

**MODELACIÓN DE HIDROSISTEMAS LAGUNARES FLUVIALES Y DE
ALTIPLANO**

FRANKLIN PAOLO FLECHAS PARRA

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
MAGISTER EN INGENIERÍA CIVIL
BOGOTA D.C.
2006**

RESUMEN

Los hidrosistemas lagunares fluviales y de altiplano son comunes en la hidrografía colombiana. Son sistemas sensibles y de gran importancia socioeconómica y ambiental, cuyo manejo requiere entre otros aspectos la cuantificación apropiada de su comportamiento y dinámica tanto del cuerpo de agua como de su cuenca tributaria. En este trabajo se desarrollan e integran herramientas matemáticas para este fin y se aplican a dos casos de estudio correspondientes a la laguna de Fúquene y a las Ciénagas Rinconada y Tesca. Los resultados indican un manejo inadecuado de sus cuencas hidrográficas reflejándose en la elevada producción de sedimentos y nutrientes que llegan al mismo, trayendo consigo una disminución en sus espejos de agua y deterioro de la calidad del agua superficial.

ABSTRACT

In the Colombian hydrography the fluvial and of highland lakes hidrosystems are common. They are sensitive systems and of great socioeconomic and environmental importance, whose management requires amongst other aspects the appropriate quantification of its behavior and dynamics so much of body of water as of its tributary basin. In this work is developed e integrated mathematical tools for this end they are applied two cases of study (laguna de Fúquene, Ciénagas de Rinconada y Tesca). The results indicate an inadequate management of its watersheds being reflected in the high production of sediments and nutrients that arrive to it. Bringing a decrease in their mirrors of water and surface water quality impairment.

Mi mas profundo y sincero agradecimiento al Director de esta Tesis Dr. Mario Díaz-Granados, por su incansable apoyo, su rectitud de trato, su guía permanente, su diálogo y su contagioso optimismo durante todo el desarrollo de esta Tesis.

A mis padres Pablo y Flor por apoyar mis sueños y decisiones.....

Se agradece a las siguientes entidades nacionales: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) Corporación Autónoma Regional del Magdalena (CORPAMAG), Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales (IDEAM) por los datos proporcionados a esta investigación.

Agradezco al Doctor Pompilio Casas por la información proporcionada para la realización de la presente tesis

Al personal del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de los Andes que de una u otra forma colaboraron en la edición de este informe de Tesis.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	I
AGRADECIMIENTOS.....	II
TABLA DE CONTENIDO.....	III
LISTA DE TABLAS.....	IV
LISTA DE FIGURAS.....	V
I. INTRODUCCION Y JUSTIFICACION.....	1
II. OBJETIVO GENERAL.....	2
III. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	2
IV. REVISION LITERARIA.....	3
4.1 CUERPOS LAGUNARES.....	3
4.2 MODELACION HIDROLOGICA.....	5
4.3 EL MODELO SWRRB.....	6
4.4 EL MODELO ACRU.....	7
4.5 EL MODELO GLEAMS.....	8
4.6 EL MODELO EPIC.....	9
4.7 EL MODELO HSPF.....	10
4.8 EL MODELO SWAT.....	12
4.9 RESUMEN DE LOS MODELOS.....	13
V. ESTRUCTURA DEL MODELO DESARROLLADO.....	14
5.1 DESCRIPCION DEL MODELO SWAT.....	15
5.2 DESCRIPCION DEL MODELO DE CIENAGAS FLUVIALES.....	16
5.3 DESCRIPCION DEL MODELO DE NUTRIENTES Y SEDIMENTOS PARA EL CUERPO DE AGUA.....	17
VI. DESCRIPCION DE LOS CASOS DE ESTUDIO.....	23
6.1 LAGUNA DE FUQUENE.....	23
6.2 CIENAGAS DE RINCONADA Y TESCA.....	25
VII. METODOLOGIA.....	26
VIII. RESULTADOS Y DISCUSION.....	31
8.1 LAGUNA DE FUQUENE.....	32
8.2 CIENAGAS DE RINCONADA Y TESCA.....	37
IX. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	41
X. REFERENCIAS.....	43
XI. ANEXOS.....	45

