

## APLICACIÓN DEL MODELO SWAT PARA LA ESTIMACIÓN DE CAUDALES Y SEDIMENTOS EN LA CUENCA ALTA DEL RIO CATAMAYO

Fernando Oñate Valdivieso, Galo Aguilar Naranjo

Docentes Investigadores del Área de  
Sistemas de Información Geográfica de la  
Universidad Técnica Particular de Loja.- Ecuador.  
Correo electrónico: [fronate@utpl.edu.ec](mailto:fronate@utpl.edu.ec)  
[gaguilar@utpl.edu.ec](mailto:gaguilar@utpl.edu.ec)

### RESUMEN

La simulación hidrológica pretende reproducir con la ayuda de un computador, todos los procesos físicos que conforman el ciclo hidrológico en una cuenca hidrográfica, utilizando un modelo matemático que los represente adecuadamente. De entre los modelos hidrológicos de simulación continua el modelo SWAT, permite pronosticar el impacto del manejo del suelo en la generación de sedimentos y la regulación del agua en cuencas hidrográficas. Por sus características, fue escogido para la determinación de caudales y sedimentos en la cuenca alta del río Catamayo, la que forma parte de la cuenca binacional Catamayo – Chira, ubicada en la zona fronteriza entre Ecuador y Perú. El área de estudio esta ubicada íntegramente en la provincia de Loja, Ecuador, en una zona explotada en una forma tradicional ineficiente con un uso de los recursos naturales caracterizado por una fuerte presión sobre ellos, que provoca una degradación, especialmente de la cubierta vegetal, que se traduce en la erosión de los suelos, la disminución de su fertilidad y el arrastre de sólidos hacia los cursos de agua. Determinar la respuesta de esta cuenca, a la aplicación de una cobertura según el uso potencial del suelo, que permitan disminuir la producción de sedimentos, afectando lo menos posible la disponibilidad del agua, es el objetivo del presente estudio.

### 1. INTRODUCCION

Un modelo para simulación hidrológica, al brindar la posibilidad de reproducir todos los componentes del ciclo hidrológico con la ayuda de un computador, se convierte en un banco de pruebas que le permite al investigador simular condiciones futuras, que afectarían a uno o varios de los procesos físicos que intervienen en dicho ciclo. La implantación de obras de captación, corrección de cauces, la urbanización, el cambio del uso de suelo, entre otros, son hechos que afectan directamente el movimiento y la producción del agua en una cuenca hidrográfica.

Por otra parte, el volumen de sedimentos que una corriente de agua transporta, es un factor de gran importancia para el diseño y operación de obras hidráulicas y es el manejo de los recursos

naturales el que influye directamente en la mayor o menor producción de sedimentos en una cuenca hidrográfica.

El problema de la sobre producción de sedimentos adquiere principal importancia en la cuenca binacional Catamayo – Chira, ubicada en la zona fronteriza entre Ecuador y Perú. La cuenca alta se ve sometida a un deficiente manejo, que ha alterado considerablemente la cobertura vegetal y que ha provocado una producción de sedimentos que ha rebasado las previsiones, afectando notablemente la cuenca baja, hecho que se evidencia con el prematuro acolmatamiento del embalse de Poechos ubicado en el Departamento de Piura, Perú.

Ante esta problemática se ve la necesidad de tomar medidas tendientes a mejorar las condiciones ambientales y sobre todo de cobertura vegetal, a fin de conservar el recurso hídrico y de disminuir la producción de sedimentos en la cuenca alta. Una manera de analizar y comparar varias alternativas de manejo es la implementación de un modelo hidrológico que permita medir el impacto que, en caudales y sedimentos, produciría un cambio de la cobertura vegetal tendiente a reducir la sedimentación, afectando lo menos posible la disponibilidad del recurso hídrico de la zona.

