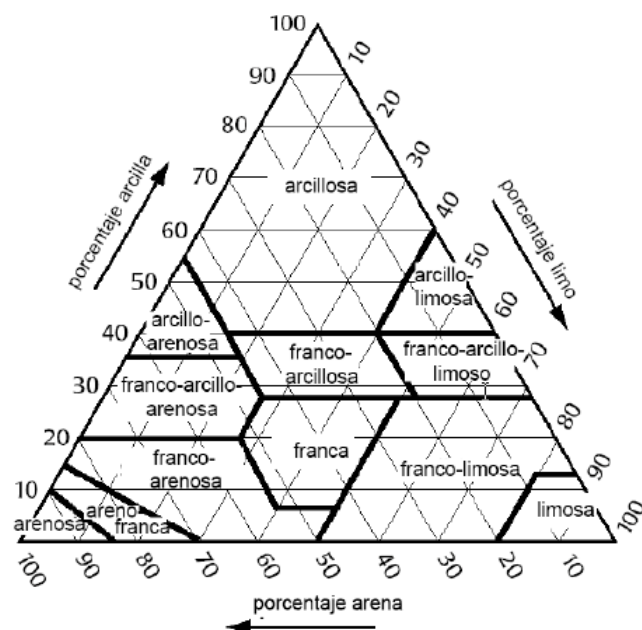
**mo** = Materia orgánica [%]

**s** = Código de la estructura del suelo

**p** = Código de permeabilidad

**M** = Producto de las fracciones del tamaño de las partículas primarias ó ( $\% \text{limo} + \% \text{arena muy fina}$ ) \* ( $100 - \% \text{arcilla}$ )





**Figura 1.** Monograma para determinar la textura de suelo  
Fuente. Velásquez, 2012

**Cuadro 2.** Códigos de permeabilidad y estructura del suelo en función de su textura

Clase de textura	Permeabilidad (código P)	Conductividad hidráulica saturada (mm/hr)	SCS grupo hidrológico del suelo
Arcilla, franco arcilloso	6	< 1	D
Arcillo arenoso, franco arcillo limoso	5	1 – 2	C – D
Franco arcillo arenoso, franco arcilloso	4	2 – 5	C
Franco limoso, franco	3	5 – 10	B
Areno franco, franco arenoso	2	10 – 60	A
Arena	1	>60	A

Fuente: Mannaerts, 1999 citado por Velásquez, 2012

Debe multiplicarse por 0.1317 para que queden en unidades del sistema internacional (SI).

### 2.4.3. Factor LS (longitud y pendiente)

Es el efecto de la topografía en la erosión. Generalmente, el factor L y S se consideran juntos. Los factores LS juntos son iguales a 1 bajo condiciones de la parcela unitaria de 22.1 m y 9% de inclinación. Los valores de L y S son relativos y representan que tan erodable es una longitud e inclinación particulares en relación a los 22.1 m de largo y 9% de inclinación de la parcela unitaria. Por lo tanto, algunos valores de LS son menores que 1 y otros mayores que 1.

### a) Longitud de pendiente (L)

Según el grupo Tragsa (1998) el factor L, longitud del declive, viene definido por:

$$L = (\lambda / 22.13)^m$$

Dónde:

L = Factor de longitud de pendiente

$\lambda$  = Longitud de la pendiente [m]

m = Exponente de la longitud de la pendiente

22.13 = Longitud de parcela unitaria RUSLE

Donde  $\lambda$  es la longitud del declive en metros y "m" un exponente influenciado principalmente por la interacción entre la longitud del declive y la pendiente. La longitud se define como la distancia desde el origen de la escorrentía superficial hasta el inicio del depósito de sedimentos, o que la escorrentía se concentre en un cauce.

El exponente de longitud de pendiente "m", determina la relación entre erosión en surcos (causada por flujo) y erosión entresurcos (causado por impacto de gotas de lluvia), puede ser calculado con la siguiente ecuación:

$$m = 0.1342 * (\ln(\Theta)) + 0.192$$

Dónde:

m = Exponente de la longitud de la pendiente

$\Theta$  = Angulo de pendiente [%]

### b) Inclinación de la pendiente (S)

Wischmeier (1982), citado por el grupo Tragsa (1998) obtuvo el factor topográfico en base a las siguientes ecuaciones:

$$S = 10.8 * \text{sen } \Theta + 0.03$$

Si:  $s < 9\%$

$$S = 16.8 * \text{sen } \Theta - 0.5$$

Si:  $s \geq 9\%$

Donde:

S = Factor de inclinación de pendiente

s = Inclinación de pendiente [%]

$\Theta$  = Angulo de pendiente [°]

También existe un procedimiento sencillo de cálculo utilizando una tabla que permite asignar directamente a una ladera el valor del factor LS en función de la pendiente.

#### **2.4.4. Factor C (cobertura vegetal)**

La vegetación actúa como una capa protectora o amortiguadora entre la atmósfera y el suelo. Los componentes aéreos, como hojas y tallos, absorben parte de la energía de las gotas de lluvia, del agua en movimiento y del viento, de modo que su efecto es menor que si actuaran directamente sobre el suelo, mientras que los componentes subterráneos, como los sistemas radicales, contribuyen a la resistencia mecánica del suelo (Morgan, 1997).

De acuerdo a Kirkby y Morgan (1980), citados por el Ministerio de Obras públicas, (1995) el factor de cultivo (C) es un factor combinado que refleja la influencia de: a) las secuencias en la cubierta vegetal (en el caso de cultivos); b) los tipos de cubierta vegetal, y c) la cantidad de aguaceros caídos durante los períodos en que las prácticas agrícolas dejan desprotegido el suelo.

El factor C es la relación entre la pérdida de suelo en un terreno cultivado en condiciones específicas y la pérdida correspondiente del suelo en barbecho continuo. Esta comparación se hace suponiendo que son semejantes las condiciones de suelo, pendiente y lluvia.

El factor C ya se ha definido como la relación entre las pérdidas de suelo que se producen bajo una alternativa y con unas determinadas técnicas de cultivo, y las pérdidas correspondientes al barbecho continuo. Grupo TRAGSA (1998).

#### **2.4.5. Factor P (prácticas de control de la erosión)**

Es la relación de pérdida de suelo con prácticas de soporte a la pérdida correspondiente con labranza en pendiente, la cual tiene un valor de 1.

Se ha considerado como una variable independiente y, por tanto, no incluido en el factor C, únicamente cuando se trata de las prácticas siguientes: cultivo a nivel, cultivo por fajas, y terrazas. Otras prácticas conservacionistas como rotación con cultivos herbáceos, tratamientos con fertilizantes, cubiertas artificiales, etc., se consideran dentro de los trabajos de cultivo, y por tanto, su influencia en las pérdidas de suelo se incluye dentro del factor C.

Según la guía del usuario de la RUSLE (1993) citado por Antezana (2001) y el Grupo TRAGSA (1998), el factor P varía según la pendiente del terreno, y sus valores pueden obtenerse en el cuadro 4. En el caso de prácticas de cultivo en terrazas, además del coeficiente P considerado, debe modificarse el factor L de longitud de declive, adoptando para la longitud entre terrazas consecutivas, cuando se quieran calcular los sedimentos que salen fuera del terreno aterrazado o para estimar su contribución al conjunto de sedimentos producidos en la cuenca.

**Cuadro 3.** Factor P de prácticas de conservación

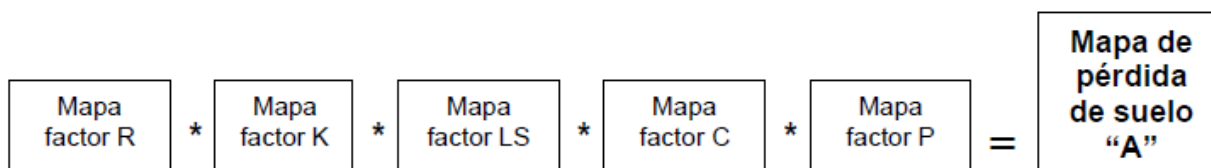
Pendiente %	Cultivo A nivel	Cultivo en Faja	Cultivo en terraza	
			a	b
1 – 2	0.60	0.30	0.12	0.05
3 - 8	0.50	0.25	0.10	0.05
9 - 12	0.60	0.30	0.12	0.05
13 – 16	0.70	0.35	0.14	0.05
17 – 20	0.80	0.40	0.16	0.06
21 - 25	0.90	0.45	0.18	0.06

Fuente: Wischmeier y Smith (1978), citados por el Grupo TRAGSA, 1998

A = Terrazas de desagüe encespadas

B = Terrazas de infiltración con contrapendiente

La estimación de la erosión se realiza con la ecuación de RUSLE:  $A = R * K * LS * C * P$ , con el que se obtendrá los valores de la tasa de pérdida de suelo.



**Figura 2.** Flujoograma para obtener el mapa de pérdida de suelo

Fuente: Antezana, 2001

## 2.5. 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. (Grupo 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.

La FAO, (1993) sostiene que la USLE y RUSLE fueron diseñados para predecir la erosión del suelo en pendientes como guía para la planificación de la conservación a nivel de predios. Sin embargo, combinándolos con proporciones de desplazamiento, pueden usarse para estimar el rendimiento de sedimento de cuencas. Proporciones de desplazamiento pueden ser

estimadas para cuencas específicas midiendo el rendimiento de sedimento y estimando la erosión total con métodos tales como USLE.

### 2.5.1. Ecuación Universal Modificada de Pérdida de Suelo (MUSLE)

USLE predice el promedio de la erosión total anual, como una función de la energía de lluvia. En MUSLE, el factor de energía de lluvia se reemplaza con un factor de escorrentía. Esto mejora la predicción de producción de sedimento, elimina la necesidad para proporciones de entrega, y permite que la ecuación sea aplicada a eventos individuales de tormenta. La predicción de producción del sedimento se mejora porque las escorrentías son una función de condición previa a la humedad, así como a la energía de lluvia. (Neitsch, et al. 2005)

Williams (1975) desarrolló la Ecuación Universal Modificada de Pérdida de Suelo (MUSLE). MUSLE es un modelo de parámetros "agrupados" que estima el rendimiento de sedimento de cuencas para un evento lluvioso único. Utiliza un factor de escurrimiento para reemplazar el factor de energía pluviosa del USLE.

La ecuación universal de pérdida de suelo (USLE. Wichmeier y Smith, 1962) ha sido modificada, MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation), reemplazando el factor R, índice de erosión pluvial, por los factores escorrentía y caudal, con vistas a predecir los sedimentos emitidos por la cuenca. (Grupo TRAGSA, 1995).

Neitsch, et al. (2005), explica que el modelo MUSLE queda definido por:

$$Y = 11.8 (Q * q_p)^{0.56} * K * LS * C * P$$

Dónde:

Y: Sedimentos aportados a una sección del cauce por un aguacero determinado sobre la cuenca vertiente (toneladas métricas)

Q: Escorrentía correspondiente a ese aguacero (m<sup>3</sup>)

q<sub>p</sub>: Caudal punta del hidrograma (m<sup>3</sup> \* seg<sup>-1</sup>)

Los factores K, LS, C y P se definieron en los anteriores subíndices.

Las unidades de Y se convierten en t\*ha<sup>-1</sup> cuando Q es en mm y q<sub>p</sub> es en mm\*ha<sup>-1</sup>. El factor de escurrimiento (Q x q<sub>p</sub>) proporciona una fuente de energía y, como la tasa de escurrimiento por unidad de superficie disminuye a medida que aumenta la superficie de drenaje, el modelo contiene una tasa de desplazamiento implícita. MUSLE es útil en cuencas con superficies de alrededor de 100 km<sup>2</sup> (FAO, 1993).

MUSLE puede ser una herramienta útil para predecir la producción de sedimentos de los pastizales también en cuencas de uso de suelo mixto (que contienen tanto los pastizales y tierras de cultivo). En consecuencia, MUSLE puede tener aplicación en múltiples tipos de cuencas (Smith, et al. 1984).

## 2.6. MODELO SWAT (SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL)

El Soil and Water Assessment Tool (SWAT) es un modelo para ser aplicado a nivel de cuencas hidrográficas desarrollado por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA). SWAT fue desarrollado para cuantificar y predecir el impacto de las prácticas de manejo de la tierra sobre la producción de agua, sedimentos nutrientes y sustancias químicas, productos de la actividad agrícola, en cuencas completas de gran extensión espacial, con diferentes tipos de suelos, usos de la tierra y condiciones de manejo; a lo largo de largos períodos de tiempo. El modelo tiene una base física y es computacionalmente eficiente, requiere datos de entrada relativamente fáciles de disponer y permite estudiar los impactos a largo plazo (Neitsch, et al. 2005).

El SWAT se basa en el balance hídrico para determinar la entrada, salida y almacenamiento de agua en la cuenca. Para la simulación, la cuenca hidrográfica se divide en pequeñas subcuencas de manera que los cálculos obtenidos sean lo más precisos posible. El modelo trabaja por unidades de respuesta hidrológica (HRU) obtenidas del cruce de los diferentes tipos de suelo (textura), con el uso y cobertura del suelo.

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

Donde  $SW_t$  es el contenido final de agua en el suelo (mm  $H_2O$ ),  $SW_o$  es el contenido inicial de agua en el suelo en un día  $i$  (mm  $H_2O$ ),  $t$  es el tiempo en días,  $R_{day}$  es la cantidad de precipitación diaria (mm  $H_2O$ ),  $Q_{surf}$  es la cantidad de escorrentía diaria (mm  $H_2O$ ),  $E_a$  la evapotranspiración diaria (mm  $H_2O$ ),  $W_{seep}$  la cantidad de agua que entra en la zona no saturada del perfil del suelo en el día  $i$  y  $Q_{gw}$  el flujo de retorno o flujo base diario (mm  $H_2O$ ). (Neitsch, et al. 2005).

Esta ecuación se fundamenta en que la escorrentía está determinada por el suelo, la cobertura del suelo y las prácticas de manejo que se realice. Las variables climáticas utilizadas por el SWAT son la precipitación, temperatura del aire, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa (Oñate, et al. 2007).

El SWAT es definido por 8 mayores componentes: hidrología, clima, erosión y sedimentación, temperatura del suelo, crecimiento de plantas, nutriente, pesticidas y manejo del suelo (Miller, et al. 2007). El presente estudio se va enfocar solo a los componentes de sedimentación y clima.

La producción de sedimento se estima para cada HRU con la ecuación modificada de pérdida universal de suelo (MUSLE). El modelo de la hidrología suministra estimaciones de

volumen de escorrentía y una tasa máxima de escorrentía que, con el área de la subcuenca, se utiliza para calcular la energía variable erosiva de escorrentía (Neitsch, et. al. 2005).

## 2.7. LUCHA CONTRA LA EROSIÓN DE LOS SUELOS

Según la FAO (1997), no hay soluciones aisladas para combatir la erosión de los suelos. Las medidas de este tipo dependen en gran parte de la situación económica del agricultor, la mayor o menor importancia concedida por las autoridades ambientales a la erosión de sedimentos y el nivel de desarrollo del país.

Bigi (sf), describe las prácticas de prevención para el control de la erosión en el departamento Sur de Haití:

**Cuadro 4.** Descripción de técnicas de conservación

<b>TECNICAS DE CONSERVACIÓN DE SUELOS</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
Técnicas tradicionales para la reducción de erosión	<p>Son tres tipos de jardines manejados dentro el hogar dependiendo superficie de terreno:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- devant-porte-kaye (500 a 1000 m<sup>2</sup>)</li> <li>- près-kaye (1000 a 5000 m<sup>2</sup>)</li> <li>- loin-kaye (&gt;5000 m<sup>2</sup>)</li> </ul> <p>En los tres se hace una rotación de cultivos, sistemas agroforestales con frutales, y delimitación de espacios con especies arbustivas y herbáceas; manteniendo las reservas de materia orgánica, y las propiedades físicas y químicas del suelo.</p>
Técnicas de conservación agronómicas	<p>La mejor manera de proteger los suelos de la erosión es con la cobertura vegetal, especialmente con cultivos permanentes en sistemas agroforestales, pero con una planificación de gestión de parcelas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Calendario rotacional</li> <li>- Cultivos en curvas de nivel</li> <li>- Evitar los mono cultivos en grandes extensiones</li> <li>- Cultivos asociados</li> </ul>
Técnicas de conservación hidráulicas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Barreras rompe vientos</li> <li>- Muros de piedra</li> <li>- Terrazas</li> <li>- Canales en contorno</li> <li>- Cultivos asociados en zanja de infiltración</li> </ul> <p>Para aplicar cualquier técnica, necesario seguir las curvas de nivel, y son recomendables utilizar técnicas combinadas.</p>

Fuente. Bigi (sf)

## 2.8. LIMITE DE TOLERANCIA DE PERDIDA 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 (Kirkby y Morgan, 1984).

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 el Grupo 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.

**Cuadro 5.** Clasificación de FAO – PNUMA – UNESCO (1981)

<b>Pérdidas de suelo</b>	<b>Grado de erosión hídrica</b>
<10	Ninguna o ligera
10 – 50	Moderada
50 – 200	Alta
>200	Muy alta

Fuente. Grupo Tragsa (1998)

## **2.9. CAMBIO CLIMÁTICO.**

El Artículo 1 de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC, 1992) describe el cambio climático como “un cambio del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y que viene a sumarse a la variabilidad climática natural observada”.

Según la CEPAL (2009), las estimaciones iniciales con respecto a la temperatura y precipitación, considerando una inacción mundial, es decir un escenario tipo A2, se tendría un aumento en la temperatura entre 3.6 °C y 4.7 °C hasta el año 2100, dependiendo del país. Se espera un promedio de reducción de la pluviosidad del 2%, con un rango entre 18 y 35%. Existe una alta variabilidad en los escenarios futuros de precipitación, lo que representa un riesgo adicional por la disponibilidad de los recursos hídricos.

Por otro lado, el Instituto Caribeño de Recursos Naturales (2008), indica que de acuerdo al estudio realizado en 2007 por el IPCC, las temperaturas del Caribe se incrementaran entre 1.4 y 3.2 °C. Las Antillas Mayores disminuirán la precipitación en los meses de junio, julio y agosto. Muy probablemente se elevara el nivel del mar de 0.18 a 0.59 m alrededor de las islas del Caribe y habrá un incremento global de los huracanes, con picos más altos para las velocidades de los vientos las precipitaciones intensas.



### **III. CONTRIBUCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN AL DESARROLLO DENTRO LA UNIDAD HIDROGRÁFICA DE AQUIN/SAINT LOUIS DU SUD HAITÍ**

Según el diario ABC (2010), Haití es el país más pobre de América con un ingreso promedio anual de 560 dólares por persona. Se ubica en el puesto 146 de 177 países en el Índice de Desarrollo Humano, UNDP.

Con 2.3 millones de habitantes, Puerto Príncipe es la capital del país. Otras ciudades importantes son Cabo Haitiano (norte), Gonaives (noroeste), Cayes (sur), Jacmel (sudeste).

Más de la mitad de la población, cerca de 9 millones de personas, vive con menos de 1 dólar por día y un 78% con menos de 2 dólares. Existe una alta tasa de mortalidad infantil (60 muertes por cada 1.000 nacimientos) y el 2.2% de quienes tienen entre 15 y 49 años son seropositivo.

La infraestructura en Haití está cerca de un colapso total y la grave deforestación ha dejado sólo un 2% de los bosques.

La DW (2013) y Oxfam International (2014), indican que Haití ha sufrido repetidamente desastres naturales que ha retrasado su desarrollo socioeconómico. Debido a sus grandes franjas costeras, el país es muy vulnerable ante los huracanes. Además, Haití se encuentra ubicado justo en la zona limítrofe entre dos placas tectónicas, la placa del Caribe y la placa Norteamericana, y por eso es una región muy propensa a los terremotos. El 12 de enero de 2010 se produjo un terremoto cerca de la capital, y murieron aproximadamente 220.000 personas. Este fue uno de los terremotos más fuertes en la historia de América del Norte y del Sur.

El terremoto afectó en total a más de tres millones de personas, alrededor de un tercio de la población de Haití. Aún tres años más tarde, muchas personas siguen sufriendo las consecuencias. Se calcula que el terremoto dejó sin hogar a 1.500 millones de personas aproximadamente, de las cuales unas 350.000 todavía hoy viven en campamentos, además de una epidemia de cólera que empezó en octubre de 2010 y que aún hoy continúa. La razón por la que el país lleve una recuperación tan lenta está en que ya era pobre antes del terremoto; además que sufrió el azote de otras tormentas tropicales posteriormente.

De acuerdo al Plan de Cogestión elaborado por el Ministerio de Medio Ambiente, I República de Haití, al igual que muchos países de América Latina y el mundo, basa su desarrollo económico en los recursos naturales. Es evidente que la falta de políticas apropiadas y los factores socioeconómicos limitantes, han propiciado que muchos recursos naturales sean explotados de manera excesiva, hecho que genera contaminación ambiental, conflictos y bajas perspectivas sociales para superar la pobreza por una mejor calidad de vida (MDE-PNUD, 2012).

Los habitantes en Haití explotan sus recursos naturales de manera insostenible, talando árboles para la fabricación de carbón, para la habilitación de tierras para agricultura y ganadería que se estable en zonas altas y medias de las cuencas, favoreciendo en gran medida a la erosión por que arrastra los suelos fértiles, dejando en muchos lugares la roca madre al descubierto, y aumenta la producción de sedimentos que al acumularse en los cauces de los ríos disminuyen tanto la calidad y cantidad de agua disponible, además que aumentan las inundaciones en las poblaciones cercanas a los ríos en época de lluvias.

Debido a estos problemas el ministerio de medioambiente junto con el PNUD, realizaron estudios en la Unidad Hidrográfica de Aquin/Saint Louis, con la finalidad de conocer la situación actual del lugar en relación a sus recursos naturales, el grado de vulnerabilidad, aspectos sociales y económicos, además de su hidrología; teniendo como producto final el plan de cogestión de la Unidad Hidrográfica de Aquin/Saint Louis.

En resumen el plan permite entender la situación de los pobladores del lugar, los medios de vida existentes, y sobre todo la situación en que los recursos naturales se encuentran, haciendo énfasis en la necesidad imperiosa de restaurar la zona con un enfoque ambiental y sostenible.

Tomando en cuenta lo anterior se realizó esta investigación con datos de estudios previos y se obtuvieron resultados elevados con relación al grado de erosión y producción de sedimentos, los cuales muestran un grave problema en el lugar y denotan la importancia de tomar acciones inmediatas como las planteadas en el plan de cogestión para el manejo de las cuencas en la mencionada Unidad Hidrográfica.

Conocer el grado de erosión permite establecer qué zonas son las más afectadas y con los modelos se analiza la manera de realizar un buen manejo del área, contribuyendo en la toma de decisiones más acertadas, sobre todo de la cuenca de Brodequin.

Dentro del Plan de cogestión de la Unidad Hidrográfica se plantea la recuperación de los recursos naturales con la aplicación de sistemas agroforestales, reforestación, control del ganado, prácticas de conservación de suelos, y otros con un enfoque ambiental. Sin embargo existen inconvenientes sociales al momento de llevar a la práctica lo planteado.

