

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA

PROGRAMA DE ENSEÑANZA PARA EL DESARROLLO Y LA CONSERVACIÓN

ESCUELA DE POSGRADO

ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN LA  
CUENCA ALTA DEL RÍO YAQUE DEL NORTE Y DEL RÍO GUANAJUMA  
REPÚBLICA DOMINICANA

Tesis sometida a la consideración de la Escuela de Posgrado, como requisito para  
optar al grado de:

*Magister Scientiae*

Por

MALDANE CUELLO ESPINOSA

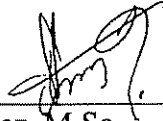
Turrialba, Costa Rica

2003

Este borrador de tesis ha sido aceptada en su presente forma por el Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del Estudiante como requisito parcial para optar por el grado de:

*MAGISTER SCIENTIAE*

FIRMANTES



Sergio Velásquez, M.Sc.

**Consejero Principal**



Francisco Jiménez, Dr.

**Miembro Comité Consejero**

Javier Saborio, M.Sc.

**Miembro Comité Consejero**

Marcelo Jorge, M.Sc.

**Miembro Comité Consejero**

Glen Galloway, Ph.D.

**Director Programa de Educación y**

**Decano de la Escuela de Posgrado**



Maldané Cuello Espinosa

**Candidata**

## **DEDICATORIA**

A mis hijos Mario Moisés y Maviel Claridania, y a mi madre Catalina Espinosa

## AGRADECIMIENTO

A Dios, por guiarme en todo momento, por brindarme su fortaleza y regalarme la dicha de concebir mi hija al tiempo de desarrollar los estudios de posgrado.

Al mi profesor consejero Sergio Velásquez, agradezco infinitamente su apoyo moral, orientación técnica, dedicación y comprensión.

Al ingeniero Marcelo Jorge, miembro del comité consejero, por sembrar la semilla y la inquietud en mí de realizar estudios de posgrado, y sin su sugerencias y apoyo no hubiera sido posible éste logro.

Al profesor Javier Saborío, miembro del comité consejero, por sus valiosos aportes, sugerencias y orientaciones para enriquecer el trabajo de investigación.

Al profesor Francisco Jiménez, miembro del comité consejero, por su básica orientación que hizo posible el logro del trabajo de investigación.

Al ingeniero Federico Gómez Delgado, cuyos aportes, orientaciones y apoyo incondicional fueron clave en el logro del trabajo de investigación.

A mis amigos Solhanlle, Pedro, Yoseth, Isa y Osvaldo, con quienes compartí mis mejores momentos en CATIE, por su apoyo, confianza y amistad. Con ellos sentí estar en mi tierra.

.Al ingeniero Eric Castro, por sus valiosos aportes, básicos para llegar a realizar la investigación.

Al CATIE, profundo agradecimiento por haberme otorgado la beca con la que pude realizar los estudios de posgrado.

Al IICAA, por su apoyo económico en la realización del trabajo de investigación.

Al personal técnico y administrativo de la Escuela de Posgrado y de la Biblioteca Conmemorativa Ortón, por su constante disposición y cooperación.

A mis profesores en la Escuela de Posgrado, por contribuir en mi capacitación durante mis estudios en CATIE.

A mis compañeros y amigos de la promoción, por la oportunidad que me brindaron de conocerles y con quienes compartí felices momentos.

## **SIGLAS Y ABREVIATURAS**

<b>MBT</b>	<b>Manabao- Bejucal- Tavera</b>
<b>INDRHI</b>	<b>Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos</b>
<b>CDE</b>	<b>Corporación Dominicana de Electricidad</b>
<b>RYA</b>	<b>Río Yaque del Norte</b>
<b>MW</b>	<b>Mega Wath</b>
<b>YN</b>	<b>Yaque del Norte</b>
<b>SIG</b>	<b>Sistema de Información Geográfica</b>
<b>ND</b>	<b>Identificador de Categoría</b>
<b>STR</b>	<b>Servicio Técnico Regional</b>
<b>CATIE</b>	<b>Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza</b>
<b>SAWT</b>	<b>Soil Water Assessment Tool</b>
<b>SWRRB-WQ</b>	<b>Simulator for Water Resources in Rural Basin – Water Quality</b>
<b>HRU</b>	<b>Unidades de Respuestas Hidrológicas</b>
<b>SCS</b>	<b>Servicio de Conservación de Suelos</b>
<b>RG</b>	<b>Río Guanajuma</b>
<b>JA</b>	<b>Conjunto Jarabacoa</b>
<b>PQ</b>	<b>Conjunto Pinar Quemado</b>
<b>MED</b>	<b>Modelo de Elevación Digital</b>
<b>TIN</b>	<b>Triangle Irregular Network</b>
<b>AF</b>	<b>Agroforestería</b>
<b>FP</b>	<b>Protección de Bosques</b>

## CONTENIDO

DEDICATORIA .....	iii
AGRADECIMIENTO .....	iv
SIGLAS Y ABREVIATURAS.....	v
CONTENIDO .....	vi
ÍNDICE DE CUADROS .....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS .....	x
ANEXOS .....	xi
RESUMEN .....	xii
SUMMARY.....	xiv
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Definición del problema .....	1
1.2. Justificación .....	2
1.3. Objetivos.....	3
1.3.1. General.....	3
1.3.2. Específicos.....	3
2. REVISIÓN DE LITERATURA .....	4
2.1. Conceptualización.....	4
2.1.1. Cuenca .....	4
2.1.2. Procesos erosivos en la cuenca .....	4
2.1.3. El Sistema de Información Geográfica y la Modelación Hidrológica.....	6
2.1.4. Modelo Hidrológico Distribuido .....	7
2.1.5. Uso de la Tierra.....	7
2.1.6. Capacidad de Uso de la Tierra.....	8
2.1.7. Metodología de clasificación basada en la capacidad de la tierra orientada a su tratamiento (Sistema Sheng).....	8
2.2. Modelos físicos para determinar sedimentos.....	9
2.3. Descripción del modelo SWRRB-WQ .....	10
2.4. Descripción del modelo SWAT (Soil Water Assessment Tool).....	11
3. METODOLOGÍA .....	14
3.1. Descripción general del área de estudio .....	14
3.1.1. Localización y Extensión.....	14

3.1.2. Geología y Geomorfología .....	15
3.1.3. Relieve .....	15
3.1.4. Clima.....	15
3.1.5. Vegetación Natural y Uso de la Tierra .....	16
3.1.6. Aspectos legales del área de las cuencas .....	16
3.2. Recopilación de información y procedimientos .....	17
3.2.1. Procedimiento para la preparación de un Mapa de Capacidad de Uso.....	18
3.2.1.1. Mapa de Suelos.....	18
3.2.1.2. Mapa de pendientes de las cuencas RYN y Guanajuma.....	19
3.2.2. Procedimiento para obtener el mapa de conflicto de usos.....	21
3.2.2.1. Mapa de Cobertura Vegetal .....	21
3.2.2.2. Matriz de clasificación de las clase de uso de la tierra .....	22
3.2.2.3. Descripción de la clasificación de ajuste:.....	23
3.3. Aplicación de un Modelo Hidrológico .....	23
3.3.1. Obtención y arreglo de los insumos necesarios .....	24
3.3.2. Procedimientos y despliegue de las salidas del modelo.....	27
3.4. Antecedentes y consideraciones del aporte de sedimentos en las cuencas de los Ríos Yaque del Norte y Guanajuma.....	30
3.4.1. Resultados de la aplicación del modelo SWRRBWQ en la cuenca del Río Yaque del Norte y de la cuenca Guanajuma .....	30
3.4.2. Detalle cronológico de algunas acciones realizadas para determinar el aporte de sedimentos en el Río Yaque del Norte.....	31
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	34
4.1. Simulación hidrológica en las Cuencas de los Ríos Guanajuma y RYN. Con el uso del modelo SWAT .....	34
4.1.1. Resultado de la calibración del modelo SWAT en la cuenca del Río Guanajuma período (1988-1992) .....	35
4.1.2. Resultado de la calibración del modelo SWAT en la cuenca del Río Yaque del Norte (1971-1975) .....	37
4.2. Resultados de la Simulación y producción de sedimentos en las cuencas de los Ríos Guanajuma y Yaque del Norte.....	39
4.2.1. Simulación hidrológica ante un cambio del uso de la tierra en la cuenca del Río Guanajuma .....	39
4.2.2. Simulación hidrológica ante un cambio del uso de la tierra en la cuenca del Río Yaque del Norte .....	40

4.2.3. Producción de sedimentos y el cambio de uso de la tierra en la cuenca RG. ....	42
4.2.4. Producción de sedimentos y el cambio de uso de la tierra en la cuenca RYN. ....	47
4.3. Comparación de las salidas del modelo SWRRBWQ y el SWAT en la cuenca del Río Guanajuma. ....	52
4.4. Comparación de las salidas del modelo SWRRBWQ y del modelo SWAT en la cuenca del Río Yaque del Norte. ....	53
5. CONCLUSIONES .....	56
6. RECOMENDACIONES.....	58
7. LITERATURA CONSULTADA .....	59
ANEXOS .....	62



## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Geología y sus Profundidades de las cuencas RYN y R G, Según Sheng.....	19
Cuadro 2. Clasificación de pendientes según la metodología de Sheng.....	20
Cuadro 3. Clasificación de tierra por capacidad de uso según metodología de Sheng.....	20
Cuadro 4. Clasificación para ajuste de uso de la tierra.....	23
Cuadro 5. Reclasificación de los usos del suelo según la tipología usada por SWAT.....	25
Cuadro 6. Estaciones climatológicas y pluviométricas utilizadas en el estudio.....	26
Cuadro 7. Datos Climáticos Estación Hato Viejo Jarabacoa (1972-1998).....	27
Cuadro 8. Localización de estaciones hidrométricas en los Ríos YN y G. ....	28
Cuadro 9. Número de curva (CN <sub>2</sub> ) para la clase de cobertura y el grupo hidrológico de suelo .....	29
Cuadro 10. Parámetros más sensibles que afectan los valores del SWAT.....	34
Cuadro 11. Escorrentía observada y simulada, período de calibración 1988-1992 (RG) ....	37
Cuadro 12. Datos de escorrentía observada y simulada, período de calibración 1971-1975 (RYN).....	39
Cuadro 13. Datos de caudales para las condiciones existente y propuesta, periodo de simulación 1988-1992 (RG).....	40
Cuadro 14. Datos de caudales para las condiciones existente y propuesta, período de simulación 1971-1975 (RYN).....	42
Cuadro 15. Tasa tolerable de pérdida de suelo.....	45
Cuadro 16. Producción de sedimentos en ton/ha/año para las condiciones existente y propuesta con el uso del modelo SWAT en la RG.....	45
Cuadro 17. Detalle de los resultados del cruce de tablas entre las subcuencas y el conflicto de uso, cuenca RG. ....	46
Cuadro 18. Producción de sedimentos en ton/ha/año para las condiciones existentes y propuestas con el uso del modelo SWAT en la RYN.....	49
Cuadro 19. Detalle de los resultados del cruce de tablas entre las subcuencas y el conflicto de uso, cuenca RYN.....	51
Cuadro 20. Variación de aporte de sedimentos en ton/ha/año para las condiciones existente y propuesta con el uso del modelo SWRRBWQ, cuenca RG. ....	52
Cuadro 21. Comparación de las salidas de los modelos SWRRBWQ y SWAT cuenca RG	52
Cuadro 22. Variación de aporte de sedimentos en Ton/Ha/año para las condiciones existente y propuesta con el uso de los modelos SWRRBWQ, cuenca RYN. ....	54
Cuadro 23. Comparación de las salidas de los modelos SWRRBWQ y SWAT cuenca RYN .....	55

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación de la las Cuencas RYN y Guanajuma, República. Dominicana. .....	14
Figura 2. Esquema de la interface ArcView-SWAT .....	24
Figura 3. Esquema del muestreador US-D49 .....	32
Figura 4 Enlace de las entradas y salidas del modelo SWAT. ....	33
Figura 5. Regresión para la comparación del escurrimiento total observado y simulado RG .....	36
Figura 6 Comportamiento del escurrimiento (mm) anual en la estación Bejucal (RG), durante el período de calibración del modelo SWAT.....	36
Figura 7. Regresión para la comparación del escurrimiento total observado y simulado RYN.....	38
Figura 8. Comportamiento del escurrimiento (mm) anual en la estación Pinar Quemado (RYN) período de calibración del modelo SWAT .....	38
Figura 9. Comportamiento del escurrimiento (mm) anual en la estación Bejucal en la condición existente y la propuesta. R.G. ....	40
Figura 10. Comportamiento del escurrimiento (mm) anual en la estación Pinar Quemado en la condición existente y la propuesta. RYN.....	41
Figura 11. Mapa de las subcuencas del Río Guanajuma .....	42
Figura 12. Mapa de conflicto de uso Cuenca Río Guanajuma .....	43
Figura 13. Mapa de valores de sedimentos por sub-cuenca, cond. prop.RG.....	44
Figura 14. Mapa del escenario existente cuenca Río Guanajuma .....	47
Figura 15. Mapa de las subcuencas del Río Yaque del Norte .....	47
Figura 16. Mapa de conflicto de uso de la Cuenca del Río Yaque del Norte.....	48
Figura 17. Mapa de valores de sedimentos por subcuenca, condición propuesta para el RYN.....	50
Figura 18. Mapa del escenario existente cuenca Río Yaque del Norte .....	51

## ANEXOS

Anexo 1. Disponibilidad de datos hidrológicos en ca cuenca del RYN para la simulación con el SWAT .....	62
Anexo 2. Disponibilidad de datos hidrológicos en ca cuenca del RG para la simulación con el SWAT .....	62
Anexo 3. Estaciones para la calibración de la cuenca del RYN .....	62
Anexo 4. Estaciones para la calibración de la cuenca RG .....	62
Anexo 5. Tipología de usos de acuerdo al SWAT .....	63
Anexo 6. Caja para editar los datos de suelo .....	63
Anexo 7. Caja para editar los datos climáticos .....	64
Anexo 8. Caja para editar y unir las unidades de suelo y cobertura de la tierra .....	64
Anexo 9. Estación climática de Manabao .....	65
Anexo 10. Estación Hidrométrica Pinar Quemado .....	65
Anexo 11. Muestreador US-D49, Río Jimenoa .....	66
Anexo 12. Botella de 450cc y muestreador US-D49 .....	66
Anexo 13. Muestreador con molinete para aforos de caudales .....	67
Anexo 14. Caja registradora de los datos de velocidades del agua .....	67
Anexo 15. Proceso para determinar sedimentos en suspensión .....	68
Anexo 16. Hidroeléctrica Jimenoa, toma de datos de aforo. ....	68

## RESUMEN

**CUELLO ESPINOSA, M.** 2003. Determinación de la producción y transporte de sedimentos en la cuenca alta del Río Yaque del Norte y del Río Guanajuma, República Dominicana.

Palabras claves: República Dominicana, Simulación hidrológica, Producción de sedimentos, SWAT, SWRRB-WQ, Sistema de Información Geográfica, Cambio de uso de la tierra, Escurrimiento.

Con el uso de la herramienta del modelo SWAT en interfase con los Sistemas de Información Geográfica aplicado en la cuenca alta del Río Yaque del Norte y en la cuenca del Río Guanajuma la simulación de la producción y transporte de sedimentos fue determinada bajo dos condiciones de uso de la tierra. El modelo de regresión aplicado para la calibración del SWAT en ambas cuencas ha revelado que el escurrimiento simulado durante un período de cinco años consecutivos se compara satisfactoriamente con los datos observados y muestra que los valores de los escurrimientos han sido significativos ( $p < 0,05$ ). Sobre la base de la metodología de Sheng, se creó el mapa de conflicto de uso en ambas cuencas, donde se conjugaron la pendiente y la profundidad del terreno con su uso y se obtuvo las condiciones de sobreuso, supuso y uso a capacidad. En la cuenca del Río Guanajuma, al sustituir el sobreuso (16%) por bosque y así pasar de una condición existente a un escenario propuesto el régimen del escurrimiento baja ligeramente bajo la condición propuesta, mientras que los niveles mas altos de producción de sedimentos se presentan bajo la condición existente o de sobreuso, reduciéndose un 30% al cambiar a una cobertura de bosque, la tasa de sedimentos cambia de baja a muy baja en el orden de 9.07 a 5.44 Ton/ha/año. De igual manera, en la cuenca del Río Yaque del Norte al sustituir el sobreuso (12.5%) por bosque el régimen del escurrimiento es muy similar en ambas condiciones de uso, mientras que los sedimentos experimentan una reducción de un 10.11% al hacer dicho cambio de uso, y pasa de alta a moderada en el orden de 24.45 a 29.98 Ton/ha/año. Sin embargo, para que en la cuenca del Río Yaque del Norte haya una reducción considerada de sedimentos debe haber una relación entre el tamaño de la cuenca y la cantidad de bosque que ocupe al realizar el cambio de uso. Al comparar en ambas

cuencas los resultados de la producción de sedimentos simulados con el SWAT con los resultados del simulador del recurso agua en las cuencas (SWRRB-WQ), sin interfase con los Sistemas de Información Geográfica, el comportamiento del escurrimiento y de la producción de sedimentos presentan las mismas tendencias. El análisis de los antecedentes y consideraciones del aporte de sedimentos en las cuencas de los Ríos Yaqué del Norte y Guanajuma durante más de cuatro décadas indicó que al igual que la simulación con el uso de los modelos SWAT y SWRRB-WQ predicen que no existe relación directa entre los escurrimientos totales y los valores de sedimentos que se producen. Desde el punto de vista metodológico se propone, utilizar los resultados de la simulación en las áreas donde se presenta el sobreuso para establecer una línea base para la toma de decisiones considerando la pendiente y la profundidad del suelo al momento de establecer o elegir el tipo de cobertura vegetal.

## SUMMARY

**CUELLO ESPINOSA, M.** 2003. Determination of the production and sediment transport in the high river basin of the Yaque River of the North and the Guanajuma River, Dominican Republic.

Key words: Dominican Republic, Hidrológic simulation, Sediment production, SWAT, SWRRB-WQ, Geographic Information System, Change of use of the Earth, Draining.

With the use of the SWAT model tool in interphase with the GIS applied in the high river basin of the Yaque River of the North and in the river basin of the Guanajuma River the simulation of the production and sediment transport, it was determined under two conditions of earth use. The model of regression applied for the calibration of the SWAT in both river basins has revealed that the draining simulated during a period of five consecutive years is compared satisfactorily with the observed data and sample that the values of the drainings have been significant ( $p < 0,05$ ). On the base of the methodology of Sheng, the map of conflict of use in both river basins was created, where they conjugated the slope and the depth of the land with its use and obtained the conditions of overuse, under use and use to capacity. In the river basin of the Guanajuma River, when replacing the overuse (16%) by forest and thus passing of an existing condition to a proposed scene the regime of draining lowered slightly under the proposed condition, whereas the high levels of sediment production appeared under the existing condition or overuse, being reduced 30% when changed to a forest cover, the rate of sediments changes of low to very low in the order of 9,07 to 5,44 Ton/ha/año. Equally, in the river basin of the Yaque River of the North when replacing the overuse (12.5%) by forest the regime of the draining is very similar in both conditions of use, whereas the sediments experience a reduction of 10,11% when doing this change of use, and goes from high to moderate in the order of 29,98 to 24,45 Ton/ha/año. However, for a considered sediment reduction in the river basin of the Yaque River of the North there must be a relation between the size of the river basin and the amount of forest that it occupies when change of use is made. When comparing in both river basins the results of the simulated sediment production with the SWAT and with the results of the water resource simulator in the river basins (SWRRB-WQ), without

interphase with the Geographic Information System, the behavior of the drainage and the sediment production present the same tendencies. The analysis and consideration, of the precedents and of the sediment contribution in the river basins of the Yaque River of the North and Guanajuma for more than four decades, indicated that like the simulation with the use of models SWAT and SWRRB-WQ predicts that a direct relation between the total drainings and the values of sediments that are produced do not exist. From the methodologic point of view one sets out to use the results of the simulation in the areas where overuse appears to establish a base line for the decision making considering the slope and the depth of the ground at the time of establishing or choosing the type of forest cover.

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Definición del problema

Actualmente en la República Dominicana la producción de energía eléctrica a través de hidrogeneradoras, pues solo alcanza un 15% de la energía consumida en el país. La generación total de energía de 3,000 MW según información de la generadora de Electricidad EG Haina. La Corporación Dominicana de Electricidad (CDE) ha considerado construir el Complejo Hidroeléctrico Manabao-Bejucal-Tavera (MBT), el cual está ubicado en las subcuencas altas de los Ríos Yaque del Norte (RYN) y Guanajuma. Se trata de un proyecto con una capacidad de generación de 105 MW y una producción anual de energía estimada en 220 millones de kWh , con lo que se puede contribuir a reducir la dependencia de combustibles importados (Jorge y Mustonen, 2001).