Los modelos de simulación hidrológica diseñados hasta la actualidad, incluyen modelos de simulación de eventos que pueden modelar un evento único de precipitación - escorrentía y modelos de simulación continua que incluyen procedimientos que permiten simular la escorrentía causada por lluvias con intervalos de días u horas a lo largo de grandes periodos de tiempo. Para la implementación de un modelo hidrológico para la cuenca alta del río Catamayo, se ha escogido el modelo de simulación continua SWAT, que por sus características de funcionamiento permitirá analizar y comparar varias alternativas de manejo.

## **2. EL MODELO SWAT**

El Soil and Water Assessment Tool (SWAT) es un programa de modelamiento hidrológico diseñado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en conjunto con la Universidad de Texas. Este modelo permite simular la producción de agua y sedimentos en cuencas hidrográficas, así como el efecto que en la calidad del agua tienen las practicas agronómicas por el uso de pesticidas y fertilizantes.

El SWAT se basa en un balance hídrico para determinar la entrada, salida y almacenamiento de agua en la cuenca. Para el modelamiento, la cuenca hidrográfica se divide en pequeñas subcuencas con el fin de mejorar la exactitud de los cálculos. Adicionalmente el SWAT trabaja por unidades de respuesta hidrológica (HRU) obtenidas del cruce de los diferentes tipos de suelo con las coberturas presentes.

### **2.1. HIDROLOGIA DEL MODELO**

El éxito de la simulación radica en la representación de los fenómenos involucrados en el ciclo hidrológico, de la manera mas detallada y precisa posible, por lo que el SWAT para los cálculos considera los siguientes aspectos:

### 2.1.1. BALANCE HÍDRICO

La hidrología del modelo se basa en el criterio de que el agua entra, sale y se almacena como lo describe la ecuación:

$$SW_t = SW + \sum_{i=1}^t (Ri - Qi - ETi - Pi - QRi)$$

Donde  $SW_t$  es el contenido de agua en el suelo el día  $t$ ,  $SW$  Es el agua aprovechable por las plantas o el contenido de agua en el suelo menos el contenido de agua a 15 bar,  $t$  es el tiempo en días,  $R$  es la precipitación diaria,  $Q$  es la cantidad de escorrentía diaria,  $ET$  la evapotranspiración diaria,  $P$  la percolación diaria y  $QR$  el flujo de retorno o flujo base; todas las unidades son en mm.

La cantidad de escorrentía es estimada aplicando la metodología del numero de la curva del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos, con datos de lluvia diarios. Esta ecuación se fundamenta en que la escorrentía esta determinada por el suelo, la cobertura de suelo y la practica de manejo que en este se realice.

El agua que penetra en el suelo o infiltracion puede tomar varios caminos: incrementar la humedad del suelo en la zona radical, moverse subsuperficialmente como flujo lateral hacia los canales de drenaje, recargar acuíferos poco profundos, donde esta agua tambien llegara hasta los canales de drenaje y recargar acuíferos profundos. El SWAT considera flujo lateral, percolacion y flujo de retorno.

El modelo SWAT ofrece tres métodos para la estimación de la evaporanspiración potencial: Penman-Monteith, Hargreaves and Sammami y Priestley – Taylor

Las variables climáticas utilizadas por el SWAT son la precipitación, la temperatura del aire, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. Si la precipitación y la temperatura diaria están disponibles deben ser ingresadas directamente al modelo, sino, el generador de variables climáticas puede simular la temperatura y precipitación diaria. Para aplicaciones practicas, se recomienda utilizar las simulaciones del simulador de clima como ultima opción.

La producción de sedimentos es calculada para cada unidad de respuesta hidrológica con la modificada ecuación de la perdida universal del suelo (MUSLE):

$$Y = 11.8(V.q_p)^{0.56}(K)(C)(PE)(LS)$$

Donde  $Y$  es la producción de sedimentos desde la subcuenca en  $t$ ,  $V$  es el volumen de escurrimiento superficial para la subcuenca en  $m^3$ ,  $q_p$  es la tasa de flujo pico en  $m^3/s$ ,  $K$  es el factor de erodabilidad del suelo,  $C$  es el factor de manejo,  $PE$  es el factor de practica del control de la erosión y  $LS$  es el factor de longitud de inclinación

## **2.2. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

Los sistemas de información geográfica (SIG), se definen como herramientas para la recolección, manipulación, transformación, análisis y despliegue de la información que tiene una referencia en el espacio.