En la zona de estudio y según la información de los técnicos del lugar, no existen planos catastrales ni de propiedad, la única referencia que tienen los habitantes son las conocidas por ellos.

En este aspecto el estudio puede aportar en dar importancia a la regulación de tenencia de tierras y generar políticas que coadyuven a delimitar los terrenos con puntos georreferenciados, además de controlar y evitar conflictos futuros entre los habitantes, regulado por la entidad del estado correspondiente.

Con estos datos georreferenciados será más fácil llevar a cabo un manejo y conservación de suelos por que los habitantes tendrán la responsabilidad propia de cuidar sus tierras, por lo tanto creará conciencia en cada individuo por preservar los recursos naturales.

Por otro lado con la investigación se observa la necesidad que tienen los habitantes con relación a la energía, la cual se obtiene de la fabricación de carbón que también es un medio de vida, por tanto el estado debe proyectar otras formas de obtener energía y disminuir la producción de carbón que reduce los bosques.

Con relación al desarrollo de la zona, es posible realizar una recuperación de los recursos naturales sin descuidar la producción agrícola y también pecuaria, pero solo será posible si los habitantes toman conciencia de la situación en que viven y sean ellos los que trabajen para mejorar su condición.

En conclusión la investigación arroja resultados favorables para llevar a cabo el plan de cogestión siempre con una visión de conservación y recuperación de los recursos sin descuidar la producción agropecuaria. Además de dar a conocer la necesidad de regularizar la tenencia de tierras y lograr una participación general de la población.

Como recomendación se plantea:

- Generar políticas de tenencia de tierras regulada por un ente estatal.
- Concienciar a la población para conseguir un trabajo con intervención de todos o la mayoría de los actores clave.
- Lograr el empoderamiento de los habitantes de la zona.
  - Realizar investigaciones más específicas en el área de estudio para obtener datos que ayuden a mejorar los resultados logrados.

#### **IV. LITERATURA CITADA**

ABC. 2010. España. Consultado el 12 Abr 2014. Disponible en: <http://www.abc.es/20100113/internacional-/haiti-pais-pobre-america-201001131124.html>

Adam, P. 2006. Précis d'hydrologie et forage d'eau (Hidrología y perforación del agua). Tome 1. Presses Nationales d'Haiti, 178 p.

Antezana, J. 2001. Calibración de los factores de erosión utilizando la ecuación universal de perfiles de suelo, revisado "RUSLE" en el sistema de producción agrícola de la cuenca Taquiña, consultado el 15 Nov 2012, disponible en: <http://www.umss.edu.bo/epubs/earts/downloads/66.pdf>

Asturias, R. 1986. Determinación del índice de erosividad de las lluvias para las estaciones pluviográficas de la zona Noroccidental de Guatemala. Tesis Ing. Ag. Guatemala. Universidad de San Carlos. Facultad de Agronomía 48p.

Baver, L.D.; Gardner, W. H.; Gardner, W. R. 1983. Física de suelos. Trad. De la 4ta ed. Inglesa por Jorge Rodríguez. México. UTEHA. 429 p.

Bergsma, E. 1998. Terminology for Soil Erosion and Conservation. Enschede, the Netherlands. 61p.

Bigi, A. sf. Guide de Référence sur les pratiques de prévention et de lutte contre l'érosion dans le département Sud d'Haïti (Referencia de las prácticas de prevención y lucha contra la erosión en el departamento Sur de Haití). Comisión europea. 144 p.

CEPAL. 2009. Centroamérica enfrenta retos urgentes por cambio climático. Consultado el 25 Nov 2012. Disponible en: <http://www.eclac.cl/cgi-bin/getProd.asp?xml=/mexico/noticias/noticias/1/38171/P38171.xml&xsl=/mexico/tpl/p1f.xsl>

Chow, V.; Maidment D.; Mays, L. 1994. Hidrología aplicada. McGraw-Hill Interamericana, S.A. Santafé de Bogotá. CO. 299 p.

Deutsch Welle, 2013, Consultado el 14 Abr 2014. Disponible en: <http://www.dw.de/los-desastres-naturales-en-hait%C3%AD/a-16593335>

Dourojeanni, A.; Paulet, M. 1976. La ecuación universal de pérdida de suelo y su aplicación al planeamiento del uso de tierras agrícolas, estudio del factor de las lluvias en el Perú. Lima. Universidad Nacional Agraria. Publicación N°2. 78 p.

FAO. 1967. La erosión del suelo por el agua. Colección FAO: Fomento de tierras y aguas N°7 FAO, Roma, 207 p.

FAO, 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de suelos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma.

FAO, 1993. Erosión de suelos en América Latina. Roma, Italia. Consultado 9 Mar 2014. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/t2351s/T2351S00.htm#Contents>

FAO. 1997. Lucha Contra la Contaminación Agrícola de los Recursos Hídricos (Estudio FAO Riego y Drenaje - 55). Roma, Italia. Consultado 28 Oct. 2012. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/W2598S/w2598s00.htm#Contents>

FAO, 2000. Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos. Boletín de tierras y aguas de la FAO N°8. Roma. Consultado en 3 de Mar de 2014. Disponible en: [http://books.google.com.bo/books?id=-kZCpFv-W1EC&pg=PA1&lpg=PA1&dq=manual+de+practicas+integradas+de+manejo+fao&source=bl&ots=LceZR3G2Ld&sig=LrHY9ueT3mpz8JVvZFAMJH78y\\_A&hl=en&sa=X&ei=avcaU7CJEYO](http://books.google.com.bo/books?id=-kZCpFv-W1EC&pg=PA1&lpg=PA1&dq=manual+de+practicas+integradas+de+manejo+fao&source=bl&ots=LceZR3G2Ld&sig=LrHY9ueT3mpz8JVvZFAMJH78y_A&hl=en&sa=X&ei=avcaU7CJEYO)

3kAfX9oCQCw&ved=0CDYQ6AEwAg#v=onepage&q=manual%20de%20practicadas%20de%20manejo%20fao&f=false

Farfán, R. 2002. Determinación del índice de erosividad pluvial (R) de la ecuación universal de pérdida de suelos, para dos estaciones pluviográficas de la VII Región de Maule. Tesis de Ingeniería Forestal. Talca, Chile. Universidad de Talca, Facultad de Ciencias Forestales, 123 p.

Foster G.R., Moldenhauer W.C. y Wischmeier W.H. 1982. Transferability of US technology for prediction and control of erosion in the tropics. En: Soil Erosion and Conservation in the Tropics, Special Publication 43. American Society of Agronomy. 135-149 pp.

Gómez, F. (2002). Evaluación de la erosión potencial y producción de sedimentos en tres cuencas de Costa Rica. UCR. 191 p.

Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático. 2000. Impactos regionales del cambio climático: evaluación de la vulnerabilidad América Latina. Consultado el 25 de Nov 2012. Disponible en: <http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/regional/pdf/amla.pdf>

Grupo TRAGSA y Ministerio de Medio Ambiente, 1998. Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión. Ed. Mundi-prensa. España. 945 p.

Gutiérrez, María A. 1987. Determinación del índice de erosividad de las lluvias y su relación con la cobertura vegetal, suelos y pendientes, para la cuenca del río Grande de Térraba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Universidad de Costa Rica – C.A.T.I.E. Turrialba.

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 15 Oct 2013. Disponible en: <http://www.canari.org/documents/TechDocno386-Spn.pdf>

IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2000. Emissions scenarios: summary for policymakers. A special report of IPCC working group III. 27 p. Consultado 14 Nov 2013. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-en.pdf>

Kirkby, M. Morgan, R. 1984. Erosión de suelos. Ed. Limusa. México. 375 p.

Lianes, E. Marchamalo, M. Roldán, M. Water erosion prediction using the revised universal soil loss equation (RUSLE) in a GIS framework, Central Chile. Chilean journal of agricultural research N° 70(1), p. 159-169, january-march 2010. Consultado 15 Ago 2013, Disponible en: [www.mag.go.cr/rev\\_agr/inicio.htm](http://www.mag.go.cr/rev_agr/inicio.htm) [www.cia.ucr.ac.cr](http://www.cia.ucr.ac.cr)

Miller, SN; Semmens, DJ; Goodrich, DC; Hernandez, M; Miller, RC; Kepner, WG; Guertin, DP. 2007. The automated geospatial watershed assessment tool. *Environmental Modelling & Software* 22(3):365-377 pp.

MDE – PNUD. 2012. Ministerio de Medio Ambiente. Unité Hydrographique Aquin – Saint Louis du Sud. Rapport de l'Étude sur l'Érosion des sols (Informe del estudio sobre la erosión del suelos)

MDE – PNUD. 2012. Ministerio de medioambiente. Unité Hydrographique Aquin – Plan de cogestion de l'unité hydrographique Aquin /Saint – Louis de Sud (Plan de cogestión de la unidad hidrográfica Aquin/Saint-Louise). Consultado el 15 Oct 2012, Disponible en: <http://www.haitienvironnement.org/Rapports/PlanCogestion.pdf>

Ministerio de obras públicas, transporte y medio ambiente, Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Vivienda. 1995. Guía para la elaboración de estudios del medio físico. España. 809 p.

Morgan, R.P.C. 1997. Erosión y conservación de suelos. Madrid, España. Consultado el 3 de Feb 2014, disponible en: [http://books.google.cl/books?id=jcFqaFI-u1UC&printsec=frontcover&dq=morga&source=gbs\\_summary\\_r&cad=0#PPP1,M1](http://books.google.cl/books?id=jcFqaFI-u1UC&printsec=frontcover&dq=morga&source=gbs_summary_r&cad=0#PPP1,M1)

Mozo, T. 1967. Conservación del suelo a través del bosque. *Revista Nacional de Agricultura*. Colombia 17: 46-47

Neitsch, S.L, Arnold, J.G, Kiniry, J.R, Williams, J.R. 2005. Herramienta de evaluación de suelos y agua documentación teórica, Consultado el 30 Oct 2012, Disponible en: <http://swat.tamu.edu/media/46964/swat2005-theo-doc-spanish.pdf>

Nyssen, J., Poesen, J., Moeyersons, J., Luyten, E., Veyret-Picot, M., Deckers, J., Haile, M. Govers, G., 2002. Impact of road building on gully erosion risk: A case study from the Northern Ethiopian Highlands. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27(12): 1267-1283.

Oñate-Valdivieso, F; Duque, E; Duque, F; León, P; Rojas, W; Tenesaca, F. 2007. Caracterización climática, meteorológica e hidrológica de la cuenca binacional Catamayo-Chira previo a la implementación de los modelos SWAT y WATEM/SEDEM con fines de planificación territorial (en línea). Consultado 21 oct. 2011. Disponible en <http://www.fronate.pro.ec/fronate/wp-content/media/2008/01/caracterizacion-climatica-catamayo-chira.pdf>

Osterkamp, W.R., 2008. Annotated Definitions of Selected Geomorphic Terms and Related Terms of Hydrology, Sedimentology, Soil Science and Ecology, USGS Open file Report 2008-1217, Reston, Virginia

Oxfam international, 2014. Consultado el 10 Jul 2014. Disponible en: <http://www.oxfam.org/es/emergencias/haiti-terremoto>

Renard, K. Foster, G. Weesies, G. Mc Cool, M. Yonder, D. 1997. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), United States Department of Agriculture, Agriculture Research Service, Agriculture Handbook Number 703.

Ríos, J. D. 1987. Efecto de la cobertura vegetal en el proceso erosivo. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Posgraduados, Montecillos, México. 544p

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.

Paulet, I. M. 1974. Guía para el planeamiento del uso de las tierras agrícolas en las zonas de lluvia del Perú. Universidad Agraria La Molina. Depto. de Recursos de Agua y Tierra. Publicación N°5, 55 p.

PNUD. 2012. Guide méthodologique pour l'Élaboration des plan de gestion des bassins versants d'Haïti (Guía metodológica para la elaboración del plan de gestión de las cuencas hidrográficas en Haití) , consultado el 15 Oct 2012, Disponible en: <http://haitienvironnement.org/GuiaMethodologique/Guide.pdf>

PNUMA. 2007. Perspectivas del medio ambiente mundial, GEO4, medio ambiente para el desarrollo.

Scherrer, S.; Naef, F. 2003. A decision scheme to indicate dominant hydrological flow processes on temperate grassland. *Hydrol. Processes*, 17, 391–401

Smith, S.J., Williams, J.R. Menzel, R.G. Coleman, G.A. 1984. Prediction of Sediment Yield Plains Grasslands with the revised Universal Soil Loss Equation. *Journal of range management* 37(4).

Suárez de Castro, F. 1980. Conservación de suelos, San José, Costa Rica, IICA: 321 p.

Vahrson, W; Cervantes, C. 1991. Escorrentía superficial y erosión laminar en Puriscal Costa Rica. In. Vahrson, W; Alfaro, M; Palacios, G. Memoria del Taller de Erosión de Suelos. Heredia, CR, UNA. 236 pp.

Valcarcel, R. 1989. Estudio de los procesos erosivos en una microcuenca: Zona Central de España -PUEBLA DE VALLES (Guadalajara). Madrid, España. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 265 p.

Vargas, F. 2010. Estimación de pérdida de carbono en el suelo por erosión hídrica laminar bajo diferentes escenarios de producción hortícola y ganadera en la subcuenca del río Birrís, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Universidad de Costa Rica – C.A.T.I.E. Turrialba

Velásquez, S. 2013. Manual spatial analyst: erosión de suelos utilizando la (RUSLE). Turrialba, Costa Rica. 44 p.

Williams, I.R. 1975. Sediment yield predictioo with universal equation using runoffenergy factor. United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service S-40, pp.

Wischmeier, W.H.; Smith, D. 1959. A rainfall erosion index for the universal soil-loss equation. Soil Sciencie Society American, Proceedings, EEUU. 23 (3); 246-249 pp.

Wischmeier, W.H. y Smith, D.D. 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses. Agriculture Handbook 537. United States Department of Agriculture. Science and Education Administration. 58 pp.



## **V. ARTÍCULO 1: ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA LAMINAR EN TRES ESCENARIOS RELACIONADOS CON LA COBERTURA VEGETAL Y LAS PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN DE SUELOS EN UNA CUENCA DE LA UNIDAD HIDROGRÁFICA AQUIN/SAINT-LOUIS DU SUD HAITÍ**

Carla Morales, Javier Saborío, Christian Brenes

Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica

### **5.1. RESUMEN**

La erosión es uno de los problemas ambientales más importantes presentes en todo el mundo. Es la principal amenaza económica para el mantenimiento de la productividad a largo plazo de tierras agrícolas y forestales. Para las poblaciones de Aquin y Saint Louis del departamento Sud en particular, la disminución y control de la erosión es imprescindible debido a que esta zona tiene ciertas características potencialmente atractivas para el desarrollo del turismo, eco-turismo, y el desarrollo de actividades productivas rentables (sistema agroforestal basado en café, coco, árbol del pan, cajú, los monocultivos de arroz y la caña de azúcar, también para crianza de cabras, vacas y pesca).

En este estudio se usó la ecuación universal de pérdida de suelos revisada (RUSLE) para estimar la erosión en tres escenarios modelados en base a los cambios de cobertura y las prácticas de conservación en una cuenca de la Unidad Hidrográfica Aquin/Saint Louis du Sud en Haití.

Los datos muestran que la pérdida de suelo con la cobertura vegetal actual es aproximadamente de 156.64 Tn/ha/año; al modelar el escenario I con un cambio de cobertura ese resultado se reduce en un 46%; mientras que el escenario II con la aplicación de prácticas de conservación la erosión laminar disminuyó en 32%, siendo menos efectivo que el escenario I. En el escenario III se aplicó un cambio de cobertura vegetal y prácticas de conservación, dando como resultado la reducción de la erosión en 51%, demostrando que ambas prácticas son necesarias para controlar y disminuir la erosión en la zona de estudio puesto que ambos son factores controlables e importantes para el futuro de la conservación del suelo.

**Palabras clave:** Erosión, RUSLE, cobertura vegetal y prácticas de conservación

### **ABSTRACT**

Erosion is one of the most important environmental problems present throughout the world. It is the main economic threat to the maintenance of long-term productivity of agricultural and forest lands. Particularly for Aquin and Saint Louis of Sud department, the control and reduction of erosion is a must, because this area has certain potentially attractive characteristics for tourism development, eco-tourism and the development of profitable and

productive activities (agroforestry system based on coffee, coconut, breadfruit, cashew monocultures, such as rice and sugar cane, goats and cows, fishing).

In this study, the revised universal soil loss equation (RUSLE) was used to estimate erosion in three modeled scenarios based on changes in coverage and conservation practices in a basin of the Aquin / Saint Louis du Sud Hydrographic Unit in Haiti.

The data shows that soil loss with the current vegetal coverage is approximately 156.64 tons / ha / year; modeling the scenario I with a change of coverage, this result is reduced by 46%; while in scenario II, with the implementation of conservation practices, laminar erosion decreased by 32%, being less effective than scenario I. In stage III, land coverage change and conservation practices were applied, resulting in the reduction erosion by 51%, demonstrating that both practices are needed to control and reduce erosion in the study area since both are controllable and important factors for the future of land conservation.

**Keywords:** Erosion soil, RUSLE, vegetation cover, soil conservation

## 5.2. INTRODUCCIÓN

La erosión del suelo es una gran amenaza para la sostenibilidad de la agricultura a largo plazo (Montgomery, 2007). El manejo adecuado del suelo depende de la evaluación y comprensión de las tasas de pérdida de la tierra agrícola (Casalí et al., 2009). La modelación para estimar la erosión puede ayudar a realizar planes de manejo de las tierras en condiciones agrícolas y naturales (Angima et al., 2003).

El problema de la erosión puede ser causado por agentes naturales como el viento (erosión eólica) y la lluvia (erosión hídrica), sin embargo el mayor agente es el antrópico, Muchas actividades humanas afectan la capacidad del suelo de sostenerse ante las fuerzas erosivas, en ese sentido la deforestación, el sobrepastoreo y las malas prácticas de cultivo son actividades comunes en muchas cuencas del mundo (Gómez, 2002).

La ecuación universal de pérdida de suelos (USLE) (Wischmeier and Smith, 1978) y la ecuación universal de pérdida de suelo revisada (RUSLE) (Renard et al., 1997) siguen siendo las ecuaciones más utilizadas para la estimación de la erosión del suelo. Esta ecuación se caracteriza por su simplicidad de aplicación y es una herramienta útil para planificar el mejor uso posible del suelo, para seleccionar sistemas de cultivo, manejo y prácticas de conservación, estimar pérdidas de suelo en áreas con uso de suelo diferente a la agricultura (Kinnell, 2010).

El modelo RUSLE calcula el promedio anual de erosión esperado en laderas multiplicando varios factores juntos: erosividad de lluvia y escorrentía (R), erodabilidad del suelo (K), longitud de la pendiente e inclinación (LS), la cubierta vegetal (C), y las prácticas de apoyo (P) (Renard, et al. 1997).

Este modelo es práctico, flexible y de mayor elección popular para obtener estimaciones de pérdida de suelo en la preparación de evaluaciones de impacto ambiental, la elaboración de planes y evaluaciones para la recuperación de tierras sometidas a la minería y la construcción (Toy, et al. 1999). Sin embargo Vahrson (1990), especifica que la ecuación no puede funcionar en los trópicos húmedos a menos que se haga una amplia calibración.

En esta investigación se analizó los datos obtenidos de fuentes secundarias para calcular la cantidad de erosión laminar en la unidad hidrográfica Aquin/Saint Louis del departamento Sud de Haití con la ecuación universal de pérdida de suelos revisada (RUSLE), posteriormente se realizó la modelación de tres escenarios planteados bajo un cambio de cobertura y prácticas de conservación.

Estos resultados son importantes para determinar el grado de erosión existente en el lugar, para planificar diversas propuestas de manejo tanto a nivel de desarrollo productivo como de conservación. Sohl y Claggett (2013) indicaron que los modelos son un apoyo para los tomadores de decisiones y otras partes interesadas en tomar decisiones de manera más fácil basados en la ciencia, que estarán en mejor posición para apoyar una decisión y aplicarlo en el mundo real basados en los resultados de los modelos sobre el uso de la tierra y la cubierta vegetal.

Se espera que a futuro existan mayores investigaciones que conlleven a la generación de información más específica del lugar de estudio, por tal motivo estos resultados no deben tomarse como concluyentes.

### **5.3. MATERIALES Y METODOS**

#### **5.3.1. Descripción general del área de estudio**

La información general sobre el área de estudio se extrajo del Plan de Cogestión elaborado por el Ministerio de Medio Ambiente a través de proyectos ejecutados por el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).

La unidad hidrográfica de Aquin/Saint-Louis du Sud es un conjunto de varias cuencas y cuencas costeras con similares características biofísicas y tiene una superficie de 711 km<sup>2</sup>. Se extiende en la costa sur de Haití en el extremo este del departamento del Sur; esta principalmente compuesto por los municipios de Aquin y Saint-Louis du Sud, con una población de 190.589 habitantes (estimación del 2009) (MDE – PNUD, 2012).

Dentro la unidad hidrográfica se encuentran ocho cuencas principales de 386.6 Km<sup>2</sup> de superficie que llevan al mar Caribe, lo que representa el 54%; y nueve cuencas costeras que tienen numerosos barrancos que dan al Mar Caribe con una extensión total de 321.5 km<sup>2</sup> y representa el 46% de la superficie total de la unidad hidrológica.

Las cuencas hidrográficas de la región oriental tiene una mayor superficie pero de muy baja pendiente (0 - 3%), a diferencia de las cuencas hidrográficas en la parte occidental que

tiene pendientes más elevadas incluso mayores a 75%. A continuación se observa una tabla que muestra las pendientes correspondientes a esta unidad.

**Cuadro 6.** Datos topográficos de la Unidad Aquin/Saint-Louis du Sud

Unidad Hidrográfica	Pendiente	Pendientes mayores por intervalo (%)	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Superficie (%)	Pendiente Mayor (%)
Aquin/Saint Louis Du Sud	0 a 3	0.39	232.2	32.7	18.8
	3 a 8	5.03	71.5	10.1	
	8 a 15	11.46	55.2	7.8	
	15 a 30	22.84	93.1	13.1	
	30 a 50	39.37	131.4	18.5	
	50 a 75	60.01	91.8	12.9	
	>75	86.13	34.2	4.8	

Fuente. MDE – PNUD, 2012

La siguiente tabla muestra la altitud existente en esta unidad

**Cuadro 7.** Datos altitudinales de la Unidad Aquin/Saint-Louis du Sud

Unidad Hidrográfica	Altura (msnm)	Altura mayor por intervalo	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Superficie (%)	Altura Mayor
Aquin/Saint Louis Du Sud	0 a 100	38.82	315.5	44.5	169.0
	100 a 200	143.26	147.5	20.8	
	200 a 300	251.84	95.8	13.5	
	300 a 400	349.21	58.5	8.2	
	400 a 500	443.44	33.2	4.7	
	500 a 600	538.26	19.4	2.7	
	600 a 700	646.69	12.5	1.8	
	700 a 800	743.76	10.7	1.5	
	800 a 900	847.23	7.1	1.0	
	900 a 1000	948.66	4.8	0.7	
	1000 a 1100	1047.00	3.1	0.4	
	1100 a 1200	1143.06	1.2	0.02	
1200 a 1329.59	1246.71	0.3	0.04		

Fuente. MDE – PNUD, 2012

Las temperaturas se distribuyen de una manera similar durante el año en todas las estaciones. Los meses más fríos coinciden con la estación seca, es decir los meses de noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo, el mes de enero es el más frío con una temperatura de 24.2 °C y 21.8 °C. Los meses más calurosos que coinciden con la temporada de lluvias son abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre; el mes más caluroso es agosto con temperaturas promedio de 27 °C a 25 °C. La temperatura media anual de Aquin es de 26.3 °C y 22.1 °C para Fonds dans Nègres.