Las subcuencas involucradas en el proyecto presentan un alto grado de deterioro y degradación ambiental, motivado por el uso no regulado y normado de las tierras, donde se desarrollan tecnologías agrícolas y forestales sin el más mínimo grado de regulación<sup>1</sup>, sumado a las prácticas inadecuadas de producción agropecuaria que los productores de la zona utilizan. Muchas zonas son aprovechadas en forma más intensiva (uso de la tierra) que la que pueden soportar por sus características biofísicas (capacidad de uso de la tierra). Esta situación acarrea entre otras consecuencias conflictos de uso, alteraciones hidrológicas, el deterioro de la base de los recursos naturales, y un creciente riesgo de aumento de los productos de la erosión susceptibles de ser arrastrados por los Ríos Yaque del Norte (RYN)

---

<sup>1</sup> La Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Recurso Naturales (2002), en la Nueva Ley Ambiental establece las regulaciones de manejo de todos los Recursos Naturales del país, pese a que en la actualidad no se ha logrado la aplicación eficiente de la misma.



y Guanajuma hacia las presas Bejucal (en proyecto) y Tavera aguas abajo. Esta situación puede implicar la disminución del volumen del flujo base y de la calidad del agua, y en consecuencia la disminución de la generación de energía, la reducción de la vida útil de los embalses del proyecto y la alteración del régimen de caudales ecológicos para preservar la vida acuática. Frente a la situación de degradación de los recursos naturales que se evidencia en las cuencas del RYN y del Río Guanajuma, se planea implementar un subproyecto de restauración hidrológico-forestal que involucra actuaciones recomendadas para garantizar la sostenibilidad del proyecto MBT. El subproyecto tiene como objetivo fundamental contribuir en 10 años, después de implementado el mismo, mejorar la regulación hidrológica de las subcuencas tributarias del proyecto; para así mantener o aumentar el flujo base del agua, mitigar el efecto de eventos meteorológicos climáticos y mejorar la calidad del agua, así como el funcionamiento de la hidroeléctrica.

La aplicación de un modelo hidrológico distribuido, utilizando un Sistema de Información Geográfica (SIG), es una valiosa herramienta que permite evaluar los procesos de erosión, transporte y deposición de los sedimentos en las cuencas, tomando en cuenta la distribución geográfica y temporal de las lluvias con influencia en el Área del Proyecto MBT. Por lo que el alcance de este trabajo de investigación ayudaría a sentar bases técnicas a considerar en la ejecución del mencionado proyecto hidroeléctrico, en el sentido de cuantificar los beneficios del subproyecto complementario de Restauración Hidrológico Forestal, el cual persiguen básicamente los objetivos de incrementar el flujo base en el Río y reducir la tasa de erosión en las subcuencas involucradas en dicho proyecto.

## **1.2. Justificación**

La cuenca alta del Río Yaque del Norte y la del Río Guanajuma son las cuencas tributarias del proyecto Complejo Hidroeléctrico Manabao Bejucal Tavera. En ese sentido, se justifica la realización de estudios, que como éste, conlleven a estimar la producción y transporte de sedimentos que se puedan generar en las cuencas hidrográficas, pudiendo predecir los valores de la producción de sedimentos producto de los cambios propuestos en el uso de la

tierra, así como de acciones para reducir su producción y transporte dentro de un proyecto de restauración hidrológica forestal.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. General**

Estimar la producción y transporte de sedimentos en la cuenca alta del Río Yaque del Norte y Guanajuma, República Dominicana, utilizando un modelo hidrológico-hidráulico con interfase SIG.

#### **1.3.2. Específicos**

- Determinar la producción de sedimentos en las cuenca del Río Yaque del Norte y en la cuenca del Río Guanajuma mediante la aplicación del modelo SWAT.
- Simular los escenarios antes y después de un cambio de uso de la tierra y su efecto en la producción de sedimentos.
- Comparar los resultados de las simulaciones realizadas con el modelo SWRRBWQ y el SWAT para la estimación de la producción de sedimentos en ambas cuencas.

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Conceptualización

#### 2.1.1. Cuenca

La cuenca de drenaje de una corriente, es el área de terreno donde todas las aguas caídas por precipitación, se unen para formar un solo curso de agua. Cada curso de agua tiene una cuenca bien definida, para cada punto de su recorrido (Villón, 2002).

#### 2.1.2. Procesos erosivos en la cuenca

Los procesos erosivos en las cuencas se producen de las dos maneras siguientes:

**Remoción en masa:** este fenómeno está asociado con deslizamientos de grandes masas de material sólido que se han producido en sitios inestable. La inestabilidad es causada por factores geotécnicos que tienen que ver con las pendientes de los taludes, el manejo inadecuado del suelo, la tala de árboles y el almacenamiento de agua de lluvia en los suelos. La masa de material permanecen por algún tiempo en un equilibrio precario en los sitios inestables, pero basta la presencia de un factor detonante para que se produzca el deslizamiento. Este factor detonante puede ser un sismo, un período prolongado de lluvias intensas o la pérdida de soporte en la pata de un talud.

Cuando el deslizamiento se produce directamente sobre una de las márgenes de una corriente natural el material deslizado se deposita sobre el lecho obstruyendo el paso libre del agua, pero a medida que pasa el tiempo el mismo flujo de agua se encarga de transportar el material hacia aguas abajo, parte como carga de fondo y parte en suspensión. Si los deslizamientos se producen lejos de las corrientes de agua, entonces solamente una parte del material puede llegar a las corrientes por erosión hídrica (Silva, 2002).

**Erosión hídrica:** puede ser analizada comenzando por la desagregación de las partículas de suelo debido al impacto de las gotas de lluvia. La energía cinética de las gotas de lluvia puede lanzar las partículas del suelo al aire durante el impacto. En terrenos a nivel, las partículas se dispersan más o menos uniformemente en todas las direcciones, pero en un

terreno con pendientes habrá un transporte neto hacia abajo. Si durante el proceso ocurre flujo superficial, las partículas removidas serán transportadas aún más abajo antes de ser depositadas de nuevo en la superficie (Linsley, 1986).

La producción anual de sedimentos en una cuenca depende de muchos factores tales como el clima, el tipo de suelo, el estado de la cobertura vegetal, la topografía y la existencia de embalses. La lluvia como uno de los elementos que integran el clima, representa mucha energía, a mayor intensidad de lluvia, mayor es la energía que será transmitida al terreno. La lluvia tiene entonces según su intensidad y duración, una determinada capacidad erosiva. En cuanto a la topografía, la tasa de erosión es mayor en pendientes altas que en pendientes suaves. Mientras más pendiente tenga un talud, más efectiva será la acción del agua en erosionar y transportar el sedimento pendiente abajo. Las velocidades del flujo superficial es también mayor en taludes muy inclinados, y los movimientos masivos del suelo son igualmente más frecuentes en terrenos de taludes pronunciados (Linsley, 1986).

Otro de los factores que determina la tasa de producción de sedimentos en una cuenca es el suelo. Cubero (1996) considera que las condiciones de los suelos determinan su susceptibilidad a la erosión. El autor hace un enfoque desde el punto de vista de la textura y de la estructura del suelo, planteando que los suelos con alto contenido de limo son muy susceptibles a la erosión por motivo de la impermeabilización del limo en los poros del suelo, lo que hace que la capacidad de infiltración disminuya generando mayor escorrentía superficial y causando daños erosivos. Considera también que los suelos con alto contenido de arcilla, y por consiguiente baja capacidad de infiltración, son muy susceptibles a la erosión en caso de aguaceros intensos, mientras que los suelos arenosos, con gran capacidad de infiltración, absorben la mayor parte del agua que reciben originando una menor escorrentía superficial y menor erosión.

Desde el punto de vista de la estructura del suelo, considera que la estructura del tipo masiva y bloques grandes fuertes son las que ofrecen mayor resistencia al impacto de las gotas de lluvia y al arrastre de las partículas por la escorrentía superficial.

Su análisis incluye la cobertura del suelo; en ese sentido, considera que con la interceptación de la lluvia y la reducción de la velocidad del agua juegan un papel primordial en la protección del suelo contra la erosión. Distintas coberturas vegetales proveen distintos grados de protección, de tal manera que el hombre podría controlar en gran parte la erosión en las áreas forestales y agrícolas, escogiendo adecuadamente el uso y el manejo de la tierra.

### **2.1.3. El Sistema de Información Geográfica y la Modelación Hidrológica**

Fedra, citado por Hernández, (2003) define los SIG como herramientas basados en sistemas de cómputo para capturar, procesar y desplegar datos espaciales o georeferenciados. Conteniendo datos geométricos (coordenadas e información topológica) y datos de atributos o información que describe las propiedades de objetos geométricos como puntos, líneas y áreas.

Desde el punto de vista hidrológico Maidment (1993), considera que los SIG proveen representaciones de las características espaciales de la tierra, que la modelación hidrológica se ocupa de los flujos de agua y sus constituyentes sobre la superficie terrestre y el ambiente subsuperficial; existe entonces, una obvia y cercana conexión entre ambos. En este contexto, el autor explica que los SIG proveen a los modelos hidrológicos el potencial de incrementar el grado de definición de las subunidades espaciales en número y detalle descriptivo. Así mismo, éste enlace permite la evaluación de procesos a escala regionales cuya hidrología no podría haberse modelado de otra forma.

Arguello, citado por Portilla (1994) no difiere al referirse a los modelos hidrológicos como un sistema matemático o físico que obedece a ciertas condiciones específicas y cuyo comportamiento es utilizado para entender un sistema físico. Mientras que los SIG proveen la tecnología para almacenar y manipular la información espacial relacionada que es demandada por los modelos hidrológicos ( Moore, citado por Portilla 1994).

#### **2.1.4. Modelo Hidrológico Distribuido**

Chow (1994) considera que una de las principales aplicaciones que podría darse a los modelos hidrológicos distribuidos, es su utilización para la estimación de la tasa anual de producción de sedimentos en una cuenca. Este tipo de modelo se enmarca también dentro del grupo dinámico determinístico, porque realiza pronóstico, considera que los procesos hidrológicos ocurren en varios puntos del espacio y define las variables del modelo como funciones de las dimensiones espaciales. Contempla que los fenómenos hidrológicos varían temporalmente en el tiempo. Requiere ecuaciones diferenciales en el tiempo como variable independiente, que puede mostrar el comportamiento de la variable de respuesta a lo largo del tiempo.

#### **2.1.5. Uso de la Tierra**

Después que el hombre se hizo sedentario, reconoció que ciertas unidades de tierra tenían diferentes respuestas frente a las plantas cultivadas, debido a la presencia de algunas características del medio físico. Este conocimiento empírico determinó, que gran parte de las florecientes y prósperas culturas antiguas se asentaron en zonas con suelos muy fértiles, especialmente planicies aluviales jóvenes, desde el punto de vista del tiempo geológico. Sin embargo, esta relación, aparentemente obvia, no fue clara para muchos y aún hoy día no lo es.

Por su parte, la FAO, considera la tierra como un concepto que cobija el ambiente físico incluyendo el clima, el suelo y la geología subyacente, hidrología, población vegetal y animal y los resultados de la actividad humana pasada y presente, en la medida que estos atributos ejercen una influencia significativa sobre los usos presentes y futuros de la tierra por parte del hombre. Es entonces, el uso de la tierra, la explotación o empleo de la misma por parte del hombre.

Por ser el concepto tierra tan amplio, las posibilidades de utilización de la misma son muy variadas. Sin desconocer que el planeta posee unas condiciones que aseguran la existencia de la vida, la tierra se considera mayormente por el espacio físico en donde se desarrolla la

producción biológica (especialmente el suelo), por la posibilidad de construcción de asentamientos e infraestructura; además, por la producción, almacenamiento y circulación de agua (ciclo hidrológico) y por la existencia de combustibles y minerales (Santana, 2000).

#### **2.1.6. Capacidad de Uso de la Tierra**

Sheng. (1971). considera la clasificación de la capacidad de la tierra como lo que constituye el fundamento del uso apropiado de la misma; no existiendo contradicción cuando Richters (1987) considera que la actividad clave para una planificación del uso de la tierra en una región es la evaluación de la tierra y su uso, la cual se puede definir como la actividad que describe e interpreta aspectos básicos del clima, vegetación, suelos, y otros aspectos biofísicos, como también aspectos socioeconómicos, con el objeto de identificar usos probables de la tierra y compararlos en cuanto al rendimiento estimado de su aplicación sostenida. Esta es una definición nueva, notándose el acercamiento positivo, o sea un uso deseado.

Lo anterior es sólo para citar dos planteamientos sobre el discutido tema de los métodos para determinar la capacidad de uso de la tierra. En ese sentido Sheng (1971) comenta que la tierra puede clasificarse de muchas maneras, que es preciso comprender que debido a diferencias en las condiciones físicas, sociales, económicas y políticas. Ninguna clasificación puede aplicarse en su totalidad o forma original de un país a otro, sin considerables modificaciones.

#### **2.1.7. Metodología de clasificación basada en la capacidad de la tierra orientada a su tratamiento (Sistema Sheng)**

Esta metodología se conoce comúnmente como sistema Sheng, por su autor. Fue creado en Taiwán, y aplicado en Jamaica, país pequeño con alta demanda de alimentos de producción agrícola, donde la necesidad de cultivar las tierras marginales montañosas es imperativa. La tierra apta para cultivos no pueden limitarse, como en Estados Unidos a pendientes de 7° u 8°, o a los límites en que pueden emplearse máquinas.

El sistema tiene como principio, entre otros, que la clasificación es para fines agrícolas, se basa en factores limitantes permanentes, se considera un nivel de manejo moderadamente alto, y que las clases son homogéneas solo con respecto al grado de riesgos de las limitaciones. Por otro lado, como aspecto novedoso del método está: considerar que por la escasez de alimentos, las tierras cultivadas a mano deben incluirse como agrícolas. La clasificación puede hacerse no solo en la posición original del terreno, sino por ejemplo, después de construir terrazas de banco. La clase de capacidad resultante llevan implícita los tratamientos de conservación necesario para evitar la erosión; y finalmente en los países, donde no existe información detallada de la tierra y donde los agricultores tienen un bajo nivel de formación, es importante contar con sistemas sencillos y de fácil comprensión (Santana, 2000).

## **2.2. Modelos físicos para determinar sedimentos**

Los modelos físicos de simulación hidrológica son una tecnología de predicción basada en procesos hidrológicos y de erosión. Estos modelos son herramientas valiosas para evaluar el efecto de prácticas de manejo sobre el ambiente, el escurrimiento, producción de sedimentos, la erosión y la productividad (Santos et al; 1996), citado por (Torres et al; 2003). Así también Benavides (1998) citado por (Torres et al; 2003) considera que la importancia de los modelos físicos radica, entre otros aspectos, en la predicción de fenómenos a largo plazo en tiempo de cálculo muy corto, permitiendo obtener relaciones causa-efecto, sin haber realizado cambios en los sistemas reales.

Este tipo de modelo, como por ejemplo el SWAT, se utilizan en combinación o como interfase de un sistema de información geográfica (SIG) para la evaluación de la producción hídrica en cantidad y calidad en diversos marcos temporales (días, meses o años) y espaciales (cuencas, subcuencas, microcuencas, unidades de respuestas hidrológicas). En este sentido los SIG proporcionan un marco integrador para los modelos, ya que organizan la información espacial, permitiendo que sean desplegadas como mapas, tablas o gráficos. Así también proveen técnicas para analizar informaciones del paisaje (uso de la tierra, suelos, focos contaminantes, captación de agua, etc) y las relaciones que existen



en el mismo y que afectan de una u otra manera la producción de agua en calidad y cantidad (EPA, 2000).

De Vries y Hromadka (1993) hacen un análisis y plantean que debido a que los resultados de este tipo de modelo son aplicables a nivel de cuenca, donde los factores ambientales como suelo o precipitación presentan una gran variabilidad espacial, que incide en la precisión, ésta dependerá de la confiabilidad de los datos y del grado en que la estructura del modelo se ajuste o represente aproximadamente los procesos hidrológicos particulares; requiriendo una gran cantidad de información para su calibración o proceso de ajuste de los parámetros del modelo a las condiciones locales para que su resultado sea similar a lo observado en el campo y puedan efectuarse simulaciones o predicciones. En ese mismo orden de ideas Arnold (2001) indica que éstos modelos en lugar de incorporar ecuaciones de regresiones teóricas para describir las relaciones hidrológicas en una cuenca, requieren información específica del clima, propiedades del suelo, topografía, vegetación y prácticas de manejo de la tierra que ocurren en la zona de captación en estudio; entonces, los procesos físicos asociados con el movimiento del agua y sedimentos, cultivos, ciclaje de nutrientes, etc, son modelados directamente al usar la información antes mencionada.

### **2.3. Descripción del modelo SWRRB-WQ**

El acrónimo en inglés para Simulator for Water Resources in Rural Basins – Water Quality. La siguiente descripción del modelo se obtuvo de SWRRBWQ Windows Interface User`s Guide (1993), Arnol et al (1991). El autor señala que el modelo calcula la producción de sedimentos para cada subcuenca con la MUSLE y que el modelo de tránsito de los sedimentos en los cauces y en la llanura de inundación está compuesto por dos componentes que operan simultáneamente (deposición y degradación). La degradación está basada en el concepto de potencia de la corriente de Bagnold; y la deposición está basada en la velocidad de caída de las partículas de sedimentos.

El SWRRB-WQ es un modelo conceptual de simulación que enlaza los componentes de hidrología superficial y subterránea. Entre los componentes del modelo está la hidrología, clima, sedimentos (erosión), manejo de prácticas agrícolas, calidad de agua, entre otros. El

SWRRB-WQ opera sobre una base continua en el tiempo y simula los procesos hidrológicos en cuencas rurales utilizando datos de entrada fácilmente disponibles. El modelo incluye las componentes hidrológicas superficiales, subsuperficiales y subterráneas, para simular el balance de agua completo en una cuenca, incorporando la humedad del suelo como una variable y se simula el flujo lateral y vertical en el perfil del suelo. Los procesos de infiltración y percolación, que enlaza la parte superficial con la subterránea, son estimados sobre la base de las características de los suelos, sus condiciones de humedad, y la vegetación que los cubre.

La modelación requiere básicamente dos tipos de información: acerca de la cuenca, que representa el sistema; y acerca de las condiciones climatológicas que actúan sobre el sistema. El modelo funciona sobre bases físicas incorporando la subdivisión de la cuenca (hasta 10 subcuencas) para reflejar las variaciones espaciales. Incluye información fisiográfica como el uso de la tierra o cobertura de la cuenca, las condiciones y características de los suelos, y los parámetros de la topografía. La información hidrometeorológica consiste en: lluvia diaria y mensual, número de días de lluvia, temperatura máxima y mínima.

#### **2.4. Descripción del modelo SWAT (Soil Water Assessment Tool)**

Torres, et al (2003) describen al SWAT como un modelo basado en principios físicos, es decir, en lugar de integrar ecuaciones regresivas para describir las relaciones entre las variables de entrada y salida; el SWAT requiere de datos específicos acerca del clima, propiedades físicas del suelo, topografía, vegetación y prácticas de manejo del suelo. Esta descripción es corroborada por Neitsch et al (2002) quien plantea que el modelo SWAT fue desarrollado para predecir las prácticas de manejo de la tierra sobre el agua, sedimentos y productos químicos agrícolas en cuencas con variedad de suelo, uso de la tierra y condiciones de manejo durante largos períodos de tiempo, lo cual es particularmente conveniente para el uso de subcuencas; donde la información de entrada está agrupada u organizada en las categorías de clima, suelo, uso de la tierra, lagunas (estanques/humedales), etc. De esta manera se definen las HRUs o área de terreno dentro de

la subcuenca que están constituidas de un solo tipo de cobertura, suelo, topografía del terreno y condiciones de campo o de manejo.

El SWAT al analizar la producción de sedimentos lo hace aplicando los principios de la fórmula conocida como la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos, cuya sigla en inglés es (USLE). Esta ecuación predice el promedio a largo plazo de la tasa anual de erosión en una pendiente del terreno basado en el patrón de lluvia, tipo de suelo, topografía, cultivos y prácticas de manejo. La fórmula consiste en la relación de cinco factores que inciden en la cantidad generada de sedimentos en las cuencas. Esos factores son: Fuerza erosiva de la lluvia o factor (R) relacionada con la intensidad de la lluvia, Tipo de suelo o factor (K), Uso de la tierra y manejo de cultivo o factor (C), Prácticas agrícolas o factor (P) y Características topográficas o factor (LS).

La simulación de la hidrología de una cuenca con la utilización del modelo SWAT puede ser separada en dos divisiones principales: fase terrestre del ciclo hidrológico y la fase de tránsito o líquida.