De los programas de Sistemas de Información Geográfica, se utilizó el ArcView 3.2<sup>a</sup> para la confección de los mapas temáticos de tipos de suelos, uso actual de suelo y de las propuestas de cobertura analizadas durante el estudio, además con la ayuda de este software se realizaron los GRIDS de elevación de cada uno de los mapas temáticos descritos anteriormente, información fundamental para la realización del estudio.

La versión SWAT 2000, utilizada para la simulación, posee una interfase con ArcView 3.2<sup>a</sup> que simplifica la utilización del mismo, poniendo de manifiesto la gran capacidad como herramientas para modelamiento que poseen los Sistemas de Información Geográfica.

## **3. METODOLOGÍA**

El primer paso para la implementación es la recolección de la información topográfica, de tipos de suelos y uso actual, la que se obtuvo a partir de los estudios del Plan Hidráulico de Loja, así como de los estudios de la Oficina de Planificación de la Presidencia de la República (ODEPLAN). Se seleccionó tres estaciones meteorológicas de la red del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), con registros históricos extensos y confiables; dos dentro de la cuenca y una vecina a ella. Además para fines de calibración se recolecta la información de caudales medios diarios registrados en una estación limnigráfica localizada a la salida de la cuenca.

Con la información de suelos recopilada, el SWAT define las Unidades de Respuesta Hidrológica. La información meteorológica genera estocásticamente los valores de precipitación y temperatura más probables, para ser usados en caso de no contar con información completa.

Con los registros diarios de precipitación se genera un registro diario de caudales el que debe ser contratado con los valores reales de caudal medidos en la estación de aforo, a fin de determinar las diferencias existentes entre los caudales reales y simulados, para proceder a calibrar el modelo y de esta manera poder simular un registro histórico.

Luego de la calibración, se procede a realizar el modelamiento, utilizando la cobertura propuesta, que se basa en el uso potencial del suelo, fin de obtener los hidrogramas de caudal y los volúmenes de sedimentos que ella produciría.

### **3.1. LA CUENCA ALTA DEL RIO CATAMAYO**

El presente estudio se realiza en la cuenca Piscobamba- Arenal, o cuenca Alta del Río Catamayo, ubicada en la Provincia de Loja.- Ecuador, cubriendo parte de los cantones de Loja, Catamayo y

Gonzanamá, La Cuenca se encuentra ubicada entre los 4 y 5 grados de latitud sur, con un área de 1133 Km<sup>2</sup> y una elevación media de 2300 m.s.n.m.

