

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 km². 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 Km² 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 km² 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 ²)	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 ²)	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-oceano-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 [$t \cdot m^2 \cdot hr / ha \cdot J \cdot cm$]

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>Bosque Seco Denso. 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>Bosque Seco ligeramente denso. 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 pérdida 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

COBERTURA VEGETAL	CAMBIO COBERTURA	FACTOR C
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

COBERTURA VEGETAL	PRACTICA DE CONSERVACIÓN	FACTOR P
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

Estación	Prom. lluvia anual (cm)	Factor R (J/m²)*(cm/hr/año)
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

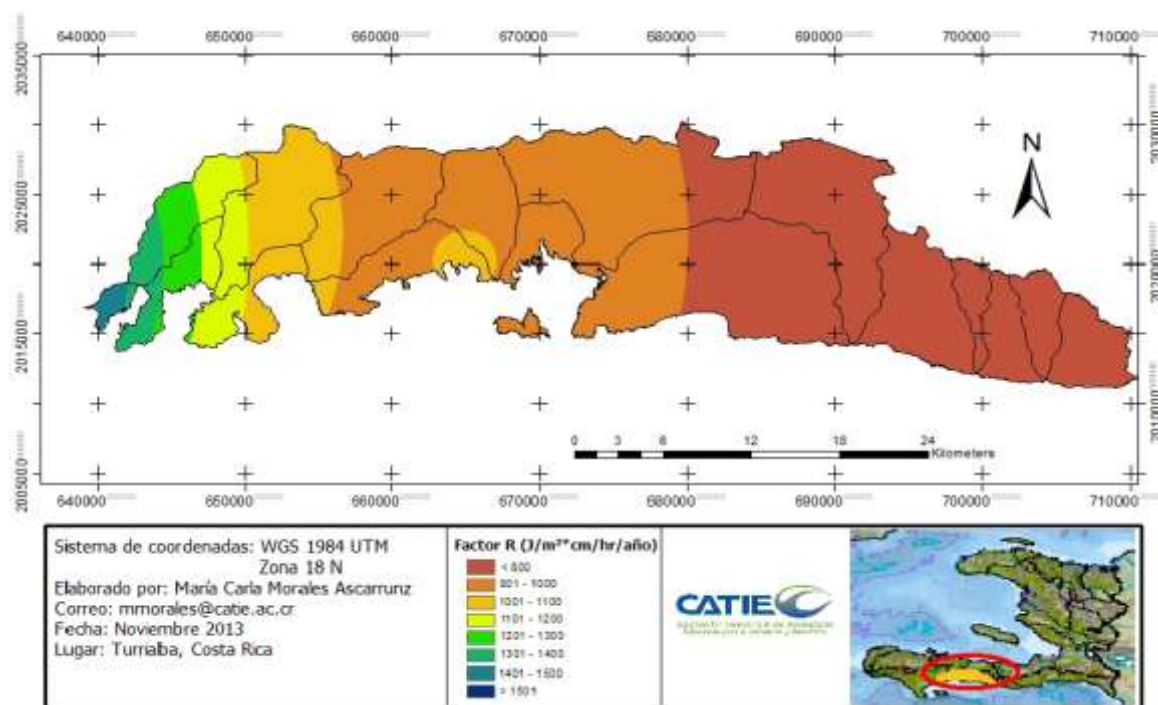


Figura 3. Cálculo del Factor R

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.