Con respecto a las precipitaciones, existe dos épocas, la lluviosa y seca. La temporada de lluvias es entre abril y octubre, pero mayo y octubre son los meses más lluviosos, y la estación seca comienza en noviembre y termina en marzo.

Con respecto a los suelos se han identificado cuatro tipos dominantes en la unidad hidrográfica Aquin/Saint-Louis du Sud, los brunisoles, vertisoles, fersiasoles y suelos poco evolucionados.

Según la Asociación Francesa para el estudio del suelo (2008), los brunisoles se caracterizan por la presencia de un horizonte estructural (horizonte S "Haplic") muy bien desarrollado (estructura clara agregado fino) y que tiene una macro-porosidad significativa y fisuras orgánicas. Estos suelos se observan principalmente en climas templados, Atlántico o semi-continental, cuando la pedogénesis es aún reciente (suelo "joven" o rejuvenecidos, no acidificado) o en suelos más antiguos. Cuando existe bosque se observan lombrices, que indica significativa actividad biológica gracias a un  $\text{pH} > 5$ ; debido al humus el ciclo biológico ofrece una nutrición nitrogenada y cationes de nutrientes adecuados.

Los fersiasoles se caracterizan por una alteración del tipo *bisiallitique* (formación de arcillas 2/1). Esta alteración se acompaña de una fuerte liberación de hierro, que por lo general recibe una estrecha relación con los minerales arcillosos. Esto se traduce en suelos maduros y diferenciados, que se caracterizan por una estructura angular y estable, así como color rojo vivo. La pedogénesis fersialítica se encuentra con mayor frecuencia en la zona subtropical y tropical, donde el drenaje profundo es cero o reducido.

Finalmente los vertisoles son suelos donde predomina la arcilla que se hincha o reduce considerablemente según las estaciones alternativamente húmedas y secas. Las diferencias estructurales entre los diferentes horizontes de vertisoles es el resultado de la dinámica de secado (que es más intenso en el horizonte que se encuentra cerca de la superficie).

- En períodos húmedos: La hinchazón de la masa de arcilla crea presiones y movimientos internos responsable de deslizamientos. En la superficie a menudo aparece montículos y microdepresiones alternantes, llamadas "micro-relieve".
- En los períodos secos: Se observa la formación de grandes y profundas grietas de contracción y la manifestación de una estructura gruesa y angular.

Los vertisoles derivan de la alteración de los productos rocas o sedimentos finos, todos ricos en minerales de arcilla (basaltos, rocas metamórficas básicas, piedra caliza, marga, lago o arroyo aluvión marino). Se encuentran principalmente en el clima tropical semiárido y subhúmedo del clima mediterráneo, la característica esencial es la alternancia de las estaciones marcadamente contrastantes de húmedo y seco. Las áreas más grandes se encuentran en las zonas donde la precipitación media anual está entre 500 y 1000 mm.

A partir de la caracterización biofísica, y como respuesta a los problemas, el año 2012 el MDE-PNUD realizó un diagnóstico socio-económico y socio-ambiental para dar soluciones sobre la base de su potencial, e identificó siete (7) unidades de gestión territorial del espacio (USAT):

- Área intensificación agrícola (IA)

- Zona agroforestal (AF)
- Área de ecológica (RE)
- Área de la zona de regeneración natural (NR)
- Conservación (ZC) / Zona Especial Conservación (ZEC) (manglares, raks, el agua y los bosques secos)
- Urbana (ZU) / Urbana extensión (ZUE)
- Zona costera-marina (MCA)

### **5.3.2. Ecuación universal de pérdida de suelos (RUSLE)**

Los datos requeridos para esta investigación fueron los siguientes:

#### **5.3.2.1 Factor R**

La precipitación es un dato climático muy importante requerido para la RUSLE. Debido a la falta de estaciones hidrometeorológicas en la zona se recurrió a los datos generados por Climate Forecast System Reanalysis (CFSR), obtenidos a través del Global Wather Data for SWAT (<http://globalweather.tamu.edu/>).

El CFSR es un sistema global que proporciona una estimación en base al sistema atmósfera-océano-tierra durante el período de 1979 a 2010 con una resolución a 38 Km (National center for atmospheric research in boulder, 2013).

Se tomó en cuenta un total de 9 estaciones, las cuales abarcaban la superficie total de la Unidad Hidrográfica de Aquin/Saint Louis.

Sin embargo debido a que estos datos no proporcionan información sobre intensidad de lluvia, se obtuvo el Factor R con una regresión lineal entre los factores R y los promedios de lluvia anuales de cada estación meteorológica de Republica Dominicana (IICA, 1982).

Dando como resultado la siguiente regresión:

$$\text{Ln}\hat{Y} = 0.42 + 1.25 (\text{ln } x)$$

Con esta relación se obtuvo el factor R (erosividad) de cada estación en la zona de estudio.

Finalmente para graficar el mapa del Factor R se utilizó la interpolación con Arc Gis, sin embargo existen diferentes métodos de los cuales se utilizó la IDW (Ponderación de distancia inversa) que según el Arcgis Resource Center, (2012) utiliza un método de interpolación que estima los valores de las celdas calculando promedios de los valores de los puntos de datos de muestra en la vecindad de cada celda de procesamiento. Cuanto más cerca está un punto del centro de la celda que se está estimando, más influencia o peso tendrá en el proceso de cálculo del promedio; además a diferencia de las otras herramientas, éste no sobrevalora los datos como la herramienta SPLINE, y no requiere de tanta información como KRIGING.

### 5.3.2.2 Factor K

El MDE-PNUD en 2012 realizó un estudio de suelos obteniendo datos de arena, limo, arcilla y materia orgánica de 26 muestras repartidas por toda la unidad hidrográfica.

Con estas muestras se procedió al cálculo del Factor K de acuerdo a la siguiente fórmula, según el Grupo Tragsa (1998) que cita a Winschmeier y Smith (1978):

$$K = [10^{-4} * 2.71 * M^{1.14} * (12-mo)^* + 4.20 (s-2) + 3.23 (p-3)] / 100$$

Dónde:

**K** = Factor de erodabilidad del suelo [t\*m<sup>2</sup>\*hr/ha\*J\*cm]

**mo** = Materia orgánica [%]

**s** = Código de la estructura del suelo

**p** = Código de permeabilidad

**M** = Producto de las fracciones del tamaño de las partículas primarias ó (%limo+%arena muy fina)\*(100-%arcilla)

Para obtener el mapa del factor K se interpoló con la herramienta IDW al igual que el factor R.

### 5.3.2.3 Factor C

Este factor está relacionado con la cobertura vegetal o uso de suelo y de acuerdo al estudio realizado por el MDE-PNUD en 2012 se observan las siguientes áreas:

**Cuadro 8:** Descripción e imágenes de la cobertura vegetal

DESCRIPCION	IMAGEN
<p><b>Bosque Seco Denso.</b> La cobertura vegetal está constituida principalmente de bayahonda (<i>Prosopis juliflora</i>), fuertemente concentrada. Esta también constituida de <i>Bursera simaruba</i>, cactus y otras plantas xerofitas. La bayahonda, como planta invasora y de gran valencia ecológica, coloniza una gran superficie. La cubierta no sufre grandes perturbaciones por las actividades agrícolas o la fabricación de carbón. Esta zona se clasifica como bosque seco denso.</p>	
<p><b>Bosque Seco ligeramente denso.</b> El bosque seco ligeramente denso presenta las mismas características que el bosque seco denso pero con una diferencia a nivel de superficie y cobertura vegetal.</p>	

**Rak.** El "rak" está constituido de una cubierta vegetal igualmente densa como el bosque seco denso pero se extiende sobre pequeña superficie y está compuesta de una vegetación muy variada, los árboles son muy viejos y tienen mayor diámetro. Se considera como una pequeña reserva de biodiversidad por su inaccesibilidad. Sin embargo, la búsqueda de espacio para la agricultura y la situación precaria de los campesinos provoca la tala de árboles en esta área para la siembra.



**Cultivos agrícolas densos.** Se trata de lugares situados en las partes planas (pendiente ligera) en donde la cobertura vegetal es muy ligera. Los árboles son muy dispersos, dejando pasar una buena luminosidad solar. Durante los periodos de cultivos, la cubierta herbácea está constituida de plantas cultivada como el arroz, el maíz, los frijoles, la yuca, el plátano, la caña de azúcar.



**Cultivos agrícolas ligeramente densos.** La cobertura vegetal es muy ligera, parecida a las zonas de cultivos agrícolas densos salvo que los cultivos agrícolas ligeramente densos pueden encontrarse no solamente en zonas de pendiente baja pero también en zonas con pendiente mediana. El estrato herbáceo está constituido de cultivos agrícolas como el maíz, el frijol, el guandú, la yuca, el sorgo, el ñame, la batata.





**Sábana arbustiva.** La cobertura vegetal está constituida principalmente de arbustos fuertemente densos en ciertos puntos y aislados en otros. La sabana arbustiva se encuentra generalmente en laderas más o menos fuertes y a veces muy pedregosas. En la parte del estrato arbustivo hay estrato herbáceo que cubre el sol cuando las piedras son ausentes. En estos espacios, las aguas de escorrentía causan graves problemas conduciendo a la perdida de la capa arable.



**Sábana desnuda.** En la sabana desnuda, parece casi imposible hablar de cobertura vegetal. Los arboles raramente observados son muy aislados y el espacio está completamente desnudo.



**Sistemas agroforestales ligeramente densos.** La cobertura vegetal de los sistemas agroforestales densos se manifiesta en arboles fuertemente densos y muy desarrollados que son mayormente árboles frutales como el mango, el aguacate, el cocotero, la nuez, los citrus, el árbol de pan y otros. Hay árboles forestales que son mayormente para madera como la caoba y en el estrato herbáceo hay plantas cultivadas como el maíz, el frijol, la yuca, el plátano, la caña de azúcar, la piña y el fruto de la pasión. En el estrato herbáceo encontramos mayor cobertura de monocultivo o asociación de cultivos agrícola.



**Manglares.** A lo largo de la costa de la Unidad Hidrográfica se encuentra una concentración de manglares, se trata de un bosque costero marino constituido principalmente de manglar rojo (*Rhizophora mangle*) y manglar negro (*Avicenia germinans*) fuertemente denso, dando una estabilidad en el litoral y facilitando la alimentación de las especies marinas y su reproducción.



**Cuerpos de agua.** Son los lagos, lagunas, zonas inundadas durante todo el año y las embocaduras de los ríos.

**Zona urbana.** Es el espacio más accesible y más poblado. La zona urbana contiene infraestructuras con un sistema de agua potable, sistemas de comunicación, instituciones financieras, centros de salud, centros escolares, etc. En la Unidad Hidrográfica Aquin/Saint-Louis du Sud están las ciudades de Aquin y Saint Louis del Sur.

Tomando en cuenta todo lo descrito anteriormente y con información secundaria se pudo establecer los códigos de acuerdo a diferentes tablas del factor C existentes en diversos estudios.

Para elaborar el mapa del factor C se obtuvo el shapefile digitalizado del mapa de cobertura vegetal de la zona de estudio, se anexó la tabla de atributos con los valores correspondientes a cada cobertura y se convirtió a raster.

#### **5.3.2.4 Factor LS**

El factor LS es el referido a la longitud (L) y la pendiente (S) los cuales se calculan dentro del ArcGis a través de diferentes pasos:

- A partir del DEM o modelo de elevación digital, que se elaboró de las curvas de nivel cada 20 m, se calculó la pendiente con la herramienta "slope" tanto en grados como en porcentaje.

- Se creó un grid de dirección de flujo con la herramienta "flow direction" y un grid de acumulación de flujo con "flow accumulation".

- Para obtener el factor L, se calculó previamente los valores F y m:

$$L = \left( \frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad m = \frac{F}{(1+F)} \quad F = \frac{\sin \beta / 0.0896}{3(\sin \beta)^{0.8} + 0.56}$$

Todos los cálculos para obtener el Factor LS se realizaron con la herramienta "raster calculator" del ArcGis

- a) valor F:

$$((\sin((\text{slope\_gra}) * 0.01745 / 0.0896)) / (3 * \text{Pow}(\sin((\text{slope\_grad}) * 0.01745), 0.08) + 0.56))$$

- b) valor m:

$$(F) / (1 + (F))$$

Finalmente se obtuvo el Factor L que responde a la siguiente fórmula de acuerdo a Desmet y Govers (1996):

$$L_{(i,j)} = \frac{(A_{(i,j)} + D^2)^{m+1} - A_{(i,j)}^{m+1}}{x^m \cdot D^{m+2} \cdot (22.13)^m}$$

Donde A(i,j)(m) es el área aportadora unitaria en la entrada de un pixel (celda), D es el tamaño del pixel y "x" es el factor de corrección de forma.

- c) Factor L:

$$(\text{Pow}(((\text{flowacc}) + 100), ((m) + 1)) - \text{Pow}(\text{flowacc}, ((m) + 1))) / (\text{Pow}(10, ((m) + 2)) * \text{Pow}(22.13, (m)))$$

- d) Factor S: Según McCool, et al (1989) el Factor S depende del valor del ángulo, entonces se utilizó la condicionante "con" para su cálculo con ArcGis:

$$S_{(i,j)} = \begin{cases} 10.8 \sin \beta_{(i,j)} + 0.03 & \tan \beta_{(i,j)} < 0.09 \\ 16.8 \sin \beta_{(i,j)} - 0.5 & \tan \beta_{(i,j)} \geq 0.09 \end{cases}$$

$$\text{Con}(\tan((\text{slope\_grad}) * 0.01745) < 0.09, (10.8 * \sin((\text{slope\_grad}) * 0.01745) + 0.03), (16.8 * \sin((\text{slope\_grad}) * 0.01745) - 0.5))$$

- e) Factor LS: los factores antes calculados se multiplican:

$$(\text{Factor L}) * (\text{Factor S})$$

### 5.3.3 ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN CON RUSLE

Para estimar la erosión todos los factores antes calculados se multiplicaron con el "raster calculator":

$$(\text{factor K}) * (\text{factor R}) * (\text{factor C}) * (\text{factor LS})$$

Esta fórmula estimó la pérdida de suelo o erosión por pixel, por tanto se transformó a hectáreas.

### 5.3.4 MODELACIÓN DE TRES ESCENARIOS

Según el MDE-PNUD (2012) se priorizó las cuencas en función de su importancia para el ecosistema:

- Prioridad 1. Los que actualmente o en el futuro proporcionaran el mayor flujo de agua para uso doméstico.
- Prioridad 2. Las cuencas que actualmente o en el futuro puedan regar grandes extensiones de tierra con fines agrícolas.
- Prioridad 3. Las cuencas con un gran potencial de las aguas subterráneas y zonas de recarga.
- Prioridad 4. Las cuencas que actualmente cuentan con la mayor producción agrícola o tienen el mayor potencial agrícola en la capacidad de utilizar mejor para beneficios económicos y sociales.
- Prioridad 5. Las cuencas con mayor potencial o producción forestal.
- Prioridad 6. Cuencas cuyo valor de sus recursos naturales y la importancia de sus ecosistemas merecen las medidas de protección, conservación y rehabilitación.
- Prioridad 7. Las cuencas con áreas de especial interés o áreas protegidas: El interés puede ser histórico, cultural, ecológico, ambiental.
- Prioridad 8. Las cuencas hidrográficas con personas e infraestructuras locales expuestos a una alta vulnerabilidad.

Se consideró a la cuenca de Brodequin adecuada para modelar tres diferentes escenarios para el control y disminución de la erosión debido al grado de erosión (alto), el grado de vulnerabilidad física, ecológica y económica (62%) y la vulnerabilidad social (65%) puesto que la población de Aquín se encuentra en la cuenca baja y es amenazada por constantes inundaciones en época de lluvias. (MDE-PNUD, 2012)

#### **a) Escenario 1: Cambio de cobertura**

Para el primer escenario se realizó el cambio en la cobertura vegetal (factor C), de acuerdo a las propuestas planteadas en el plan de cogestión elaborado por el Ministerio de medio ambiente y la PNUD (2012):

**Cuadro 9.** Cambio de cobertura vegetal

<b>COBERTURA VEGETAL</b>	<b>CAMBIO COBERTURA</b>	<b>FACTOR C</b>
Cult. agr. lig. densos (6 meses)	Sist. agroforestal	0.2
Bosques seco lig. denso (matorral degradado)	Matorral 2 (m)	0.14
Rak (terreno desprovisto de veg.)	Rak	0.95
Sabana arbustivo (pastura nat. pastoreada)	Pasto natural o mejorado	0.008
Sabana desnuda (sobrepastoreo)	Pastizal cultivado	0.0215
Sist. agrof. lig. densos (Palmeras, cocos cubiertos)	Sist. agroforestal	0.02

Fuente: Elaboración propia

Debido a que los datos son generales en este factor, se asumió que la superficie que corresponde a cada cobertura cambia en su totalidad según lo propuesto.

### **b) Escenario 2: Prácticas de conservación**

El segundo escenario se realizó en base a las prácticas de conservación de suelos, las cuales fueron escogidas de acuerdo al cuadro 3:

**Cuadro 10.** Prácticas de conservación

<b>COBERTURA VEGETAL</b>	<b>PRACTICA DE CONSERVACIÓN</b>	<b>FACTOR P</b>
Cult. agr. lig. densos (6 meses)	Cultivo en curvas de nivel (1-2%)	0.6
Bosques seco lig. denso (matorral degradado)	Ninguno	1
Rak (terreno desprovisto de veg.)	Ninguno	1
Sabana arbustivo (pastura nat. pastoreada)	Cultivo en fajas (13-16%)	0.35
Sabana desnuda (sobrepastoreo)	Cultivo en fajas (17-20%)	0.4
Sist. agrof. lig. densos (Palmeras, cocos cubiertos)	Ninguno	1

Fuente: Elaboración propia

### **c) Escenario 3: Cambio de cobertura y prácticas de conservación**

El tercer escenario es la combinación de los dos anteriores haciendo un cambio en la cobertura vegetal y aplicando las prácticas de conservación correspondientes.

## **5.4 RESULTADOS Y DISCUSIONES**

### **5.4.1 Estimación de la erosión**

Para la primera pregunta de investigación se consultó acerca de cuál era el área que muestra mayor grado de erosión. Según la información del taller con el grupo focal y su experiencia en campo, las cuencas más erosionadas son:

- Mombin

- Millionnaire
- Brodequin
- Vieux bourg d´aquin

Este análisis se basó en la observación de falta de cobertura vegetal, pendientes fuertes, aparición de roca madre, exceso de sedimentación en los ríos pertenecientes a cada cuenca, las malas prácticas de la población (siembra de cultivos anuales en la cuenca media y alta, ganadería libre, surcos a favor de la pendiente). Con relación al ganado, éste se pastorea en la cuenca media y alta, de manera libre, dejando el suelo descubierto y sin protección ante cualquier evento climático.

Para estimar el grado de erosión de manera científica se utilizó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos Revisada (RUSLE), la cual requiere de información detallada de los factores descritos en índices anteriores. Para la obtención del factor R (erosividad) y debido a la dificultad de contar con registros satisfactorios para procesar la información según los requerimientos del método EI30, se diseñó otra manera de estimar la erosividad de lluvias. Gutiérrez (1987), relacionó el índice de erosividad R de las lluvias con diversas variables en la cuenca del río Grande de Térraba en Costa Rica, y consideró como confiable la relación existente entre los promedios anuales de precipitación con los valores de los índices de erosividad por la alta asociación ( $R=0.82$ ).

De acuerdo al IICA (1982) los coeficientes de determinación  $R^2$  de República Dominicana son altos e indican un alto grado de asociación entre la cantidad total anual de lluvia y R anual. Sin embargo Stocking citado por Vahrson (1990) especifica que la ecuación no puede funcionar en los trópicos húmedos a menos que se haga una amplia calibración.

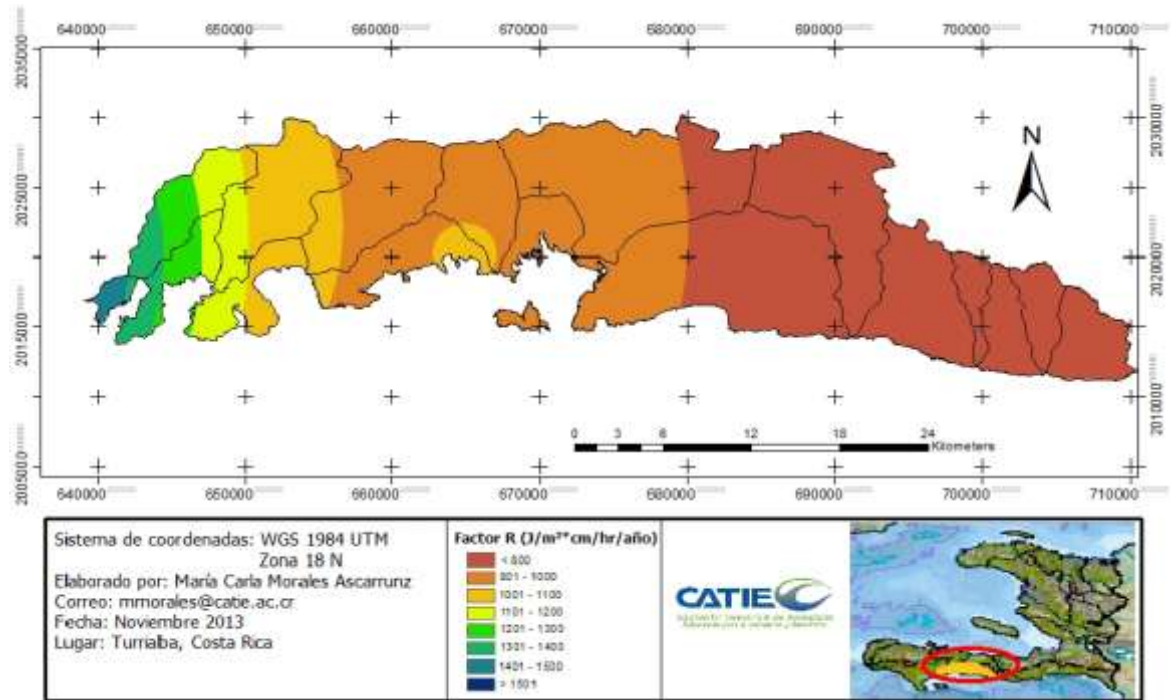
Se aplicó la metodología descrita en subíndices anteriores y se obtuvo los siguientes resultados:

**Cuadro 11.** Factor R de la Unidad Hidrográfica de Aquin/Saint Louis

<b>Estación</b>	<b>Prom. lluvia anual (cm)</b>	<b>Factor R (<math>J/m^2</math>)*(cm/hr/año)</b>
estación 3	104.802	500
estación 4	139.422	715
estación 9	188.454	1042
estación 10	152.848	802
estación 11	211.594	1204
estación 12	300.199	1865
estación 17	121.33	601
estación 18	158.506	938
estación 19	240.880	1416

Fuente: Elaboración propia

Con los datos obtenidos se realizó una interpolación y se obtuvo el siguiente gráfico donde se observa la distribución de los factores R a lo largo de la unidad hidrográfica



**Figura 3.** Cálculo del Factor R

En la investigación se obtuvo un  $R=0.68$  de confiabilidad entre el factor R y el promedio anual de lluvias de República Dominicana siendo altamente significativa ( $p < 0.0001$ ) para el factor R. En base a esta regresión se trabajó con el promedio anual de lluvias de Haití y se obtuvo un factor R entre 500 y 1865  $J/m^2 \cdot cm/hr$ , resultado que no se aleja de países vecinos como República Dominicana con un R entre 100 y 1800  $J/m^2 \cdot cm/hr$  o Puerto Rico con un R entre 600 y 800  $J/m^2 \cdot cm/hr$ , según IICA (1982).