LISTA DE TABLAS

Tabla 4.1 Principales características de los modelos descritos.....	13
Tabla 8.1 Estaciones simuladas en la cuenca hidrográfica de la laguna de Fúquene en el periodo 1993-2001.....	33
Tabla 8.2 Producción promedio anual de sedimentos en las cuencas tributarias en la Laguna de Fúquene en los periodos evaluados.....	35
Tabla 8.3 Generación promedio anual de nutrientes en la cuenca tributaria del río Ubate en los periodos evaluados para la Laguna de Fúquene.....	35
Tabla 8.4 Balance de nutrientes en el cuerpo de agua en el periodo 1993-2001 en la Laguna de Fúquene.	36
Tabla 8.5 Volúmenes de entrega en los caños de conexión entre la ciénaga de Rinconada y el río Magdalena, y entre las ciénagas Rinconada y Tesca.....	39
Tabla 8.6 Generación promedio anual de nitritos y nitratos en las cuencas tributarias de las ciénagas de Rinconada y Tesca.....	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 Panorámica de la laguna de Fúquene.....	3
Figura 5.1 Diagrama del modelo desarrollado.....	14
Figura 6.1 Ubicación de la cuenca hidrográfica de la laguna de Fúquene en el Departamento de Cundinamarca, Colombia.....	24
Figura 6.2 Ubicación de la cuenca hidrográfica de las ciénagas de Rinconada y Tesca en el Departamento de Magdalena, Colombia.....	25
Figura 7.1. DEM de la cuenca tributaria a la laguna de Fúquene, Departamento de Cundinamarca, Colombia.....	26
Figura 7.2 Cuenca tributaria generada por SWAT para la laguna de Fúquene, Departamento de Cundinamarca, Colombia.....	27
Figura 7.3. Cobertura en la cuenca tributaria de la laguna de Fúquene para el 1966-1980, Departamento de Cundinamarca, Colombia.....	27
Figura 7.4. Cobertura en la cuenca tributaria de la laguna de Fúquene para el 1993-2001, Departamento de Cundinamarca, Colombia.....	28
Figura 7.5. Tipo de Suelo en la cuenca tributaria de la laguna de Fúquene, Departamento de Cundinamarca, Colombia.....	28
Figura 7.6. Ingreso de las estaciones con los datos climatológicos en la cuenca tributaria de la laguna de Fúquene, Departamento de Cundinamarca, Colombia.....	29
Figura 7.7. Corrida del modelo SWAT en la cuenca tributaria de la laguna de Fúquene, Departamento de Cundinamarca, Colombia.....	29
Figura 7.8. Programa de generación de archivos para intervalos decadales (10 días)....	30
Figura 7.9. Esquema del modelo de ciénagas fluviales y corrida del mismo.....	30
Figura 8.1. Método de evapotranspiración Potencial seleccionado (Hargreaves).....	31
Figura 8.2. Valores de Caudales Medios mensuales Observados versus Simulados durante el periodo 1966-1980 en la estación Puente Colorado (Cuenca Laguna de Fúquene).....	32
Figura 8.3. Valores de Cotas Medias Anuales Observadas versus Simuladas durante el periodo 1966-1980 y 1993-2001 en la Laguna de Fúquene.....	34

Figura 8.4. Valores de Caudales Medios mensuales Simulados versus Proyecto piloto durante el periodo 1986-1994 (Ciénagas Rinconada y Tesca).....	37
Figura 8.5. Valores de Cotas Medias Anuales simuladas versus Proyecto piloto en las ciénagas de Rinconada y tesca.....	39
Figura 8.6. Valores promedio anual de los sedimentos simulados en las ciénagas de Rinconada y Tesca para el periodo 1986-1994.....	40

I. INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN

En la hidrografía de Colombia existen sistemas hídricos como lagunas y ciénagas con características especiales en muchos de ellos. Debido a un elevado uso consuntivo de sus aguas y a un manejo inadecuado de sus cuencas tributarias se manifiesta un deterioro en estos hidrosistemas (Rojas, 1997).

Las consecuencias de la problemática planteada son las altas tasas de sedimentación y pérdida del espejo de agua, que afectan las funciones que cumplen estos hidrosistemas de regulación y de balance e intercambio de aguas superficiales, subterráneas y atmosféricas. Además, su función de amortiguamiento de crecientes genera beneficios a las poblaciones ribereñas asentadas aguas abajo, así como su función ecológica de la preservación de la integridad de ecosistemas que dependen del cuerpo agua entre otros. Por ello la gran importancia de la conservación de estos hidrosistemas.