**Fase terrestre:** controla la cantidad de agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas descargados en el cauce principal en cada subcuenca. El modelo simula el ciclo hidrológico según la ecuación del balance hídrico:

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

Donde  $SW_t$  es el contenido final de agua en el suelo (mm H<sub>2</sub>O),  $SW_o$  es el contenido inicial de agua y suelo en el día  $i$  (mm H<sub>2</sub>O),  $t$  es el tiempo (días),  $R_{day}$  es la cantidad de precipitación en un día  $i$  (mm H<sub>2</sub>O),  $Q_{surf}$  es la cantidad de escorrentía superficial en un día  $i$  (mm H<sub>2</sub>O),  $E_a$  es la cantidad de evapotranspiración en un día  $i$  (mm H<sub>2</sub>O),  $W_{seep}$  es la cantidad de agua que percola a través de la zona vadosa o zona en capacidad de campo en un perfil de suelo hacia el acuífero somero en un día  $i$  (mm H<sub>2</sub>O), y  $Q_{gw}$  es la cantidad de flujo de retorno en un día  $i$  (mm H<sub>2</sub>O) (Torre et al, 2003).

La asignación de subdivisión de la cuenca permite al modelo reflejar diferencias en evapotranspiración para varios cultivos y suelos. La escorrentía se estima separadamente para cada URH y se transita para obtener la escorrentía total de la cuenca. Esto incrementa la precisión y da una mejor descripción física del balance de agua (Neitsch et al, 2000).

**Fase líquida:** Esta fase comprende el movimiento del agua, sedimentos, etc; a través de la red de canales o cauces en la cuenca hasta su salida o punto de aforo. El desplazamiento en el cauce principal puede dividirse en cuatro componentes: agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas.

Agua: Con el flujo del agua pendiente abajo, una porción puede perderse debido a evaporación y transmisión a través del lecho del cauce. Otra pérdida potencial se debe a la remoción del agua del cauce para uso agrícola o humano. El caudal puede ser suplementado por la lluvia caída directamente sobre el cauce y la proveniente de fuentes puntuales. El flujo es dirigido a través del cauce usando un método variable de coeficientes de almacenamiento.

Sedimentos: El transporte de sedimentos en el cauce es controlado por la operación simultánea de dos procesos: deposición y degradación. El SWAT utiliza ecuaciones simplificadas y la cantidad máxima de sedimentos que puede ser transportada desde un segmento del cauce, la cual es una función de la velocidad máxima del agua:  $R = V.S$  (fórmula de Yang), donde V es la velocidad máxima de la corriente y S la pendiente. La potencia de la corriente disponible se usa para reentrar el material suelto y depositado hasta que todo el material sea removido en el cauce. El exceso de potencia de la corriente causa degradación del lecho del cauce, el cual se ajusta por la erosionabilidad del lecho de la corriente y la cobertura. (Chanasyk et al., 2003, citado por Hernández, 2003).

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Descripción general del área de estudio

##### 3.1.1. Localización y Extensión

Las cuencas del Río Yaque del Norte y Guanajuma, están localizadas al norte de la República Dominicana, entre las coordenadas 19° 4' a 19° 11' Latitud Norte y 70° 39' a 70° 50' Longitud Oeste, se encuentran entre las provincias de La Vega y Santiago. La cuenca de RYN tiene una extensión de 317 km<sup>2</sup> y la del RG 62 km<sup>2</sup>, constituyendo entre ambas un área total de extensión de 379 km.<sup>2</sup>



Figura 1. Mapa de ubicación de la las Cuencas RYN y Guanajuma, República. Dominicana.

### **3.1.2. Geología y Geomorfología**

Más del 50% toda el área que abarca las cuencas de los Ríos YN y Guanajuma (en estudio), corresponde a la roca tipo Graníticas, seguidas por la formación Complejo Duarte, Formación Tiro y Depósitos Aluviales respectivamente.

Según el estudio realizado por la compañía Intersa-Inarsa/J & M (2000), la mayor parte del área de las cuencas del RYN y Guanajuma corresponde a geoformas de cordilleras, montañas y colinas altas, conformadas por asociaciones y paisajes complejos con características geomorfológicas y pedológicas definidas que han sido influenciadas por procesos tectodinámicos, como son el volcanismo, plegamiento y fallamiento, así como por procesos morfodinámicos exógenos.

### **3.1.3. Relieve**

El relieve en la zona que abarca el presente trabajo se puede agrupar en tres tipos de pendientes: zonas con pendientes iguales o mayores del 40%, zonas de 20 a 40% y zonas con menos de 20%. Las primeras se encuentran ocupadas parcialmente por formaciones cerradas de bosques y otras áreas deforestadas. Las segundas son tierras de pastoreo y formaciones arbustivas, sin bosques ni cafetales. La zona de menor pendiente está destinada a cultivos anuales, cultivo de repollo, cultivo de tayota, cafetales o huertos familiares.

### **3.1.4. Clima**

La estación climática Hato Viejo en Jarabacoa ha registrado valores de temperatura media anual de 22 °C, manteniéndose durante el año una diferencia entre mínimas y máximas de 11 y 12 °C, la que desciende con la altura hasta los 3175 msnm (Pico Duarte). Las temperaturas medias oscilan entre 19.6 y 23.8 °C.

La precipitación media anual en Jarabacoa es de 1,535 mm. El mes más lluvioso es mayo, con 215.1 mm en promedio y el mes más seco es junio, con una media de 87.8 mm. Existen dos picos de lluvias, uno en primavera (abril y mayo) y otro en otoño (octubre a diciembre), (Intersa-Inarsa/J & M, 2000).

En el área de las cuencas de los RYN y Guanajuma, se identifican, según clasificación de Holdridge, dos zonas de vida: bosque húmedo sub-tropical, situado en las subcuencas más cercanas a Jarabacoa (ciudad cabecera) y sobre todo en la subcuenca del Río Guanajuma, y el bosque húmedo montano-bajo que se encuentra en las cumbres de las subcuencas de La Guázara y Arroyo Grande, éstas pertenecientes a la cuenca del RYN.

### **3.1.5. Vegetación Natural y Uso de la Tierra**

Según el informe para el proyecto MBT, (2000) el bosque nativo está constituido por el pino criollo (*Pinus occidentalis* Sw.) que es la especie dominante, y por algunas formaciones de especies latifoliadas típicas de los bosques tropicales húmedos, ubicados en los barrancos y arroyos. La distribución del pino criollo no sigue un patrón fijo; en las subcuencas vertientes directas del Yaque del Norte se encuentra en las partes altas de las crestas, pero conforme se acerca a Jarabacoa (municipio cabecera), las formaciones se hacen más densas y en las partes bajas de las subcuencas el pino criollo se encuentra mezclado con especies latifoliadas, formando un bosque denso.

En las subcuencas de los Arroyos El Cercado y La Guázara, el pino se encuentra mejor distribuido en formaciones claras en las que se asientan potreros degradados invadidos de la hierba yaragua, cultivos de sombra café y conucos. En la parte alta de las subcuencas se encuentran formaciones más densas. En la subcuenca del río Guanajuma, el pino ocupa formaciones residuales en las cotas altas, mientras que en la del río Arroyo Grande se encuentra en formaciones densas en ambas vertientes, hasta las cotas más bajas cercanas a Manabao (921 msnm)

### **3.1.6. Aspectos legales del área de las cuencas**

Los aspectos legales relevantes para las cuencas en estudio, están enmarcados en la Ley General sobre Medio Ambiente y Recursos Naturales publicada en agosto del año 2000 (Ley 64-00). En esta ley se definen los instrumentos para la gestión del ambiente y los recursos naturales, se establecen las normas generales para la protección y calidad del medio ambiente para prevenir los procesos contaminantes del agua, el suelo y la atmósfera.

También se establecen las normas comunes para la conservación de los recursos naturales, con especial referencia a los suelos, las aguas, la diversidad biológica, los bosques y otros recursos naturales.

En el artículo 132 se señala que “en las cuencas hidrográficas, cuyas aguas sean utilizadas para el abastecimiento público, la Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Recursos Naturales establecerá restricciones de uso para garantizar, mantener e incrementar la calidad y cantidad de las aguas. Con relación a los suelos, el artículo 121 indica que “quienes realicen actividades agrícolas, pecuarias o forestales deberán conservar, rehabilitar o incrementar la capacidad productiva de los suelos, utilizando técnicas y métodos de explotación y conservación apropiados, previniendo su degradación o esterilización”. En el artículo 122 se prohíbe dar a los suelos montañosos con pendiente igual o superior a 60% el uso de laboreo intensivo o cualquier labor que incremente la erosión y esterilización de los mismos, permitiendo solamente el establecimiento de plantaciones permanentes de arbustos frutales y árboles maderables. En el párrafo I de este artículo se establece que se dará preferencia al mantenimiento de la cobertura boscosa nativa, al desarrollo de combinaciones que incluyan cultivos perennes y cobertura, y técnicas agroforestales que garanticen su protección, la producción y el almacenamiento natural de agua.

### **3.2. Recopilación de información y procedimientos**

Para facilitar la aplicación de un Modelo de Simulación de la Erosión y Transporte de Sedimentos con el objetivo de evaluar en términos físicos y económicos el impacto de las acciones implementadas dentro del proyecto de Restauración Hidrológico Forestal de la cuenca alta del Río Yaque del Norte y del Río Guanajuma, fue necesario crear mapas y recopilar diferentes tipos de datos resumidos a continuación.

- Datos y procedimientos requeridos para elaborar un Mapa de Capacidad de Uso de la Tierra, involucrando la elaboración previa de un Mapa de Suelo y un Mapa de Pendientes.
- Datos y procedimientos para la elaboración de un mapa de conflictos de uso



- Datos y procedimientos para la aplicación de un modelo hidrológico

### **3.2.1. Procedimiento para la preparación de un Mapa de Capacidad de Uso**

Según descripción de la capacidad de uso, acápite 2.1.6, es necesario tener los insumos que servirán de base para preparar dicho mapa. A continuación se describe detalladamente como se logró obtener cada uno de los mapas que sirvieron de insumo para tales fines.

#### **3.2.1.1. Mapa de Suelos**

Con el uso del Arc View-GIS como herramienta, se crearon los mapas geológico y de suelo; sirviendo el primer mapa de base para obtener el segundo mapa. Los polígonos de las formaciones geológicas fueron trazados en base a las cuatro formaciones geológicas predominantes en el área del estudio. Estas formaciones son: Depósitos Aluviales, Rocas Graníticas, Complejo Duarte y Formación Tireo. Las formaciones geológicas mencionadas corresponden a la clasificación realizada para el proyecto MBT.

Posteriormente, el mapa geológico fue convertido a un Mapa de Suelos asignando valores de profundidad a las formaciones geológicas descritas en el mapa. Para ello se utilizaron los valores de profundidad de suelo propuestos en la metodología de T. C. Sheng, cuya clasificación diferencia los siguientes valores: <20, 20-50, 50-90, >90cm. Estos valores fueron introducidos al mapa al momento de crear los polígonos que identifican cada formación geológica.

Se le asignaron valores de 1, 2, 3, y 4 a cada polígono. Los valores se basaron en los estudios de suelo realizados para el Proyecto MBT, los cuales incluyen 30 calicatas en toda el área del estudio. Según estos estudios los suelos más profundos corresponden a los Depósitos Aluviales, seguido por las Rocas Graníticas, Complejo Duarte y la Formación Tireo respectivamente. Así fueron identificados con los números 1, 2, 3 y 4 en la leyenda del mapa.

Además de las profundidades asignadas al mapa de suelos, se le asignaron también los valores de textura del suelo, cuyos datos corresponden a los perfiles modales de cuatro

conjuntos de suelos predominantes en las subcuencas: (conjunto Río Yaque del Norte RYN, conjunto Río Guanajuma RG, conjunto Jarabacoa JA y conjunto Pinar Quemado PQ).

La descripción de las profundidades del suelo y su formación geológica se describen en el cuadro siguiente.

Cuadro 1. Geología y sus Profundidades de las cuencas RYN y R G, Según Sheng.

No	Formación Geológica	Profundidad (cm)	Descripción
1	Depósitos Aluviales	> 90	Muy profundo
2	Rocas Graníticas	50-90	Moderadamente profundo
3	Complejo Duarte	20-50	Profundo
4	Formación Tireo	< 20	Poco Profundo

Fuente: Basado en el mapa geológico realizado por INTECSA-INARSA para el proyecto MBT (2000) y el Manual de Planificación de Fincas T.C. Sheng.

### 3.2.1.2. Mapa de pendientes de las cuencas RYN y Guanajuma

Para obtener el mapa de pendientes, se tomaron las curvas de nivel del área, ya digitalizadas a partir de las hojas cartográficas del área del proyecto MBT, con un intervalo de 20 metros cada una.

Se creó un TIN (Triangle Irregular Network) basado en el Modelo de Elevación Digital (MED) que sirve para modelar datos continuos como las pendientes, en tres dimensiones guardando coordenadas X, Y y Z para cada vértice, el cual se obtuvo del Proyecto PROCARYN. Una vez generado el TIN de las pendientes y activando la extensión Spatial Analyst se derivaron las pendientes en grados utilizando la opción “Derive Slope” del menú Theme. Para convertir el TIN a Grids se escogió la opción “Convert to Grid” del menú Theme y se escogió el tamaño de celdas de 30 metros de resolución.

Para convertir las pendientes de grados en porcentaje se abrió el Map Calculador desde el menú Analyst. Para ello se utilizó la extensión Spatial Analyst. Desde la caja de diálogo se bajó el nombre del Grid que representa las elevaciones utilizando la siguiente fórmula:

([Grid de Elevaciones].slope(nil,true)). Esta expresión ordena que al Grid se le calcule las pendientes en porcentaje.

La clasificación de las pendientes también fue efectuada según la metodología de T. C. Sheng, quien las describe en grados de la siguiente forma: <7, 7-15, 15-20, 20-25, 25-30, >30; equivalente en porcentaje a: <12%, 12-27%, 27-36%, 36-47%, 47-58%, >58%. Al igual que el Mapa de Suelo las pendientes fueron reclasificadas utilizando el menú Analyst-Reclassify, asignándoles en éste caso valores de 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

Cuadro 2. Clasificación de pendientes según la metodología de Sheng

No	Categoría	Rango en °	Rango en %
1	Suave	<7	<12
2	Moderada	7-15	12-27
3	Fuerte	15-20	27-36
4	Muy fuerte	20-25	36-47
5	Escarpado	25-30	47-58
6	Muy escarpado	>30	>58

Fuente: Manual de planificación de fincas propuesto por T. C. Cheng.(1971)

Para obtener el mapa de Capacidad de Uso, se utilizó el mapa de suelo creado anteriormente; al sumar éste mapa y el mapa de pendientes, también creado anteriormente, se obtuvo el Mapa de Capacidad de uso propuesto por Sheng. Lo anterior permite obtener combinaciones de profundidad y pendientes que corresponden a cada una de la clasificación de capacidad de uso de la tierra, y cuyos valores se describen a continuación:

Cuadro 3. Clasificación de tierra por capacidad de uso según metodología de Sheng.

Profundidad del suelo cm	Tipo de pendiente %					
	Suave <12	Moderada 12-27	Fuerte 27-36	Muy fuerte 36-47	Escarpado 47-58	Muy Escarpado >58
Profundos >90	C1	C2	C3	C4	FT	F
Moderado 50-90	C1	C2	C3	C4/P	FT/F	F
Profundo 20-50	C1	C2/P	C3/P	P	F	F
Poco profundo <20	C1/P	P	P	P	F	F

Fuente: T. C. Sheng (1981)

Las clases se resumen de la siguiente manera:

1. Símbolos para los usos o cultivos más intensivos:

C1: Tierras cultivables 1: sin requerir o con pocas medidas intensivas de conservación.

C2: Tierras cultivable 2: en pendiente entre 12 y 27 %, con suelos moderadamente profundo con necesidad de conservación intensa.

C3: Tierra cultivable 3: de 27 a 36%, necesita terrazas de banco, la mecanización está limitada a tractores pequeños por la fuerte pendiente.

C4: Tierra cultivable 4: entre 36 y 47 %, todos los tratamientos necesarios deberían hacerse mediante laboreo manual.

P: Pastos mejorados, donde la pendiente alcanza los 47%.

FT: Árboles frutales o alimenticios.

F: Tierra de bosques, también si la pendiente es mayor de 58% y el suelo es poco profundo

AF\*: Agroforestería

FP\*: Protección de bosques

\* Clases de capacidad añadido posteriormente a la presente clasificación.

2. Cualquier terreno demasiado húmedo, ocasionalmente inundado; o demasiado pedregoso que impida el laboreo y el tratamiento se debe clasificar como:

Bajo de 47% \_\_\_\_\_ Pasturas

Sobre de 47% \_\_\_\_\_ Bosques

NOTA1. Si los terrenos tratables están entre 47% y 58% se clasifica como FT (árboles frutales o alimenticios). Cualquier terreno sobre 58% o no tratable deberá clasificarse para otros propósitos, como: bosques, pastizales, agroforestería, etc. para proporcionar una cobertura vegetal permanente.

### **3.2.2. Procedimiento para obtener el mapa de conflicto de usos**

#### **3.2.2.1. Mapa de Cobertura Vegetal**

El mapa de Cobertura Vegetal del área utilizado fue el creado para el proyecto MBT (2002), en el cual cada píxel tiene una resolución de 30 metros, producto del análisis de una imagen satelital Landsat. Este mapa fue reducido a siete (7) categorías de uso utilizando el Reclassify del menú Analysisist. Esto para facilitar el proceso de la creación del mapa.

Las categorías reclasificadas son:

- 1- Nubes y No Clasificados
- 2- Bosques: (Latifoliado Dominante, Conífero Dominante Abierto, Conífero Mixto con Latifoliado, Conífero Dominante Denso)
- 3- Pasto, Matorral y Helechal
- 4- Café sin Sombra, Agroforestería y Escasa Vegetación
- 5- Lagos, Lagunas y Embalses
- 6- Áreas Pobladas
- 7- Campos Quemados y Cultivos Intensivos

### **3.2.2.2. Matriz de clasificación de las clase de uso de la tierra**

Dado el hecho de que las cuencas en estudio se encuentran en la actualidad bajo un estado de deterioro muy significativo, se consideró factible crear un mapa de conflictos de uso que sirva como un mecanismo técnico para hacer recomendaciones de manejo apropiadas para el logro de la restauración hidrológica de los mismos.

Se ha elaborado un criterio de clasificación para determinar las condiciones de uso. Este se utilizó a partir de la sobreposición de la capa del mapa de cobertura vegetal, descrito en el acápite 3.2.2.1 correspondiente al uso actual y la capa del mapa de capacidad de uso, descrito en el acápite 3.2.1, y así obtener los resultados de la clase correspondiente para cada parcela de tierra.

Cuadro 4. Clasificación para ajuste de uso de la tierra

Clase de Uso	Capacidad de Uso						
	C1	C2	C3	C4	P	FT/AF	F
Campos quemados y Cultivos intensivos	W	W+	W+	O	O+	O+	O+
Pasto, Matorral y Helechal	U	U	U	U	W	O	O
Café sin sombra, Agroforestería y Escasa Vegetación	U	U	U	W+	O	W+	O
Bosques	U	U	U	U	O	U	W
Áreas pobladas	U	U	O	O	O	O	O+

Manual de planificación de fincas T.C. Sheng.(1986).

### 3.2.2.3. Descripción de la clasificación de ajuste:

W+: Uso apropiado dentro de la capacidad pero que necesita tratamiento de conservación de suelos.

W : Uso apropiado dentro de la capacidad pero no necesita tratamiento de conservación de suelos.

O+: Seriamente sobreutilizado.

O: Sobre utilizado.

U+: Sub-utilizado, de terrenos públicos que pueden ser ajustados para un mejor uso.

U: Sub utilizado.

### 3.3. Aplicación de un Modelo Hidrológico

La erosión y los procesos de transporte de sedimentos se pueden representar con un modelo hidrológico, por lo que para analizar el comportamiento de la producción de sedimentos en las Cuencas alta del Río Yaque del Norte y Guanajuma se utilizó el modelo hidrológico SWAT, cuyas bases teóricas se describen en el acápite 2.3. La figura 2 ilustra la presentación del modelo al abrirlo dentro de los SIG.

Para llevar a cabo la aplicación del modelo fue necesario desarrollar procedimientos metodológicos que permiten generar insumos para el mismo, así como el arreglo de los insumos para poder usarlos y las principales consideraciones que hay que tomar al

momento de ejecutar el modelo. A continuación se presenta un contexto del proceso usado para el logro de la corrida del modelo.