## MAPA DE UBICACION DE LA CUENCA

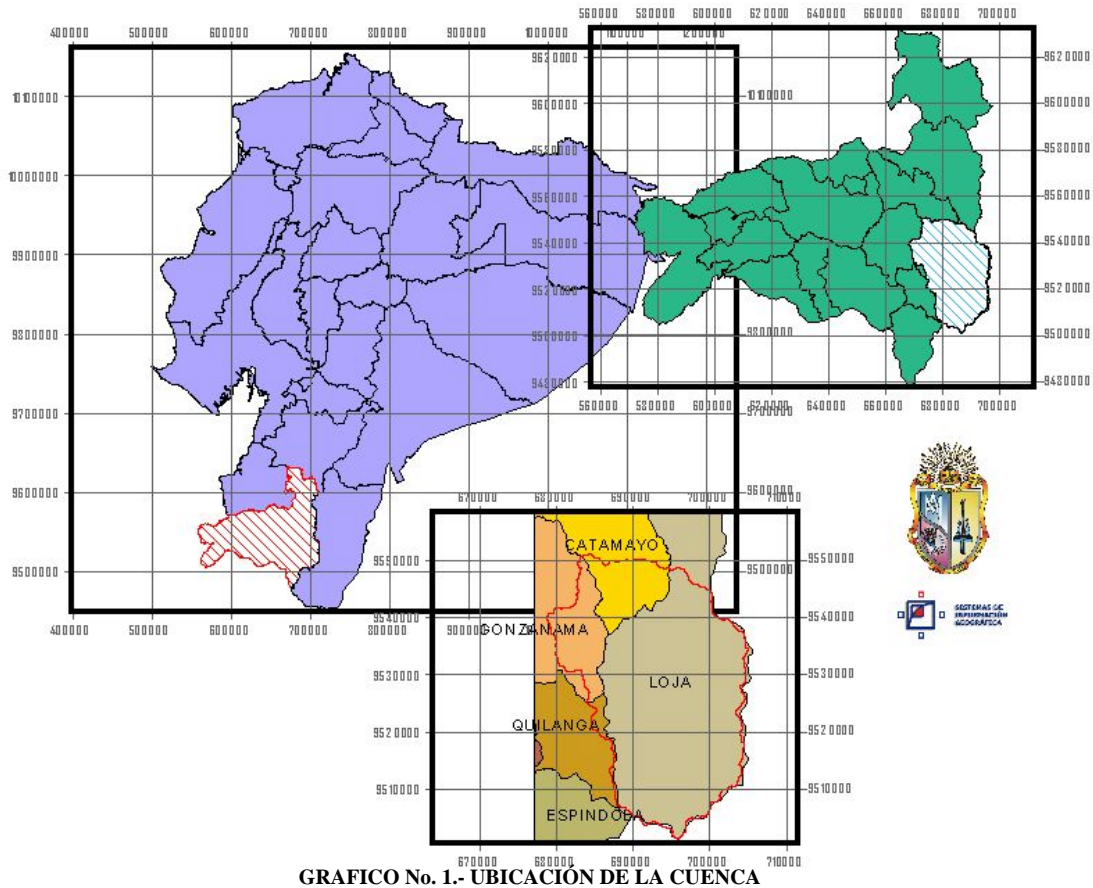


GRAFICO No. 1.- UBICACIÓN DE LA CUENCA

### 3.2. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN DE TIPO DE SUELO

Para el presente estudio se realizó la clasificación taxonómica del suelo, determinándose la existencia de suelos pertenecientes a los grupos entisol, molisol, inceptisol, alfisol y vertisol, con sus correspondientes subclases. Para la aplicación del modelo se requiere determinar 16 parámetros para cada tipo de suelo, de los cuales 10 son específicos para cada estrato que lo compone, la información obtenida es:

- Análisis granulométrico de cada estrato constitutivo del suelo, para obtener porcentajes de arena, limo y arcilla y adicionalmente el contenido porcentual de rocas.
- El grupo Hidrológico del suelo (A, B, C y D), según la metodología del número de la curva del U. S. Soil Conservation Service, parámetro que se obtuvo en base a la conductividad hidráulica saturada en la capa de suelo de 0 a 0.5 m y aplicando las tablas citadas en la Hidrología Aplicada de Ven Te Chow.

- c. Albedo del suelo, o porcentaje de la radiación solar que es reflejada por el suelo a capacidad de campo. Este parámetro se lo estimo utilizando las tablas de Sellers en las que el albedo se estima en función del color de la superficie del suelo.
- d. La erodabilidad del suelo, que se define como la resistencia del suelo a ser erosionado por el golpe directo de las gotas de lluvia, este parámetro es calculado en base a la ecuación propuesta por Wischmeier y Smith, en la que K es el índice de erodabilidad, M es (%limo + % arena muy fina)(100 - %arcilla), a es el porcentaje de materia orgánica, b es la clasificación de la estructura de acuerdo al tipo y clase y c es la clasificación de la permeabilidad.

$$K = \frac{2.1M^{1.14}(10)^{-4}(12-a) + 3.25(b-2) + 2.5(c-3)}{100} * 1.2928$$

- e. La densidad aparente (BD) que es la relación entre la masa de suelo seco y su volumen total.
- f. El agua aprovechable en el suelo que es el agua retenida en el suelo entre la capacidad de campo y el punto de marchitez
- g. La conductividad hidráulica definida como la medida de la capacidad del suelo para permitir el paso del agua. Estos tres parámetros se estimaron en base a la textura, estructura y granulometría del suelo, comprobando los resultados con ensayos de laboratorio.