Esta tesis buscó implementar modelos matemáticos que contribuyan al análisis de estas problemáticas. Para esto se analizaron las diferentes características de éstos sistemas hídricos, se identificaron los modelos matemáticos existentes apropiados para su simulación, teniendo en cuenta sus requerimientos, ventajas y limitaciones, se definió el modelo a implementar con base en uno o más modelos existentes, se desarrollaron las correspondientes herramientas computacionales para su integración y finalmente se verificó su desempeño de simulación. A continuación se seleccionaron tres hidrosistemas: laguna de Fúquene, ciénagas de Rinconada y Tesca, para implementar las herramientas desarrolladas recopilando y analizando la información hidroclimatológica, geomorfológica, batimétrica, agrológica, etc, requerida, procediendo posteriormente a su modelación siguiendo protocolos de calibración, verificación y análisis de sensibilidad.

Los resultados del comportamiento hidrológico, hidráulico y ambiental de cuerpos de agua lagunares se constituyen en insumos para análisis económicos que permitan evaluar la factibilidad de proyectos de preservación, recuperación y rehabilitación de estos hidrosistemas.

II. OBJETIVO GENERAL

Implementar modelos matemáticos para el análisis de diferentes problemáticas de hidrosistemas lagunares fluviales y de altiplanos colombianos que permitan simular los diferentes escenarios de manejo y rehabilitación.

III. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para poder obtener unos resultados óptimos dentro de la realización del proyecto se derivan los siguientes objetivos específicos.

- Implementar un modelo matemático para la cuenca tributaria de un cuerpo de agua lagunar y para el balance hídrico de éste.
- Utilizar un modelo matemático para analizar la calidad del agua de un cuerpo lagunar debido a las actividades agropecuarias generadas en su cuenca tributaria.
- Generar información cuantitativa del comportamiento hidrológico y ambiental de cuerpos de agua lagunares que constituyan insumos pertinentes para la evaluación económica y financiera de alternativas de recuperación de estos cuerpos de agua.

IV. REVISION LITERARIA

4.1 CUERPOS LAGUNARES¹

Los cuerpos lagunares son zonas cubiertas de aguas permanentes caracterizadas por una baja circulación. Lo característico de un cuerpo lagunar es la presencia de agua durante períodos lo bastante prolongados como para alterar los suelos, sus microorganismos y las comunidades de flora y fauna hasta el punto de que el suelo no actúa como en los habitat acuáticos o terrestres.



Figura 4.1 Panorámica de la laguna de Fúquene.

Otra característica habitual de las lagunas es que se presentan agrupadas en aquellos lugares en los que los cursos fluviales no pueden desembocar en otros ríos mayores o en el mar, y desagan en depresiones de suelos impermeables que contienen el agua sin filtrarla, desecándose por evaporación. Este fenómeno se denomina endorreísmo.

¹ EDWARD B. BARBIER, MIKE AGREMÁN Y DUNCAN KNOWLER. 1997. Valoración económica de los humedales Guía para decisores y planificadores. Oficina de la Convención de Ramsar.

Los cuerpos de aguas lagunares figuran entre los ecosistemas más productivos de la Tierra. Dadas las funciones que desempeñan en los ciclos hidrológicos y químicos, así como las extensas cadenas alimenticias y la rica diversidad biológica que sustentan, se ha dicho que son los riñones del medio natural y supermercados biológicos.

Éstos se encuentran dentro una clasificación general de humedales, Scott (1989). A título ilustrativo se pueden identificar cinco grandes sistemas de humedales, a saber:

- estuarios - es decir, donde los ríos desembocan en el mar y el agua alcanza una salinidad equivalente a la media del agua dulce y salada (por ejemplo, deltas, bancos fangosos y marismas);
- marinos - los que no resultan afectados por los caudales fluviales (por ejemplo, litorales y arrecifes de coral);
- fluviales - las tierras anegadas periódicamente como resultado del desbordamiento de los ríos (por ejemplo, llanuras de inundación, bosques anegados y lagos de meandro);
- palustres - los que contienen aguas relativamente permanentes (por ejemplo, pantanos de papiro, marismas y ciénagas);
- lacustres - zonas cubiertas de aguas permanentes caracterizadas por una baja circulación (lagunas, lagos glaciales y lagos de cráteres de volcanes).