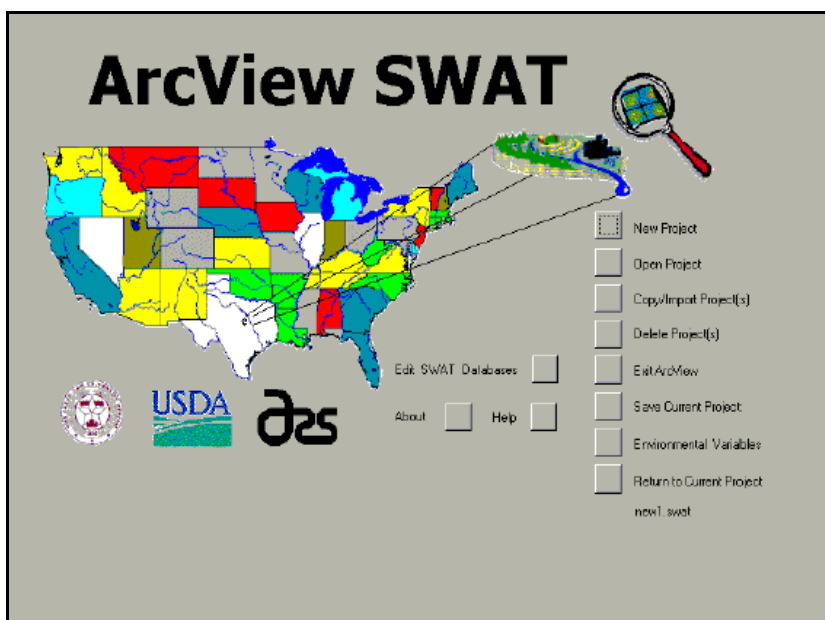


Figura 2. Esquema de la interface ArcView-SWAT

### 3.3.1. Obtención y arreglo de los insumos necesarios

#### Modelo de elevación digital

El MED se obtuvo del realizado para el proyecto MBT, constituyendo una superficie que representa las variaciones de la topografía de las cuencas en estudio, el tamaño del pixel es de 30\*30 metros.

#### Máscara

Se obtuvo con la unión de todos los polígonos de los diferentes suelos que contienen las cuencas, y a los que se le dieron valor de uno, así se puede crear una representación del área que serviría posteriormente para definir el entorno de la cuenca hidrográfica.

## Uso de la Tierra

Se utilizó el mismo mapa de uso creado para obtener el mapa de conflicto de uso, correspondiente al mapa de cobertura vegetal del año 2000, realizado para el proyecto MBT. Este mapa fue necesario ajustarlo a la base de datos que dispone el SWAT de tal forma que los usos sean escogidos con base a los que ofrece el modelo, y que además sean lo más similares posible a los descritos en el mapa, los cuales representan los tipos de usos existentes en las cuencas. En el cuadro 5 se describen los diferentes usos con sus respectivas tipologías y en el anexo 5, se ilustra el esquema de la caja de diálogo utilizada por el modelo para tales fines.

Cuadro 5. Reclasificación de los usos del suelo según la tipología usada por SWAT

Código de uso	Tipología de uso	Redefinición en AVSWAT	Código en AVSWAT
2	Bosques (Latifoliado Dominante Conífero Dominante Abierto, Co nífero Mixto con Latifoliado, Co nífero Dominante Denso.)	Forest Mixed	FRST
3	Pasto, Matorral y Helechal	Pasture	PAST
4	Café sin sombra, Agroforestería y Escasa Vegetación	Agricultural-Land- Generic	AGRIL
5	Lagos, Lagunas y Embalses	Water	WATR
6	Areas Pobladas	Density Low	URLD
7	Campos quemados y Cultivos Intensivos	Cabbage	CABG

## Suelos

Se usó el mapa de suelos preparado para crear el mapa de capacidad de uso descrito en el acápite 3.2.1.1, en él se describen los diferentes tipos de suelos existentes en las cuencas, aunque fue necesario la obtención de datos más detallado de los suelos en el contexto de sus características físicas y químicas, ya que para el uso del SWAT esto constituye condiciones fundamentales; esos datos fueron tomados de los estudios de suelos realizándose las cuencas bajo estudio por la compañía Jorge y Mustonen 2000.



El SWAT demanda de rigurosas informaciones, requiriendo datos del suelo por horizonte. El modelo posee una interfase amigable (anexo 6), teniendo la ventaja que los datos de suelos se pueden editar durante el proceso de los arreglos de los insumos garantizando que las salidas del modelo sean tan confiables como la calidad de los datos de entrada.

### **Base de datos metereológica**

Las informaciones climáticas correspondientes a: precipitación, temperatura, radiación solar y evapotranspiración, fueron tomadas de las estaciones (climáticas, hidrométricas y pluviométricas) instaladas en toda el área que constituye la cuenca alta del RYN y del RG. Esas informaciones son tomadas periódicamente por la Compañía Jorge y Mustonen para el proyecto MBT; igualmente lo hace el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI) como entidad nacional que le corresponde llevar registros de los datos climáticos de las cuencas de todo el país. Precisamente de las fuentes mencionadas se han tomado los datos climáticos que constituye la serie de tiempo necesaria en este trabajo para ejecutar el modelo hidrológico.

El modelo requiere datos por estación de precipitación diaria, temperatura mínima y máxima diaria, velocidad del viento, radiación solar, número de días de lluvia después de un día seco, número de días de lluvia después de un día de lluvia, etc, y sus respectivos estadígrafos (cuadro 7). Sin embargo el modelo permite que al menos se tengan registros de los cuatro primeros datos mencionados anteriormente, pues tiene la facultad de que cuando no existen registros de algunas variables, el modelo las puede simular a partir de un generador climático. Para este estudio en particular se logró obtener todas las variables requeridas por el modelo.

Cuadro 6. Estaciones climatológicas y pluviométricas utilizadas en el estudio

Estación	Código	Tipo	Latitud (°,mits, segs)	Longitud (°,mits, segs)	Elevación msnm	Registro años
Hato Viejo (c)	0401	1	19° 07' 50"	70° 38' 20"	500	1968-1986
Manabao (P)	0410	2	19° 03' 50"	70° 47' 40"	921	1961-1999
Los Montazos(p)	0446	3	19° 08' 15"	70° 47' 40"	825	1986-2000

Plan hidrológico forestal en las Cuencas de los Ríos Yaque del Norte y Guanajuma

Cuadro 7. Datos Climáticos Estación Hato Viejo Jarabacoa (1972-1998)

Mes	Tmed °C	Coef. Var Temp. Mens	Tmax °C	Tmin °C	Tmax Ext. °C	Tmin Ext. °C	Rad. Global Cal/cm <sup>2</sup> /día
1	20.8	0.036	26.0	13.4	30.0	8.0	517.90
2	20.8	0.037	26.4	13.7	31.5	8.5	595.10
3	21.8	0.038	27.3	14.8	33.4	10.0	651.41
4	22.7	0.039	28.2	15.8	38.0	9.0	709.37
5	23.4	0.033	28.9	17.0	35.0	9.0	736.67
6	24.5	0.025	30.2	17.0	34.0	11.0	745.42
7	24.6	0.021	30.3	16.9	34.2	10.0	739.40
8	24.6	0.021	30.4	17.1	34.0	8.0	708.22
9	24.3	0.023	30.3	16.9	35.5	11.0	673.95
10	23.6	0.028	29.4	16.8	34.0	10.5	613.18
11	22.5	0.026	27.6	16.0	32.0	10.0	537.05
12	21.0	0.040	26.0	14.2	31.0	8.0	491.60
Año	22.9	0.030	28.4	15.8	38.0	8.0	234.85

Fuente: Plan hidrológico forestal en las Cuencas de los Ríos Yaque del Norte y Guanajuma

### 3.3.2. Procedimientos y despliegue de las salidas del modelo

El SWAT enlaza diferentes fuentes de forma organizada, lo que facilita el proceso de la simulación con el uso de la computadora y los SIG. La figura 4 en la página 33 muestra los enlaces de las entradas y salidas durante todo el proceso de uso del modelo. El modelo fue operado dentro del ArcView 3.1 y alimentado con los datos generados para las cuencas del Río Yaque del Norte y Guanajuma. El período de calibración para la cuenca del Río Guanajuma fue de cinco años (1988-1992) y el de simulación abarca desde 1988 a 1992. Para la cuenca del RYN el período de calibración y simulación va desde los años 1971-1975.

**Proceso de la delineación de las subcuencas:** con el MED y la máscara se establece el área o la superficie disponible para la definición de las subcuencas; dentro del proceso se esquematiza también como el modelo define la hidrografía de las diferentes subcuencas. Para la cuenca del Río Guanajuma el modelo definió 6 subcuencas en toda el área. Para la cuenca del Río Yaque del Norte se definieron 8.

Cuadro 8. Localización de estaciones hidrométricas en los Ríos YN y G.

Estación	Código	Latitud	Longitud	Elevación msnm	Área Km <sup>2</sup>	Registro
Manabao (RYN)	040001	19 04 47	70 47 11	863	197.5	1968-1975
PinarQuemado(R YN)	040003	19 05 26	70 40 25	567	325.0	1968-1975
Bejucal (RG)	042203	19 10 56	70 44 06	605	66.15	1982-2000

Plan hidrológico forestal en las Cuencas de los Ríos Yaque del Norte y Guanajuma

**Proceso de las Unidades de Respuestas Hidrológicas (URH):** luego de realizada la reclasificación de la cobertura tomando en consideración las que el modelo propone, se unen los suelos con las coberturas redefinidas o reclasificadas para lograr obtener combinaciones de suelo y cobertura diferentes, pues el comportamiento hidrológico será igualmente diferente en cada una de ellas. Con lo anterior cada subcuencas posee diferentes URH que la diferencia una de otra. En el anexo 8 se puede visualizar las entradas que el modelo necesita para realizar las combinaciones.

**Proceso del Generador Climático:** el generador climático inicia con la entrada de los valores de los estadígrafos calculados para cada una de las variables que constituyen la base de datos del clima requeridas por el modelo. Con el SWAT se puede simular el comportamiento climático de la cuenca cargando los datos directamente al modelo durante todo el proceso de simulación. Estadísticamente la generación del clima se acepta si los datos hidrometeorológicos utilizados son confiables y representativos de los datos diarios de las cuencas. Los datos utilizados para este estudio se detallan en el cuadro. 7. Si el usuario no cuenta con todos los datos de clima requeridos el modelo tiene la facultad de simular las variables faltantes.

**Calibración y Resultados del SWAT:** para esta fase de la simulación se ajustaron los parámetros que son sensibles al modelo para generar datos de caudales similares a los observados en el campo. Una vez calibrado el modelo se obtuvieron los datos de escorrentía total y de sedimentos resultantes de la salida para la condición existente, consistiendo ésta en un escenario donde se exhibe la cobertura vegetal existente en las cuencas en la actualidad; luego se ejecutó nuevamente el modelo con el mapa de la

condición propuesta, la cual consiste en cambiar la cobertura de los terrenos que se encuentran bajo la condición sobreutilizada obtenida al crear el mapa de conflicto de uso, por una cobertura de bosques, y así obtener un segundo escenario que corresponda al escenario propuesto. El modelo adopta el valor del Número de Curva ( $CN_2$ ) para cada tipo de cobertura y solo un grupo hidrológico del suelo, pues utiliza para la asignación de sus valores la clasificación propuesta por el Servicio de Conservación del Suelo (S.C.S.). En este trabajo se asignaron diferentes valores del  $CN_2$  para los diferentes tipos de cobertura y suelo, pues en las cuencas en estudio existen dentro de ellas más de un tipo de suelo desde el punto de vista hidrológico, por lo que los valores del  $CN_2$  utilizados corresponden a cada uno de ellos con su respectiva cobertura. Sin embargo, lo dicho anteriormente no contradice la clasificación realizada por el S.C.S., más bien la asignación se realizó basada en dicha clasificación. En el cuadro 10 se muestran los valores de los  $CN_2$  utilizados en cada combinación de suelo y cobertura. Cabe señalar también que durante el uso del modelo se respetaron los valores del Factor de Manejo del Cultivo (C), y el Factor de Prácticas de Labranza (P) de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE), pues el modelo utiliza internamente esta ecuación para determinar la erosión del suelo; esto se debió básicamente a que se usó como entradas al modelo los mapas de uso del suelo digitalizados para tales fines en un Sistema de Información Geográfica, y el modelo asigna los valores de las variables antes mencionadas directamente de los mapas.

Cuadro 9. Número de curva ( $CN_2$ ) para la clase de cobertura y el grupo hidrológico de suelo

Cubierta del suelos	Número de curva correspondiente al grupo hidrológico de los suelos
	Clase A/C/D
Cultivos	67
Bosques	56
Pastos	78
Agroforestería	67

### **3.4. Antecedentes y consideraciones del aporte de sedimentos en las cuencas de los Ríos Yaque del Norte y Guanajuma.**

#### **3.4.1. Resultados de la aplicación del modelo SWRRBWQ en la cuenca del Río Yaque del Norte y de la cuenca Guanajuma**

En el 2001 en República Dominicana, la compañía Jorge y Mustonen utilizaron el modelo SWRRB-WQ como antecesor del modelo SWAT en el área de las cuencas alta del RYN y Guanajuma ajustando los parámetros en el modelo que afectan los componentes del escurrimiento, con base a un análisis de sensibilidad de las respuestas para los períodos de calibración del 1968-1986 y 1986-1992 en la cuenca del los Ríos Yaque del Norte y Guanajuma, respectivamente. Luego de calibrar el modelo en ambas cuencas, simularon la esorrentía total generada y los sedimentos que se producen, determinando que los cambios en el valor del escurrimiento difieren muy poco entre las condiciones existentes y propuestas en ambas subcuencas, y que los caudales medios mensuales son ligeramente menores en la condición propuesta, excepto en los períodos donde se producen menos lluvia.

Se comparó la tasa promedio de aporte de sedimentos de la condición existente al momento de la simulación frente a una condición propuesta sobre la base de un proyecto de Restauración Hidrológico Forestal, donde se hace un cambio de la cobertura vegetal aumentando el área de bosques en un 40%, así como la modificación de las prácticas de control de la erosión (factores C y P de la ecuación USLE) para la condición existente; los valores utilizados fueron 0.80 y 0.90, respectivamente, mientras que para la condición propuesta fueron 0.40 y 0.70, respectivamente. También se hizo un cambio en la concentración de sedimentos en el flujo de retorno y la cobertura residual inicial, asignándole valores de 1300 g/m<sup>3</sup> y 1000 k/ha en la condición existente, y de 800 g/m<sup>3</sup> y 500 k/ha en la condición propuesta. Al momento de hacer la comparación se observa que la erosión cambia de baja a muy baja en la cuenca del Río Guanajuma y en la cuenca del Río Yaque del Norte la clasificación se mantiene baja. En el cuadro 18 se detallan los valores del escurrimiento y los sedimentos simulados.

### **3.4.2. Detalle cronológico de algunas acciones realizadas para determinar el aporte de sedimentos en el Río Yaque del Norte**

Durante más de cuatro décadas diferentes personas e instituciones han sentido la inquietud de hacer mediciones de los sedimentos que se producen en la cuenca alta del Río Yaque del Norte, por su gran potencial hidroeléctrico y por ser uno de los Ríos más importantes de la región del Cibao y de todo el territorio nacional. Por su parte, María de la Cruz analizó las muestras de sedimento en suspensión tomadas por el INDRHI en el Río Yaque del Norte, en Tavera, en los períodos de octubre a diciembre de 1966, de febrero a julio de 1967 y de abril a junio de 1969. Las 238 muestras se tomaron a profundidades de hasta 20 centímetros por debajo del nivel del agua, en sitios accesibles usando una botella. El caudal máximo aforado fue de 102 m<sup>3</sup>/s y la concentración del sedimento en suspensión fue aproximadamente de 300 miligramos por litro, obtenida por caudales del orden de 15 a 31 m<sup>3</sup>/s.

Por otra parte, para los años comprendidos entre 1972 y 1978, el INDRHI ha realizado medidas de sedimentos en suspensión en el RYN, en Boma. Las ilustraciones de los datos indican la ausencia de una curva de aforo de sedimento. Para un mismo caudal de 70 m<sup>3</sup>/s la carga de sedimento suspendido varía de 58 a 48,000 toneladas por día. En el citado período de 6 años, el caudal máximo aforado al tomar las muestras fue de 175 m<sup>3</sup>/s, y para el mismo año la concentración de sedimento suspendido se acercó a los 600 miligramos por litro. La máxima concentración medida fue de 10,900 miligramos por litro y correspondió a un caudal de 30 m<sup>3</sup>/s.

Se ha calculado el promedio anual de la carga de sedimento suspendido en la cuenca alta del RYN, suponiendo diferentes relaciones, concluyendo que posiblemente el 90% de la descarga de sedimento suspendido se presenta cuando el caudal en Boma (estación hidrométrica) es mayor de 40 m<sup>3</sup>/s.

Relacionando lo dicho anteriormente y otros estudios realizados en la cuenca del RYN, se ha concluido que al graficar la concentración de sedimentos versus caudal, no hay una relación definida entre las variables. Es decir que no existe una curva de aforo del

sedimento en suspensión y que la mayor parte del sedimento es transporte del material de lavado.

A mediados del año 2004, durante el proceso metodológico correspondiente a este trabajo de investigación para llegar a determinar los sedimentos en la cuenca del Río Yaque del Norte, se realizaron algunos aforos con la finalidad de medir los sólidos en suspensión en una sección del Río Jimenoa, el cual es un afluente del Río Yaque del Norte, aprovechando el Torno Cable-Vía (figura 11) que se instaló con el fin de mantener un monitoreo continuo de los caudales del río en esa sección, ya que a pocos metros se ubica la casa de máquinas del proyecto hidroeléctrico Jimenoa (figura 16). Las mediciones se hicieron utilizando el método EWI en el cual se divide la sección del Río en puntos de muestreo equidistantes, escogiéndose para tomar las muestras los mismos puntos donde se hicieron los aforos, pues las velocidades del agua obtenidas en esos puntos se utilizan para entrar a la curva del diámetro de boquilla correspondiente, y así determinar el tiempo de llenado de la botella, de acuerdo al tiempo de inmersión del muestreador (ida y regreso en vertical). El muestreador utilizado fue el US-D49 y la botella de capacidad de 450 cc. Los datos de sedimentos en suspensión fueron muy bajos, alcanzando un valor promedio de solo 49 PPM, puede que ese valor no sea representativo por las pocas repeticiones realizadas en sólo la época seca del año. Los anexos 11, 12, 13, y 14 ilustran la forma como se hizo el muestreo en el río Jimenoa.

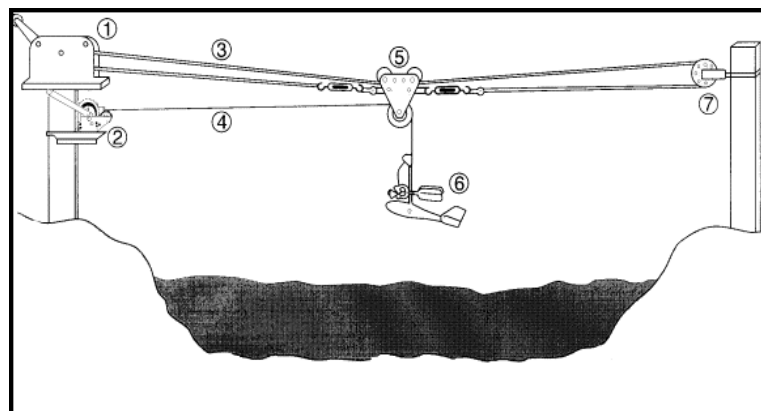


Figura 3. Esquema del muestreador US-D49

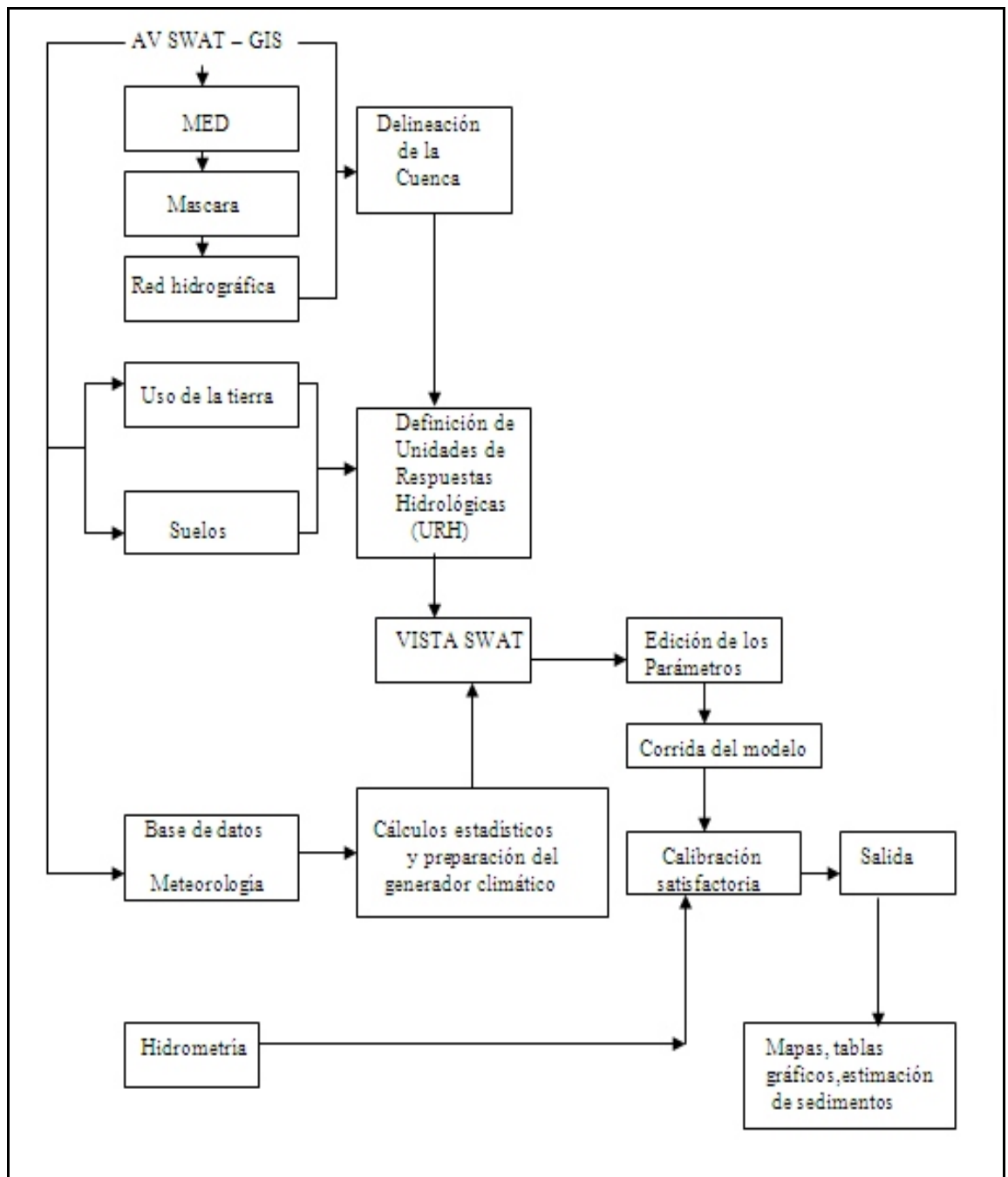


Figura 4 Enlace de las entradas y salidas del modelo SWAT.



## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Simulación hidrológica en las Cuencas de los Ríos Guanajuma y RYN. Con el uso del modelo SWAT

Para efectuar la simulación en las cuencas de los Ríos Yaque del Norte y Guanajuma, se hizo necesario obtener la base de datos exigida por el modelo SWAT y la calibración de éste; lo anterior se describe con detalle en el acápite 3.3. En ese sentido se escogió la serie de tiempo en ambas cuencas que cumpliera con dichos requerimientos, siendo los años 1988-1992 de calibración y simulación para la cuenca del Río Guanajuma, y 1971-1975 los años de calibración y simulación para la cuenca del Río Yaque del Norte. En los anexos 1 y 2 se presenta los datos disponibles para el uso del modelo en ambas cuencas.

Los resultados de salida considerados en el proceso de calibración del modelo corresponde a la escorrentía total producida en las cuencas de los Ríos Guanajuma y Yaque del Norte; para lo cual se ajustaron las variables del modelo al momento de la calibración inclinando porcentualmente los valores hacia el límite superior o inferior en la caja de diálogo presentada por el modelo, según el ajuste de los valores de las variables analizadas, resultando ser las más sensibles las descritas en el Cuadro 10.

Los detalles del comportamiento del escurrimiento se hacen en una serie de tiempo anual para facilitar el análisis de la salida del modelo en lo que corresponde a este estudio en particular.

Cuadro 10. Parámetros más sensibles que afectan los valores del SWAT

Parámetro Modificado	Significado	Grado de Sensibilidad	Parámetro de salida que modifica
CN2	Curva paramétrica en la Subcuenca	Alto	Escurrimiento superficial Escurrimiento subsuperficial
SOL_AWC	Capacidad de agua disponible	Alto	Escurrimirnto superficial
ALPHA_BF	Factor para el flujo base	Medio	Escurrimiento superficial Escurrimiento subsuperficial
SLSUBBSN	Pendiente y longitud de la pendiente	Alto	Producción de sedimentos

#### 4.1.1. Resultado de la calibración del modelo SWAT en la cuenca del Río Guanajuma período (1988-1992)

El escurrimiento que reporta la salida del SWAT para la cuenca del RG, puede visualizarse en la figura 6, donde se manifiesta la dinámica y magnitud del escurrimiento en forma anual de los valores observados y los simulados por el modelo; en la figura también son apreciables los valores anuales simulados los que se asemejan bastante durante toda la serie del tiempo considerada, presentando pequeños cambios en los años 1989-91, donde los valores simulados se muestran por encima que los observados, cosa que cambia para el año siguiente (1992). En el cuadro 11 se muestran los valores del escurrimiento. No obstante, las variaciones mostradas son a pequeña escala en cuanto a los valores absolutos del escurrimiento para la serie estudiada. La figura 5 muestra gráficamente la regresión entre los valores totales de los escurrimientos observados y simulados, presentando claramente que mantienen muy buen ajuste, el análisis de regresión reporta un coeficiente de correlación  $r^2 = 0.98$ , revelando que el escurrimiento simulado se compara muy favorablemente con los datos observados, los cuales son considerados como aceptables, pues el modelo de regresión es significativo al 5% y la probabilidad obtenida fue de 0.0009 como se observa en los resultados mostrados abajo. El modelo matemático utilizado fue el siguiente:

$$Y = a + Bx;$$

$$\text{Esc. Sim.} = 53.82 + 0.95 \text{ Esc. Obs.}$$

##### Análisis de regresión lineal

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	Aj	ECMP
Sim		50.98	0.9827706	71	

##### Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	EE	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	Cp	Mallows
const	53.82	68.25	-163.37	271.02	0.79	0.4879		
Obs.	0.95	0.07	0.73	1.17	13.57	0.0009	139.34	

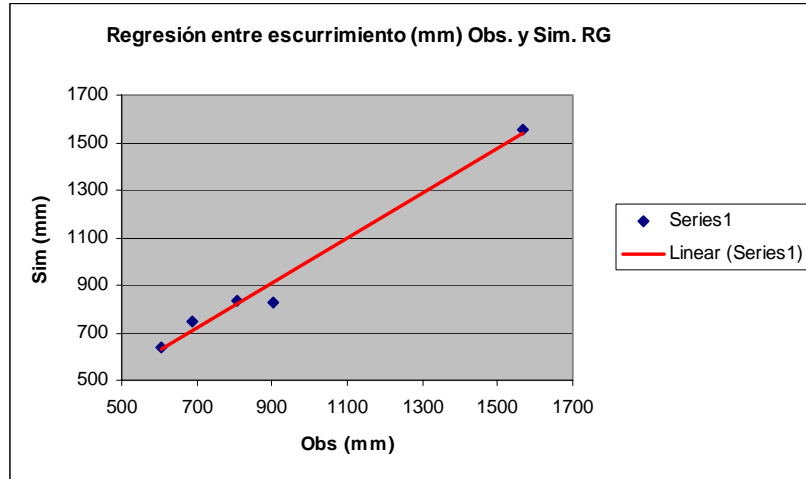


Figura 5. Regresión para la comparación del escurrimiento total observado y simulado RG

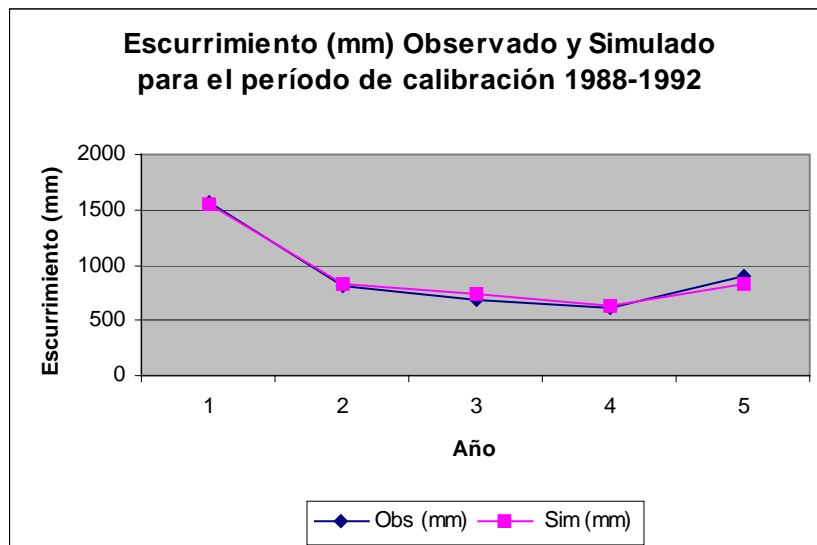


Figura 6 Comportamiento del escurrimiento (mm) anual en la estación Bejucal (RG), durante el período de calibración del modelo SWAT

Cuadro 11. Escorrentía observada y simulada, período de calibración 1988-1992 (RG)

Serie	Año	Escorrentía Observada (mm)	Escorrentía Simulada (mm)
1	1988	1566.40	1558.05
2	1989	808.10	833.94
3	1990	689.00	746.36
4	1991	607.20	638.53
5	1992	903.50	830.80

#### 4.1.2. Resultado de la calibración del modelo SWAT en la cuenca del Río Yaque del Norte (1971-1975)

Una situación similar a la de la cuenca del RG se presenta para la cuenca del RYN, en este caso el análisis de regresión reporta un valor de  $r^2 = 0.91$  y un valor para  $p = 0.0082$ , lo que manifiesta que el escurrimiento simulado se corresponde bastante al observado. El comportamiento gráfico entre el ajuste de los valores observados y simulados se pueden apreciar en la figura 7.

En sentido general se puede decir que se obtuvo muy buena aproximación entre los valores de caudales observados y simulados. Cabe entonces poner de manifiesto la buena precisión del modelo al brindar un buen ajuste entre ellos. Las similitudes y las diferencias se presentan de forma alterna y sucesiva para cada año. Las diferencias mostradas se consideran en pequeña escala, manteniéndose el mismo comportamiento entre ambos valores durante toda la serie de tiempo. En el cuadro 12 se muestran los valores de los escurrimientos observados y simulados, cuyo comportamiento se observa en la figura 8. El modelo matemático es el mismo utilizado para la cuenca del RG.

$$Y = a + Bx;$$

$$\text{Esc. Sim.} = 95.56 + 1.05 \text{ Esc. Obs.}$$

Análisis de regresión lineal				
Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP
Sim (mm)	50.93	0.9149	773.61	

Coeficientes de regresión y estadísticos asociados						
Coef	Est.	EE	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor
const	-95.56	425.68	-1450.25	1259.13	-0.22	0.8368
Obs (mm)	1.05	0.17	0.52	1.59	6.27	0.0082
						30.71

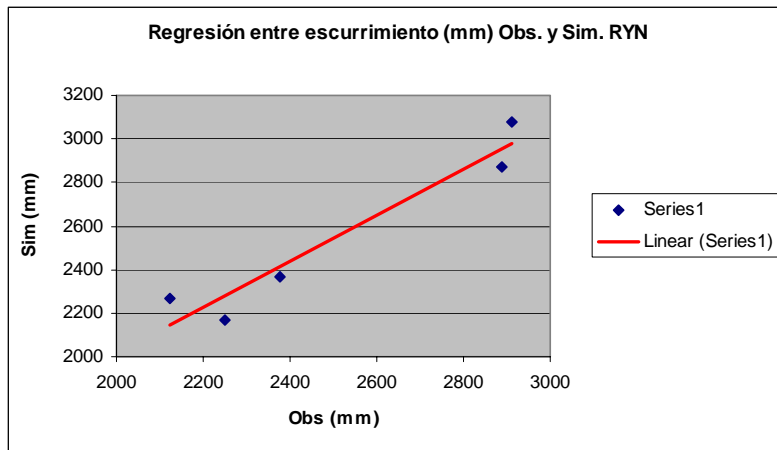


Figura 7. Regresión para la comparación del escurrimiento total observado y simulado RYN

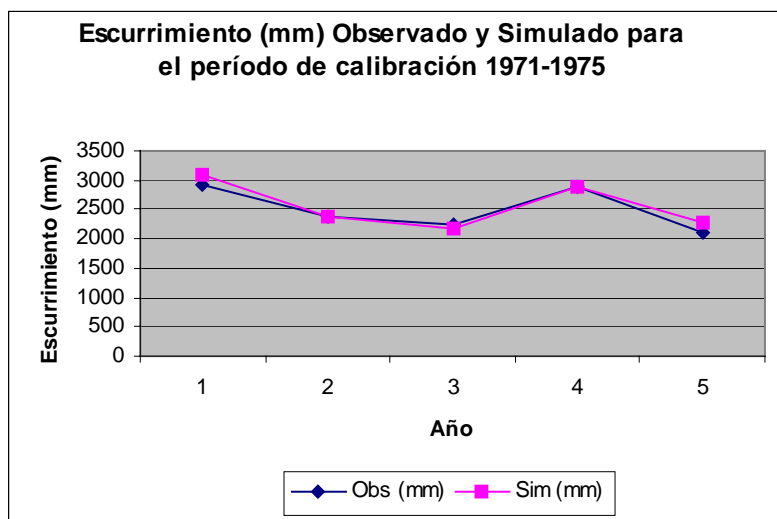


Figura 8. Comportamiento del escurrimiento (mm) anual en la estación Pinar Quemado (RYN) período de calibración del modelo SWAT

Cuadro 12. Datos de escorrentía observada y simulada, período de calibración 1971-1975 (RYN)

Serie	Año	Escorrentía Observada (mm)	Escorrentía Simulada (mm)
1	1971	2911.54	3079.04
2	1972	2375.78	2367.36
3	1973	2248.10	2164.77
4	1974	2886.68	2872.65
5	1975	2122.02	2265.70

## **4.2. Resultados de la Simulación y producción de sedimentos en las cuencas de los Ríos Guanajuma y Yaque del Norte.**

### **4.2.1. Simulación hidrológica ante un cambio del uso de la tierra en la cuenca del Río Guanajuma**

La simulación hidrológica en la cuenca del Río Guanajuma mediante el modelo SWAT, se realizó para el período 1988-1992, bajo las condiciones: antes (condición existentes) y después (condición propuesta) de hacer un cambio en el uso de la tierra, específicamente se sustituyó el área del sobreuso (16%) que experimenta la tierra en el primer escenario por bosque, lo que implica un aumento del área de éste en el orden de un 36% a un 52% para obtener el escenario propuesto.

Se eligió el sobreuso para realizar el cambio por bosques y obtener el escenario propuesto, porque el proceso de erosión puede efectuarse con mayor facilidad en los suelos donde existe este tipo de condición de uso. En este sentido, se analiza el significado de la aplicación de los elementos de la fórmula USLE de pérdida de suelos, descrita en el acápite 2.3.

La figura 9 muestra la modificación que se tendría en el régimen del escurrimiento, de acuerdo a la simulación realizada como resultado del cambio de uso de la tierra descrito anteriormente. Aquí se puede observar que los caudales medios anuales para el período de simulación son ligeramente menores en la condición propuesta, manteniendo la misma trayectoria durante toda la serie de tiempo, aún así la tendencia en los cambios no son exagerados, más bien parecidos, según se detallan en el cuadro 13.

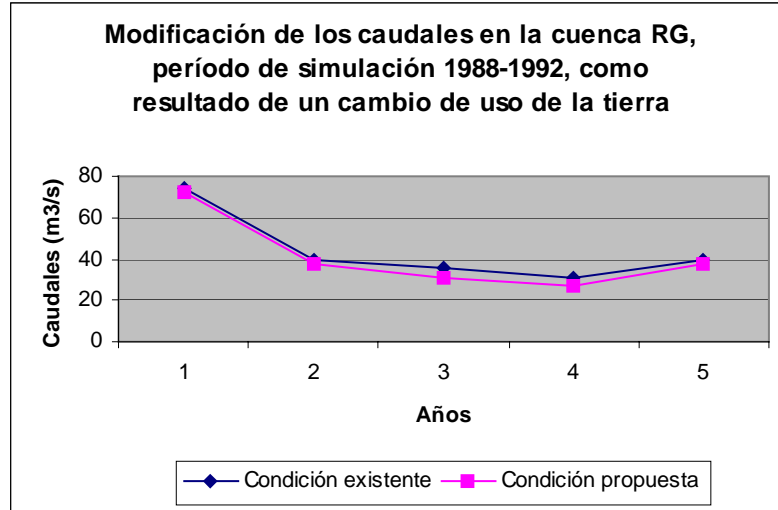


Figura 9. Comportamiento del escurrimiento (mm) anual en la estación Bejucal en la condición existente y la propuesta. R.G.

Cuadro 13. Datos de caudales para las condiciones existente y propuesta, periodo de simulación 1988-1992 (RG)

Serie	Año	Caudal Condición Existente (m <sup>3</sup> /s)	Caudal Condición Propuesta (m <sup>3</sup> /s)
1	1988	74.19	72.24
2	1989	39.71	37.76
3	1990	35.54	31.16
4	1991	30.41	26.76
5	1992	39.56	37.23

#### 4.2.2. Simulación hidrológica ante un cambio del uso de la tierra en la cuenca del Río Yaque del Norte

El comportamiento del escurrimiento total en la cuenca del RYN se ha simulado durante el período de tiempo de los años 1971-1975. Al igual que para la cuenca del RG, la simulación se realizó bajo las condiciones antes (condición existente) y después (condición propuesta) de hacer un cambio en el uso de la tierra; sustituyendo el área de sobreuso 12,50% que hay en el primer escenario, por una cobertura de bosque, implicando un aumento de éste que va de un 68.23% a un 80.73% para obtener la condición propuesta.

Los criterios utilizados para aplicar un cambio en el sobreuso por bosques son los mismos que los descritos anteriormente.

La figura 10 exhibe la dinámica del escurrimiento total en el período de simulación, revelando claramente que el comportamiento anual de éste para ambas condiciones son muy parecidos, cuya similitud no es sólo en el orden de los valores absolutos, sino también en los cambios que experimenta sus trayectoria durante toda la serie de tiempo estudiada. En el cuadro 14 se detallan los valores de caudales simulados para ambas condiciones.

El excelente ajuste del escurrimiento entre ambos escenarios muestra la bondad del modelo SWAT, lo que hace pensar que cualquier estimación que se haga amparada sobre estos ajustes quedaría igualmente bien simulados, tomando en cuenta sobre todo que la calidad de las salidas del modelo dependen de la calidad de las entradas.

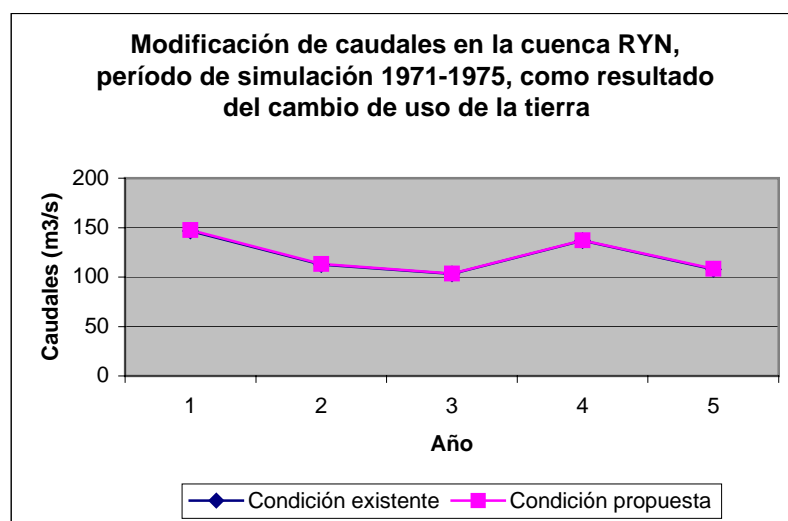


Figura 10. Comportamiento del escurrimiento (mm) anual en la estación Pinar Quemado en la condición existente y la propuesta. RYN.



Cuadro 14. Datos de caudales para las condiciones existente y propuesta, período de simulación 1971-1975 (RYN)

Serie	Año	Caudal Condición Existente (m <sup>3</sup> /s)	Caudal Condición Propuesta (m <sup>3</sup> /s)
1	1971	146.62	147.63
2	1972	112.73	113.27
3	1973	103.08	103.46
4	1974	136.79	137.25
5	1975	107.89	108.42

#### 4.2.3. Producción de sedimentos y el cambio de uso de la tierra en la cuenca RG.

Al sobreponer la capa del mapa de las subcuencas (Figura 11) sobre la capa del mapa de conflictos de uso de la tierra (Figura 12), se puede observar que en las subcuencas en condiciones de sobreuso es donde se produce la mayor cantidad de sedimentos, tratándose específicamente de las subcuencas 1,2. Caso contrario sucede en la subcuenca 5, donde se encuentran la mayor cantidad de bosques, haciéndola menos propensa a erosión, aún sus pendientes sean diferentes.