El mapa de los tipos de suelo se presenta en el gráfico No. 2

### 3.3. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN DE USO DE SUELO

La información que el SWAT requiere sobre uso de suelo, se la tomó de la base de datos del programa en el que constan los 100 tipos de cultivo más comunes, los que son acoplados a los que existen en la cuenca en estudio, adaptando, eso sí, algunos parámetros para que se ajusten a nuestra realidad. El mapa de uso actual y propuesto (basado en el uso potencial) se presentan en los gráficos No. 3 y 4

### 3.4. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN METEOROLÓGICA

Se seleccionaron tres estaciones meteorológicas del INAMHI, recabándose la información histórica para un periodo de 25 años, a fin de alimentar la base de datos del Generador de Clima del SWAT. Las estaciones seleccionadas constan en la tabla No. I.

CODIGO	ESTACION	CATEGORIA	UBICACIÓN	ZONA	IdTR (10 años)
M - 146	CARIAMANGA	CLIMATOLOGICA	EXTERIOR	18	3.10
M - 144	VILCABAMBA	CLIMATOLOGICA	INTERIOR	35	3.00
M - 147	YANGANA	CLIMATOLOGICA	INTERIOR	18	3.43

TABLA No. I ESTACIONES SELECCIONADAS

## TIPOS DE SUELO

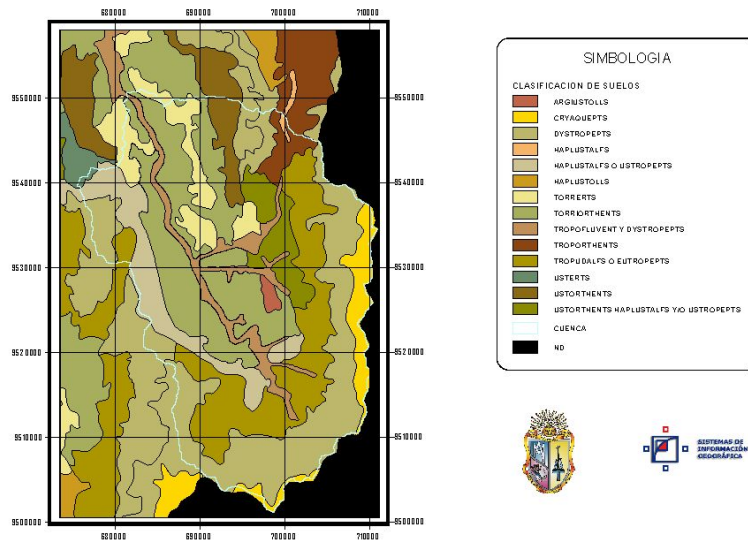


GRAFICO No. 2.- TIPOS DE SUELO DE LA CUENCA

## USO ACTUAL DEL SUELO

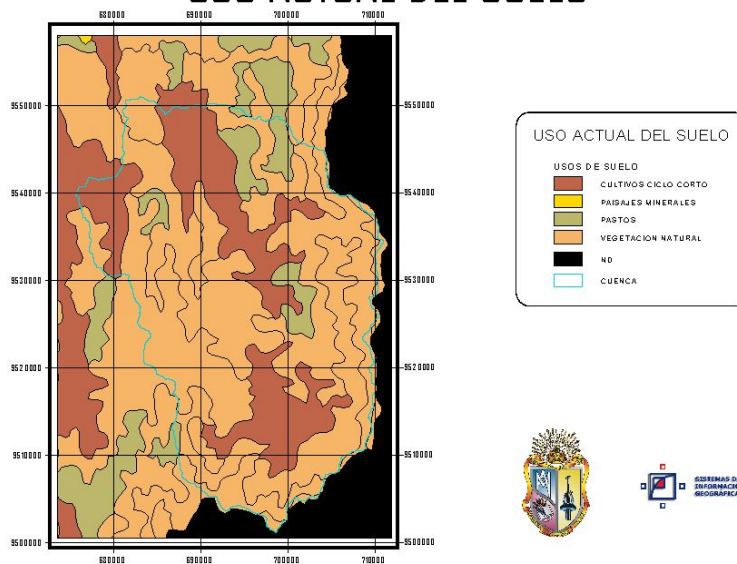


GRAFICO No. 3.- USO ACTUAL DEL SUELO

La información meteorológica que el modelo requiere comprende:

- Lámina para la media hora de lluvia (mm) con frecuencia de 10 años
- Lámina para seis horas de lluvia (mm) con frecuencia de 10 años.