4.2 MODELACIÓN HIDROLÓGICA²

Por "modelación de los sistemas hidrológicos" se entiende por lo general la aplicación de expresiones matemáticas y lógicas que definen las relaciones cuantitativas entre las características de flujo (salida) y los factores determinantes del flujo (entrada). Ésta es una definición muy general que abarca gran diversidad de métodos. En un extremo se tienen las técnicas puramente empíricas, "de caja negra", por ej., las que no persiguen modelar la estructura interna y la respuesta de la cuenca sino que se limitan a buscar la correspondencia entre la entrada y la salida del sistema de la cuenca. En el extremo opuesto se tienen técnicas que suponen complejos sistemas de ecuaciones basados en leyes físicas y conceptos teóricos que gobiernan los procesos hidrológicos. Entre esos dos extremos se sitúan los diversos modelos conceptuales. Esos modelos representan una consideración lógica de elementos conceptuales sencillos, por ej., embalses lineales o no lineales y canales, que son una simulación de los procesos que ocurren en la cuenca.

Hay una gran variedad de éstos que tratan de simular los diferentes procesos en una cuenca hidrográfica. Las necesidades de datos en materia de calibración y verificación son enormes. Si bien estos modelos pueden ofrecer ciertas ventajas, sobre todo por el detalle con que se pueden simular prácticas agrícolas alternativas, no son por lo general los más idóneos para los países en desarrollo, precisamente por la gran necesidad de datos y por el hecho de que las decisiones de ordenación a nivel de las explotaciones casi siempre se pueden basar en datos más generales pero también en la experiencia y el sentido común. (FAO 1997).

A continuación se presenta una perspectiva general de los métodos actuales utilizados para la estimación de flujos, de pérdida de suelos y nutrientes.

² OMM. 2000. Proyecto de Declaración de la OMM sobre la base científica para la Modelización hidrológica y sus limitaciones. Anexo VIII.

4.3 El modelo SWRRB³

El modelo SWRRB -Simulator of Water Resources in Rural Basin- fue desarrollado para simular los procesos hidrológicos en cuencas rurales, bajo un amplio rango de suelos, clima, uso de la tierra y topografía. Proviene de una modificación al modelo hidrológico CREAMS, (Knisel, 1980, citado por Arnold et al, 1990), con la finalidad de aplicarlo en cuencas rurales grandes y complejas, a objeto de predecir el efecto de las decisiones de manejo sobre la producción de sedimentos y agua con suficiente exactitud en cuencas no aforadas de USA. Sus componentes principales son: hidrología, clima y producción de sedimentos. Entre los procesos incluidos en el modelo se destacan: escurrimiento superficial, flujo de retorno, percolación, evapotranspiración, pérdida por transmisión, almacenamiento en lagunas y embalses, sedimentación y crecimiento de cultivos. El modelo requiere de registros diarios de lluvia, temperatura máxima y mínima y radiación solar; si estos datos no son suministrados al programa un generador de clima los simula; también requiere de parámetros hidrológicos, de suelos y de vegetación.

El modelo SWRRB en condiciones de alta pendiente sobrestima la producción de sedimentos. Ello puede atribuirse al cálculo del gradiente de la pendiente, el cual ha sido formulado para pendientes inferiores a 19%. Adicionalmente, cuando se incrementa el número de curva, se sobrestima en mayor grado la producción de sedimentos. Se define que la generación de volúmenes y caudales pico de escorrentía también está afectando en manera importante. Por ello, se considera conveniente ajustar de forma conjunta los componentes hidrológicos y de erosión del modelo. El modelo resulta ser muy sensible al número de curva y a la erodabilidad del suelo, por lo que ambos factores deben ser asumidos cuidadosamente, sobre todo por las grandes diferencias entre los valores reales y los estimados de dichas variables. El factor C (manejo y cobertura del cultivo) puede ser asumido con mayor libertad cuando se trata de coberturas protectoras, es decir, valores C bajos. El factor L, en cuencas pequeñas y de laderas cortas, puede ser establecido con pocas mediciones de campo, es decir, no se requiere que se inviertan grandes recursos y tiempo en su obtención.

³ ARNOLD, J.G., J.R. WILLIAMS, R.H. GRIGGS y N.H. SAMMONS. 1990. SWRRB – A basins scale simulation model for soil and water resources management. Texas ASM. Universidad Press, College Station.