Para el cálculo del factor de erodabilidad (factor K) se obtuvo el código de permeabilidad (p) y de estructura (s) del suelo de acuerdo al cuadro 2 y la figura 1, se aplicó la fórmula correspondiente y se obtuvo los siguientes factores:

**Cuadro 12.** Factor K de la Unidad Hidrográfica de Aquin/Saint Louis

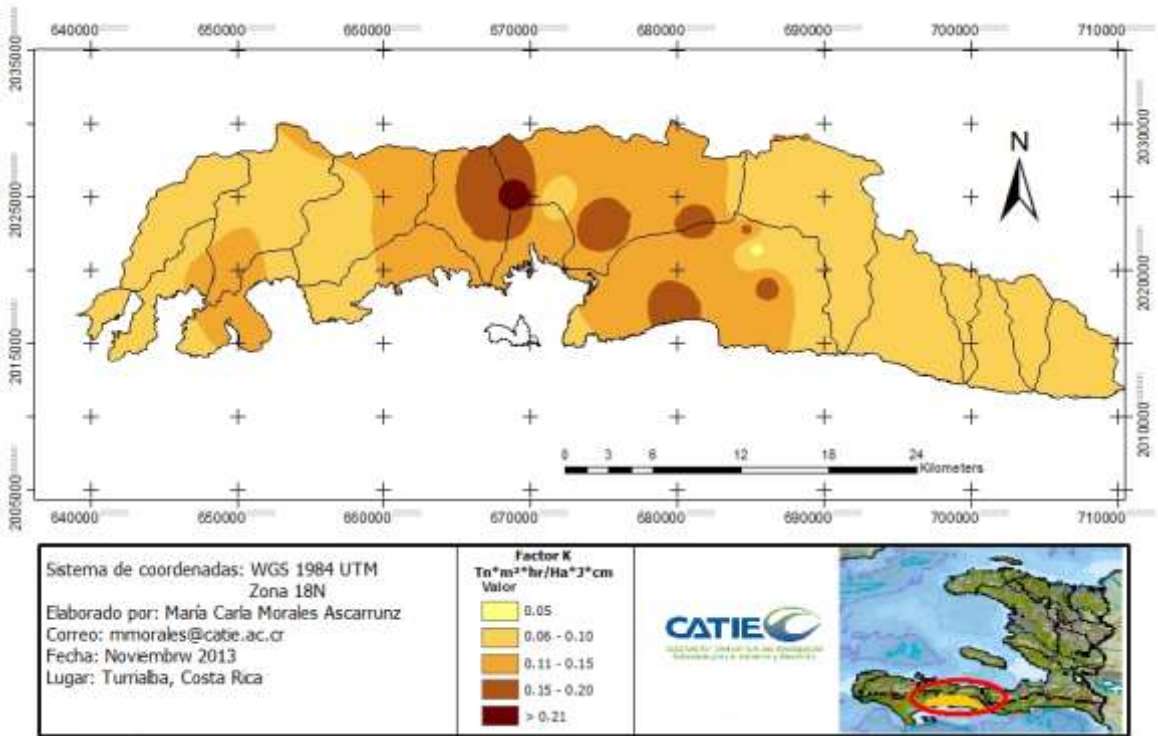
LOCALIDAD	ARENA	LIMO	ARCILLA	TEXTURE	MO	p	s	s-2	p-3	M	Factor K ( $Tn \cdot m^2 \cdot hr$ ) / ( $Ha \cdot J \cdot cm$ )
Flamands	60	10	30	Franco-arcillo-arenoso	3.22	4	3	1	1	700	0.115
GobÚ	60	5	35	Franco-arcillo-arenoso	2.55	4	3	1	1	325	0.093
Morne Farino	60	15	25	Franco-arcillo-arenoso	4.70	4	3	1	1	1125	0.133
Duclos	40	5	55	arcillosa	0.00	6	4	2	3	225	0.196
Ka Madi	90	0	10	arenosa	0.00	1	1	1	2	0	0.106

Nan Makay	55	10	35	Franco-arcillo-arenoso	2.68	4	3	1	1	650	0.114
SÚnailler	50	10	40	arcillo -arenosa	1.68	5	3	1	2	600	0.147
Grosse-Caille	35	20	45	arcillosa	0.00	6	4	2	3	1100	0.276
Tchanmy	85	0	15	areno-franca	0.00	2	1	1	1	0	0.074
Tchanmy	90	0	10	arenosa	0.13	1	1	1	2	0	0.106
Nan BoulÚ	60	5	35	Franco-arcillo-arenoso	0.00	4	3	1	1	325	0.098
Do Dasma	35	20	45	arcillosa	4.97	6	4	2	3	1100	0.236
Duverger	70	10	20	franco-arenosa	0.00	2	1	1	1	800	0.140
Tp Wouj	50	15	35	Franco-arcillo-arenoso	9.70	4	3	1	1	975	0.090
Nan Saline	50	35	15	franca	4.43	3	2	0	0	2975	0.187
Bois Corail	55	25	20	franco-arenosa	0.00	2	1	1	1	2000	0.262
Tbt Letan	30	15	55	arcillosa	0.53	6	4	2	3	675	0.233
Ka Titon	35	5	60	arcillosa	2.55	6	4	2	3	200	0.191
Malbranche	50	30	20	franca	0.00	3	2	0	0	2400	0.232
	60	5	35	franco-arcillo-arenoso	0.00	4	3	1	1	325	0.098
Grand Fond	70	5	25	franco-arcillo-arenoso	0.00	4	3	1	1	375	0.102
Pilote	75	10	15	franco-arenosa	0.00	2	1	1	1	850	0.145
Anwo Lakay	55	15	30	franco-arcillo-arenoso	0.00	4	3	1	1	1050	0.164
Anba M_n	80	0	20	franco-arenosa	6.72	2	1	1	1	0	0.074
Popoto	60	20	20	franco-arenosa	0.00	2	1	1	1	1600	0.220
Ka JeanLouis	60	10	30	franco-arcillo-arenoso	5.38	4	3	1	1	700	0.105
Joupa Boule	35	15	55	arcillosa	0.00	6	4	2	3	675	0.235
Pontwa	35	10	55	arcillosa	0.00	6	4	2	3	450	0.215
Morne Lalane	65	5	30	Franco-arcillo-arenoso	0.00	4	3	1	1	350	0.100
La Ferme	65	5	30	Franco-arcillo-arenoso	0.00	4	3	1	1	350	0.100
Zabriko	80	0	20	franco-arenosa	2.62	2	1	1	1	0	0.074
La Baleine	60	5	35	Franco-arcillo-arenoso	0.00	4	3	1	1	325	0.098
Pichacha	60	25	15	franco-arenos	0.00	2	1	1	1	2125	0.276
La Baleine	60	5	35	Franco-arcillo-arenoso	0.00	4	3	1	1	325	0.098
Passe Bois	60	5	35	Franco-arcillo-	0.00	4	3	1	1	325	0.098



Fuente: Elaboración propia

Estos valores se graficaron con una interpolación para observar donde se ubican dentro la unidad hidrográfica como se muestra en el siguiente mapa.



**Figura 4.** Cálculo del Factor K

Los valores que se obtuvieron del factor K oscilan entre 0.05 y 0.27 Tn\*m<sup>2</sup>\*hr/Ha\*J\*cm, pero es importante tomar en cuenta que según Wischmeier citado por Mora (1987), este índice puede ser el más difícil de transferir a zonas tropicales, debido a la gran diferencia y variabilidad en las condiciones del suelo.

Para el factor C se utilizaron las diferentes tablas para establecer los valores de las coberturas:

- Factor vegetación (factor C) de cobertura arbóreas, de matorral y pastos en la cuenca del río Birris (Lianes, et al. 2009)
- Valores del factor cobertura vegetal (C) (Chapingo, 2006)
- Valores de C para pastizales, matorrales y arbustos (Wischmeier citado por Grupo Tragsa, 1998)

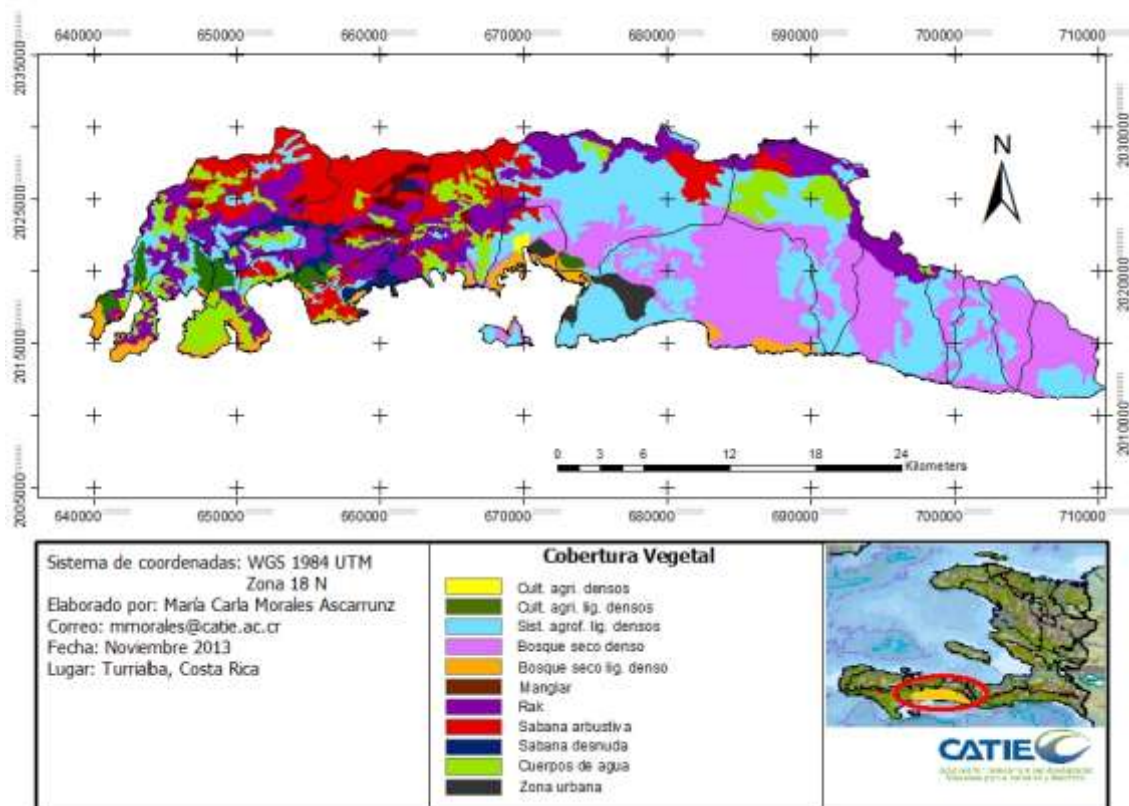
Se logró identificar los siguientes valores para las diferentes coberturas:

**Cuadro 13.** Factor C de la Unidad Hidrográfica de Aquin/Saint Louis

COBERTURA VEGETAL	FACTOR C
Zona urbana	0.0065
Cultivos agrícolas densos (arroz 70%)	0.15
Cultivos agrícolas ligeramente densos (pradera herbácea)	0.65
Bosque seco (pradera herbácea)	0.175
Bosque seco ligeramente denso (matorral degradado)	0.65
Manglar (inundación buena)	0.015
Rak (terreno desprovisto de vegetal)	0.95
Sabana arbustiva (pastura natural pastoreada)	0.12
Sabana desnuda (sobrepastoreo)	0.1
Sistemas agroforestales ligeramente densos	0.2
Cuerpos de agua	0

Fuente: Elaboración propia

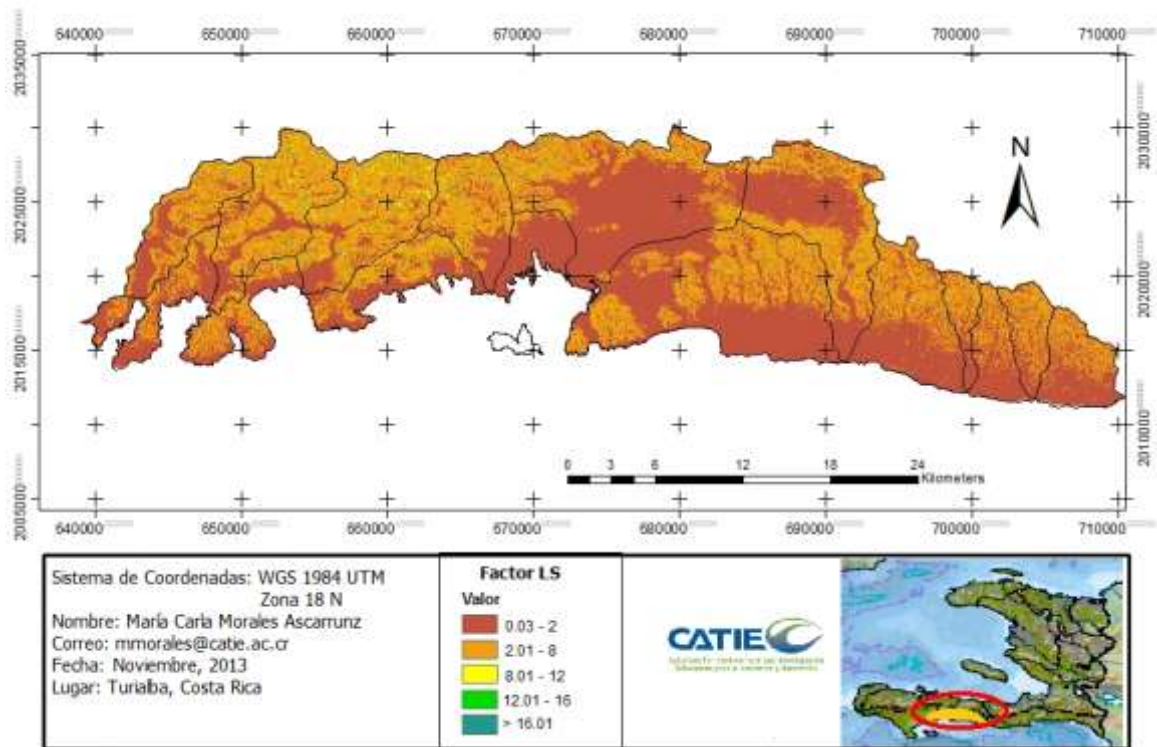
Estos valores fueron introducidos anexando una nueva fila al shape de la cobertura vegetal y de esta forma se obtuvo el siguiente mapa:



**Figura 5.** Cálculo del Factor C

Por lo que se observa las coberturas más representativas dentro de la unidad hidrográfica son los sistemas agroforestales ligeramente densos y los bosques secos densos, seguidos de las sabanas arbustivas y el rak. Las otras coberturas se manifiestan en menor proporción.

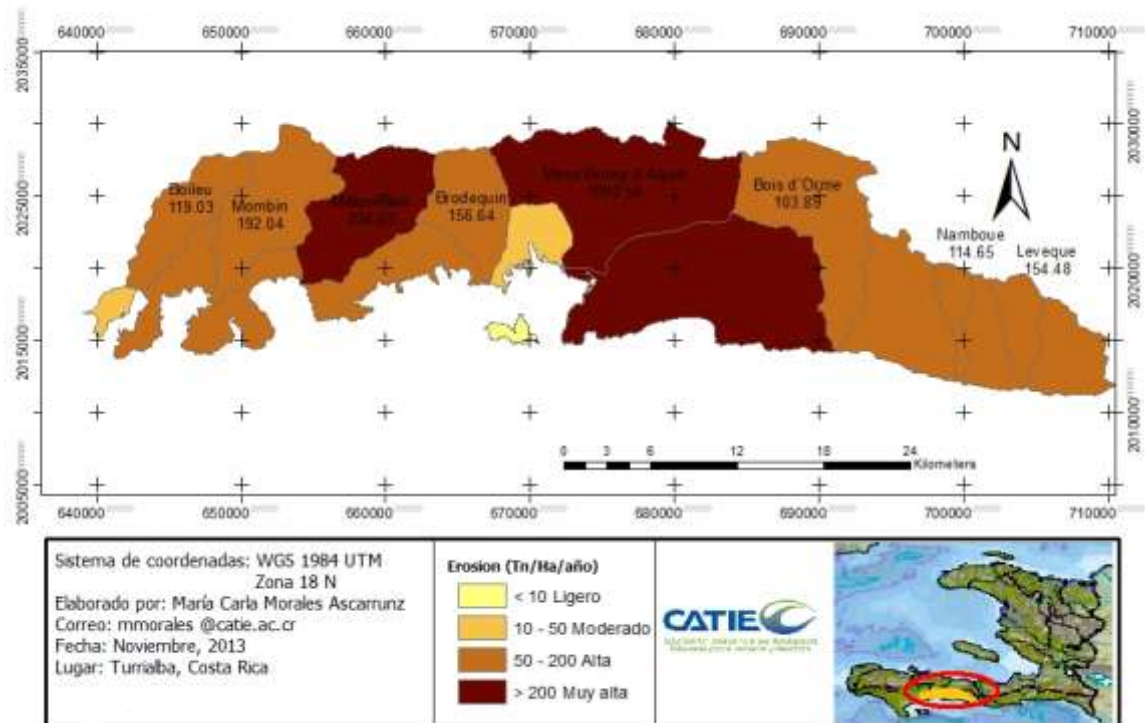
Para obtener el factor LS se procedió a realizar los cálculos descritos en anteriores subíndices y se graficó el siguiente mapa:



**Figura 6.** Cálculo del Factor LS

El mapa del factor LS muestra valores entre 0.03 y 16, pero la mayor parte de la superficie tiene valores menores entre 0.03 y 8. Los parámetros que se utilizó son los establecidos por Wischmeier, y se observó que no existen valores del factor LS en la unidad hidrográfica que estén fuera de estos parámetros. Debe señalarse que si las pendientes por evaluar no son uniformes (suaves o con gradiente constantes) se incurrirá en yerros. Es el caso de las pendientes cóncavas que sobreestima LS, o las superficies convexas donde dicho factor es subestimado según explica Mora (1987).

Una vez se obtuvo los mapas se procedió a la aplicación de la ecuación universal revisada de la pérdida de suelos para estimar la erosión de la unidad hidrográfica teniendo como resultado el siguiente mapa donde también se observa el grado de erosión.



**Figura 7.** Cálculo y grado erosión en la Unidad Hidrográfica de Aquin/Saint Louis según FAO-UNESCO

Se obtuvieron los siguientes resultados sobre la erosión en la Unidad Hidrográfica de Aquin/Saint Louis:

**Cuadro 14.** Estimación de la erosión

NOMBRE	AREA (Ha)	EROSION (Tn/ha/año)	GRADO FAO-UNESCO
BV Mombin *	5427	192.04	Alta
BV Boileau	3323	119.03	Alta
BV Millionaire *	5585	234.65	Muy alta
BV Brodequin *	3627	156.64	Alta
BV Vieux Bourg d'Aquin *	10520	1092.50	Muy alta
BV Bois d'Orme	7143	103.89	Alta
BV Namboue	1153	114.65	Alta
BV Leveque	1749	154.48	Alta

Fuente. Elaboración propia

Cuencas que coinciden con la observación técnica (\*).

Como resultado la erosión laminar estimada en la Unidad Hidrográfica de Aquin/Saint Louis du Sud se encuentra entre 1092 y 103 Tn/ha/año; teniendo en cuenta que se haya sobreestimado debido a que el factor R no fue calculado con la formula inicial del modelo, al igual que el estudio de Portilla (1994) realizado en Costa Rica donde explica que las aplicaciones de la ecuación posiblemente estén sobreestimando las tasas de pérdida de suelos, debido principalmente a que los estudios no se han apegado a los supuestos iniciales del modelo por las múltiples maneras en que se ha querido evaluar algunos factores.

Sin embargo se asemeja a otros cálculos como los obtenidos por Saborío (1997) que ha presentado resultados de erosión en tres microcuencas de Arenal y valoró las erosiones en un máximo de 150 Ton/Ha/año. En Guatemala, el mismo autor (2000), a nivel nacional encontró que en un 72% del área la erosión no superaba las 10 Ton/Ha/año y que sólo el 2.3% del territorio de ese país alcanzaba valores por encima de las 150 Ton/Ha/año. También Vahrson estima la erosión de Costa Rica entre 10 Ton/Ha/año hasta las 1500 Ton/Ha/año.

Se comparó los resultados obtenidos entre la observación técnica y la investigación (\*), éstos coinciden logrando ser validados y observables en campo.