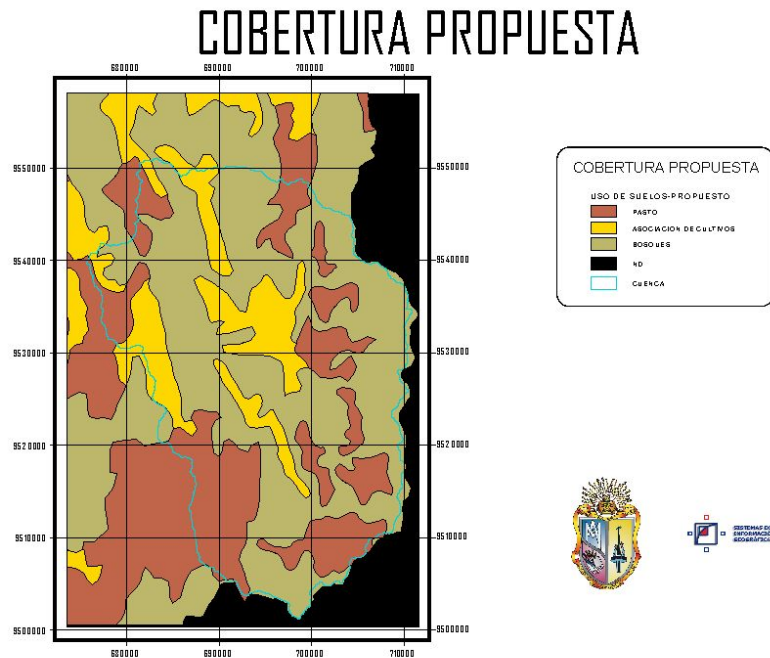


GRAFICO No. 4.- USO PROPUESTO

- c. La máxima media hora de lluvia para todo el periodo por mes. Para la determinación de estos parámetros fue necesario realizar el estudio de intensidad, duración frecuencia para las tormentas registradas en las estaciones Cariamanga y La Argelia, únicas que cuentan con información pluviográfica en las cercanías de la cuenca. La regionalización de las intensidades se realizó en base a la precipitación máxima en 24 horas, para varios períodos de retorno, registradas tanto en las estaciones pluviográficas como en las estaciones pluviométricas de la cuenca, obteniéndose dos ecuaciones:

$$I_{TR} = 69.036 * t^{-0.338} * Id_{TR} \dots \dots \dots (Zona.18)$$

$$I_{TR} = 92.854 * t^{-0.4083} * Id_{TR} \dots \dots \dots (Zona.35)$$

En las ecuaciones  $I_{dTR}$  es la intensidad máxima diaria para un período de retorno en mm/h y  $t$  es el tiempo de duración de la lluvia en minutos. Los valores adoptados de  $I_{dTR}$  para el cálculo de los literales a. y b. constan en la tabla No. I. Para el cálculo del literal c. Se empleó la precipitación máxima mensual registrada en cada estación.

- d. Para definir el tipo de distribución de las lluvias, se realizó el respectivo análisis de frecuencias, lo que determinó que la distribución es asimétrica, lo que determinó un código de distribución de lluvias igual a 0, ya que de ser exponencial mixta el código sería 1.