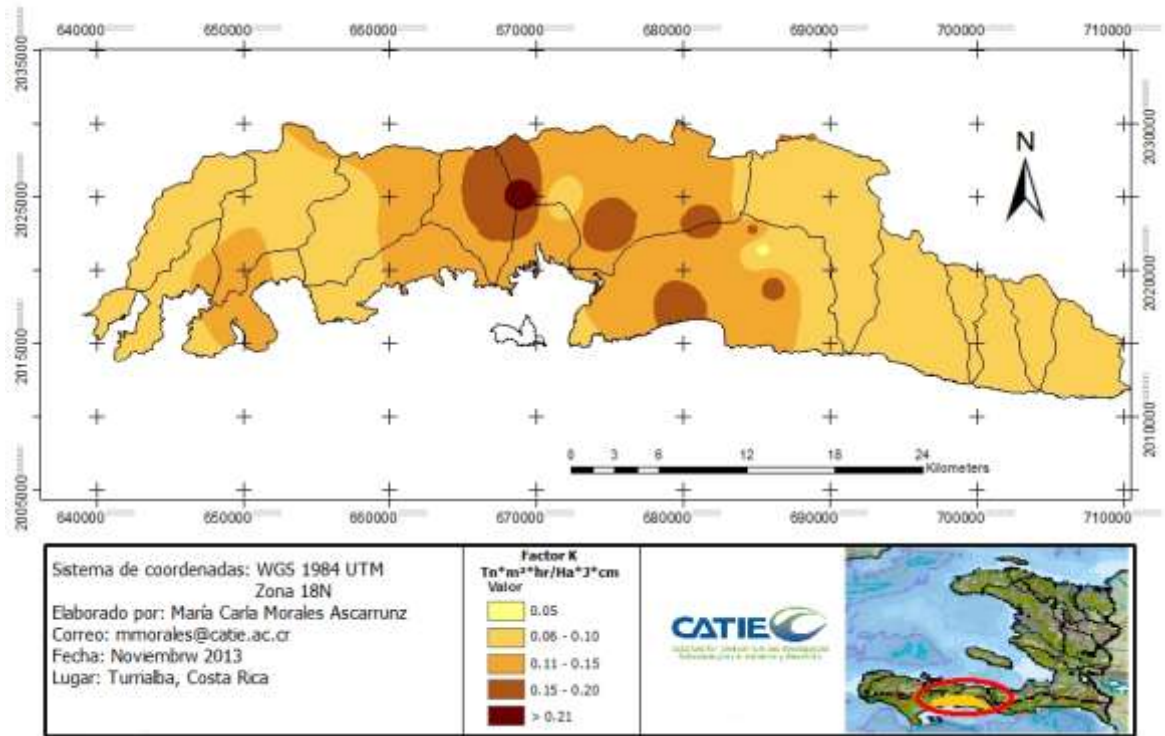


Figura 4. Cálculo del Factor K

Los valores que se obtuvieron del factor K oscilan entre 0.05 y 0.27 Tn*m²*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:

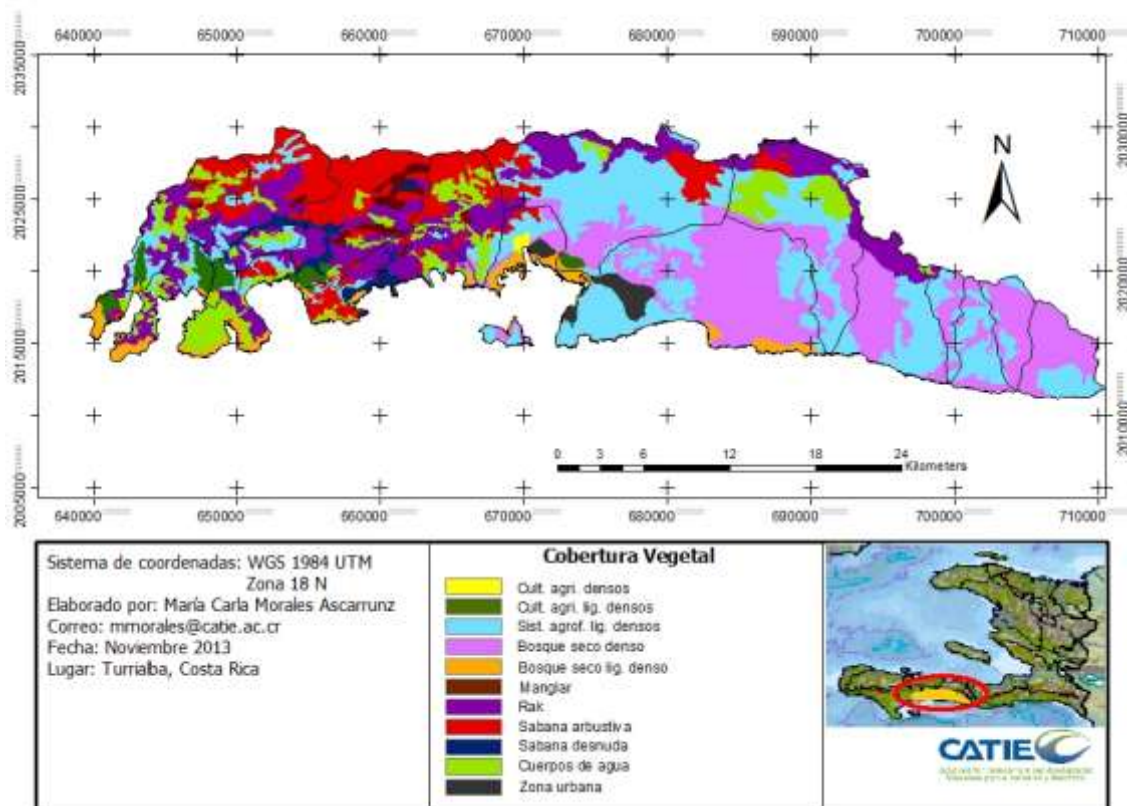


Figura 5. Cálculo del Factor C

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:

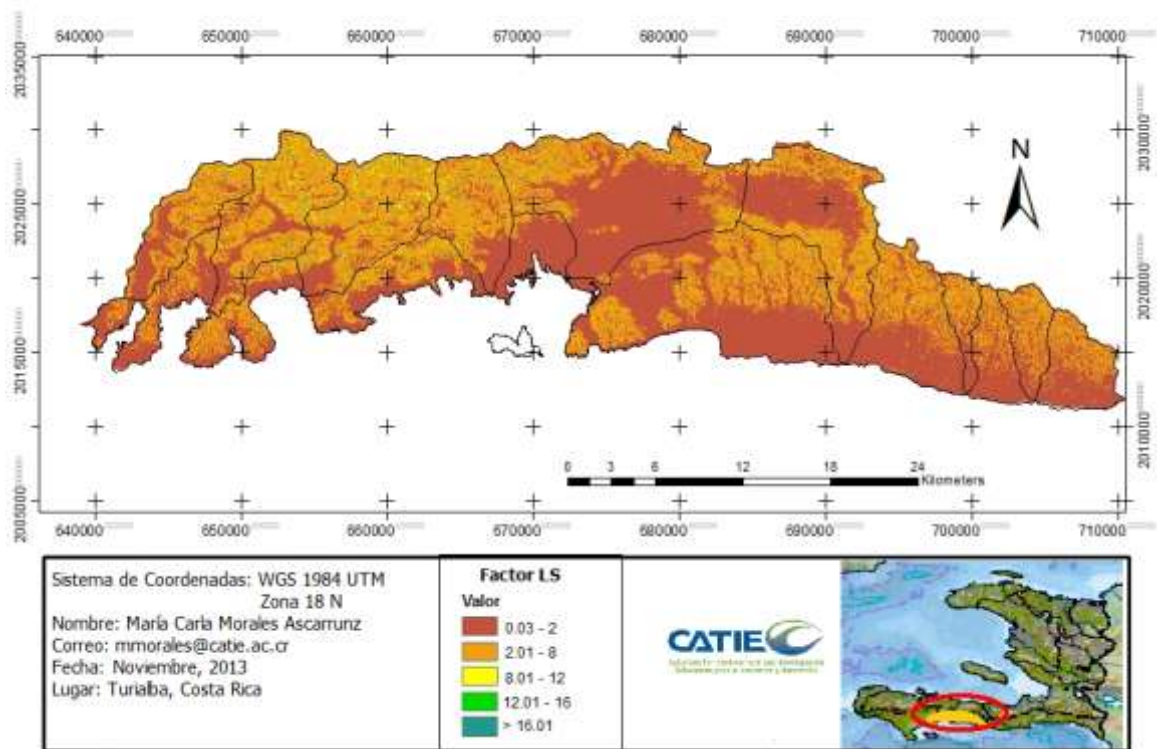


Figura 6. Cálculo del Factor LS

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.