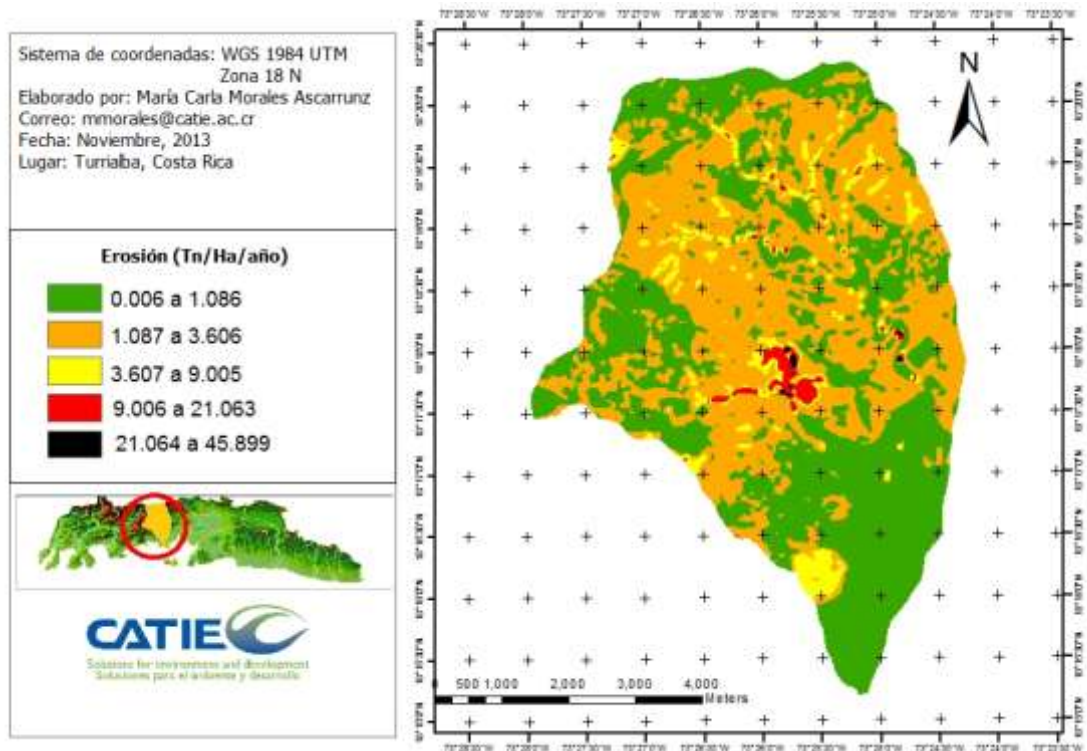
#### **5.4.2. Modelación de escenarios**

En toda la Unidad Hidrográfica Saint/Louis du Sud es necesario realizar cambios de cobertura vegetal y prácticas de conservación; sin embargo existen cuencas prioritarias según la vulnerabilidad social, importancia socioeconómica y ambiental. De acuerdo a la observación técnica las cuencas prioritarias son:

- Millionnaire: Por el cultivo el arroz en la parte baja, la existencia de una población y la protección del agua debido a que en la parte alta existen zonas de recarga.
- Brodequin y Vieux Bourg d'Aquin: ambas por las ciudades de Aquin y Vieux Bourg d'Aquin respectivamente y para protección del agua, especialmente en la cuenca de Brodequin que depende del agua que se encuentra en la parte alta.

La investigación se centró en la cuenca Brodequin para realizar la modelación de acuerdo a las prioridades técnicas y la información secundaria obtenida.

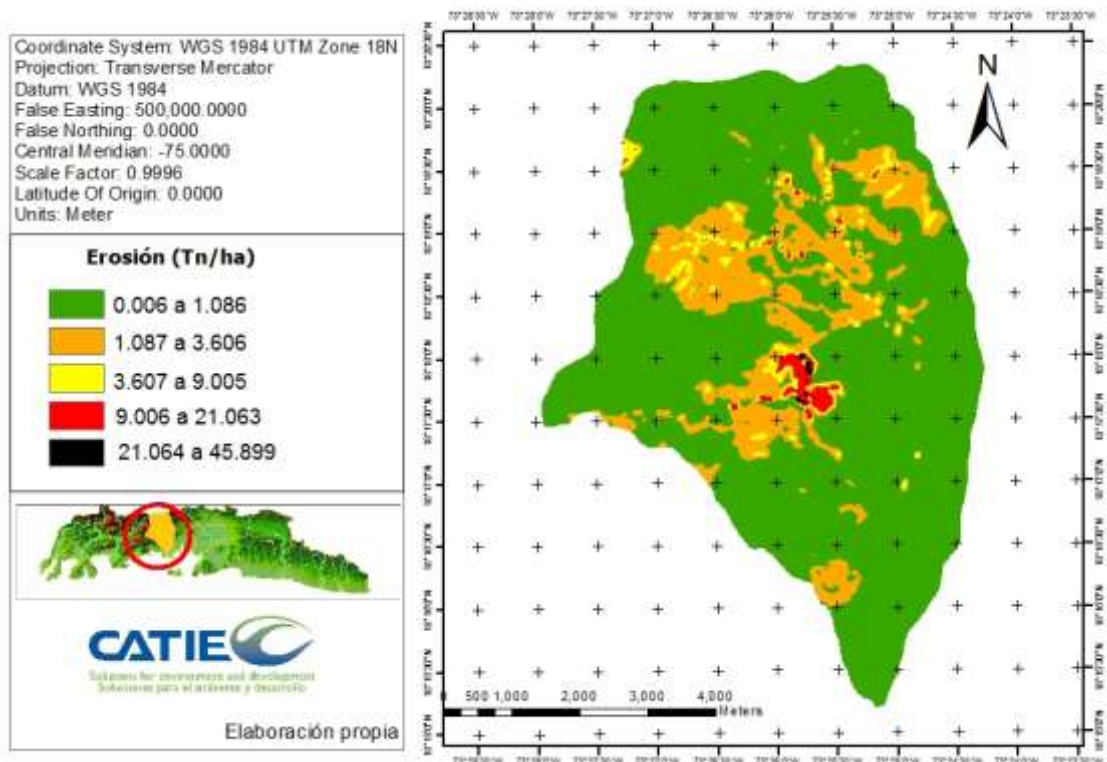
Se obtuvo los siguientes mapas cambiando la cobertura vegetal con los nuevos valores descritos en la parte metodológica y anexando una nueva fila al shape de cobertura vegetal para graficar las prácticas de conservación con sus respectivos valores.



**Figura 8.** Erosión en Brodequin

La cuenca de Brodequin tiene 3627 Ha de superficie y una tasa de erosión estimada de 156.64 Tn/Ha/año. Según la anterior figura se observó que la cuenca alta y media sufren mayor grado de erosión y tiene una zona roja donde la erosión es crítica; esta área es la que corresponde a la cobertura Rak que tiene presencia de rocas en gran parte de su superficie y plantas endémicas.

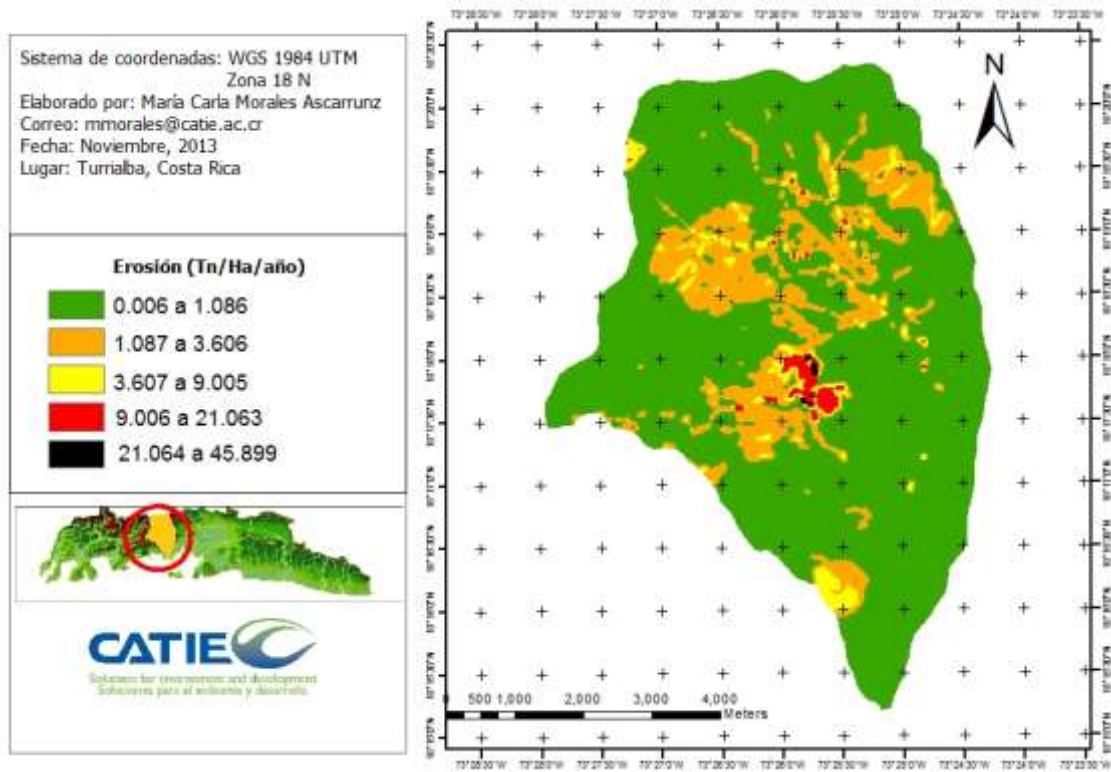
La siguiente figura es el primer escenario donde se aplicó el cambio de cobertura vegetal a una basada en la recuperación de bosques secos, aplicación de sistemas agroforestales, control en el pastoreo y recuperación de pastos naturales.



**Figura 9.** Cambio de cobertura vegetal (Escenario 1)

Se observó en este escenario la disminución de la erosión a 85.51 Tn/Ha/año. Esto demostró que el cambio de cobertura a uno más sostenible hace una diferencia significativa para reducir la erosión.

El siguiente mapa es el segundo escenario en el cual se aplicó prácticas de conservación con la cobertura actual. Las prácticas sugeridas son aquellas medidas por Wischmeier y cuya aplicación es de conocimiento general. Estas prácticas son la elaboración de surcos según las curvas de nivel y cultivos en fajas.

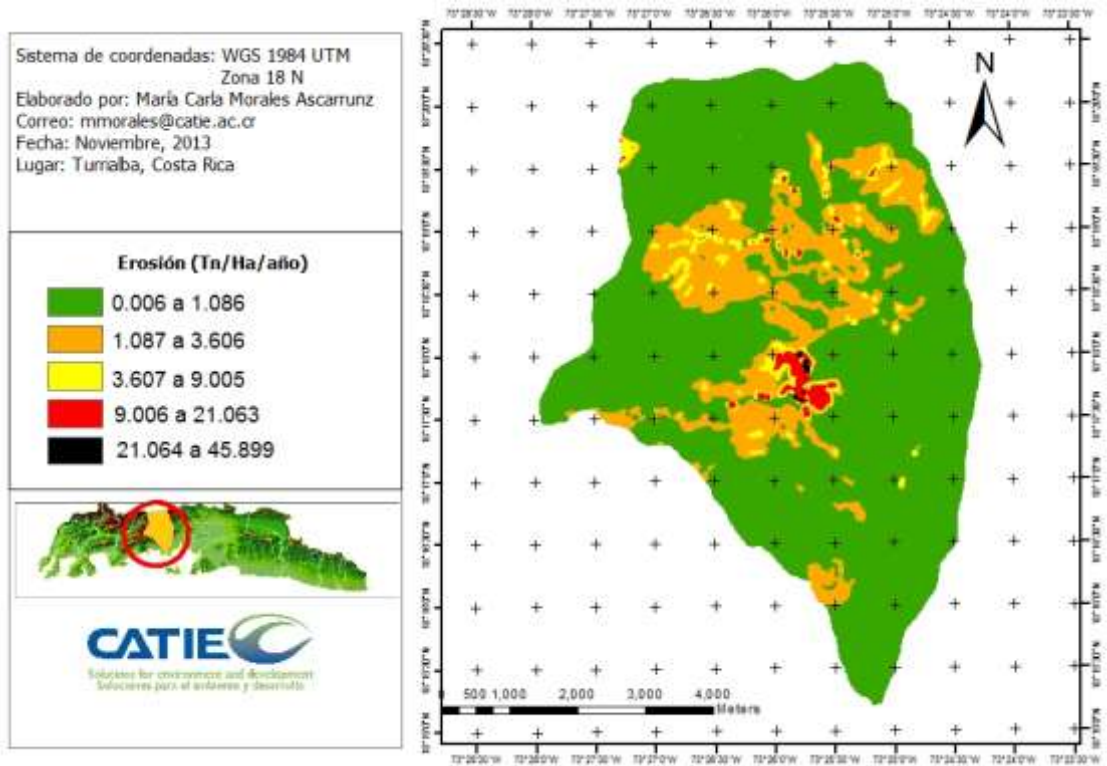


**Figura 10.** Prácticas de conservación (Escenario 2)

Los resultados obtenidos demuestran que la aplicación de prácticas de conservación de suelos también disminuyen la erosión a 107.91 Tn/Ha/año, pero en menor cantidad en comparación con el primer escenario.

Para el tercer escenario se aplicó las prácticas de conservación con un cambio de cobertura vegetal dando como resultado la siguiente figura:

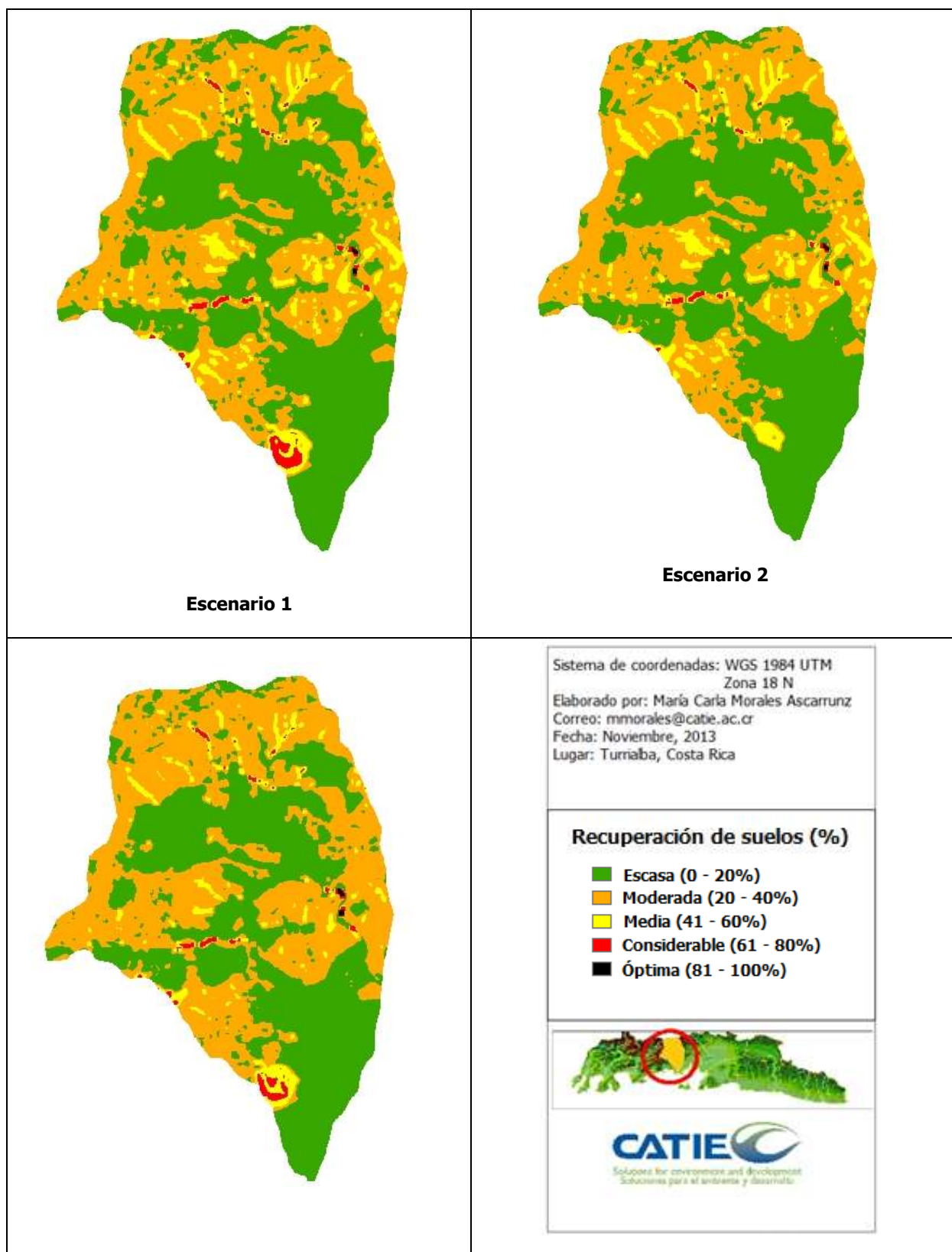




**Figura 11.** Cambio de cobertura y prácticas de conservación (Escenario 3)

Este tercer escenario mostró mayor eficiencia que los dos anteriores por que redujo la erosión a 77.82 Tn/Ha/año.

Para mostrar gráficamente qué áreas se podrían recuperar aplicando los cambios propuestos en los diferentes escenarios se restaron los resultados de la erosión actual menos los datos obtenidos de cada escenario propuesto y se obtuvieron los siguientes gráficos:

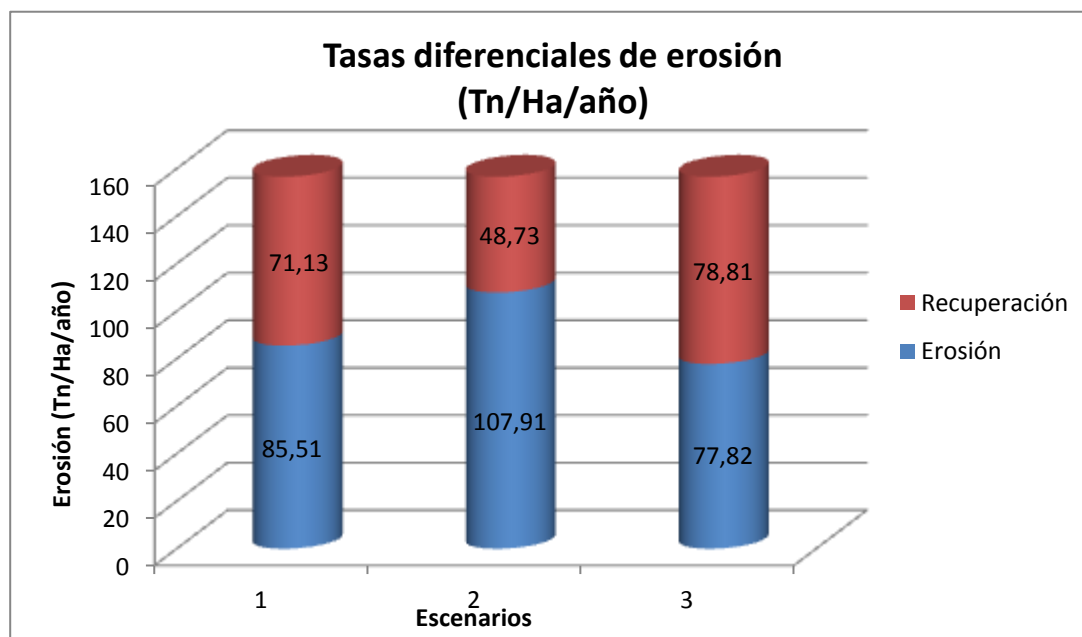


**Figura 12.** Recuperación de suelos

En los tres escenarios se mostró una reducción de la erosión debido a los cambios propuestos. La zona crítica de la cobertura Rak se mantuvo debido a que no se aplicó

ninguna práctica ni cambio de cobertura en el lugar. La cuenca alta recuperó moderadamente los suelos en comparación a la cuenca media, lo que indicó que el manejo adecuado de las áreas de pastoreo es indispensable para lograr buenos resultados. Existen áreas esparcidas en toda la cuenca donde la recuperación fue considerable siendo el más notorio la zona de los bosques secos. El cambio de cultivos anuales por sistemas agroforestales tuvo un impacto escaso, pero la aplicación de las mismas es necesaria para la conservación del suelo.

Con relación a la aplicación de prácticas de conservación (escenario 2), gráficamente no se observó diferencias en comparación a los otros dos escenarios, pero los resultados estadísticos muestran diferencias significativas como se muestra a continuación:



**Figura 13.** Erosión anual de suelos por escenario

Estos datos mostraron que el uso actual de la tierra es inadecuado por la alta pérdida anual de suelos que se estima (156.64 Tn/ha/año); comparado con el escenario 1 (cambio de cobertura) el modelo disminuyó la erosión en un 46%. En el escenario 2 con la aplicación de prácticas de conservación (cultivos según las curvas de nivel y cultivos en fajas) la reducción fue de un 32%. Mientras que el escenario 3 (cobertura vegetal y prácticas de conservación) los datos fueron más favorables con una disminución del 51%.

### 5.4.3. Diagnóstico y validación de la información

Para el diagnóstico y la validación de la información con relación al uso del suelo, precipitación y estudio de suelos se realizó un taller aplicando la metodología del "grupo focal" donde se hacen reuniones con 4 a 8 personas por espacio de un par de horas (Imbach, 2012), en este caso con cinco técnicos del Ministerio de Medio Ambiente quienes trabajan en el área de estudio para obtener información detallada.

En la reunión se explicó el motivo de la misma (en general se planteó la necesidad de entender el sistema productivo de la zona y obtener de ellos el conocimiento del área de estudio con relación a los parámetros a diagnosticar). Se elaboraron las siguientes preguntas y comentarios de apoyo.

**Cuadro 15:** Preguntas y comentario de apoyo para el grupo focal

<b>PREGUNTAS</b>	<b>COMENTARIOS DE APOYO</b>
¿Cuál es la información más detallada que tienen con respecto a: estudio de suelos, cobertura vegetal y precipitación?	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Conocer los cultivos, arboles, y sistemas que utilizan para cultivar la tierra.</li> <li>- Cuáles son las más productivas y consumen comúnmente</li> <li>- Conocer el estado de los suelos y su historia con relación al uso del suelo</li> <li>- Preguntar sobre las estaciones meteorológicas y si hay datos de las mismas</li> </ul>
¿Cuál es la zona de mayor erosión de la Unidad Hidrográfica Aquin/Saint-Louis Du Sud?	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Según sus criterios técnicos cual es la zona más erosionada y porque</li> </ul>
¿Cuál es la cuenca adecuada para realizar los cambios de cobertura vegetal y prácticas de conservación?	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Según sus criterios técnicos cuál o cuáles son las cuencas más erosionadas</li> <li>- Que cuenca escogerían para el estudio en cuestión y por que</li> <li>- Si conocen algún otro estudio parecido o existen datos anteriores</li> </ul>
¿Qué cobertura vegetal y prácticas de conservación son las recomendables para disminuir la erosión?	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Que cambios en la cobertura realizarían y porque</li> <li>- Qué prácticas de conservación existen en el lugar</li> <li>- Si la respuesta anterior es negativa, entonces porque no se utiliza ninguna práctica</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia

Durante el taller se logró un diálogo entre todos los participantes respondiendo a cada pregunta para obtener la mayor información posible sin salirse del contexto por lo que los comentarios de apoyo fueron fundamentales.

Para la cobertura vegetal del lugar se centraron en los cultivos existentes e importantes para la población:

- Cuenca baja: coco, maíz, plátano, sorgo, caña
- Cuenca media: café, aguacate, árbol del pan, mango, cítricos y maní
- Cuenca alta: monbin (sp forestal, *Spondia*), mapou, maní.

De todos estos productos los más comerciales son: maíz, coco, plátano, mango, caña, café y maní.

La información que se recabó en el taller demuestra que los técnicos conocen los cultivos existentes y cuales son comercialmente más importantes, pero no se tiene la extensión ni el lugar exacto dentro la cuenca, siendo datos importantes para la investigación.