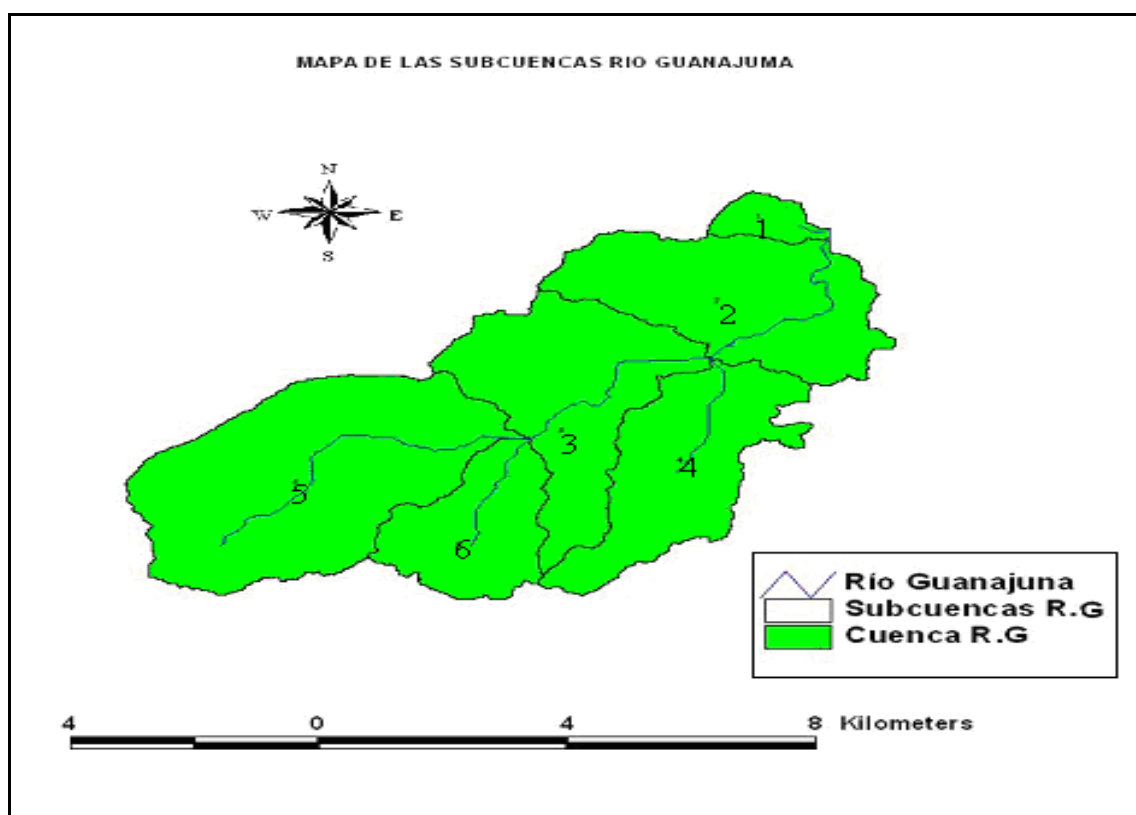


Figura 11. Mapa de las subcuencas del Río Guanajuma

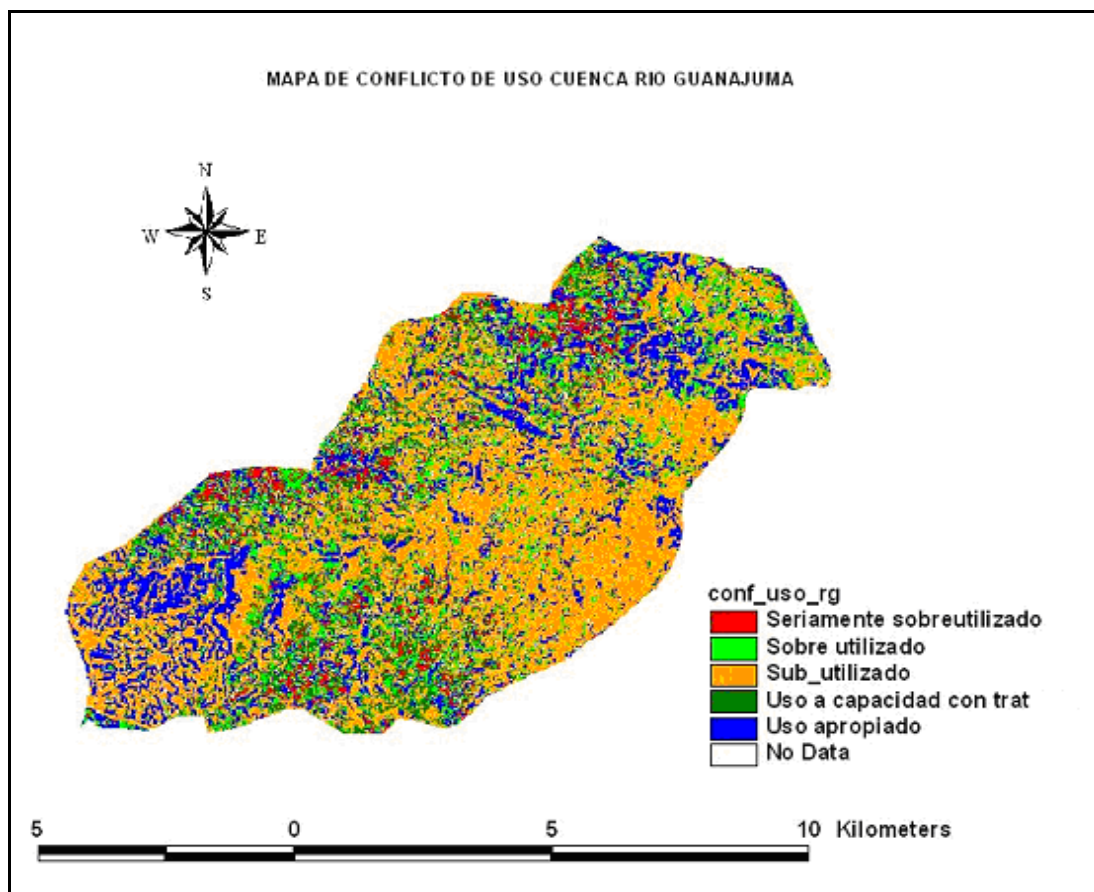


Figura 12. Mapa de conflicto de uso Cuenca Río Guanajuma

De igual manera si se sobrepone la capa del mapa de las subcuencas al mapa de uso propuesto (Figura 13), para un escenario donde se cambia el sobreuso por bosques, los sedimentos se reducen considerablemente en las subcuencas 1 y 2 y sufren reducciones en diferentes grados en las demás subcuencas con excepción de la subcuenca 5, esto corrobora lo dicho anteriormente. De todas maneras los niveles más altos se producen en las subcuencas 1 y 2, en ambos escenarios.

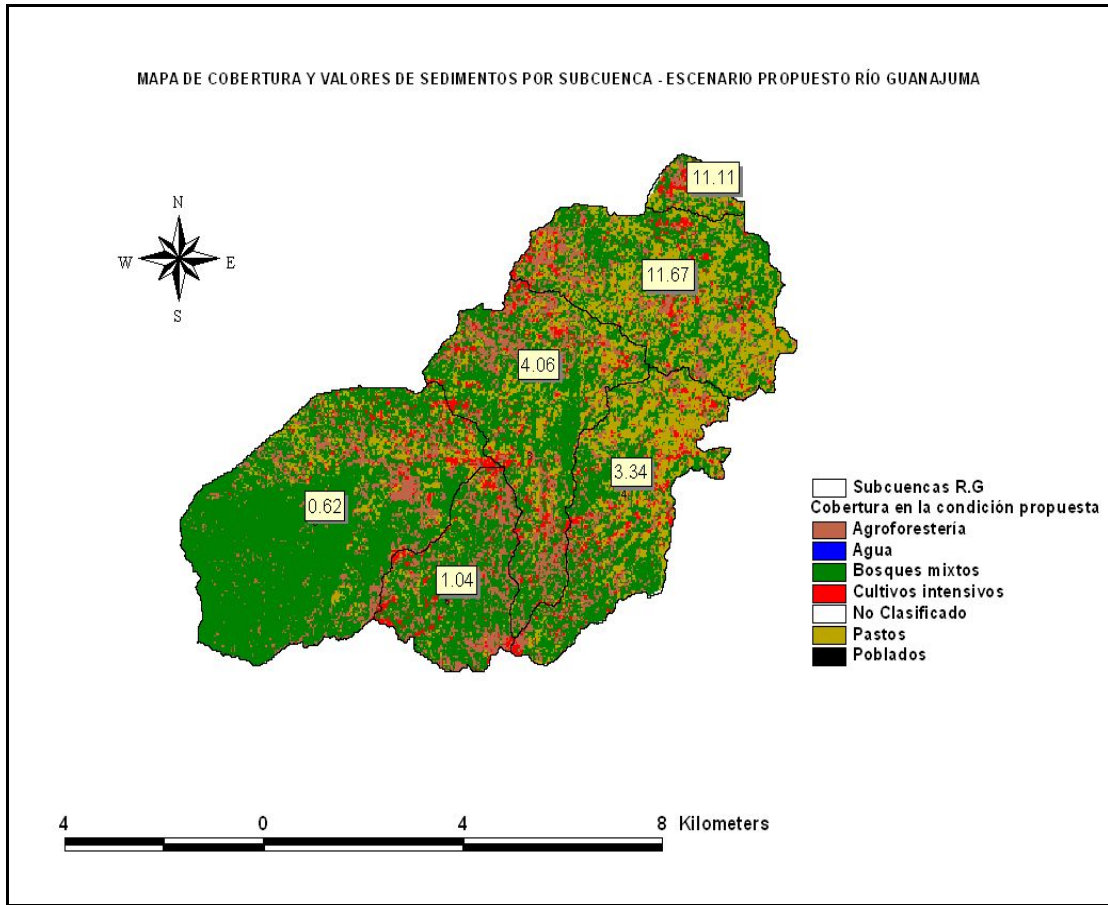


Figura 13. Mapa de valores de sedimentos por sub-cuenca, cond. prop.RG.

En sentido general si se cambia el sobreuso por bosques, los sedimentos se reducen en un 62% en toda la cuenca. En la Figura 13 se refleja que en las áreas con mayores cobertura de bosques es donde los valores de sedimentos son menores como se puede apreciar en las subcuencas 3, 4, 5, y 6; contrario a ello sucede en las subcuencas 1 y 2, donde se encuentran los valores más altos a pesar de que son las subcuencas donde los sedimentos sufrieron mayores reducciones al hacer un cambio de uso. Al comparar la tasa promedio de aporte de sedimentos en toda la cuenca con los valores tolerables de la tasa de producción de sedimentos, la comparación muestra que la erosión cambia de baja a muy baja (Cuadro 15), manifestando con ello que aplicando el modelo SWAT se puede lograr obtener

resultados satisfactorios, acordes con los escenarios estudiados. En el Cuadro 16 se muestra la variación de la producción de sedimentos por subcuencas para ambos escenarios.

Cuadro 15. Tasa tolerable de pérdida de suelo

Clase de erosión del suelo	Pérdida potencial del suelo Ton/Ha/año
Muy Baja	< 7.4
Baja	7.4 a 12.4
Moderada	12.4 a 24.7
Alta	24.7 a 37.1
Severa	> 37.1

Fuente: Según parámetros del Servicio de Conservación de Suelos (USDA), citado por R. P. Stone.

Cuadro 16. Producción de sedimentos en ton/ha/año para las condiciones existente y propuesta con el uso del modelo SWAT en la RG

Subcuencas del RG	Área (km <sup>2</sup> )	Condición existente 1988-92	Condición propuesta 1988-92	% de reducción de sedimentos entre ambas condiciones
1	1.42	15.83	11.11	29.80
2	12.21	24.38	11.67	52.10
3	11.31	6.18	4.06	34.30
4	10.24	4.34	3.34	23.00
5	19.58	0.62	0.62	0.00
6	6.74	3.08	1.84	40.30
Total	61.50	9.07	5.44	30.00

Por otra parte y en el mismo sentido, gracias a las bondades brindadas por el ArcView-SIG, se pudo cruzar las tablas de los mapas de las subcuencas con el mapa de conflicto de uso en ambos escenarios, notándose que en la subcuenca 1 los bosques aumentan un 93.8% entre ambos escenarios; en la cuenca 2 los bosques experimentan un aumento de 55.6%; mientras que en la subcuenca 5, que es donde se encuentran concentrados la mayor cantidad de bosques, solo se aumenta un 21.8% en el escenario propuesto. Esto comparado con el área total de cada subcuenca, revela que en la subcuenca 5 es donde se presentan menos condiciones de sobreuso, contrario a las subcuencas 1 y 2, siendo como consecuencia en éstas últimas donde se producen más cantidad de sedimentos en el escenario existente, y

donde se reducen la mayor cantidad de sedimentos en el escenario propuesto. En el cuadro 17 se presenta los detalles de cada subcuenca.

Cuadro 17. Detalle de los resultados del cruce de tablas entre las subcuencas y el conflicto de uso, cuenca RG.

Sub Cuencas	Área subcuenca (ha)	Área %	A de Boques Cond. Exist (ha)	A. de Bosques Cond. Prop. (ha)	Área Combinadas (ha)	% Bosques Cruzados
1	141.96	2.27	3.34	54	50.66	93.81
2	1221.96	19.60	225.17	507.8	282.63	55.66
3	1215.50	19.50	345.68	599.65	253.97	42.35
4	1024.13	16.43	347.98	470.02	122.04	26.00
5	1957.67	31.40	1154.59	1476.57	321.98	21.85
6	673.36	10.80	221.67	404.19	182.52	45.22
Total	6234.58	100.00			1213.8	

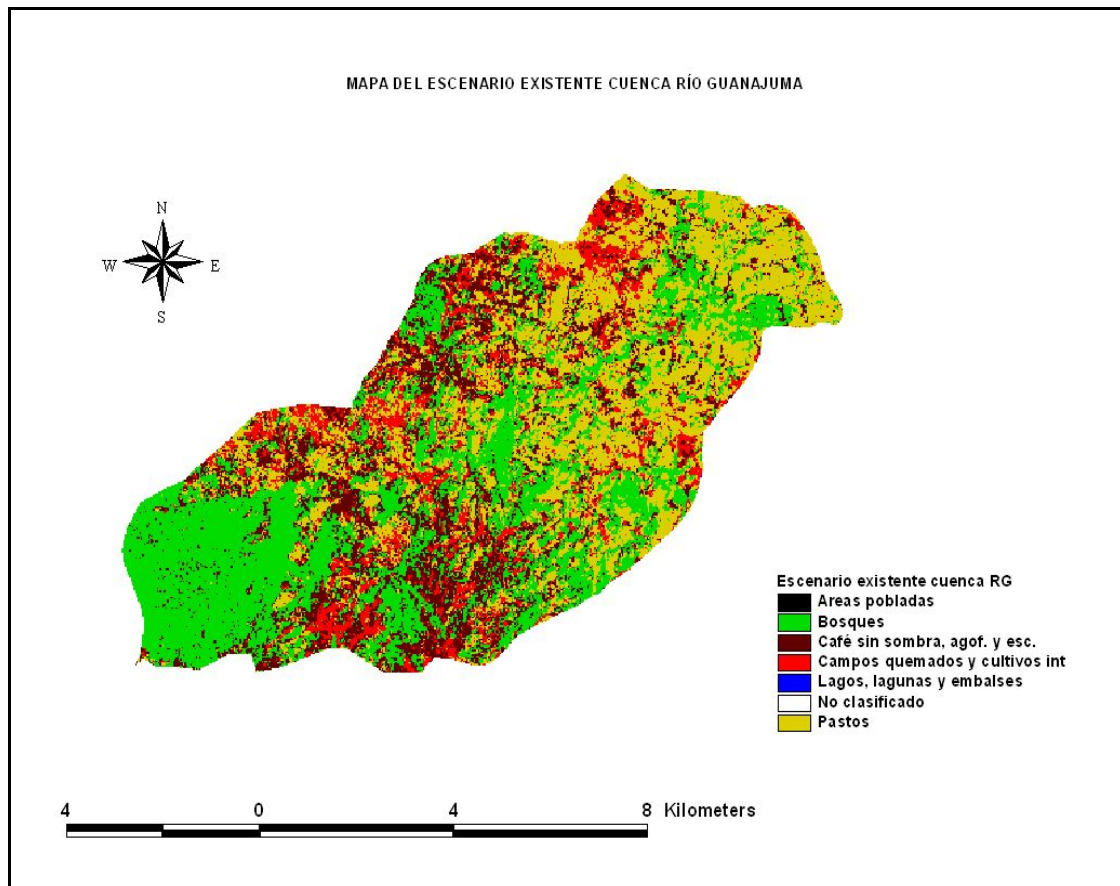


Figura 14. Mapa del escenario existente cuenca Río Guanajuma

#### 4.2.4. Producción de sedimentos y el cambio de uso de la tierra en la cuenca RYN.

Aplicando la misma metodología utilizada en el capítulo anterior, al sobreponer la capa del mapa de las subcuencas del RYN (Figura 15) sobre la capa del mapa de conflictos de uso de la tierra (figura 16), se obtiene que las subcuencas 1 y 8 experimentan una baja en la producción de sedimentos al comparar la condición existente con la condición propuesta.

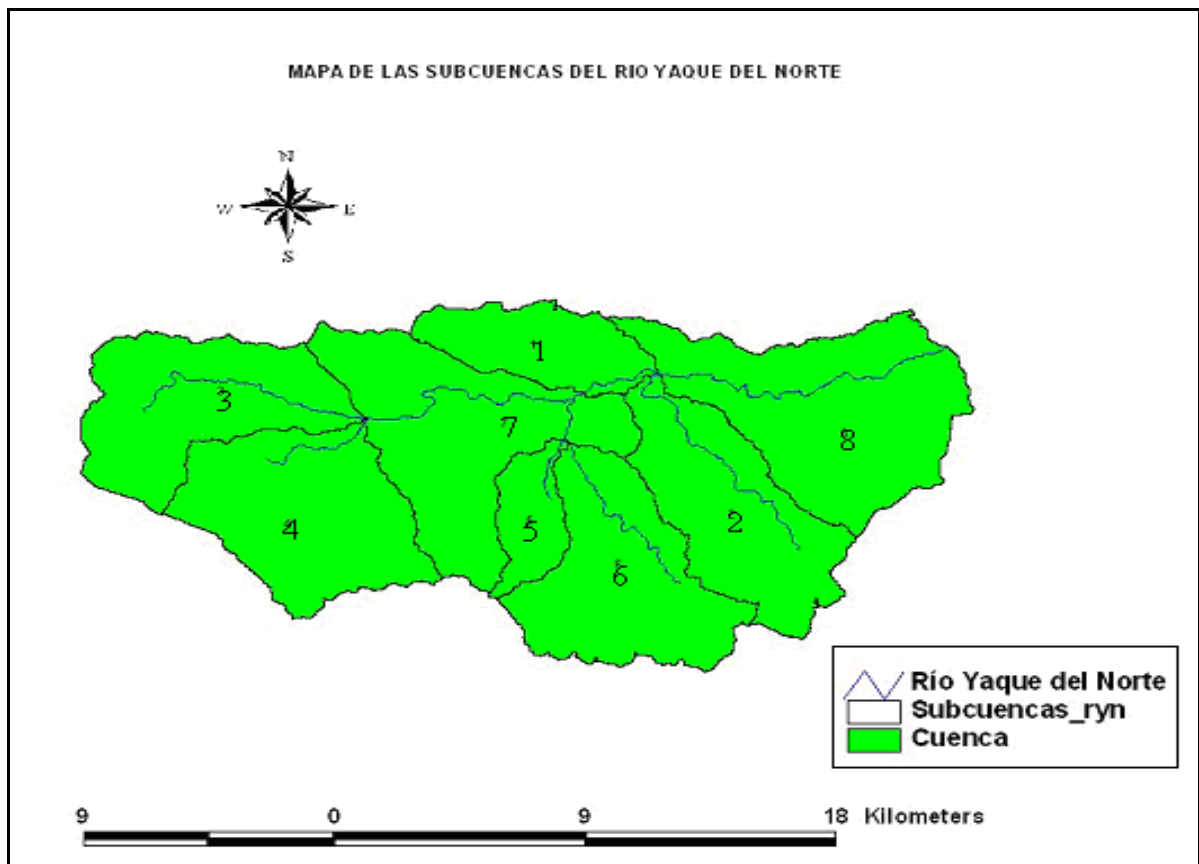


Figura 15. Mapa de las subcuencas del Río Yaque del Norte

En el cuadro 18 se observa que en la subcuenca 1 para el escenario propuesto los valores de la producción de sedimentos alcanzan menos de la mitad de los que se producen en el escenario existente; de igual manera, pero a menor escala, sucede en las subcuencas 8 y 5,

donde la producción de sedimentos bajan un 18% al cambiar del escenario existente por el propuesto. En estas dos subcuencas es donde se manifiestan las mayores variaciones en cuanto a los valores de sedimentos producidos al efectuar un cambio de uso de la tierra. Con relación a las demás subcuencas la producción de sedimentos se mantiene igual en ambos escenarios.