El modelo SWRRB, debido a su aceptable establecimiento de tendencias, es útil para comparar varios sectores hidrológicos de entre sí en cuanto a riesgo de erosión se refiere, así como en la determinación del efecto que sobre la erosión causan los diversos factores físicos, de uso y de manejo de la tierra, siempre y cuando se establezcan valores de entradas basados en observaciones representativas y donde exista consistencia en el error entre las mismas. (Silva 1996).

4.4 El modelo ACRU⁴

El modelo hidrológico de ACRU ha sido desarrollado sobre un número de años por el departamento de la ingeniería agrícola, universidad de Natal, Pietermaritzburg, África del sur. Los aspectos particulares del modelo se describen en una gama de publicaciones (e.g. NewvSchulze, 1996 ; Schulze ef a/, 1993 ; Smithers y Caldecott, 1993). El modelo es multi-propósito y puede ser utilizado para simulación hidrológica, predicción de la erosión del suelo y el modelación de la producción agrícola

La base del modelo abarca las rutinas de balance del agua. El balance del agua del suelo se simula en dos dimensiones (es decir verticalmente). La precipitación total sobre áreas previas es sujeta de la intercepción de la cobertura vegetal y en el almacenamiento de las depresiones de la superficie, mientras que la lluvia que cae sobre áreas superficiales impermeables se encamina directamente en escorrentia superficial, o bien agregado a la precipitación neta. La precipitación neta se reparte entre la salida infiltración-exceso y la infiltración en la tierra vegetal, usando una ecuación modificada de SCS. El agua en exceso en el suelo drena del límite superior al subsuelo son en una cantidad determinada por las características de la textura del suelo. Igualmente, los excesos de agua del subsuelo son el almacenamiento del agua subterránea (o flujo base). El flujo base es generado mediante una función del decaimiento y agregado a la salida para producir el flujo total para el día.

⁴ G.P. W. JEWITT AND R.E. SCHULZE. 1999. Verification of the ACRU model for forest hydrology applications. Website <http://www.wrc.org.za>.

4.5 El Modelo GLEAMS⁵

GLEAMS es un modelo funcional de simulación continua a escala de parcela que fue desarrollado por el Departamento de Agricultura de EEUU (USDA) como herramienta para simular el impacto de los cultivos sobre el medio ambiente (hidrología, erosión y transporte de nutrientes y pesticidas) (Leornard et al, 1987). GLEAMS es una mejora del modelo CREAMS (Knisel, 1980) con cambios en el balance hídrico, procesos de erosión y transporte de pesticidas, y en su última edición (Knisel et al, 1993) tiene la incorporación del modelo de transporte de nutrientes.

El modelo calcula secuencialmente y a incrementos de tiempo de un día, los diferentes balances hídricos, de erosión, y de nutrientes y pesticidas. La hidrología se basa en una modificación del método del número de curva del SCS, acoplado con un balance de agua en la zona radicular del suelo (la única estudiada por el modelo) que incluye evapotranspiración (ETP) e infiltración. Las estimaciones de ETP se calculan por el método de Penman-Monteith o el de Priestley-Taylor, basados en medias mensuales de radiación solar, temperaturas máximas y mínimas, punto de rocío y distancia recorrida por el viento. La percolación desde la zona radicular se calcula como exceso de las capas superiores, pero no hay subrutinas para flujo vertical o lateral más allá de dicha zona. El componente de erosión se basa en las estimaciones de escorrentía del submodelo hidrológico para predecir transporte y depositación de sedimento en un conjunto variado de topografías y tipos de flujo superficial (Foster et al, 1980, 1985). El submodelo de nutrientes proporciona estimaciones de las pérdidas de nitrógeno y fósforo en el extremo-inferior de la zona radicular y el borde de la parcela de cultivo en superficie.

GLEAMS considera el ciclo del nitrógeno basado en el intercambio entre una serie de tipos de Nitrógenos presentes en el suelo (N orgánico fresco, fertilizante, nitrato, amonio, N orgánico de estiércol y N activo y estable). El intercambio es controlado por la disponibilidad de las diferentes especies y funciones de transferencia dependientes de la temperatura y la humedad del suelo. La absorción de nitrógeno por el cultivo y fijación del

⁵ SING, V.P. Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications 1995. 1130p.

nitrógeno por leguminosas sigue el esquema del modelo EPIC (Sharpley & Williams, 1990).

El modelo GLEAMS realiza un balance hídrico diario en la zona radicular, estimando la percolación como el volumen de exceso que abandona la zona radicular. La conductividad saturada del suelo se utiliza para estimar el tiempo de residencia medio del agua en cada horizonte del suelo.