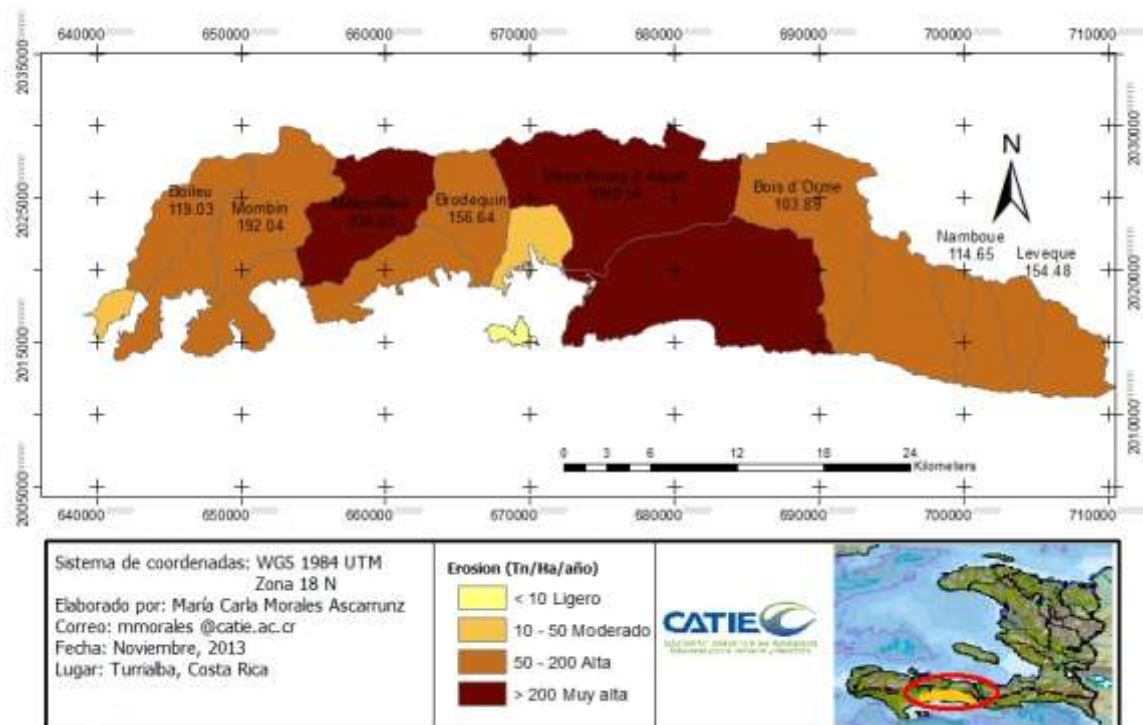


Figura 7. Cálculo y grado erosión en la Unidad Hidrográfica de Aquin/Saint Louis según FAO-UNESCO

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.