Con relación a los datos para la obtención del Factor K, la información del taller fue la siguiente: En la cuenca baja los suelos son brunisoles, con muchos aluviones (deposiciones) de arcilla. En la parte media son vertisoles, mientras que en pendientes elevadas hay suelos fuertemente erosionados hasta llegar a roca madre. Finalmente en la parte alta de la cuenca los suelos son fersisoles con materia orgánica pobre. El estudio indica el porcentaje de los principales materiales existentes en los suelos, pero el dato sobre materia orgánica es deficiente. Es importante tomar en cuenta que es difícil transferir este índice a zonas tropicales, debido a la gran diferencia y variabilidad en las condiciones del suelo, según Wischmeier citado por Mora (1987).

Para la precipitación se requirieron los datos de estaciones meteorológicas, pero de acuerdo a la información que se recabó en el taller las mediciones de las antiguas estaciones posiblemente se encuentren en el ministerio de agricultura, pero esta posibilidad es incierta por tanto no están disponibles. Se cuenta con datos de la estación de Aquin desde 1912 hasta 1946 y del año 1987, esto dentro la cuenca Brodequin; y a nivel de la unidad hidrográfica se tiene información de otras estaciones, pero son datos incompletos y sin georeferenciación, factores indispensables para realizar la interpolación.

Como resultado del diagnóstico de los cinco factores importantes para calcular la erosión por medio de la RUSLE, dos de ellos (factor LS y factor P) no fueron tomados en cuenta dentro del análisis con el grupo focal debido a que no existen prácticas de conservación en el lugar (factor P) ni problemas con el cálculo del factor LS. En cambio la información que se obtuvo sobre cobertura vegetal, precipitación y estudio de suelos (factor C, R, y K) no fue suficiente para mejorar la calidad de los datos calculados con respecto a la erosión en la zona de estudio, pero sirvió como comparación entre el análisis técnico de campo y los resultados de la investigación como se vio en subíndices anteriores.

#### **5.4.4. Discusiones**

Se realizó un diagnóstico de los factores C, R y K por tener escasa información de los mismos a diferencia del factor LS con el cual no se tuvo inconveniente al momento de elaborar el mapa, ni el factor P por que no se realizan prácticas de conservación en el lugar.

Al término del diagnóstico se evidenció la falta de información específica en estos tres factores. Para el factor C debe considerarse el reunir datos como extensión y posicionamiento, además de priorizar cultivos de acuerdo a las necesidades del lugar para contar con extensiones que sean significativas y que puedan aportar a mejorar los resultados como los obtenidos por Lianes, et al. (2009) que por medio de la formulación original del modelo RUSLE a partir del manual de Renard, et al. (1996) realizó una evaluación del factor C, e indica que para mejorar el cálculo de los valores del factor C se debe realizar

investigaciones sobre la determinación del subfactor uso previo de la tierra, la rugosidad de la superficie y el coeficiente de efectividad de la cubierta del suelo para reducir la erosión; además pudo corregir parte de la sobreestimación de las pérdidas de suelo de tierras agrícolas señalada en estudios previos al obtener un cálculo más preciso del factor C en la cuenca del río Birris en Costa Rica.

Por otro lado existe una cobertura dentro la cuenca llamada Rak, la cual es endémica del lugar y tiene presencia de rocas. Esta cobertura es difícil de clasificar de acuerdo a las tablas existentes para este factor, debido a que no existe una cobertura de este tipo y como afirman Renard y asociados, citado por Borbón (2000), según nuevas revisiones de la RUSLE se debe incorporar en el Factor C el efecto producido por la presencia de rocas en la superficie del suelo. Las rocas reducen la disgregación de las partículas que se deriva del impacto de las gotas de lluvia pues suministran un efecto de escudo al suelo. Dado este rasgo en un terreno en ausencia de otro tipo de protección, no sería adecuado clasificarlo como suelo desnudo o sin cobertura aunque luzca como tal.

Los estudios de suelos con que se obtuvo el factor K tenían información mínima necesaria para realizar la interpolación con ayuda de Arc Gis. Sin embargo existen áreas dentro la zona de estudio donde no se levantaron muestras por la presencia de roca madre en la superficie donde antes había un suelo productivo.

Con relación al Factor R debido a la escasa información se procedió a aplicar el presente método y como la intensidad es un dato ausente se descartó aquellas lluvias que mostraban datos extremos para disminuir la sobreestimación del resultado final. La intensidad de lluvias es el dato más importante para el cálculo de este factor, porque la mayoría de los métodos estudiados requieren de esta información para determinar que lluvia puede considerarse erosiva y cual no, tal como propuso Hudson (1982) citado por Gómez (2002), que para países tropicales y subtropicales se desestima lluvias de intensidades menores de 25 mm/hr al considerarlas lluvias no erosivas.

Al analizar los resultados obtenidos en la estimación de la erosión se observó que en el primer y tercer escenario, los cambios de cobertura arrojaron datos favorables para la conservación de suelos. Las tasas diferenciales de erosión mostraron que las coberturas perteneciente a las sabanas son las que sufren mayor erosión por encontrarse en la parte alta y media de la cuenca y las que requieren mayor atención. El bosque seco ligeramente denso presentó una reducción importante con la regeneración natural. Debido a que los cultivos agrícolas ligeramente densos se encuentran en la cuenca baja, no hubo mucha diferencia entre los escenarios y se mezclaron con los sistemas agroforestales que se extienden a lo largo del río.

Con estos resultados se demostró que el tipo de cobertura vegetal (factor c) existente en el lugar es un factor determinante para el grado de erosión, tal como indica Ranzi, et al. (2012); el factor C juega un papel crítico en la determinación de la tasa de erosión. Las hojas de las plantas protegen el suelo del impacto de las gotas de lluvia y las raíces sostienen el

suelo. Las plantas también tienden a aumentar la infiltración de agua, lo que reduce el volumen de flujo superficial corriendo sobre la pendiente.

Otros resultados como los planteados por Zhou, et. al. (2008) sugieren que en una cuenca alta montañosa la erosión tiende a ocurrir cuando más del 30% del suelo está expuesto; una vegetación que cubra el 78% del suelo puede reducir en gran medida la erosión por el agua.

Finalmente Woo y Luk (1990) indican que la presencia de una cubierta vegetal puede aumentar la infiltración, reducir la superficie de escurrimiento y por lo tanto reducir la erosión laminar significativamente. Pero como indican Varis, et. al. (2001) y Sidle, et. al. (2004) si la cubierta vegetal es reducida, la escorrentía y la erosión del suelo puede aumentar en gran medida, lo que resulta en inundaciones y deslizamientos de tierras. Estas investigaciones ponen de manifiesto la importancia que tiene la cobertura vegetal sobre el suelo y la protección contra los efectos causados por la precipitación, respaldando de esta manera los resultados obtenidos.

En el segundo escenario se modela la aplicación de prácticas de manejo (factor P) que son métodos ampliamente aceptados que minimizan el impacto de la actividad agrícola sobre las aguas superficiales y las aguas subterráneas (Arabi, et al. 2007); cuyo efecto, según Ranzi, et al. (2012) se reflejan en la reducción de la cantidad y velocidad de la escorrentía del agua y por lo tanto reduce la cantidad de la erosión.

Como práctica de conservación también se debe considerar la liberación de terrenos degradados y/o frágiles (por ejemplo suelos superficiales en zonas de alta pendiente) para transformarlos en bosques secundarios y/o bosques riparios para la protección de los ríos, las quebradas y las nacientes tal como menciona Harvey, et al. (2003).

Por otro lado el conocimiento del tipo de suelo aporta al manejo adecuado y su recuperación. De acuerdo a Taylor and Francis Group (2006), la Asociación Francesa para el estudio del suelo (2008) y FAO (2006) los Brunisoles son equivalentes a los Cambisoles que generalmente constituyen buenas tierras agrícolas y se usan intensivamente. Tienen alta saturación y están entre los suelos más productivos de la tierra.

Los Cambisoles más ácidos, aunque menos fértiles, se usan para agricultura mixta y como tierras de pastoreo y forestales. En pendientes escarpadas es mejor conservarlos bajo bosque; esto es particularmente válido para los Cambisoles de zonas montañosas. En planicies aluviales bajo riego en la zona seca se usan intensivamente para producción de cultivos alimenticios y aceiteros. En terrenos ondulados o con colinas se cultivan con una variedad de cultivos anuales y perennes o se usan como tierras de pastoreo.

Los Cambisoles en los trópicos húmedos son típicamente pobres en nutrientes pero con influencia del agua freática en planicies aluviales son suelos altamente productivos para arroz inundado (*paddy soils*).

Los Nitisoles son los suelos equivalentes a los fersiasoles según Taylor and Francis Group (2006), la Asociación Francesa para el estudio del suelo (2008) y FAO (2006) que se encuentran entre los suelos más productivos de los trópicos húmedos. El solum profundo, poroso y la estructura del suelo estable del Nitisol permite el enraizamiento profundo y hace a estos suelos bastante resistentes a la erosión. El fácil laboreo, su buen drenaje interno y buenas propiedades de retención de agua se complementan con las propiedades químicas (fertilidad) que comparan favorablemente con las de la mayoría de otros suelos tropicales.

Los Nitisoles tienen contenidos relativamente altos de minerales meteorizables, y el suelo superficial puede contener elevado porcentaje de materia orgánica, en particular bajo bosque o cultivos forestales. Estos suelos se cultivan con plantaciones como cacao, café, caucho, ananá y también son muy utilizados para producir cultivos alimenticios en minifundios.

Grandes áreas de Vertisoles en los trópicos semiáridos están todavía sin utilizar o sólo se usan para pastoreo extensivo, cortar madera, quemar carbón y similares. Estos suelos tienen potencial agrícola, pero el manejo adecuado es una precondition para la producción sostenida. La fertilidad química comparativamente buena y su ocurrencia en planicies llanas extensas donde puede considerarse la recuperación y el laboreo mecánico son ventajas de los Vertisoles. Las características físicas del suelo y su difícil manejo del agua causan problemas.

Los usos agrícolas de los Vertisoles van desde muy extensivos (pastoreo, recolección de leña y quema de carbón) a través de producción de cultivos post-estación lluviosa en minifundios (mijo, sorgo, algodón y garbanzos) hasta agricultura bajo riego en pequeña escala (arroz) y gran escala (algodón, trigo, cebada, sorgo, garbanzos, lino, noug o semilla de Niger [*Guizotia abyssinica*] y caña de azúcar). Los cultivos forestales generalmente son menos exitosos porque las raíces de los árboles encuentran difícil establecerse en el subsuelo y se dañan cuando el suelo se expande y se contrae. Las prácticas de manejo para producción de cultivos deberían dirigirse primariamente al control del agua en combinación con la conservación o mejora de la fertilidad del suelo.

Al comparar el uso actual con el adecuado según el tipo de suelo, se observó que en la cuenca alta donde predominan los fersiasoles el mayor problema es el sobrepastoreo y la tala de árboles, a pesar que en algunas zonas todavía se conservan especies forestales según la información de los técnicos. En la cuenca media los vertisoles tienen un uso adecuado, pero la falta de manejo y fertilización empobrece estos suelos y corrobora la necesidad de aplicar prácticas de conservación. Finalmente los brunisoles en la cuenca baja son los menos afectados en su manejo por tener diversos usos y encontrarse en terrenos con poca pendiente, donde además se aplican sistemas agroforestales y cultivos anuales.

Por los resultados obtenidos y como indican Xu, et al. (2012), la alta cobertura vegetal y un control eficaz de las prácticas son factores importantes para la prevención de la erosión.



Se debe prestar mucha atención a estos dos factores en futuros trabajos de conservación del suelo.

Los métodos de trabajo han sido muy variables y no todos han sido precisos, por eso es importante tener datos de campo con los cuales pueda calibrarse la información del modelo y evitar sobre o subestimaciones.

## 5.5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.5.1. Conclusiones

A pesar de las sobreestimaciones que pudo generar el modelo debido a las diversas formas de calcularse los factores, se tiene una estimación cercana a la realidad y puede guiar acerca de qué tipo de investigaciones e información son necesarios.

Se concluye que para el control y disminución de la erosión en la cuenca Brodequin son necesarias ambas prácticas, como se muestra en el cuadro siguiente:

**Cuadro 16.** Cambio de cobertura y prácticas planteadas

COBERTURA ACTUAL	COBERTURA PROPUESTA	PRACTICA DE CONSERVACIÓN
Cultivo agrícola ligeramente denso (6 meses)	Sistema agroforestal a base de coco, café, cítrico y árbol del pan, también como protección contra inundaciones debido a que se encuentra en la cuenca baja.	Cultivo en curvas de nivel (1-2%). Debido a que esta área se encuentra en la cuenca baja donde la pendiente es muy baja y se puede aplicar esta práctica.
Bosques seco ligeramente denso (matorral degradado)	Restauración y reforestación del bosque, para protección debido a que se encuentra en el extremo que da al mar Caribe. Y para cubrir las necesidades energéticas	Ninguno
Rak (terreno desprovisto de veg.)	Rak área endémica, protección de área natural como área de aprovechamiento para el turismo	Ninguno
Sabana arbustivo (pastura natural pastoreada)	El encontrarse en la cuenca media y que es utilizada como zona de pastura, es importante implementar un sistema silvopastoril con pasto natural o mejorado	Cultivo en fajas a nivel o en contorno (13-16%) se adapta a la topografía del terreno. Utilizada para terrenos poco fértiles, en pastizales con gran peligro de erosión.
Sabana desnuda (sobrepastoreo)	Al igual que el anterior, pero al haber sobreexplotación, no solo basta la regeneración natural, sino que sea un área de pastizal cultivado manejado sin pastoreo, debido a que se encuentra en la cuenca alta	Cultivo en fajas a nivel o en contorno (17-20%). Idem al anterior solo varía la pendiente.
Sistema agroforestal ligeramente denso (Palmeras, cocos cubiertos)	Mantenimiento de los sistemas agroforestales, se puede aplicar algunas prácticas pero depende la pendiente	Ninguno

El factor de coberturas (factor C) es muy significativo dentro la ecuación, puesto que tuvo mayor efecto sobre la reducción de la erosión de acuerdo a los resultados obtenidos.

Las prácticas de conservación (factor P) son muy importantes con o sin un cambio de cobertura vegetal, puesto que logran disminuir la erosión.

### **5.5.2. Recomendaciones**

Recabar datos de extensión y georreferenciación de los cultivos comerciales para aumentar la precisión del análisis de la cobertura vegetal (factor C) y disminuir el error del estudio.

Realizar otro estudio de suelos con mayor profundidad en los datos para mejorar la calidad de la información en relación al Factor K.

Realizar los cambios propuestos por el plan de gestión del 2012 sobre todo el cambio de cobertura vegetal, dando énfasis a la reforestación, restauración natural, sistemas agroforestales y protección de zonas de descarga; aplicación de prácticas de conservación para disminuir los efectos que están causando los malos manejos y prácticas agropecuarias en la zona; además de mejorar la calidad de vida de la población, aumentar su producción agrícola, ganadera y cubrir las necesidades básicas de energía.

Eliminar la ganadería libre para recuperar y conservar las tierras en la cuenca alta y media.

Se recomienda realizar el estudio a nivel de cuenca, no de unidad hidrográfica, porque el análisis del factor C (uso de suelo) y Factor LS (pendiente) difieren de una cuenca a otra.

Los técnicos del ministerio recomiendan las siguientes acciones:

- En la cuenca alta: aumentar la cobertura forestal con casuarina equisetifolia, anular el maní, anular el libre pastoreo
- En la cuenca media: aumentar el cultivo de café con árboles de cobertura como *erythenia sp*, *inga verra*, *glyricidia sp*, *gayacum sp*, *acacia mearnsii*, *cassia sp*, *cedrela odorata*. Implementar terrazas y cultivos siguiendo las curvas de nivel, muros con material del lugar y cercas vivas.
- En la cuenca baja: cultivar árbol del pan, plátano, aguacate, ñame, yuca, maní con prácticas de conservación dependiendo el cultivo; colocar gaviones en riberas de río.
- En toda la cuenca evitar pendientes fuertes para sembrar.

Para un mejor control y disminución de la erosión es necesario aplicar otras prácticas las cuales no pueden ser medidas con la RUSLE pero actúan sobre la capacidad de infiltración, resistencia al arrastre, la fertilidad del suelo o sobre todos a la vez, como ser:

- Fertilización orgánica
- Encalados
- Control fitosanitario con un manejo integrado
- Elección de alternativas de cultivos
- Pastoreo controlado
- Cubiertas vegetales vivas o muertas

Finalmente realizar investigaciones en el lugar para que la base de datos sea más precisa y así obtener resultados exactos que ayuden a una mejor toma de decisiones siguiendo la metodología planteada.

## **5.6. LITERATURA CITADA**

Angima S.D., Stott D.E., O'Neill M.K., Weesies G.A., 2003. Soil erosion prediction using RUSLE for central Kenya highland conditions. *Agr Ecosyst Environ* 97, 295-308 pp.

Arabi, M., Frankenberger, J.R., Engel, B.A., Arnold, J.G., 2007. Representation of agricultural conservation practices with SWAT. *Hydrologic Processes* 22, 3042 - 3055 pp.

Arc Gis Resource Center. Consultado en diciembre de 2013. Disponible en: <http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/na/00r90000001n000000/>

Asociación Francesa para el estudio del suelo. 2008. Repositorio de suelo (Référentiel pédologique). Ed. Quae. Francia. 435 p.

Borbón, Á. 2000. Análisis de la producción y transporte de sedimentos en la cuenca del río General. Informe de proyecto de graduación. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica.

Casalí J., Giménez R., De Santisteban L., Álvarez-Mozos J., Mena J., Del Valle De Lersundi J., 2009. Determination of long-term erosion rates in vineyards of Navarre (Spain) using botanical benchmarks. *Catena* 78, 12-19 pp.

Desmet, P.J.J., Govers G. 1996. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation*. 51: 427-433.

FAO, 2006. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Roma, Italia. 127 p.

Global Weather Data for SWAT. 2012. Consultado el 1 Dic 2012. Disponible en: <http://globalweather.tamu.edu/>

Gómez, F. (2002). Evaluación de la erosión potencial y producción de sedimentos en tres cuencas de Costa Rica. UCR. 191 p.

Gutiérrez, María A. Determinación del índice de erosividad de las lluvias y su relación con la cobertura vegetal, suelos y pendientes, para la cuenca del río Grande de Térraba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Universidad de Costa Rica – C.A.T.I.E. Turrialba. 1987

Harvey, C.A.; Villanueva, C.; Villacís, J.; Chacón, M.; Muñoz, M.; López, M.; Ibrahim, I.; Gomez, R.; Martínez, J.; Navas, A.; Sáenz, J.; Sánchez, D.; Medina, A.; Vilchez, S.; Hernández, B.; Pérez, A.; Ruiz, F.; López, F.; Lang, I.; Kunth, S. y Sinclair, F.L. 2003. Contribución de las cercas vivas a la productividad e integridad ecológica de los paisajes agrícolas en América Central. *Revista Agroforestería en las Américas*, 10 (39/40): 30-39.

IICA y Secretaría de estado de Agricultura. 1982. Intensidades máximas y erosividad de las lluvias en la Republica Dominicana. Información y procedimientos. Santo Domingo. 140 p.

Imbach, A. 2012. Estrategias de vida analizando las conexiones entre la satisfacción de las necesidades humanas fundamentales y los recursos de las comunidades rurales. Turrialba. Costa Rica. 55 p.

Kinnell, P.I.A., 2010. Event soil loss, runoff and the Universal Soil Loss Equation family of models: a review. *Journal of Hydrology* 385, 384–397 pp.

Lianes E; Marchamalo M; Roldán M. 2009. Evaluación del factor C de la RUSLE para el manejo de coberturas vegetales en el control de la erosión en la cuenca del río Birrís, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 33(2): 217-235 pp.

McCool, D.K., Brown, L.C., Foster, G.R., et al., 1989. Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of ASAE* 32 (5), 1571–1576.

MDE-PNUD. 2012. Guía metodológica para la elaboración del plan de gestión de cuencas en Haití, consultado el 15 Oct 2012, Disponible en: <http://haitienvironnement.org/GuiaMethologique/Guide.pdf>

Ministerio de Medio Ambiente MDE – PNUD. 2012. Reporte de los estudios de suelos de la Unidad Hidrográfica Aquín – Saint Louis du Sud.

Ministerio de medioambiente MDE – PNUD. 2012. Plan de cogestión de la Unidad hidrográfica Aquin /Saint – Louis de Sud, consultado el 15 Oct 2012, Disponible en: <http://www.haitienvironnement.org/Rapports/PlanCogestion.pdf>

Montgomery D.R., 2007. Soil erosion and agricultural sustainability. *Proceeding of the National Academy of Science. Journal of the American Chemical society. USA* 104 (33), 13268-13272.

Mora, I. 1987. Evaluación de la pérdida de suelo mediante la ecuación universal (EUPS): Aplicación para definir acciones de manejo en la cuenca del río Pejibaye, Vertiente Atlántica, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Universidad de Costa Rica – C.A.T.I.E. Turrialba.

Portilla, R. 1994. Simulación hidrológica y de erosión de suelos utilizando el modelo distribuido ANSWERS: aplicación en la cuenca del río Pejibaye, Cartago, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. C.A.T.I.E. Turrialba, Costa Rica.

Ranzi R., Hung Le T., Rulli M. C. 2012. A RUSLE approach to model suspended sediment load in the Lo river (Vietnam): Effects of reservoirs and land use changes. *Journal of Hydrology* 422–423. 17–29 pp.

Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., Mc Coold. K., Yoder D.C., 1997. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). USDA Agriculture Handbook No. 703, 404 pp.

Saborío, J. y Bruce A. 1997. Análisis espacial de erosión y el transporte de sedimentos en tres micro-cuencas de Arenal, Costa Rica. CREED Costa Rica Notas Técnicas. No.7. Centro Científico Tropical. San José. Costa Rica.

Saborío, J. 2000. Estudio de erosión para la República de Guatemala. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba.

Sidle R.C., Taylor D., Lu X.X., Adger W.N., Lowe D.J., de Lange W.P., Newnham R.M., Dodson J.R., 2004. Interactions of natural hazards and society in Austral–Asia: evidence in past and recent records. *Quaternary International* 118–119. 181–203 pp.

Sohl T. Claggett P. 2013. Clarity versus complexity: Land-use modeling as a practical tool for decision-makers. *Journal of Environmental Management* 129. USA. 235-243 pp.

Taylor and Francis Group. 2006. Encyclopedia of soil science. Consultado en 3 Mar 2014. Disponible en: <http://books.google.com.bo/books?id=sjNZ3LSUz80C&pg=PA249&lpg=PA249&dq=Fran%C3%A7ais+syst%C3%A8me+de+classification+des+sols+brunisol&source=bl&ots=YVRgTFgwI4&sig=jshx-cBgpPdGTH15zjAClLrsfr8&hl=en&sa=X&ei=gG0jU5PxLoqhkQfCx4GwAQ&ved=0CEcQ6AEwBA#v=onepage&q=Fran%C3%A7ais%20syst%C3%A8me%20de%20classification%20des%20ols%20brunisol&f=false>

Toy T.J., Foster G.R., Renard K.G., 1999. RUSLE for mining, construction and reclamation lands *J. Soil Water Conservancy* 54, 462-467

Vahrson, W. 1990. El potencial erosivo de la lluvia en Costa Rica. *Agronomía costarricense (C.R.)*. 14 (1): 15-24.