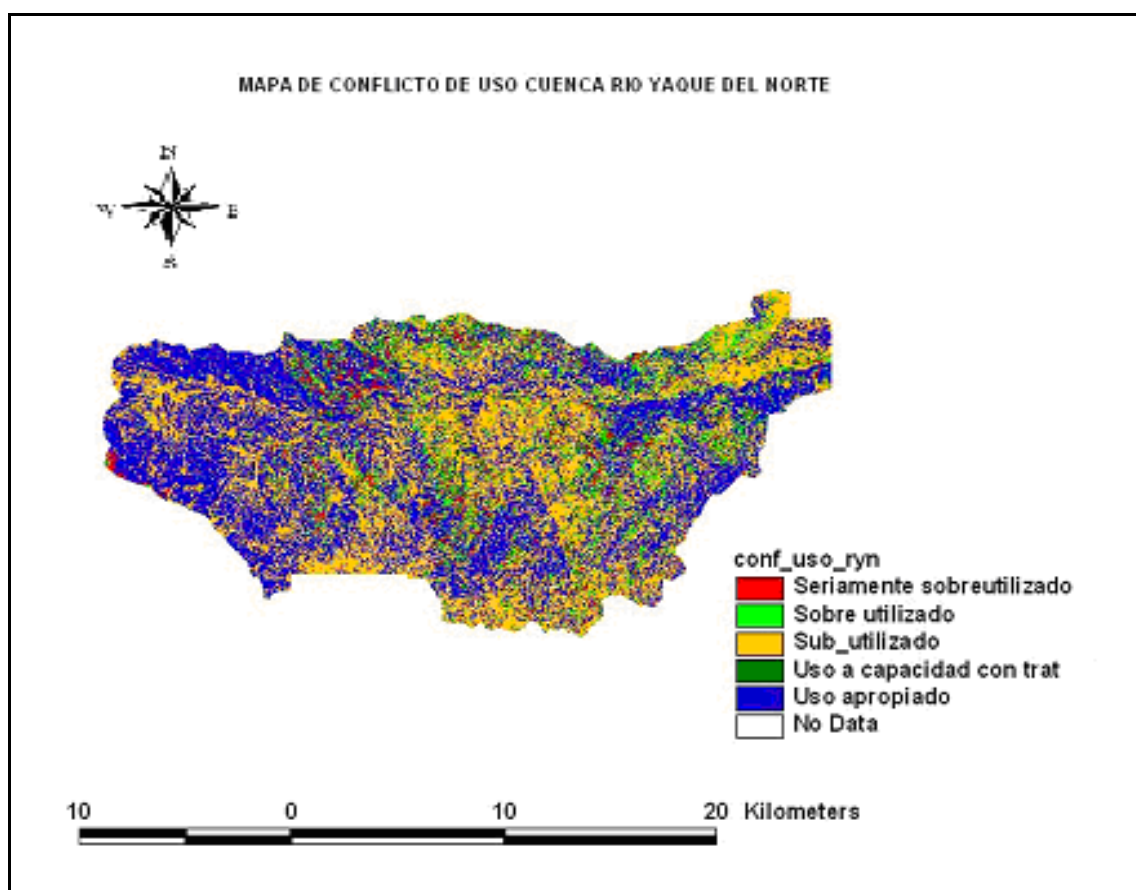


Figura 16. Mapa de conflicto de uso de la Cuenca del Río Yaque del Norte

Haciendo un análisis de los sedimentos producidos en la cuenca, cuyos valores se muestran en el Cuadro 18, se puede observar que en la cuenca se producen sedimentos en el escenario existente, donde los conflictos de uso de la tierra se presentan de igual manera en toda el área. Es evidente que la subcuenca 8 es la que presenta mayor área de sobreuso,

haciendo que sea en ella donde los sedimentos se produzcan con mayor severidad; al hacer el cambio del sobreuso por bosques, las áreas de sobreuso se reducen drásticamente y por lo tanto también la cantidad de sedimentos producidos en el escenario propuesto; de igual manera, y por las mismas razones, ocurre en la subcuenca 1 y 5, pero a menor escala. También queda claro que entre los conflictos de uso generados en todas las demás subcuencas (2,3,4,6,7) el sobreuso no es el más relevante, porque al hacer el cambio de escenario en esas subcuencas, no se produce ninguna alteración.

Cuadro 18. Producción de sedimentos en ton/ha/año para las condiciones existentes y propuestas con el uso del modelo SWAT en la RYN.

Subcuencas del RYN	Área (km <sup>2</sup> )	Condición existente 1971-75	Condición propuesta 1971-75	% de reducción de sedimentos entre ambas condiciones
1	21.04	20.43	8.56	58.10
2	41.45	17.21	17.21	0.00
3	41.69	30.31	30.31	0.00
4	46.22	26.62	26.62	0.00
5	11.49	25.15	18.97	0.00
6	43.81	20.45	20.45	0.00
7	52.30	20.13	20.12	0.05
8	58.59	35.34	25.60	27.60
Total	316.59	195.64	167.84	
		24.45	29.98	10.71

Si se compara la tasa promedio de aporte de sedimentos en la cuenca del Río Yaque del Norte con los valores tolerables de producción de sedimentos, se muestra que la erosión cambia de moderada a baja, según indica el Cuadro 15. En sentido general si se cambia el sobreuso por bosques en toda la cuenca los sedimentos bajan en el orden del 15%.

Al cruzar las tablas de los mapas de las subcuencas con el mapa de conflicto de uso de la tierra en ambos escenarios, cuyo detalle se indica en el Cuadro 19, se muestra que el mayor porcentaje (35%) de bosques cruzados desde el escenario existente al propuesto corresponde a la subcuenca 5, sin embargo esta subcuenca es la que ocupa menor área con relación al área total de la cuenca, no siendo en ella donde se produce ni donde se reduce la mayor cantidad de sedimentos (Cuadro 19). Esto lleva a la conclusión que debe existir



cierta relación del tamaño de la subcuenca y la cantidad de bosques que ocupe para que haya un impacto considerable de la reducción de sedimentos al cambiar el sobreuso por bosques. El análisis anterior se fortalece al observar tal relación en las subcuencas 8 y 1, las cuales son las de mayor tamaño, respectivamente, lo que hace que el porcentaje de bosques cruzados sean considerables implicando que sean las subcuencas que experimentan una mayor producción y reducción de sedimentos al hacer el cambio de uso de la tierra.

Lo anterior se ilustra en el mapa 18. Con base a la discusión anterior, se concluye que con el uso del modelo SWAT se puede simular diferentes escenarios que representen condiciones reales permitiendo poder fijar de manera objetiva y práctica decisiones de manejo que conlleven a reducir los sedimentos en la cuenca.

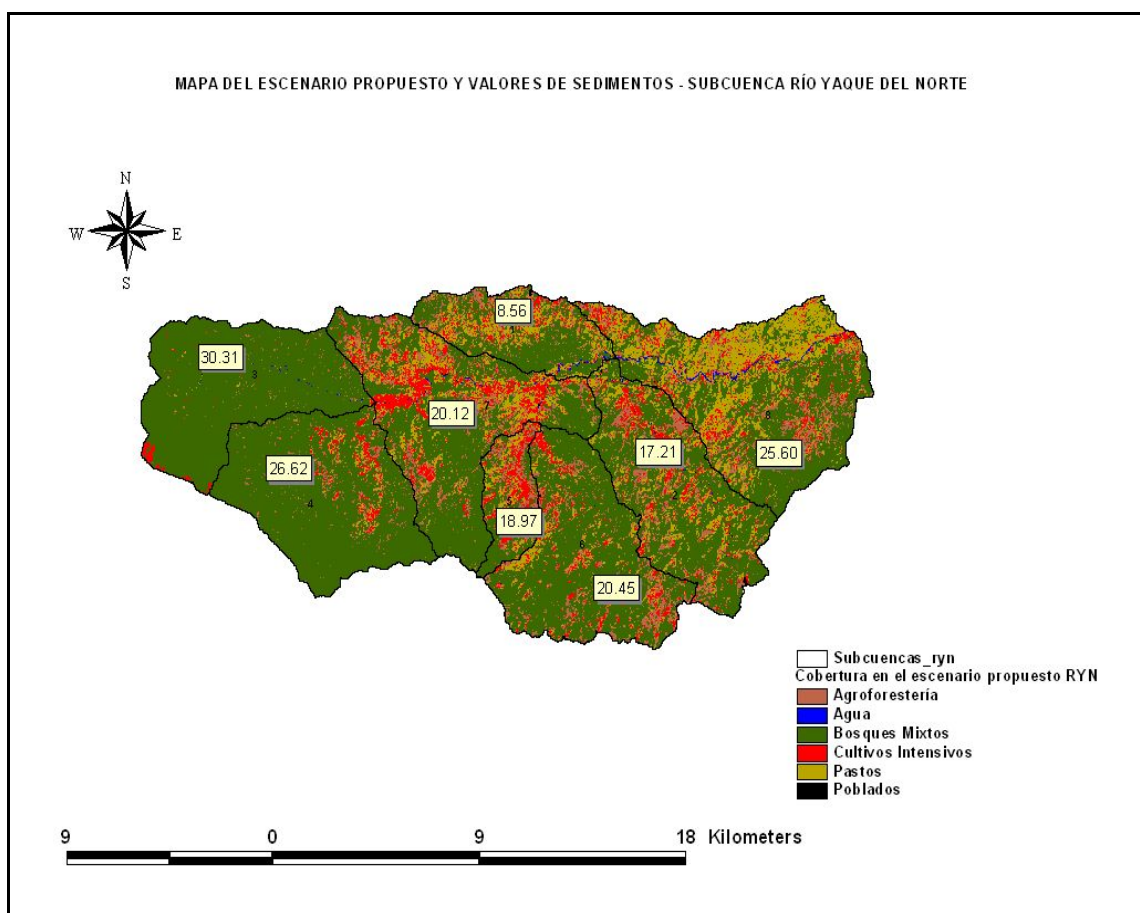


Figura 17. Mapa de valores de sedimentos por subcuenca, condición propuesta para el RYN.

Cuadro 19. Detalle de los resultados del cruce de tablas entre las subcuencas y el conflicto de uso, cuenca RYN

Sub Cuencas	Area subcuenca (Ha)	Area %	A. de Bosques Cond. Exist. (Ha)	A. De Bosques Cond. Prop. (Ha)	Area Combinadas (Ha)	% Bosques Cruzados
1	2106.13	6.65	1136.93	1559.98	423.05	27.12
2	4144.57	13.09	2592.38	3192.25	599.89	18.79
3	4169.44	13.17	4026.99	4125.45	98.46	2.39
4	4622.13	14.60	4128.67	4388.64	259.97	5.92
5	1149.00	3.63	506.73	780.02	273.29	35.04
6	4380.87	13.84	3234.32	3660.06	425.74	11.63
7	5230.20	16.52	3118.42	3884.94	766.52	19.73
8	5858.01	18.50	2858.85	3959.08	1026.09	27.79
Total	31660.35	100.00			3873.01	

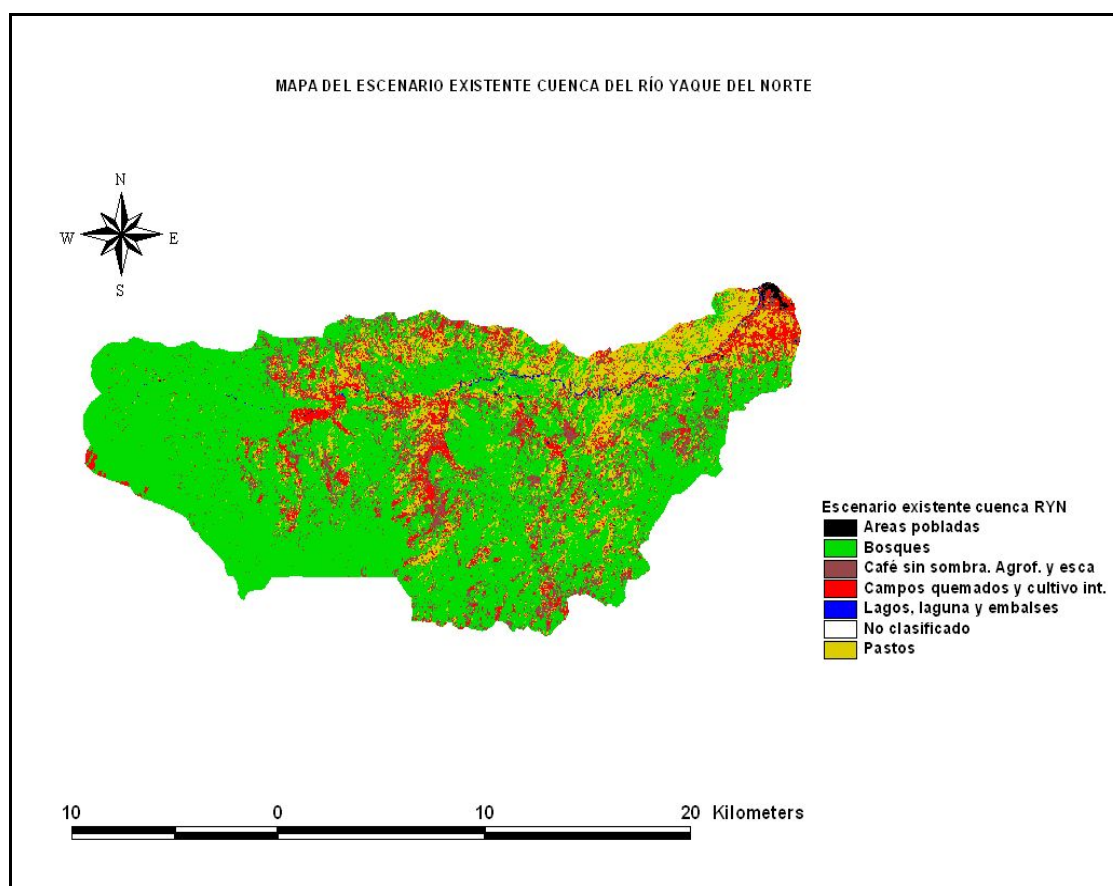


Figura 18. Mapa del escenario existente cuenca Río Yaque del Norte

### 4.3. Comparación de las salidas del modelo SWRRBWQ y el SWAT en la cuenca del Río Guanajuma.

Según la comparación de los valores de escurrimiento total simulado con el uso del modelo SWRRBWQ y el SWAT, no resultan ser muy diferentes, pues la diferencia es de 50 y 126 mm para las condiciones existente y propuesta y cuyas diferencias corresponden a un 5% y 15%, respectivamente. Lo mismo no ocurre con las salidas de los sedimentos; donde con el uso del modelo SWAT para la condición existente la cantidad de sedimentos son mayores que con el uso del modelo SWRRBWQ; de igual manera, pero a escala un poco mayor, ocurre para la condición propuesta. Sin embargo, la tendencia con el uso de ambos modelos es que los sedimentos y la esorrentía bajen para toda el área de la cuenca. En los cuadros 20 y 21 se detallan los valores de la producción de sedimentos con el uso del modelo SWAT y su relación con la salida del modelo SWRRBWQ en la cuenca del Río Guanajuma para la condición existente y propuesta.

Cuadro 20. Variación de aporte de sedimentos en ton/ha/año para las condiciones existente y propuesta con el uso del modelo SWRRBWQ, cuenca RG.

Subcuencas del RG	Area (km <sup>2</sup> )	Condición Existente 1986-92	Condición Propuesta 1986-92
1	10.92	7.00	5.00
2	17.70	6.90	4.90
3	15.64	7.00	5.30
4	10.58	9.70	6.50
5	11.30	9.20	6.20
Total	66.14		

Cuadro 21. Comparación de las salidas de los modelos SWRRBWQ y SWAT cuenca RG

Modelo	Esc. total (mm) Cond. existente	Esc. total (mm) Cond. propuesta	Prod. Sedimentos ton/ha/año Cond. existente	Pro. Sedimentos ton/ha/año Cond. propuesta
SWRRB-WQ	871	849	39.8	27.9
SWAT	921	723	54.3	32.6

#### **4.4. Comparación de las salidas del modelo SWRRBWQ y del modelo SWAT en la cuenca del Río Yaque del Norte.**

En el caso de la cuenca del RYN no se puede hacer una comparación del escurrimiento total simulado en toda la cuenca, pues el modelo SWRRBWQ no se utiliza en interfase con los SIG y sólo fue aplicado en la parte más baja, la cual comprende solo 127.5 km<sup>2</sup>, equivalente al 40.27% de toda el área, correspondiendo específicamente a las subcuencas 1,2 y 8. En el cuadro 23 se muestran los valores del escurrimiento total de las mencionadas subcuencas, las cuales representan toda el área simulada con el uso del modelo SWRRBWQ. Según las comparaciones realizadas, los escurrimientos totales simulados con éste modelo para ambos escenarios se mantienen por debajo a los simulados con el modelo SWAT el cual fue usado en interfase con los SIG cuya herramienta permitió seleccionar el punto mas bajo de las subcuencas. La diferencia podría ser consecuencia de que para la calibración del modelo SWAT se ajustaron las variables para obtener caudales parecidos a los medidos en la estación hidrométrica Pinar Quemado, la cual abarca el escurrimiento total de la cuenca, mientras que para la calibración del modelo SWRRBWQ se ajustaron las variables del modelo para obtener caudales parecidos a la diferencia de los escurrimientos de la estación Pinar Quemado y la estación Manabao, quedando esta última ubicada aguas arriba del área simulada con el modelo SWRRBWQ. Esa situación no sucedió en el caso de la simulación de la cuenca del Río Guanajuma, descrita en el capítulo anterior, donde para ambos modelos se utilizó la misma área, y los datos de caudales fueron tomados de la misma estación hidrométrica, implicando con ello que los escurrimientos totales arrojados por ambos modelos sean muy parecidos.

En cuanto a la producción de sedimentos, en el cuadro 22 se registra los valores de las salidas de los modelo SWRRBWQ y el SWAT en la simulación realizada para los escenarios existente y propuesto aplicados a la cuenca del RYN. Al comparar los resultados, es notorio que los valores de los sedimentos con el uso del modelo SWAT se mantienen por encima en ambos escenarios, tanto que, aún en el escenario propuesto usando el mismo modelo, el valor de los sedimentos es mayor que los obtenidos con el modelo SWRRBWQ en el escenario existente.

Al comparar la producción de sedimentos con el uso del Modelo SWRRBWQ y los sedimentos producidos con el uso del Modelo SWAT cuyos valores se muestran en el cuadro 23, se puede observar que en la simulación con el modelo SWRRBWQ los sedimentos producidos representan el 32% del total producido con el uso del Modelo SWAT, (34.90 Ton/Ha/Año de un total de 51.37 Ton/Ha/Año). El área en mención es donde se produce más de la tercera parte de sedimentos y corresponde solo a las subcuencas 1, 2, y 8 de las correspondientes al área usada en la simulación con el uso del Modelo SWAT. Lo anterior evidencia que el 68% de los sedimentos producidos corresponden a las subcuencas (3, 4, 5, 6 y 7) ubicadas aguas arriba del área simulada con el uso del Modelo SWRRBWQ. Lo anterior refleja que los modelos pudieron bien estimar los sedimentos, pues los resultados del SWAT reflejan que en las subcuencas 1 y 8 es donde se produce más de la tercera parte de los sedimentos y en donde se experimenta el mayor porcentaje de bosques cambiado de un sobre uso a cobertura de bosques (ver cuadro 19). En sentido general, si se aplican los escenarios propuestos, con ambos modelos los sedimentos mantienen una tendencia a reducir su producción sea con la aplicación de ellos en una parte o en toda la cuenca alta del Río Yaque del Norte.

Cuadro 22. Variación de aporte de sedimentos en Ton/Ha/año para las condiciones existente y propuesta con el uso de los modelos SWRRBWQ, cuenca RYN.

Subcuencas del RYN	Area (km <sup>2</sup> )	Condición Existente 1968-95	Condición Propuesta 1968-95
1	22.5	5.2	4.1
2	26.9	7.2	4.9
3	17.2	5.5	4.3
4	17.4	5.5	4.4
5	15.8	7.1	4.9
6	8.2	4.4	3.7
7	10.6	6.6	4.5
8	8.9	5.7	4.1
Total	127.5		

Cuadro 23. Comparación de las salidas de los modelos SWRRBWQ y SWAT cuenca RYN

Modelo	Esc. total (mm) Cond. existente	Esc. total (mm) Cond. propuesta	Prod. Sedimentos ton/ha/año Cond. existente	Pro. Sedimentos ton/ha/año Cond. propuesta
SWRRB-WQ	729	711	47.2	34.9
SWAT	1259	1268	72.9	51.3

## 5. CONCLUSIONES

1. La simulación con el modelo SWAT en las cuencas de los Ríos Yaque del Norte y Guanajuma muestran resultados que favorecen la condición propuesta, tratándose de cambiar el uso donde las tierras están sobre utilizadas por una cobertura de bosque, ya que esto propiciaría a que se mantenga el escurrimiento base y que se produzca una reducción en la producción de sedimentos, considerando que en la cuenca los productores han mantenido la misma forma de uso.

2. Los resultados obtenidos con la aplicación del modelo SWAT en la cuenca del Río Guanajuma son importantes en el sentido de que los sedimentos que se producen pueden afectar la vida útil del embalse Bejucal y su posterior arrastre aguas abajo hasta la presa Tavera u otro tipo de obras civiles que pudieran atrapar sedimentos, según la ubicación el proyecto hidroeléctrico Manabao-Bejucal-Tavera, cuyos resultados arrojaron reducción de sedimentos en el orden del 60%. y 70% respectivamente.