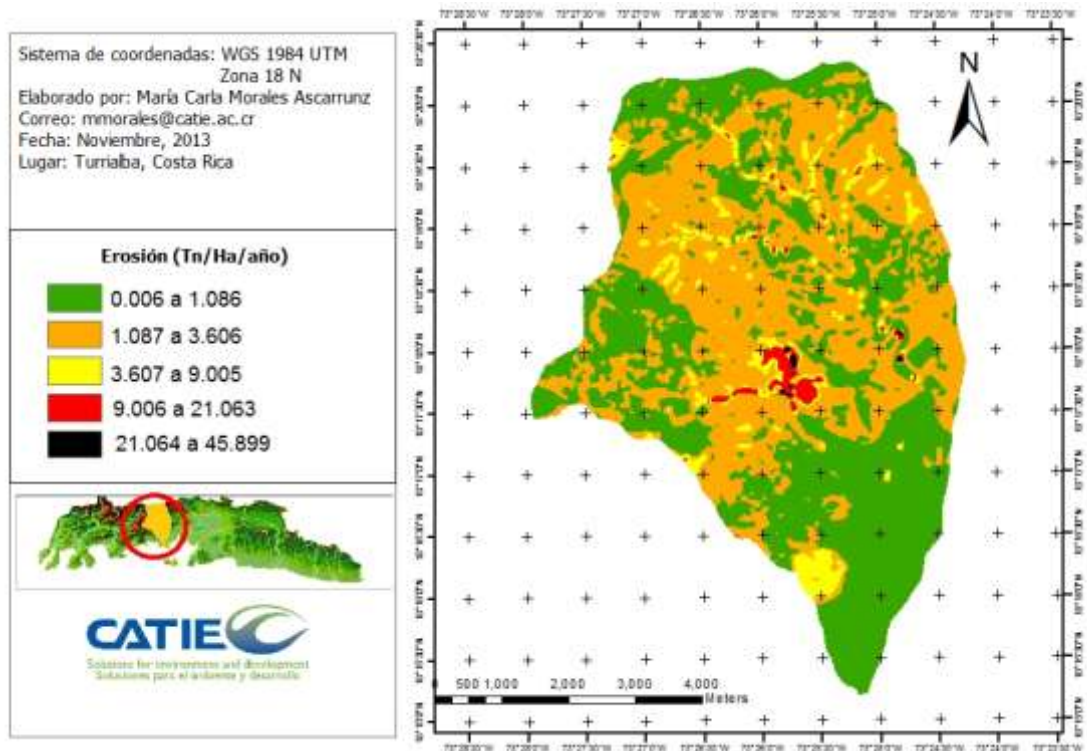


Figura 8. Erosión en Brodequin

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.

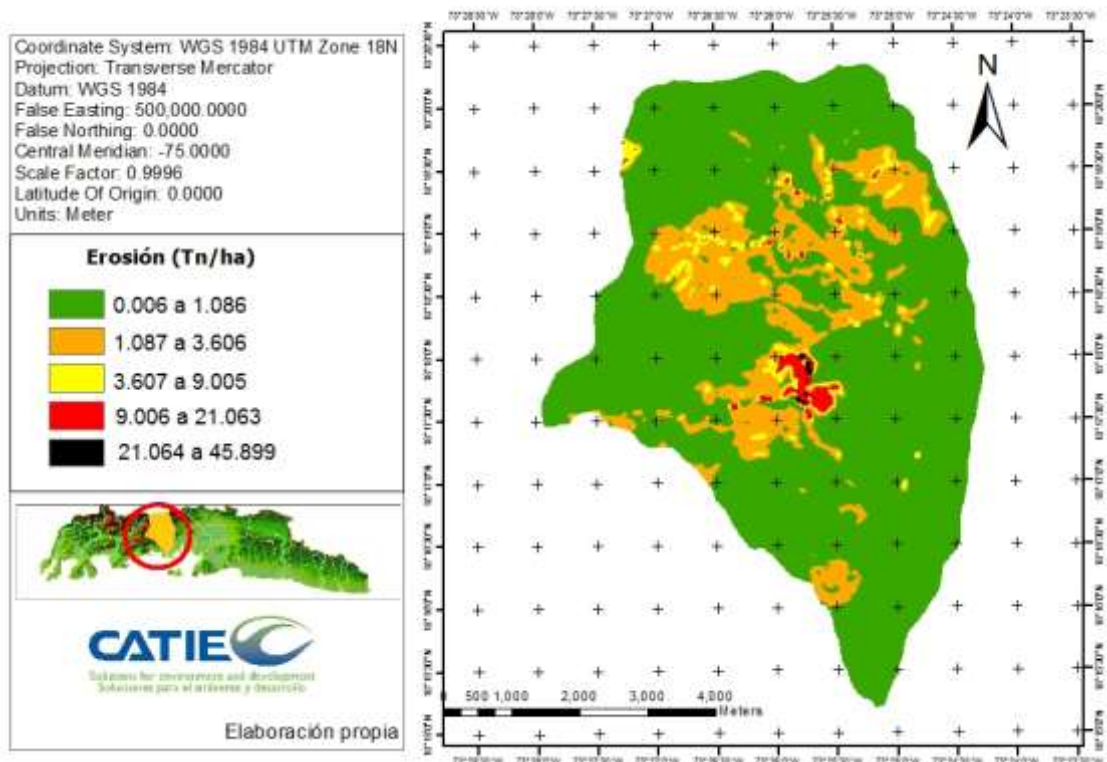


Figura 9. Cambio de cobertura vegetal (Escenario 1)

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.