Varis O., Vakkilainen P, 2001. China's 8 challenges to water resources management in the first quarter of the 21st Century. *Geomorphology* 41. 93–104 pp.

Velásquez, S. 2012. Erosión de suelos utilizando la EUPSR (RUSLE). Notas de clase. Turrialba, Costa Rica. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE)

Wischmeier W.H., Smith D.D., 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Agriculture Handbook No. 537. USDA, Washington DC. 13-27 pp.

Woo M., Luk S., 1990. Vegetation effects on soil and water losses on weathered granitic hillslopes, south China. *Physical Geography* 11, 1–16 pp.

Xu L., Xu X., Meng X. 2012. Risk assessment of soil erosion in different rainfall scenarios by RUSLE model coupled with Information Diffusion Model: A case study of Bohai Rim, China. *Catena* 100. 74–82 pp.

Zhou P., Luukkanen O., Tokola T., Nieminen J. 2008. Effect of vegetation cover on soil erosion in a mountainous watershed. China. *Catena* 75. 319–325 pp.

## **VI. ARTÍCULO 2: ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS EN DIFERENTES ESCENARIOS Y BAJO MODELOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN UNA CUENCA DE LA UNIDAD HIDROGRÁFICA DE AQUIN/SAINT LOUIS, HAITÍ**

Carla Morales, Javier Saborío, Christian Brenes

Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica

### **6.1. RESUMEN**

El cambio climático es evidente en estos tiempos, hoy en día los estudios se centran principalmente en los efectos que tendrán estos cambios sobre el ecosistema y la vida siendo la precipitación y la temperatura los principales factores de estudio. En esta investigación y con ayuda del modelo SWAT que es una herramienta útil para este tipo de análisis, estos dos parámetros fueron estimados hasta el año 2030 para ver su influencia en la generación de sedimentos en la zona de estudio tomando en cuenta tres escenarios basados en los cambios de cobertura vegetal y prácticas de conservación.

Los resultados muestran que existen una correlación significativa entre la precipitación y la generación de sedimentos, pero otros factores como la cobertura vegetal y el manejo del suelo tiene mucha relevancia al momento de analizar el proceso de sedimentación. Se debe realizar un cambio de cobertura vegetal basada mayormente en la aplicación de sistemas agroforestales y silvopastoriles junto con prácticas de conservación de suelos de aplicación lógica como el cultivo según curvas de nivel y cultivos en fajas; además de la conservación de bosques tomando en cuenta los efectos que el cambio climático generará a futuro.

Debido a la falta de información no fue posible realizar la calibración; sin embargo se concluye que los cambios planteados en el plan de cogestión de la Unidad Hidrográfica Saint/Louis du Sud son necesarios para el control de la erosión y la disminución de sedimentos teniendo esta investigación como referencia.

**Palabras claves:** Sedimentación, SWAT, cobertura vegetal, conservación de suelos

### **ABSTRACT**

Climate change is evident in these times; nowadays studies mainly focus on the effects these changes will have on the ecosystem and life, with precipitation and temperature the main factors of study. In this research and with the help of SWAT model, which is a useful tool for this type of analysis, these two parameters were estimated until 2030, to see its influence on the generation of sediments in the study area taking into account three scenarios based in soil coverage and conservation practices changes.

The results show that there is a significant correlation between precipitation and sediment generation, but other factors such as vegetation coverage and soil management,

are more relevant when analyzing the sedimentation process. A change of vegetation coverage must be done, based mostly on the implementation of agroforestry and silvopastoral systems, together with soil conservation practices of logical application, such as contour lines farming and strip cropping; besides forests preservation of forests, considering the effects that climate change will generate future.

Due to lack of information, calibration was not possible; however it is concluded that the changes proposed in the co-management plan of the Saint / Louis du Sud Hydrographic Unit, are needed to control erosion and sediment reduction, taking this research as reference.

**Keywords:** Sedimentation, SWAT, vegetation cover, soil conservation

## **6.2. INTRODUCCIÓN**

El equilibrio dinámico de la erosión, de los sedimentos, transporte y deposición en una cuenca hidrográfica puede ser modificado por factores naturales, como el clima, los cambios de vegetación y factores antropogénicos, como embalses, las prácticas agrícolas y el uso del suelo (Walling, 2011), pero también este flujo es sensible al programa de control de sedimentos y al cambio climático (Shrestha, et. al. 2013).

El cambio climático en combinación con las actividades humanas intensivas acarrea una serie de graves problemas relacionados con los grandes sistemas fluviales, tales como aumento de la precipitación, provocando mayor erosión, sedimentos, grandes riesgos climáticos a escala como sequías e inundaciones y disminución de caudal de los ríos en la estación seca (Kundzewicz, et. al. 2009).

Kazimierski (2011) indica que existe una marcada correlación entre las precipitaciones medias anuales de cada cuenca y la tasa de generación de sedimentos anuales, pero Xu (2009) ratifica que la precipitación anual (Pm) podría explicar sólo el 16-37% de la variación de la concentración de los sedimentos en suspensión. Por lo tanto la variación en la precipitación no es la principal causa para la variación en la concentración de sedimentos. Las causas son la actividad humana como la minería a gran escala, la construcción urbana, carreteras, la construcción de embalses, la reforestación y la conservación de suelo y agua en diversos periodos y para diversos afluentes.

La cuenca de Brodequin que pertenece a la Unidad Hidrográfica Aquin/Saint Louis se encuentra en el departamento Sud de Haití y tiene una extensión de 36 Km<sup>2</sup>, dentro la cual se encuentran la población de Aquin, ubicada en la cuenca baja haciendo que la vulnerabilidad social sea alta (62%) según el MDE-PNUD (2012).

Esta población genera una fuerte presión sobre la cuenca, dentro la cual se observó una grave deforestación y sobre pastoreo en la parte alta y media, que ocasiona una erosión donde la capa arable casi ha desaparecido llegando en algunas zonas a la roca madre; mientras en la cuenca baja en época de lluvias se inunda. Por estos problemas en el plan de



cogestión de la Unidad Hidrográfica de Saint/Louis du Sud, se catalogó esta cuenca como prioritaria para realizar un manejo y conservación de suelos dada su importancia a nivel ecológico y productivo y sugiere realizar cambios en la cobertura vegetal, con énfasis en la reforestación, sistemas agroforestales, conservación de áreas endémicas y cultivos perennes.

Como el modelo hidrológico de SWAT se basa en la ecuación del balance hídrico y es capaz de simular la hidrología, ciclo de pesticidas, nutrientes y transporte de sedimentos, es una herramienta ideal para realizar la investigación porque ayuda a los gestores de recursos hídricos en la predicción de los impactos de los sedimentos presentes en el agua, los químicos del campo, los impactos de las prácticas de manejo del suelo, agua y rendimientos nutricionales agrícolas Gómez (2002). El modelo es muy adecuado para cuencas hidrográficas complejas con diferentes suelos, uso de la tierra y diferentes condiciones de manejo durante largos períodos de tiempo (Nietsch, et. al. 2001; Arnold, et. al. 1998; ASCE, 1999).

Los resultados muestran que un cambio de cobertura vegetal es significativamente importante si se pretende reducir la producción de sedimentos, y las coberturas de mayor influencia para este control son la reforestación y los sistemas agroforestales. Aunque las prácticas de conservación por si sola influyen positivamente, la aplicación de ambos es recomendable para una mayor reducción en la producción de sedimentos.

La gestión de cuencas en sistemas fluviales y cuerpos de agua son crecientemente importantes en todas partes del mundo y estos procesos de erosión y sedimentación poseen relevancia desde un punto de vista socioeconómico y ambiental (UNESCO, 2010). Es ahí donde radica la importancia de esta investigación, puesto que esos procesos son aspectos clave dentro del objetivo general del plan de cogestión. Además, se estima que en las próximas décadas más del 50% de la capacidad de almacenamiento de los reservorios de agua del mundo pueden verse reducidos como producto de los procesos de sedimentación. Entonces no hay que escatimar esfuerzos por alcanzar una gestión eficiente de los sedimentos, en el contexto de un desarrollo sustentable de los recursos hídricos (UNESCO, 2010).

Estos esfuerzos tienen que centrarse en realizar mayores investigaciones para obtener mejores resultados que ayuden en la toma de decisiones acertadas y puedan aumentar la productividad agrícola y económica de la zona.

### **6.3. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **6.3.1. Área de estudio**

La unidad hidrográfica de Aquin/Saint-Louis du Sud con una superficie de 711 km<sup>2</sup>, es un conjunto de varias cuencas y cuencas costeras con similares características biofísicas. Se extiende en la costa sur de Haití en el extremo este del departamento del Sur; esta principalmente compuesto por los municipios de Aquin y Saint-Louis du Sud con una población de 190.589 habitantes (estimación del 2009) (MDE – PNUD, 2012).

Dentro la unidad hidrográfica se encuentran ocho cuencas principal que lleva al mar Caribe de 386.6 Km<sup>2</sup> de superficie, lo que representa el 54% del área; y nueve cuencas costeras con numerosos barrancos que también dan al Mar Caribe con una extensión total de 321.5 km<sup>2</sup>, que representa el 46% de la superficie total de la unidad hidrográfica.

Las cuencas hidrográficas de la región oriental tiene una mayor superficie pero de muy baja pendiente (0-3%), a diferencia de las cuencas hidrográficas en la parte occidental que tiene pendientes más elevadas incluso mayores a 75%.

Con respecto a las precipitaciones existen dos épocas, la lluviosa y seca. La temporada de lluvias es entre abril y octubre, pero mayo y octubre son los meses más lluviosos y la estación seca comienza en noviembre y termina en marzo.

En relación a los suelos se han identificado cuatro tipos dominantes en la unidad hidrográfica Aquin/Saint-Louis du Sud, los brunisoles, vertisoles, fersisoles y suelos poco evolucionados.

La Unidad Hidrográfica de Aquin/Saint-Louis du Sud tiene ciertas características potencialmente atractivas para el desarrollo del turismo, eco-turismo, el desarrollo de actividades productivas rentables (sistema agroforestal basado en café, coco, árbol del pan, los monocultivos de cajú, arroz y la caña de azúcar, también la cría de cabras vacas y la pesca).

### **6.3.2. Obtención de datos climáticos hasta el 2030**

Para la investigación se recurrió a los datos diarios de precipitación y temperatura desde 1979 hasta el 2010 generados por Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) obtenidos a través del Global Wather Data for SWAT (<http://globalweather.tamu.edu/>).

Para crear escenarios a futuro hasta el año 2030 se utilizó los escenarios del climate wizard de la página <http://climatewizardcustom.org>, dentro del cual se introdujo el mapa del área de estudio para obtener las anomalías correspondientes y calcular la variabilidad climática.

Estas anomalías fueron de temperatura como dato absoluto y precipitación en porcentaje que se procesaron mediante la multiplicación de la precipitación diaria con el porcentaje de variación y la adición del incremento a la temperatura máxima y mínima diaria para modelar el clima los siguientes 20 años bajo un escenario A2 (el crecimiento económico y poblacional se mantiene igual) (CEPAL, 2010). No se utilizó el B2, asumiendo que no se presentará ninguna solución local con respecto a la mitigación del cambio climático.

SWAT necesita como insumo la tabla Userwgn la cual presenta una serie de parámetros estadísticos de la data de clima a utilizar en la corrida del modelo que pueden ser generados

mediante vía ejecutable WGN Excel Macro. Los datos de clima (precipitación y temperatura) se introdujeron a la macro WGN.

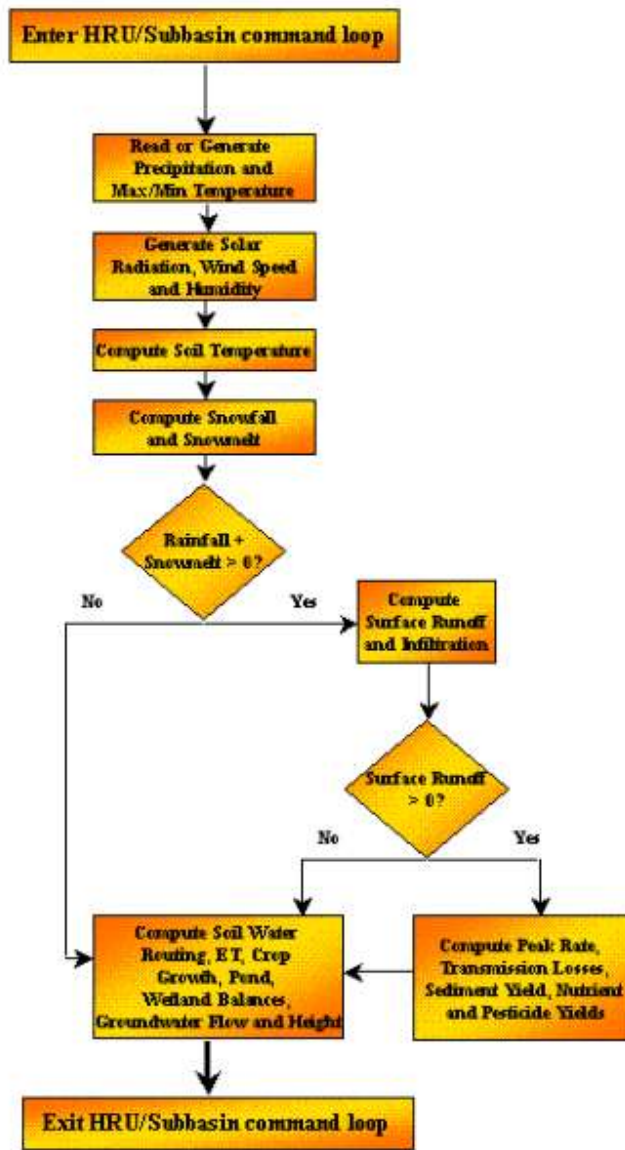
El mapa de suelos se elaboró en base al mapa mundial de suelos de la FAO y toda la información necesaria (textura, pH, estructura, materia orgánica, color, densidad aparente) requerida por el modelo se extrajo del manual de procedimientos de la FAO (1993). Los parámetros hidrológicos como la densidad aparente, conductividad hidráulica y el agua disponible se calcularon a partir del porcentaje de arena, arcilla y materia orgánica con el SPAW hydrology disponible en página web:

<http://hydrolab.arsusda.gov/SPAW/SPAWDownload.html>.

Se trabajó con un mapa de cobertura vegetal digitalizado con 6 clases de vegetación (cultivos anuales, bosque seco ligeramente denso, sistemas agroforestales, sabana densa, sabana desnuda y rak) las cuales se reclasificaron según las clases de cultivo de la base de datos de SWAT (Agricultural land generic, Forest deciduous, Forest mixed, Range brush y Range Southwestern US).

Se elaboró un modelo digital de elevaciones (MDE) a partir de curvas de nivel digitalizadas (equidistancia de 20 m). De la misma manera se dispuso de la hidrografía digital de la cuenca. Usando la delineación automática de SWAT2012 se dividió la cuenca Brodequin en 25 subcuencas con la opción de 'quemado de ríos' activada.

El modelo SWAT al introducir datos de uso de suelos, suelos y pendiente, define los HRU que son las unidades hidrológicas de respuestas, que es la combinación única de un tipo específico de suelo y uso de tierra (Di Luzio, et al. 2002).



**Figura 14.** Diagrama de flujo de HRU/subcuencas en SWAT  
Fuente. Neitsch, et. al, 2005

Esta figura muestra la secuencia general de los procesos usados por SWAT para modelar las fases del ciclo hidrológico (Neitsch, et. al. 2005).

Para correr el modelo es necesario tener un periodo de calentamiento de 3 años para estabilizar todos los parámetros, principalmente aquellos relacionados con el balance hídrico, nutrientes, etc. Estos años se modelan pero no se incluyen en la salida de los datos, entonces la modelación en este caso comenzará desde el año 1982 (Winchell, et al. 2012).

### 6.3.3. Modelación de escenarios hasta el 2030

Se modeló tres escenarios basados en cambios de coberturas vegetal y prácticas de conservación según el siguiente cuadro:

**Cuadro 17:** Datos introducidos a SWAT

Escenario base(*)	Escenario 1(*)	Escenario 2	Escenario 3
AGRL (Agricultural land generic)	FRST (forest mixed)	Curvas de nivel	FRST + Curvas de nivel
FRSD (forest deciduous)	FRSD (forest deciduous)	Ninguno	FRSD
SWRN (Range Southwestern)	SWRN (Range Southwestern)	Ninguno	SWRN
FNGB (Range brush)	RNGE (Range grasses)	Cultivos en fajas	RGNE + Cultivos en fajas
SWRN (Range Southwestern)	PAST (pasture)	Cultivos en fajas	PAST + Cultivos en fajas
FRST (forest mixed)	FRST (forest mixed)	Curvas de nivel	FRST + Curvas de nivel

Fuente: Elaboración propia

\*: Arnold, J., et al. (2012)

Se introdujo los datos de acuerdo al formato del modelo, se corrió el programa y obtuvieron resultados por subcuencas expresados en Tn/Ha generada hasta el año 2030 bajo un escenario A2.

Estos datos se analizaron con el grupo focal (tecnicos del ministerio) y se reemplazó el área dedicada a pastos cultivados (PAST) por forestación mixta (FRST), como indica el siguiente cuadro:

**Cuadro 18:** Datos introducidos con nueva cobertura vegetal

Escenario base(*)	Escenario 1(*)	Escenario 2	Escenario 3
AGRL (Agricultural land generic)	FRST (forest mixed)	Curvas de nivel	FRST + Curvas de nivel
FRSD (forest deciduous)	FRSD (forest deciduous)	Ninguno	FRSD
SWRN (Range Southwestern)	SWRN (Range Southwestern)	Ninguno	SWRN
FNGB (Range brush)	RNGE (Range grasses)	Cultivos en fajas	RGNE + Cultivos en fajas
SWRN (Range Southwestern)	FRST (forest mixed)	Curvas de nivel	FRST + Curvas de nivel
FRST (forest mixed)	FRST (forest mixed)	Curvas de nivel	FRST+ Curvas de nivel

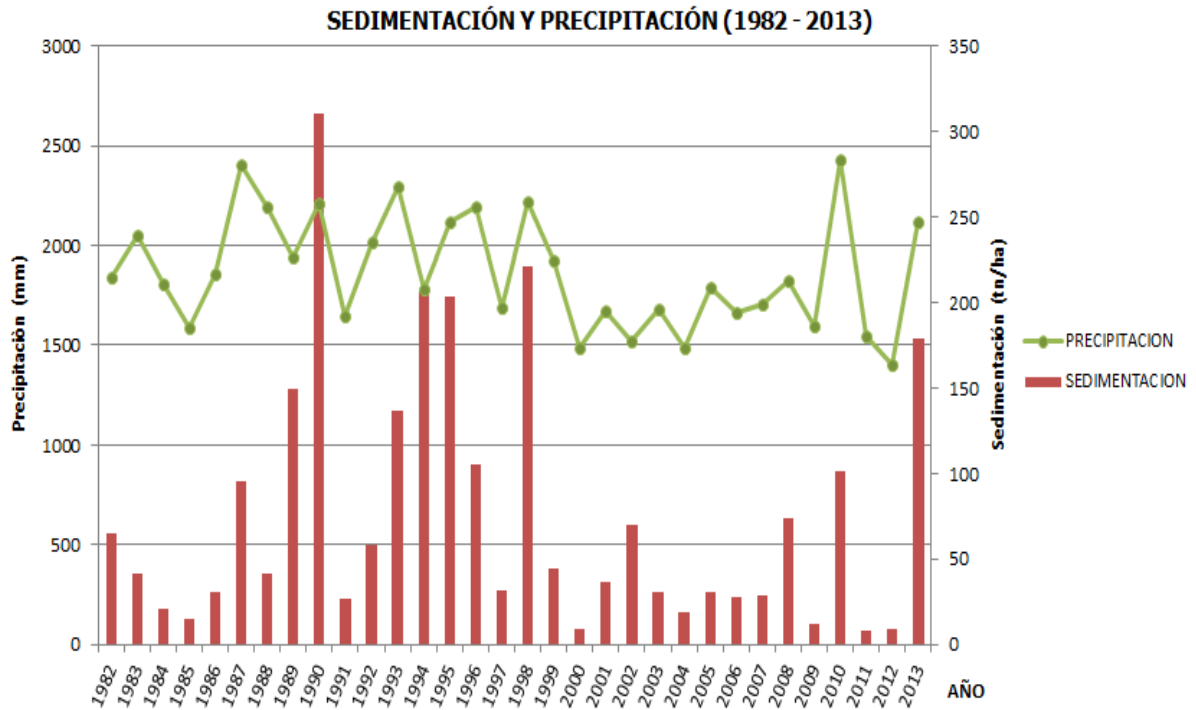
Fuente: Elaboración propia

\*: Arnold, J., et al. (2012)

Los resultados de los promedios anuales de sedimentación hasta el año 2030 se obtuvieron con ayuda de la herramienta SWAT PLOT.

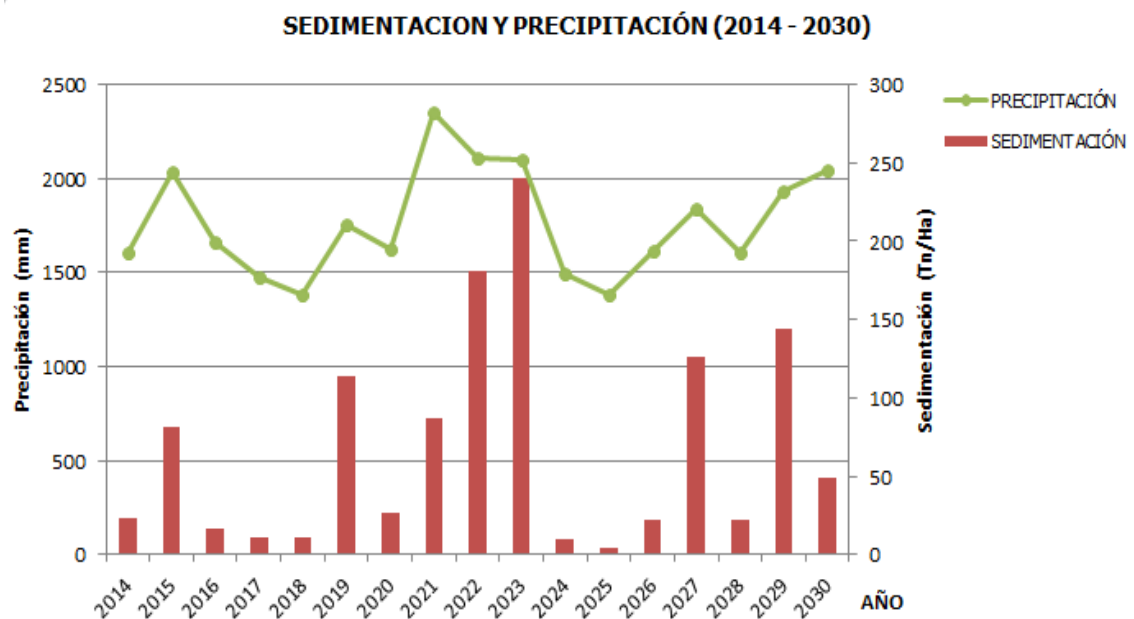
## 6.4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Para conocer cuál escenario genera menor cantidad de sedimentos a futuro tomando en cuenta el cambio climático en un escenario A2, se analizaron las siguientes figuras.