Hacer el cambio del uso de cultivos de ciclo corto por cultivos permanente, pastos y otros usos considerando la pendiente del terreno, puede resultar más factible que hacer un cambio del sobreuso por bosque en relación a la producción de sedimentos y a las costumbres y cultura de siembra de los agricultores en las cuencas estudiadas, ya que no se asegura que éstos adopten un cambio de los cultivos usuales únicamente por bosque.

3. La producción de sedimentos en las cuencas de los Ríos Yaque del Norte y Guanajuma está muy relacionadas a los usos de la tierra y a la inclinación de la pendiente, aunque con la utilización del modelo SWAT se puede llegar a obtener resultados particulares para cada uso, por el proceso de discretización de las subcuencas que el modelo logra hacer al combinar los diferentes tipos de uso y su condición, con los diferentes tipos de suelo,

4. Para que haya un impacto significativo de la reducción de sedimentos al cambiar el sobreuso por bosques en las subcuencas del Río Yaque del Norte, debe existir cierta relación del tamaño de éstas y el área ocupada por el bosque dentro de ellas, dentro del rango de 25% a 67%.

5. Las simulaciones realizadas con el uso de los modelo SWAT y el SWRRBWQ en la cuenca del Río Yaque del Norte, predicen que no existe una relación directa entre los escurrimientos totales y los valores de sedimentos producidos, acorde con los valores que reportan otras determinaciones de sedimentos realizadas anteriormente por diferentes personas e instituciones diferentes sitios y estaciones de la cuenca.

6. El modelo SWAT y el modelo SWRRBWQ tienen un comportamiento similar en cuanto a las tendencias del escurrimiento total y la producción de sedimentos en las cuencas de los Ríos Yaque del Norte y Guanajuma, a pesar de que en la cuenca del RYN el área simulada con el modelo SWRRBWQ fué sólo el 47,27% del área simulada por el SWAT, los sedimentos no sufrieron variaciones significativas entre ambas estimaciones, reduciéndose en el orden del 26.06% y 29.21% respectivamente, mientras que en el Río Guanajuma la reducción de sedimentos es en el orden de 60% y de 70% respectivamente; sin embargo el SWAT ofrece ventajas al definir la topografía del terreno permitiendo modelar otros aspectos relacionados a las combinaciones de suelo, uso y clima que utiliza para generar las Unidades de Respuestas Hidrológicas. De igual forma sucede con el comportamiento el escurrimiento y la producción de sedimentos en cuenca del Río Guanajuma,

7. La ventaja del modelo SWAT radica en su interacción con los Sistemas de Información Geográfica y el uso de mapas digitales, lo que hace más fácil el despliegue y análisis de los datos de salidas para las posteriores aplicaciones y toma de decisiones. Tales interacciones permiten desarrollar procesos para simular y examinar la hidrología en las cuencas de los Ríos Yaque del Norte y Guanajuma que no podrían ser realizados de otra forma.



## 6. RECOMENDACIONES

1. Dado que se usaron pocas estaciones climáticas y pluviométricas para la simulación en este estudio, se recomienda que en tiempos posteriores se sigan realizando trabajos similares a éste con datos de más estaciones cercanas a las cuencas bajo estudio, y obtener otra fuente de información que podría ser comparadas con las salidas de sedimentos obtenidas en este trabajo.
2. Se recomienda que para la restauración hidrológica de los suelos de las cuencas de los Ríos Yaque del Norte y Guanajuma se tome en cuenta la instalación de cultivos permanentes y considerando la pendiente del terreno, ya que al momento de su aplicación podría resultar más práctico que el escenario propuesto con el uso de los modelos SWAT y SWRRBWQ.
3. Se recomienda hacer estudios similares a éste en las cuencas del país donde se encuentran instaladas hidroeléctricas, cuya generación se vea amenazada por los sedimentos generados en las cuencas, para así poder lograr estimar su producción con el fin de que se puedan tomar decisiones de manejo que garanticen la rentabilidad económica de las mismas y un manejo sostenible de los recursos naturales.
4. Se recomienda también seguir haciendo estudios similares a éste en otras cuencas importantes del país, cuyos recursos constituyen la base de vida de las comunidades más cercanas, como son las cuencas del Río Las Damas en Duvergé (generación hidroeléctrica), Río Nizaito en Barahona (agua potable y riego), Río Las Cuevas en Azua (Instalación del Bosque modelo) etc, para obtener un diagnóstico de la situación de la producción de sedimentos y las condiciones de las cuencas, con el propósito de poder adquirir las bases para establecer los planes de manejo pertinente.

## 7. LITERATURA CONSULTADA

- Arguello, G. 1992. Modelación hidrológica continua en tiempo real de la cuenca del río Virilla, Costa Rica, Thesis Msg.Sc. Turrialba CR. CATIE. 128p.
- Arnold, J. 2001. Soil and Water Assesment Tool. Consultados el 29 de octubre del 2004. Disponible en línea: <http://www.brc.tamus.edu/swat/swattheo.html>
- \_\_\_\_\_; Williams, J; Griggs, R; Sammons, N. 1991. SWRRBWQ A Basin Scale Model for Assessing Management Impacts on Water Quality
- Bethencourt, A. 1998. Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión: Ingeniería Medioambiental. 2.ed. España.Ediciones Mundipresa. 945p.
- Carabalí, F; Estrada, R. 2001. Estimación de caudales y sedimentos en la cuenca del río Guadalajara, mediante el modelo SWAT. CAT. CD.
- Chow, V; Maidment, D; Mays, L. 1994. Hidrología Aplicada. Bogotá, Colombia. Marta Edna Suárez, eds. 584p.
- Chuvieco, E. 1996. Fundamentos de Teledetección espacial. Madrid España, RIALP S.A. 3ed. 565 p.
- De Vries, J; Hromadka, T. 1993. Computern models for surface water. In Maidment, D. eds. Hsndbook of Hydrology. New York. US, McGraw Hill. Inc. P 21.1-21.39.
- Dilucio, M; Srinivasan, R; Arnold, J; Neitsch, S. 2000. ArcView Interface For SWAT 2000: User's Guide. Texas. Agricultural Experiment Station.345p.
- DIT-HARRIS-SCA-MENDAR. 1986. Energía hidroeléctrica en la cuenca del Río Jimenoa: Informe Principal de Planificación para la Corporación Dominicana de Electricidad In Proyecto Alto Jimenoa. República Dominicana. (sp).
- EPA. 2001. Sistema de software para EPA 2001. BASINS versión 3.0. Agency Fact Sheet Better Assessment Science Integrating Pint Sources. CD.
- ESRI , 2002. Arc Hydro: GIS for Water Resources. Estados Unidos. David R,ed. 202 p.
- Guzman, N. 2000. Informe final de Uso y Cobertura de la Tierra en el Area del Proyecto Manabao Bejucal Tavera. ed.INTECSA-INARSA-Jorge y Mustonen C. Por A. 20p.
- Hann, C.T, ed. 1982. Hidrologic modeling of small watersheds. Michigan, USA. American Society of Agricultural Engineers. 533p.

- Hernández, A. 2003. Dinámica del uso de la tierra y de la oferta hídrica en la cuenca del Río Guacerinque, Tegucigalpa, Honduras. Thesis Mag. Sc. Turrialba CR. CATIE. 112 p.
- INTERSA-INARSA; Jorge, M. Estudio hidrológico para la evaluación del plan hidrológico forestal en las Cuencas de los Ríos Yaque del Norte y Guanajuma. Proyecto MBT. Modelamiento con el SWRRBWQ.
- Jorge, P; Jorge, M. Sedimentación en el embalse de Sabaneta y Erosión en la cuenca alta del río San Juan. UNIBE. De Ciencia y Cultura. 4(3): 7-21.
- Laporte, S. 2002. cap 1. Determinación de Sedimentos In Apuntes de clase del curso de Hidrología. Turrialba, C.R., CATIE, 8p.
- Linsley, R K; Kohler, M A; Paulhus, J L. 1986. Hidrología para ingenieros. Traducido al español por CETIH, Universidad de los Angeles, Bogotá, Colombia. 2 ed. Mxico, D.F. 386 p.
- Maidmendt, DR. 1993. GIS and hydrological modeling. In Goodchild, MF; Parks, BO; Steayert, LT. Eds. Environmental modeling with GIS. New York, US, oxford University press. P 147-167.
- Marcelino, J.(sf). Evaluación de los suelos en la cuenca alta del río Guanajuma. República Dominicana. In Informe del Estudio del Proyecto Manabao Bejucal Tavera. 15p.
- Neitsch, S. 2000. Soil and Water Assessment Tool: User Manual 2000. Grassland, Soil and Water Research Laboratory o Agricultural Research Service. 781p.
- 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. Thesis Mag. Sc. Turrialba CR. CATIE. 172 p.
- Richters, E. (1987) Manejo de Uso de la Tierra: Una Propuesta, *In Memoria del Talles Metodologías de Clasificación de Capacidad de Uso de la Tierra*. Tegucigalpa, Honduras. CATIE , Ed. P 10-26.
- Santana, L. 2000. Determinación de la capacidad de uso y aptitud de la tierra: un proceso mas que necesario en el ordenamiento territorial, *In congreso colombiano de geografía*. Cali Colombia, 2000. Consultado el 7 de diciembre del 2004. Disponible en línea: <http://www.azimuth.univalle.edu.co/capsue.htm>
- Sheng, T. (1971). Proyecto de Clasificación de la Capacidad de la Tierra Orientado hacia su tratamiento: Para Tierra Marginales Montañosas de los Tropicós Húmedos. Oficina de Manejo de Cuencas , FAO, kinston. 11 p.

- \_\_\_\_\_, T. (1986). Planificación física para Cuencas. Consultado por la Corporación Dominicana de Electricidad CDE. Traducido por E, Oscar; Fernández H. CATIE, Turrialba, Costa Rica, (1981). 26 p.
- Torres, E; Fernández, D, Oropeza, J, Saenz, E. (sf). Aplicación del Modelo Matemático de simulación hidrológica SWAT en la Cuenca “El Tejocote”, Atlacomulco, estado de Mexico. Consultado: 11/11/02. Disponible en línea: <http://www.chapingo.mx/terra/contenido/22/4/437>
- Villón, M. 2002. Hidrología. San José, CR, Instituto Tecnológico de Costa Rica. 435p.
- Silva, G. 2002. Erosión pluvial y transporte de sedimentos en ríos. Última revisión. Consultado el 12 de septiembre del 2002. Disponible en línea en: [http://IE5\O1SBQ7B2\G\\_Silva M\\_EROSION PLUVIAL Y EL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN RIOS \(1\).htm](http://IE5\O1SBQ7B2\G_Silva M_EROSION PLUVIAL Y EL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN RIOS (1).htm).
- Woolhiser, D; Brakensiek, D. 1982. hidrologic system synthesis. In Hydrologic Modelling of Small Watersheds. Ed. By C.T. Hann; H.P. Jhonson; D. Brakensiek. EE.UU. American Society of Agricultural Engineers.

## ANEXOS

### Anexo 1. Disponibilidad de datos hidrológicos en ca cuenca del RYN para la simulación con el SWAT

Estación	msnm	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	#							
Hato Viejo (t)	500																																																
Manabao (p)	921																																																
La ciénaga (p)	1107																																																
pinar Q. (Q)	567																																																
Manabao (Q)	863																																																
Hati Viejo (p)	500																																																

Datos diarios



### Anexo 2. Disponibilidad de datos hidrológicos en ca cuenca del RG para la simulación con el SWAT

Estación	msnm	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	#														
Hato Viejo (t)	500																																																
Bejucal (Q)	605																																																
Los montazos (p)	825																																																
Hato Viejo (p)	500																																																

Dataos diarios



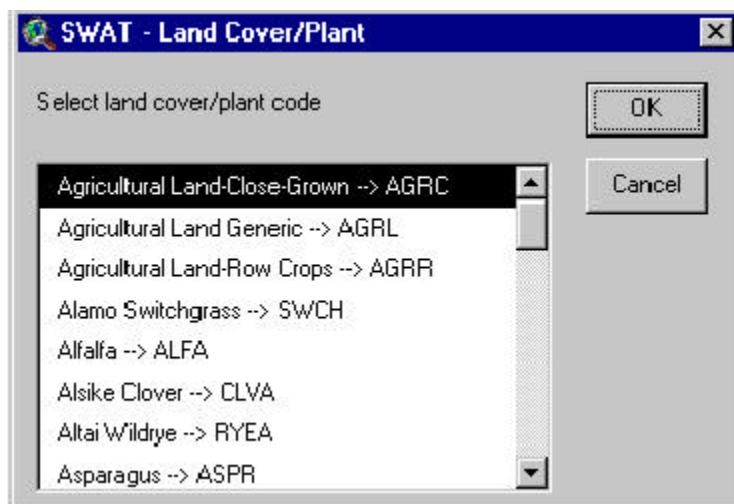
### Anexo 3. Estaciones para la calibración de la cuenca del RYN

Estación	msnm	71	72	73	74	75
Hato Viejo (t)	500					
Manabao (p)	921					
pinar Q. (Q)	567					
Manabao (Q)	863					

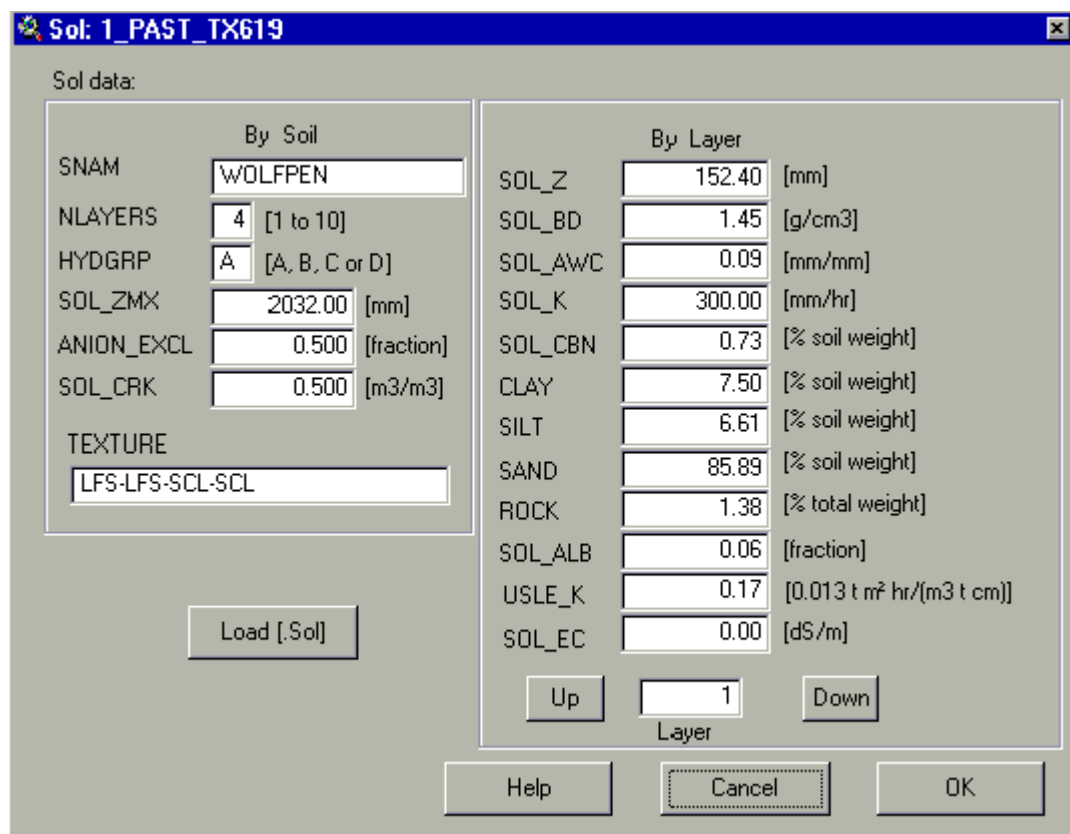
### Anexo 4. Estaciones para la calibración de la cuenca RG

Estación	msnm	86	87	88	89	90	91	92
Hato Viejo (t)	500							
Bejucal (Q)	605							
Los montazos (p)	825							

Anexo 5. Tipología de usos de acuerdo al SWAT.



Anexo 6. Caja para editar los datos de suelo



## Anexo 7. Caja para editar los datos climáticos

**Wgn: Subbasin 5**

Weather Station Name: PASALINA3W  
 Rain\_YRS: 10 [Years]  
 WLATITUDE: 40.52 [Degrees]  
 WLONGITUDE: -79.55 [Degrees]  
 WELEV: 338.3 [m]

**Monthly parameters**

TMPMX       PR\_W1  
 TMPMN       PR\_W2  
 TMPSTDMX       PCPD  
 TMPSTDMN       RAINHHMX  
 PCFMM       SOLARAV  
 PCFSTD       DEWPT  
 PCFSKW       WNDAY

Jan.	197	Jul.	28.59
Feb.	4.07	Aug.	27.79
Mar.	9.69	Sep.	24.43
Apr.	16.95	Oct.	18.03
May	22.65	Nov.	11.05
Jun.	26.65	Dec.	4.72

[°C]

Buttons: Load [.wgn], Help, Cancel, OK

## Anexo 8. Caja para editar y unir las unidades de suelo y cobertura de la tierra

**Union of Land Use and Soil Themes**

Land Use data base: [Browse] [Load] [Load Table: G:\Data\Land Use\Land cover classes]

Code	Value	Area (H)	Perim (K)
1	28.20	19015	
2	52.21	1921	
3	14.07	1930	

Soil data base: [Browse] [Load] [Load Table: G:\Data\Soil\Soil attributes]

Code	Value	Area (H)	Perim (K)
4	42.44	4875	
5	52.43	4820	

Options: [Union] [Intersect] [Difference] [Symmetric Difference] [XOR] [AND] [OR] [None]

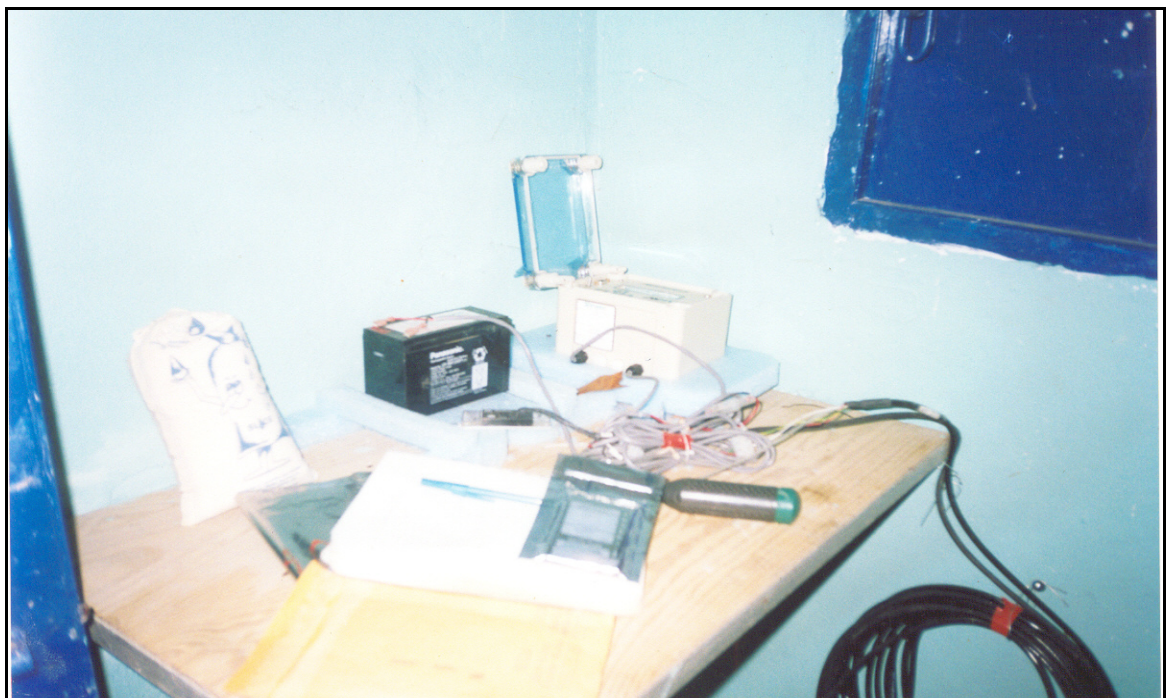
Buttons: OK, Cancel, Help

Labels: Datos de Uso de la Tierra, Datos de Suelo, Unión

Anexo 9. Estación climática de Manabao



Anexo 10. Estación Hidrométrica Pinar Quemado





Anexo 11. Muestreador US-D49, Río Jimenoa



Anexo 12. Botella de 450cc y muestreador US-D49



Anexo 13. Muestreador con molinete para aforos de caudales



Anexo 14. Caja registradora de los datos de velocidades del agua



Anexo 15. Proceso para determinar sedimentos en suspensión



Anexo 16. Hidroeléctrica Jimenoa, toma de datos de aforo.