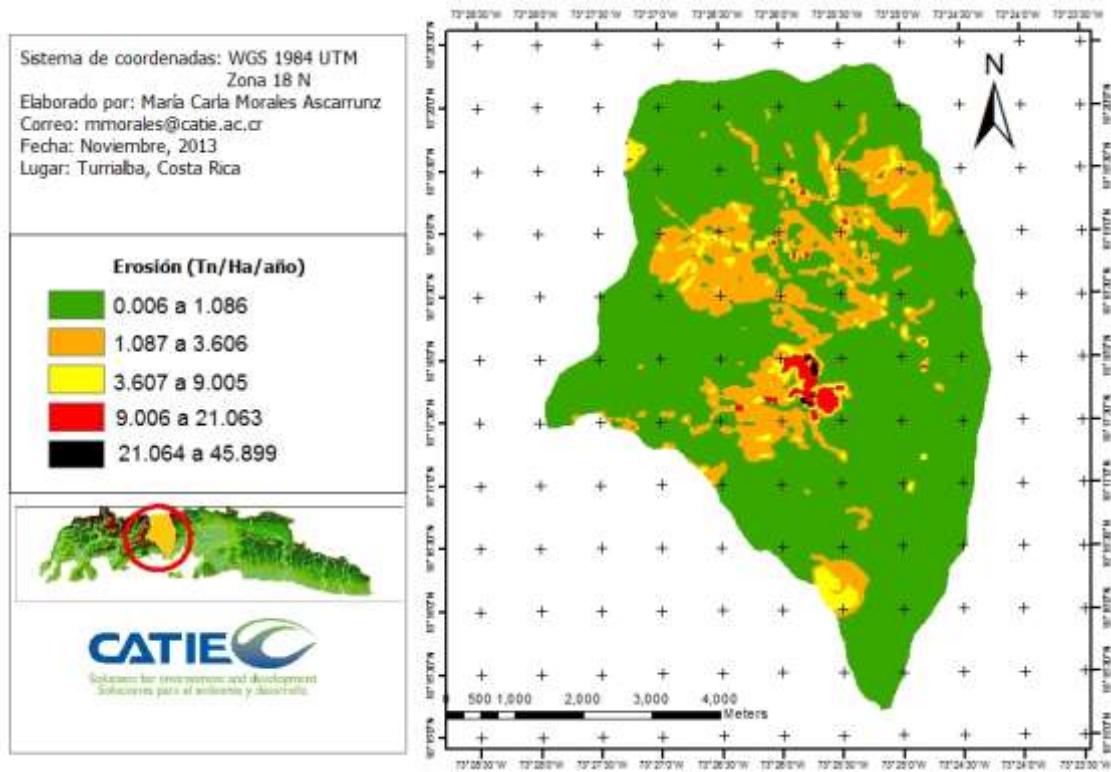


Figura 10. Prácticas de conservación (Escenario 2)

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:

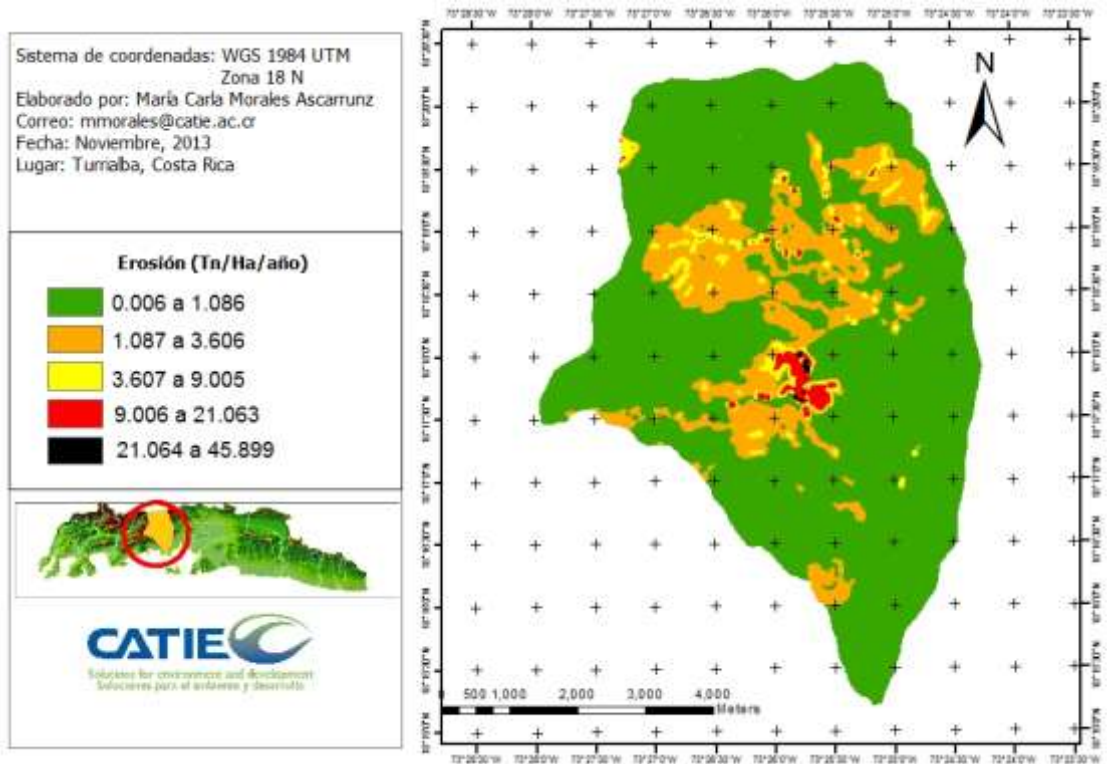


Figura 11. Cambio de cobertura y prácticas de conservación (Escenario 3)

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:

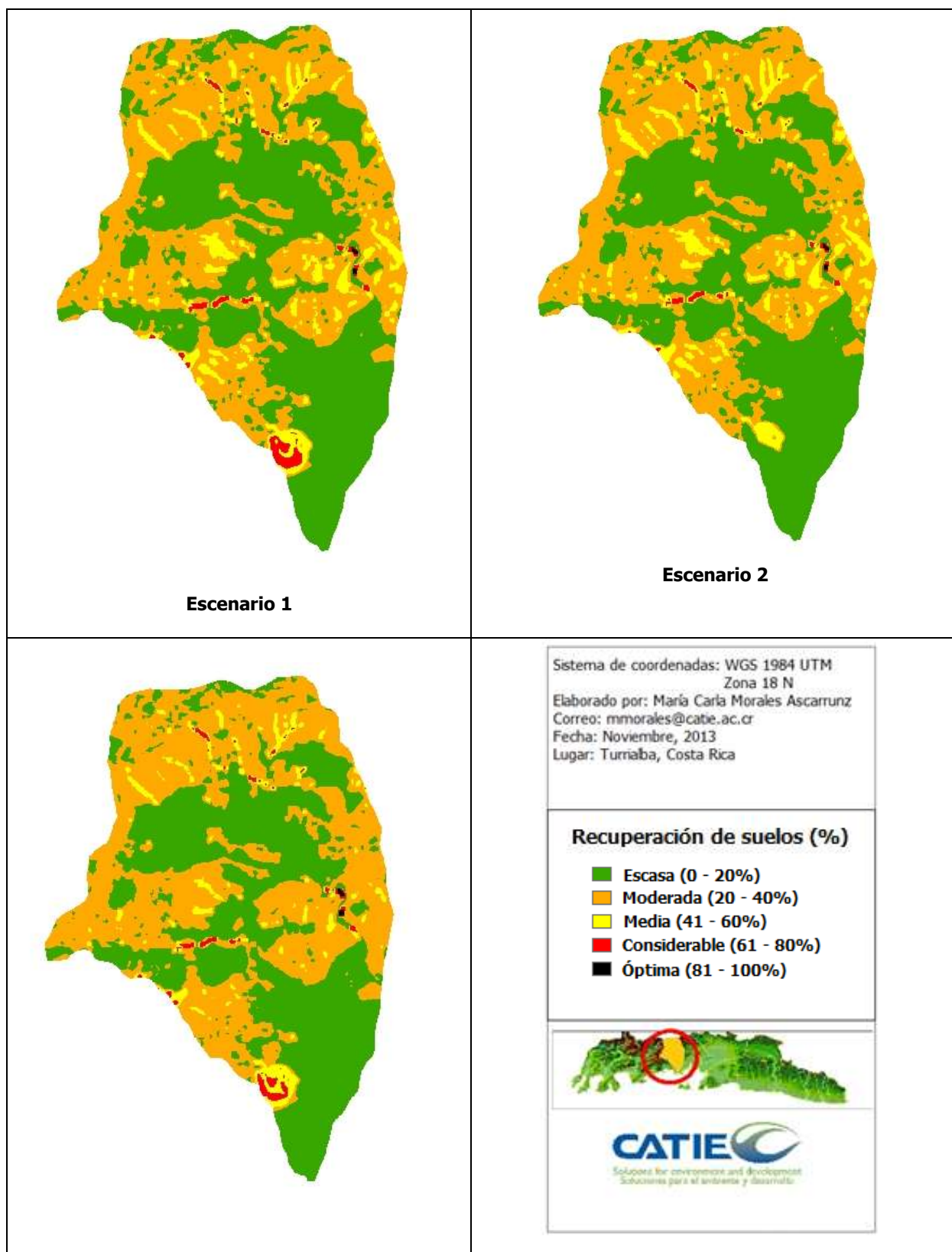


Figura 12. Recuperación de suelos

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:

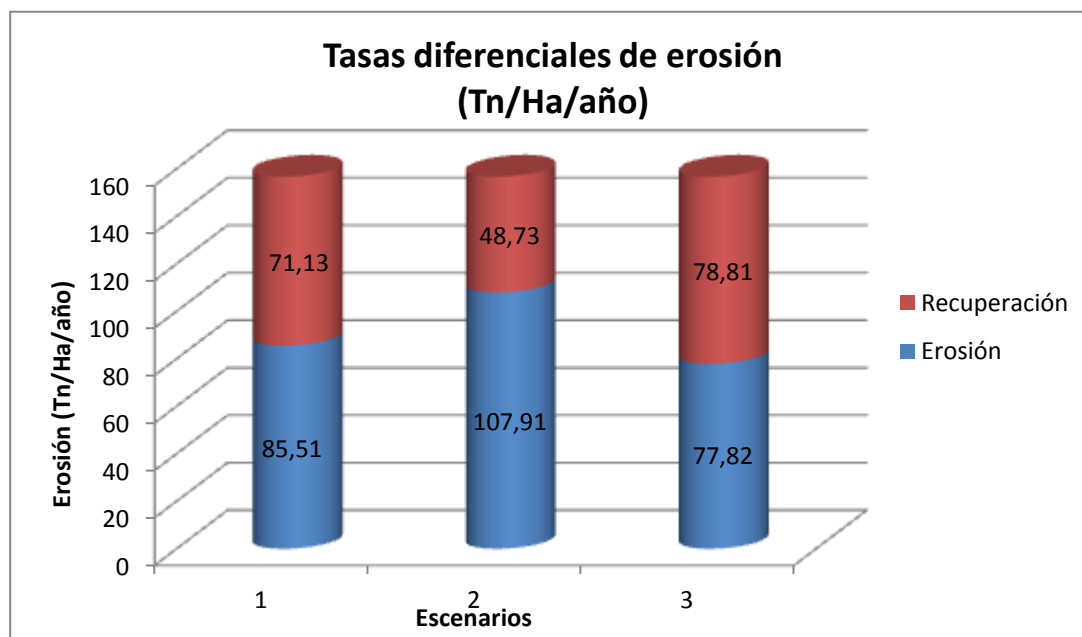


Figura 13. Erosión anual de suelos por escenario

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

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

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.