- e. Al no contar con información de la probabilidad de tener un día húmedo después de uno seco y la probabilidad de tener un día húmedo luego de un día húmedo, se seleccionó la opción del SWAT con la que se calcula dichas probabilidades a partir del número promedio de días de precipitación por mes.
- f. Los valores promedios mensuales de precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima, requeridos por el modelo, fueron obtenidos del registro histórico, el mismo que fue rellenado, extendido y homogeneizado a través de un análisis de correlación entre estaciones.
- g. Se calcularon los coeficientes de variación (razón entre la desviación estándar y la media) para el promedio de la temperatura por mes, la desviación estándar y el coeficiente de asimetría de Pearson para la precipitación diaria en el mes.
- h. El programa requiere el promedio de la radiación solar para el mes, valor que no está disponible para ninguna estación en las cercanías de la cuenca, por esta razón se determinó este parámetro en base a la heliofanía registrada aplicando la ecuación propuesta por Glover y Mc Cullock, en la que  $R_c$  es la radiación global,  $R_a$  es la radiación extraterrestre,  $n$  es el número de horas de insolación observadas por el heliógrafo,  $N$  es el número máximo posible de horas de insolación teniendo en cuenta la posición geográfica  $t$  la fecha y  $\lambda$  es la latitud de la estación en grados.

$$\frac{R_a}{R_c} = \left( 0.29 \cos \lambda + 0.52 \frac{n}{N} \right)$$

- i. El promedio de la temperatura del punto de rocío en el mes fue estimada utilizando el diagrama sicrométrico para el que se requiere la temperatura y la humedad relativa del aire.
- j. Adicionalmente, el programa requiere el promedio de velocidad del viento en el mes, información que afortunadamente si era registrada en las estaciones consideradas para el estudio.

La información descrita en los literales anteriores alimenta el generador de climas del modelo, el que permite estimar estocásticamente los valores faltantes en los registros diarios empleados para la simulación.

Los valores de precipitación diaria registrados en cada estación, utilizados en el modelamiento corresponden a un periodo de cuatro años (1990 – 1993).

En la simulación el programa SWAT puede calcular precipitación diaria y temperatura en base a datos mensuales. Los datos de radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa son siempre simulados por el programa SWAT.

### 3.5. CAUDALES OBSERVADOS

Con la finalidad de calibrar el modelo, se recopilaron los caudales medios diarios observados en la estación Arenal en Puente Boquerón, para el mismo período de los registros de precipitación diaria.

## 4. RESULTADOS OBTENIDOS

La aplicación del modelo permitió obtener varios resultados, los que se resumen en los gráficos No. 5 y 6.