4.6 Modelo EPIC⁶

El modelo EPIC es un modelo a escala de campo, de tiempo continuo, diseñado para simular la respuesta de sistemas complejos de cultivo al clima, a los suelos y al manejo y conservación de suelos (Williams et.al, 1984; Williams y Renard, 1985). Utiliza una escala horaria a diaria para simular clima, hidrología, erosión hídrica y eólica del suelo, labranza, ciclos y pérdidas de nitrógeno y fósforo, ciclos y pérdidas de plaguicidas, temperatura del suelo, manejo de cultivos, crecimiento y rendimiento de cultivos, y economía.

EPIC tiene varias ventajas con respecto al uso de modelos de parámetros "agrupados" tales como USLE, AOF y MUSLE. La capacidad del modelo para simular las alternativas de manejo de cultivos y suelos detalladamente, permite al usuario evaluar los efectos de rotaciones de cultivos, mecanización de la labranza, manejo de residuos, prácticas de control de escurrimiento, estrategias de riego y otros factores. Además, su capacidad para simular rendimientos de cultivos, ciclos de fertilización y nutrientes, y dinámica de los plaguicidas permite al usuario evaluar las relaciones entre economía, conservación de suelos, y contaminación de aguas superficiales y subterráneas por nutrientes y plaguicidas. (FAO 1993).

Los resultados indican que el modelo EPIC es viable para ser utilizado en zonas de ladera

⁶ WILLIAMS, J.R. 1995. Chapter 25. The EPIC Model. p. 909-1000. In Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications. Highlands Ranch, CO.

para simular la pérdida de suelo en los cultivos de maíz y yuca, no obstante que los niveles de precipitación y pendiente sean superiores a los límites del modelo; se requieren estudios más profundos para la calibración y validación del modelo bajo condiciones locales. El modelo resulta altamente sensible a los parámetros de cobertura y prácticas de conservación, razón por la cual deben ser determinados con mayor precisión. El modelo no tiene confiabilidad para estimar pérdidas de suelo en rastrojo debido a la escasa información disponible sobre fisiología de esta cobertura del suelo y a la alta variabilidad de la composición botánica de los rastrojos. (Arroyave et al. 1999).

4.7 El Modelo HSPF⁷

HSPF surge de Stanford Watershed Model. Durante la década de 1960 Crawford y Linsley (1966) crearon HSP Hydrocomp Simulation Program, el cual incluía elementos para simulación de calidad del agua. A principios de la misma década se desarrollaron otros modelos incorporados a HSP. Estos eran el ARM (Agricultural Runoff Management Model) y el NPS (Nonpoint Source Pollutant Loading Model) (Bicknell et al., 1996). Debido a que el programa HSP presentaba algunas limitaciones en el manejo de datos, la USEPA comisionó a Hydrocomp Inc. en 1976 para desarrollar un programa en Fortran que incluyera los módulos usados por HSP. Como resultado de esto surge HSPF. El paquete que se usa actualmente es una versión actualizada de estos trabajos originales de Hydrocomp Inc. (Bicknell et al., 2001).

HSPF es un modelo de simulación continua el cual fue creado para simular procesos de cantidad y calidad de agua. Está clasificado como un modelo agregado, el cual puede reproducir variabilidad espacial por subdivisión en áreas hidrológicamente homogéneas y simular cada área por separado (Bicknell et al., 1996).

El modelo HSPF combina atributos físicos de la cuenca distribuidos espacialmente, dentro de unidades de respuesta hidrológica (HRU). Cada una de estas responde a datos meteorológicos (precipitación, evapotranspiración, temperatura) y factores de capacidad

⁷ SUAREZ N. 2005. Coeficientes de exportación de sedimentos para la cuenca del Río Grande del Arecibo Universidad de Puerto Rico.

de almacenamiento (intercepción, retención superficial, y retención de humedad del suelo) (Johnson et al., 2003). La escorrentía es simulada con procesos de exceso de escorrentía y los datos de salida como flujo representan la respuesta de cada HRU a la precipitación y al transporte de agua hacia el canal.