**Figura 15:** Sedimentación y precipitación (1982 - 2013)  
Fuente. Elaboración propia

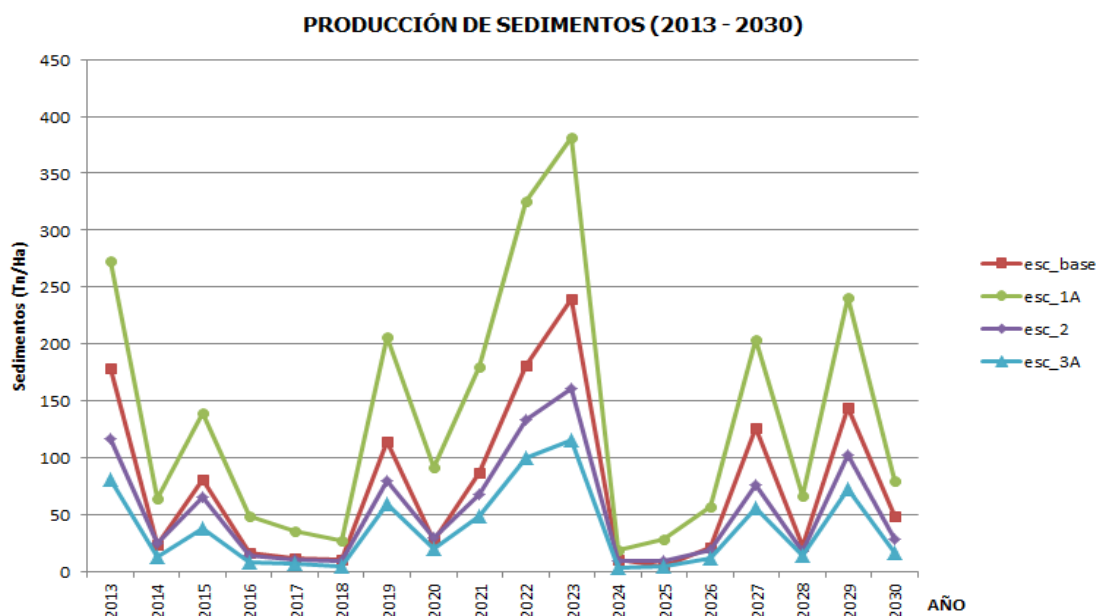
En la figura anterior se observó la relación existente entre la producción de sedimentos y la precipitación, y se realizó un análisis de correlación para medir estadísticamente esta relación donde se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.62.



**Figura 16.** Sedimentación y precipitación (2014 – 2030)  
Fuente. Elaboración propia

La relación entre precipitación y sedimentación de 2014 a 2030 aumentó de acuerdo al anterior gráfico y esto se corrobora con el coeficiente de correlación de 0.73.

Debido a que las estimaciones de la precipitación son variables y no se pueden controlar, la sedimentación va a seguir una dinámica relacionada con las lluvias, sin embargo la cantidad de sedimentos que se presenta en función de la precipitación pueden disminuir o aumentar dependiendo del uso de suelo y las prácticas de conservación como se puede apreciar en la siguiente figura.



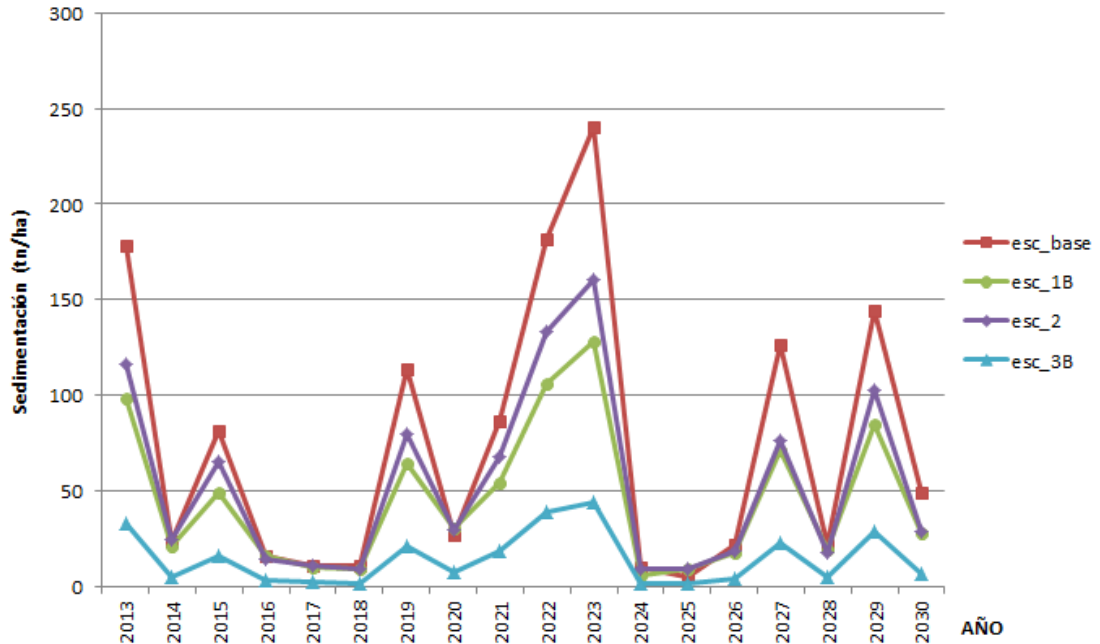
**Figura 17.** Producción de sedimentos A (2013 -2030)

Fuente: Elaboración propia

Los resultados que se obtuvieron muestran que la aplicación de prácticas de conservación (Esc\_2) con la misma cobertura reduce la sedimentación; a diferencia del cambio de cobertura con pastos (Esc1\_A) que influyo de manera negativa, puesto que incrementó la sedimentación. Por otro lado el cambio de cobertura vegetal y la aplicación de prácticas (Esc3\_A) tienen un resultado significativo comparado con los otros escenarios.

Según los datos arrojados por el modelo, en el escenario base la cobertura que mayor sedimentación genera es la SWRN (Range Southwestern), clasificación que pertenece a la cobertura Rak y sabana desnuda. Para modelar el Esc\_1A, la cobertura vegetal Rak se mantuvo por ser una zona endémica la cual se desea conservar, en cambio la sabana desnuda se cambió a un uso de suelo de pastura cultivada (PAST), pero el modelo indicó que este cambio de cobertura produjo mayor sedimentación; entonces se optó por realizar un segundo cambio a un sistema agroforestal (FRST, forest mixed) dando resultados más favorables como se observa a continuación.

### PRODUCCIÓN DE SEDIMENTACION (2013 - 2030)



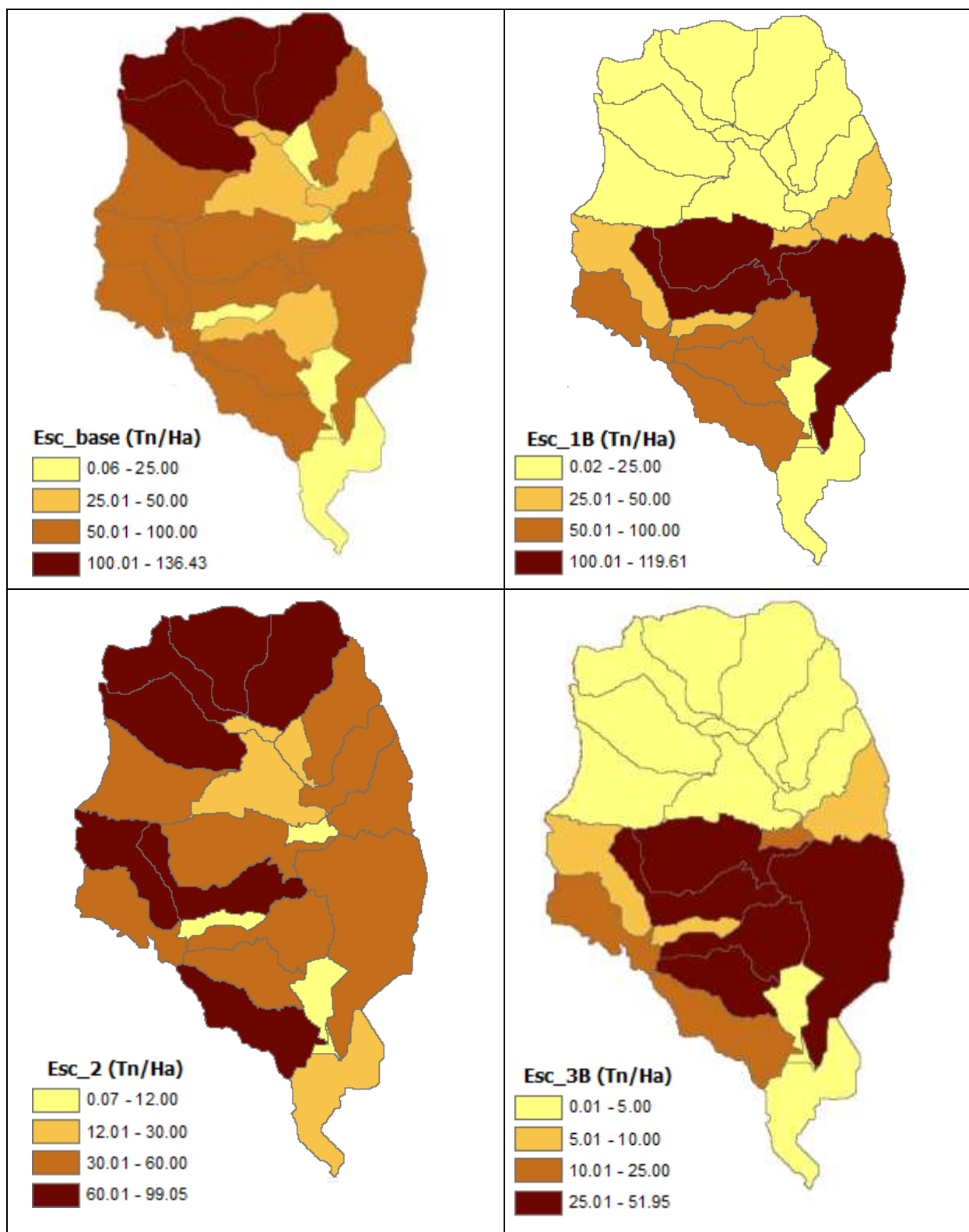
**Figura 18.** Producción de sedimentos B (2013 -2030)

Fuente: Elaboración propia

Se observó que este cambio de cobertura (esc\_1B) disminuye significativamente la sedimentación, siendo más favorable que solo la aplicación de prácticas de conservación (esc\_2) que también disminuyó la sedimentación pero no tan eficientemente como el primer escenario. El cambio drástico se produjo con la aplicación de prácticas de conservación y el nuevo uso de suelo (Esc3\_B) donde se puede apreciar una diferencia significativa.

En ambos gráficos la producción de sedimentos entre los años 2020 y 2024 es elevada debido al incremento de la precipitación, constando de esta manera la relación existente entre estos factores. Se comprobó que los cambios efectuados en los modelos en relación a la cobertura vegetal y las prácticas deben ser llevadas a cabo para la conservación de los suelos en el área de estudio tal como se observa en la siguiente figura, donde se muestran las áreas recuperadas y la reducción en la producción de sedimentos.





**Figura 19.** Mapas de producción de sedimentos B (2013 – 2030)

Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se observa que el cambio de cobertura genera un impacto positivo en la cuenca alta reduciendo la producción de sedimentos (comparación entre Esc\_base y Esc\_1B). Entre el Esc\_1B y el Esc\_2 la diferencia importante está en los datos de las áreas oscuras donde la producción de sedimentos es menor con la sola aplicación de prácticas de conservación; pero al compararlo con el Esc\_3B se evidencia que el cambio de cobertura más la aplicación de prácticas disminuye la generación de sedimentos de manera significativa incluso en las zonas críticas.

Los resultados muestran que los cambios de cobertura tienen una importante influencia en la erosión y sedimentación dentro la cuenca; el tipo de cobertura puede tener una incidencia muy significativa sobre la producción de sedimentación, tal como observó Pham (2007) en su investigación donde el cambio de una zona boscosa a cultivos de arroz, matorrales, arbustos y prados provocó severos impactos en la producción de sedimentos y lo corrobora Miller, et. al. (2002) indicando que las pasturas con avanzada degradación son factores que aceleran la erosión hídrica, afectan la calidad del agua y aumentan la producción de sedimentos. La escorrentía está directamente relacionada a la producción de erosión y sedimentos; por eso es importante mantener el equilibrio dentro la cuenca hidrográfica, porque su alteración modifica el ciclo hidrológico (Guo, et. al. 2008; Juckem, et. al. 2008; Li, et. al. 2009).

Con respecto a los árboles, Young (1997) menciona que éstos actúan como barreras que reducen la escorrentía, los impactos de las lluvias, mejora la infiltración y la retención de agua en el suelo. Tomando en cuenta este concepto se caracterizó en la base de SWAT todas las coberturas en una condición hidrológica pobre por la baja cobertura existente en la cuenca alta y media y una condición hidrológica regular en la cuenca baja. Li, et. al. (2009) mencionan que la disminución de la erosión va estar en función de la alta densidad de la cubierta forestal, pastizal o las prácticas de conservación. Sin embargo otros resultados obtenidos por Wilson, et. al. (2011) indican que los mayores cambios en la concentración de la totalidad de sólidos suspendidos se observa en escenarios climáticos en comparación con el uso de la tierra.

Por otro lado la aplicación de prácticas de conservación son indispensable para disminuir la sedimentación en cualquier actividad o intervención que se realice dentro la cuenca, tal como indica la evaluación de Tetra Tech, (1998) sobre las buenas prácticas aplicadas a la cuenca del Chorro Creek en Estados Unidos donde se redujo la producción de sedimentos, alcanzando en las subcuencas locales donde están instaladas las mejores prácticas de conservación para el lugar hasta 50% de reducción; además hubo un proyecto de exclusión del ganado de la lechería, de exclusión de ganado en aguas abajo y un proyecto de manejo del pastoreo.

La importancia de la aplicación de las mejores prácticas de conservación según Arabi, et. al.(2007) radica en que son métodos ampliamente aceptados y que minimizan el impacto de la actividad agrícola en las aguas superficiales y las aguas subterráneas; cuyo mantenimiento en condiciones adecuadas de calidad del agua es importante para proteger la salud humana,

animal y la sanidad vegetal, preocupación constante en el mantenimiento de los recursos hídricos (Pejman, et. al. 2009). Pero Giri, et. al. (2012) indican que se debe enfatizar la selección del método focalizándolo en el área para satisfacer las necesidades y objetivos de una implementación de las mejores prácticas debido a que los diferentes métodos producen resultados variables.

La mejor manera para la mitigación y adaptación al cambio climático es con el manejo, la conservación de los recursos naturales y la planificación del uso del suelo (Guo, et. al. 2008; Juckem, et. al. 2008; Cepal, 2010; Lal, et. al. 2011); por tal motivo la planificación debe analizarse con buenos criterios para evitar impactos interrelacionados con los cambio de uso (Heuvelmans, et. al. 2005). En consecuencia, los análisis de usos de suelo y cambios de cobertura son esenciales para la comprensión de cómo se manifestarán en el futuro (Clarke, et. al. 1997; Rounsevell, et. al. 2006). Además Wilson, et. al. (2011) revela que el uso futuro de la tierra y los cambios climáticos tienen el potencial de cambiar drásticamente los niveles de concentración total de sedimentos.

## **6.5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **Conclusiones**

Los sistemas de producción y la ganadería libre dentro la cuenca Brodequin, provocan una severa deforestación por la habilitación de tierras, además de la fabricación y comercio de carbono el cual es un medio de vida importante para el mantenimiento de las familias, dando como resultado una elevada erosión y por ende un flujo de sedimentos alto.

El cambio de cobertura a sistemas agroforestales y reforestación resultó más favorable para la reducción en la producción de sedimentos, pero este cambio fue más significativo con la aplicación de prácticas de conservación de suelos.

La aplicación de prácticas de conservación debe ser focalizada de acuerdo al área donde se desea implementar para que cumpla con su objetivo.

Como la precipitación incide de manera significativa en la producción de sedimentos, es importante realizar los cambios necesarios de cobertura y aplicación de prácticas de manera casi inmediata para mitigar los efectos del cambio climático.

### **Recomendaciones**

Realizar estudios para que la implementación de las prácticas de conservación sean las adecuadas para el área.

Para cualquier cambio de cobertura es necesario eliminar la práctica de la ganadería libre.

Toda actividad a realizarse debe tener la participación activa de los agricultores quienes son los directos interesados, además que deben conocer las diferentes técnicas a implementarse para su constante conservación.

La calibración y validación del modelo es un factor clave para reducir la incertidumbre y el aumento en la capacidad de predicción. Debido a la escasez de información el modelo SWAT no podrá ser calibrado, sin embargo se recomienda generar la información necesaria para este propósito.

## **6.6. LITERATURA CITADA**

Arabi, M., Frankenberger, J.R., Engel, B.A., Arnold, J.G., 2007. Representation of agricultural conservation practices with SWAT. *Hydrologic Processes* 22, 3042-3055.

Arnold, J.G., Williams, J.R., Srinivasan, R., and King, K.W. (1999). SWAT: Soil and Water Assessment Tool. U.S. Dept. of Agriculture, Agricultural Research Service, Temple, Texas.

Arnold J.G., Kiniry J.R., Srinivasan R., Williams J.R., Haney E.B., Neitsch S.L.. 2012. Input/Output Documentation Version. Texas Water Resources Institute

CEPAL, (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). 2010. La economía del cambio climático en centroamérica: Síntesis 2010. p. 143

Clarke K.C., Hoppen S., Gaydos L. 1997. A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay Area. *Environ Plan Plan. Design*;24:247-61.

Di Luzio, M., Srinivasan R., Arnold J.G., Neitsch S.L. 2002. Soil and Water Assessment Tool. ArcView GIS Interface Manual: Version 2000. GSWRL Report 02-03, BRC Report 02-07, Published by Texas Water Resources Institute TR-193, College Station, TX. 346 p.

FAO/UNEP/ISSS/ISRIC. 1993. Global and national soils and terrain database (SOTER). Procedures manual. World Soil Resources Report 74. FAO, Rome. 122 pp.

Giri S., Nejadhashemi A. P., Woznicki S. A. 2012. Evaluation of targeting methods for implementation of best management practices in the Saginaw River Watershed. *Journal of Environmental Management* 103. 24-40 pp.

Gómez, F. (2002). Evaluación de la erosión potencial y producción de sedimentos en tres cuencas de Costa Rica. UCR. 191 p.

Guo, H; Hu, Q; Jiang, T. 2008. Annual and seasonal streamflow responses to climate and land-cover changes in the Poyang Lake basin, China. *Journal of Hydrology (Amsterdam)* 355(1/4):106-122.

Heuvelmans, G; Garcia-Qujano, JF; Muys, B; Feyen, J; Coppin, P. 2005. Modelling the water balance with SWAT as part of the land use impact evaluation in a life cycle study of CO2 emission reduction scenarios. *Hydrological Processes* 19(3):729-748.

Juckem, PF; Hunt, RJ; Anderson, MP; Robertson, DM. 2008. Effects of climate and land management change on streamflow in the driftless area of Wisconsin. *Journal of Hydrology (Amsterdam)* 355(1/4):123-130.

Kazimierski, L. D., Irigoyen, M. Brea, J. D., Spalletti, P., Menéndez A. N. 2011. Impacto del cambio climático en la producción de sedimentos en las cuencas de los Ríos Bermejo y Pilcomayo. Argentina. Consultado en 21 Nov. 2013. Disponible en: [http://www.ina.gov.ar/pdf/ifrrhh/04\\_011\\_Kazimierski.pdf](http://www.ina.gov.ar/pdf/ifrrhh/04_011_Kazimierski.pdf)

Kundzewicz, Z.W., Nohara, D., Tong, J., Oki, T., Buda, S., Takeuchi, K., 2009. Discharge of large Asian rivers – observations and projections. *China Quaternary International* 208, 4–10 pp.

Lal, R; Delgado, J; Groffman, P; Millar, N; Dell, C; Rotz, A. 2011. Management to mitigate and adapt to climate change. *Journal of Soil and Water Conservation* 66(4):276-285.

Li, Z; Liu, W; Zhang, X; Zheng, F. 2009. Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China. *Journal of Hydrology (Amsterdam)* 377(1/2):35-42.

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.

Pejman, A.H., Nabi Bidhendi, G.R., Karbassi, A.R., Mehrdadi, N., Esmaeili Bidhendi, M., 2009. Evaluation of spatial and seasonal variations in surface water quality using multivariate statistical techniques. *International Journal of Environmental Science and Technology* 6, 467-476

Pham, H., 2007. Evaluating Potential of Soil Loss Erosion in the Ba Be Lake Basin in Vietnam, Project, Hanoi-Vietnam.

Rounsevell M.D., Reginster I., Araujo M.B., Carter T.R., Dendoncker N., Ewert F., et al. 2006. A coherent set of future land use change scenarios for Europe. *Agronomy Ecosystem Environment*; 114:57–68

Shrestha B., Maskey S., Babel M.S., Griensven A., Green A., Akkharath I., Uhlenbrook S. 2013. Impact of climate change on sediment yield in the Mekong River basin: a case study of the Nam Ou basin, Lao PDR. *Hydrology Earth Syst. Sci.*, 17, 1-20 pp.

UNESCO. 2010. Procesos de erosión - sedimentación en cauces y cuencas. Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe. Documento Técnico N° 22. Chile

Xu J.X. 2009. Larger Asian rivers: Climate change, river flow and sediment flux. China. Quaternary International 208:1-3 pp.

Walling, D.E., 2011. Human Impact on the Sediment Loads of Asian Rivers, Sediment Problems and Sediment Management in Asian River Basins. IAHS Publ. 349, Wallingford, pp. 37-51.

Wilson, C.O., Weng Q. 2011. Simulating the impacts of future land use and climate changes on surface water quality in the Des Plaines River watershed, Chicago Metropolitan Statistical Area, Illinois. Science of the Total Environment 409. 4387-4405 pp.

Winchell, M. Srinivasan, R. Di Luzio, M. Arnold, J. 2012. ArcSWAT Interfase for SWAT 2012. User's guide. USDA Agricultural Research Service. Temple, Texas. 459 p.

White, KL; Chaubey, I. 2005. Sensitivity analysis, calibration, and validations for a multisite and multivariable SWAT model. JAWRA Journal of the American Water Resources Association 41(5):1077-1089 pp.

Young, A. 1997. Agroforestry for soil management. Cab International. v. Ed. 2