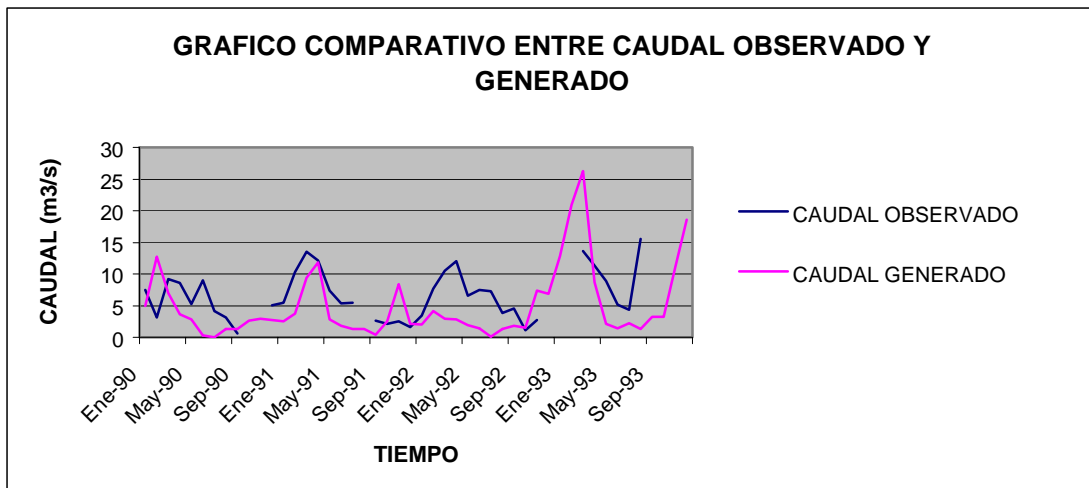


GRAFICO No. 5.- CAUDALES

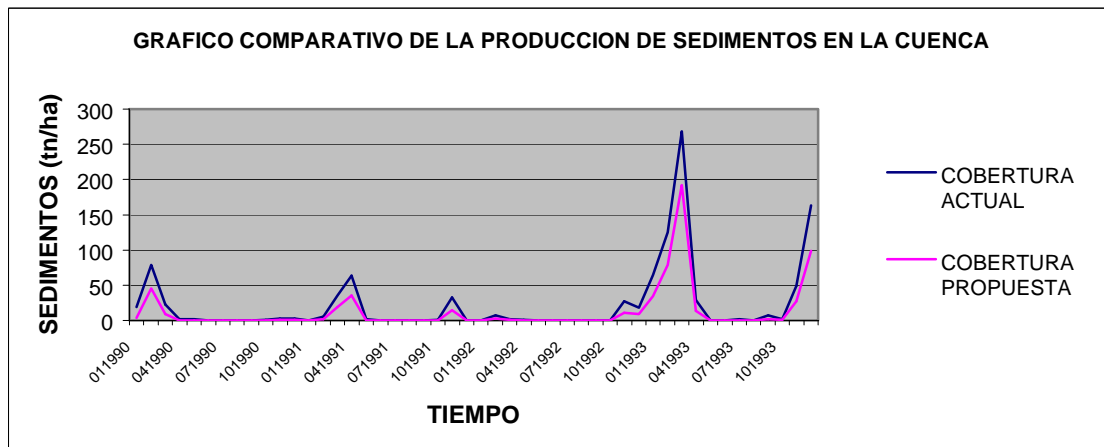


GRAFICO No. 6.- SEDIMENTOS

## 5. CONCLUSIONES

Como puede observarse en el grafico No. 5, los caudales generados conservan la tendencia de los datos observados, evidenciándose un desplazamiento aproximadamente constante en el eje vertical del gráfico. Este desplazamiento se debe a la poca densidad de estaciones meteorológicas, especialmente en la parte alta de ella, lo que impide representar la distribución de precipitaciones en la cuenca en estudio de una manera más real.

A pesar de la carencia de información, el modelo SWAT reproduce de una manera aproximada el registro histórico, lo que hace suponer, que de mejorar las condiciones actuales de la red de estaciones existente, los resultados serian del todo satisfactorios.

En el grafico No. 6 se puede observar una disminución del orden del 40 % en la producción de sedimentos de la cuenca. La cobertura propuesta, confeccionada en base al uso potencial, a pesar de que logra una reducción notable en la producción de sedimentos, afecta la producción de agua, la que se reduce en un porcentaje similar.

## 6. RECOMENDACIONES

Debido a la importancia que en proyectos de desarrollo tiene la información meteorológica, es necesario ampliar, la red y de ser posible automatizar la recolección y transmisión de la información.

Se deben realizar estudios de tipo y uso de suelo a mayor detalle, a fin de definir varias alternativas de manejo, ya que una cobertura según el uso potencial, reduce la producción de sedimentos, pero afecta notablemente la producción del agua.

Se debe continuar con la investigación en el área de modelamiento hidrológico ya que a pesar de las limitaciones es posible lograr resultados.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

**BUD, S. W., HOLE, F.** (1990).- Génesis y Clasificación de Suelos, Editorial Trillas, Bogotá.

**CHOW, V.T., MAIDMENT D.** (1994).- Hidrologia Aplicada, Ed. McGraw-Hill, Bogotá.

**NEITSCH, S. DiLUZIO, M.** (1999).- ArcView Interface for SWAT 99.2 Users Guide.

**INAMHI.**- Anuarios Hidrológicos, Meteorológicos y Publicaciones

**O.E.A.** (1994).- Plan Integral de Desarrollo de los Recursos Hídricos de la Provincia de Loja-Ecuador

**VALAREZO, C., IÑIGUEZ, M.** (1998).- Condiciones Físicas de los Suelos de la Región Sur, Universidad Nacional de Loja, Ecuador