HSPF es un modelo complejo. Sin embargo, su estructura modular permite aislar sus elementos de otros módulos (Wang et al., 1999). Hidrológicamente, HSPF considera dos tipos de segmentos: segmentos de terreno (permeable e impermeable) y el cuerpo de agua. Las fronteras son establecidas de acuerdo a las necesidades. Por lo general un segmento presenta características hidrológicas similares. En segmentos que permiten infiltración (permeables), HSPF simula el movimiento de agua en tres componentes: escorrentía, interflujo y flujo de agua subterránea. Cada uno de estos presenta diferencias en tiempo e interacción con los componentes del agua. Los procesos que ocurren en segmentos impermeables son también simulados. Ejemplo de esto es que, aunque no existe infiltración, existe precipitación, aumento del flujo y evaporación.

Los procesos hidráulicos y de calidad de agua que ocurren en el río son simulados por el método de embalses múltiples. Una versión del modelo de onda cinemática es utilizada para esto (Bicknell et al., 2001).

4.8 El Modelo SWAT⁸

SWAT es un modelo integral de cuenca desarrollado en Texas por el Dr. Jeff Arnold para el USDA Agricultural Research Service (ARS), avalado por su amplia aplicación a cuencas de todo el mundo con las más diversas características, que contempla e integra un número muy considerable de submodelos. Surge como una evolución de los programas CREAMS (Knisel, 1980) y EPIC (Williams et al., 1984), entre otros, con más de 25 años de experiencia en el cálculo hidrológico, de calidad de aguas y sedimentos. Básicamente, los submodelos (módulos) que forman parte de SWAT se pueden agrupar en climáticos, hidrológicos, de erosión, de nutrientes, agrícolas y urbanos. El módulo principal, que sirve de sustento a todos los demás, es el hidrológico, lo que significa que cualquier error en su calibración puede invalidar todos los resultados posteriores obtenidos con el resto de módulos.

SWAT es un modelo básicamente unidimensional, físicamente basado, cuyos procesos espaciales en planta están promediados según tramos homogéneos de tamaño no condicionado a priori. Cada tramo está definido por un punto en un cauce (outlet) y lo componen todos los pixels cuya escorrentía superficial alcanza el cauce entre ese punto y el inmediatamente aguas arriba del mismo (una subcuenca).

SWAT, para realizar las predicciones, divide la cuenca hidrográfica en pequeñas subcuencas. Al hacer esto es posible calcular con mayor precisión los caudales y los sedimentos presentes. Además para hacer más fácil y exactos los cálculos, SWAT trabaja por unidades de respuesta hidrológica, las cuales son el cruce de los diferentes tipos de suelo con las diferentes coberturas o usos del suelo y a cada una de estas combinaciones les asigna un atributo para diferenciarlas de las demás. A las anteriores unidades se les ha llamado unidades de respuesta hidrológica (HRU) debido a que el comportamiento del agua en el suelo depende de estos dos factores.

⁸ J. Herrero Latarón, M.I. Rodríguez Rojas, A. Aviles Benitez. 2004. *Modelos integrales de cuencas hidrográficas y prognosis de escenarios de gestión. SWAT aplicado a la cuenca del guadalfeo*. Universidad de Granada.

Saleh, A., J.G. Arnold, P.W. Gassman, L.M. Hauck, W.D. Rosenthal, J.R. Williams, and A.M.S. McFarland, 2000. *Application of SWAT for the Upper North Bosque River Watershed*. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 43(5):1077-1087.

También los resultados de un modelo de simulación pueden ser datos de ingreso para otro modelo en SWAT. De todas formas el modelo opera con periodos de tiempo diario y es suficientemente eficiente para correr por muchos años (Ayala 2001).

4.9 RESUMEN DE LOS MODELOS

En la tabla 4.1 se presenta un resumen comparativo entre los modelos descritos.

NOMBRE	APLICACIÓN	ESCALA TIEMPO	DE	ESCALA ESPACIAL
CREÁMS(erosión química y escorrentía de los sistemas de ordenación agrícola)	Hidrología, erosión, N, P y Plaguicidas	Diaria, continuada		Finca
EPIC(calculador del efecto erosión-productividad)	Hidrología, erosión, ciclo de los nutrientes, ordenación de cosechas y suelos y economía	Suceso aislado, diaria, continuada		Finca
HPSF(Programa Fortran de simulación hidrológica)	Hidrología, calidad del agua en relación con contaminantes orgánicos tóxicos y convencionales	Suceso aislado, diaria, continuada		Cuenca hidrográfica
SWÁT (Herramienta de evaluación de suelos y aguas)	Procesos hidrológicos, sedimentos, nutrientes y plaguicidas	Suceso aislado, diaria, a continuada		Simulación simultánea para centenares de subcuencas
SWRRB(simulador para recursos hídricos en cuencas Rurales)	Balace hídrico y Procesos hidrológicos y sedimentación	Suceso aislado, diaria, continuada		Cuenca hidrográfica

Tabla 4.1 Principales características de los modelos descritos (FAO, 1997)

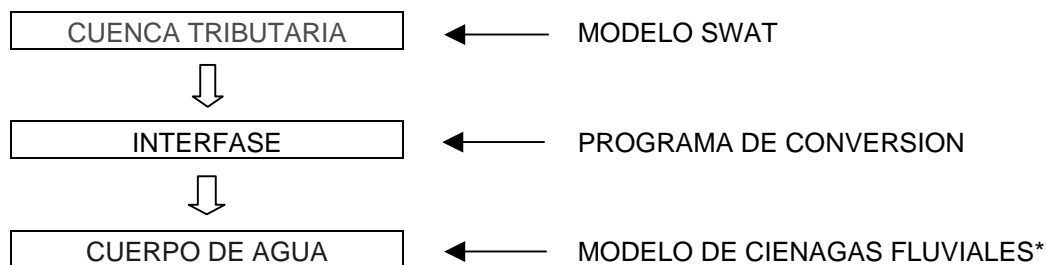
V. ESTRUCTURA DEL MODELO DESARROLLADO

Basándose en las características de diferentes modelos existentes para la simulación de flujos de agua, sedimentos y nutrientes, se seleccionó SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para modelar las cuencas tributarias a los hidrosistemas lagunares, por su habilidad para simular simultáneamente varias subcuencas.

Para el balance hídrico del cuerpo de agua se escogió el modelo elaborado para la modelación de balances hídricos de ciénagas fluviales y costeras Colombianas (Díaz-Granados et al., 2000), debido a que el modelo permite identificar las direcciones principales de comunicación entre los distintos cuerpos de agua y la magnitud de los volúmenes de intercambio resultantes.

Para el balance de sedimentos y nutrientes en el cuerpo de agua se seleccionó el conjunto de modelos de balance de masas simple utilizados en SWAT (Neitsch et al 2000).

Se creó una interfase rápida y amigable para convertir los archivos de resultados simulados por el modelo SWAT en los archivos para la entrada al modelo de ciénagas fluviales.



* Trabaja para intervalos de tiempo decadal (10 días)

Figura 5.1 Diagrama del modelo desarrollado.

5.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO SWAT⁹

El modelo SWAT fue desarrollado para predecir el impacto en el manejo del suelo y la vegetación en la producción de agua, sedimentos y químicos agrícolas en grandes y complejas cuencas con variación en suelos, uso de suelo y condiciones de manejo en largos periodos. El modelo tiene como principal objetivo predecir el efecto en la toma de decisiones en el manejo de la producción de agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas con razonable precisión, en cuencas que no cuentan con estaciones de aforo (Arnold et al., 1987).

El modelo está conformado por un conjunto de submodelos, los cuales se emplean para simular distintos procesos hidrológicos. El modelo hidrológico está basado en la ecuación general de 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 (mmH_2O); SW_o es el contenido de agua inicial en el día i (mmH_2O); t es el tiempo (día); R_{day} es la cantidad de precipitación en el día i (mmH_2O); w_{seep} es la cantidad de agua acumulada en la zona no saturada del perfil del suelo en el día i (mmH_2O); Q_{gw} es la cantidad de flujo de retorno en el día i (mmH_2O) (Arnold et al., 1991).

Los principales componentes del modelo pueden ser ubicados en ocho divisiones principales: hidrología, clima, sedimentación, temperatura del suelo, crecimiento de cultivos, nutrientes, pesticidas y manejo de cultivos. Uno de los más importantes es el que calcula los escurrimientos, dado que sirve de base para los otros submodelos.

El cálculo de los escurrimientos superficiales es realizado por SWAT para los días de lluvia o deshielo usando la modificación de Williams y Laseur (1976) a la técnica de

⁹ GARCIA A., PALACIOS E. 2005. adaptation of a hydrological simulation model to the río Laja watershed, Hidrociencias. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. Guanajuato, México

número de curva del Servicio de Conservación de Suelos (U.S. Soil Conservation Service, SCS, 1972). Para ello, usa las tres condiciones de humedad con la finalidad de proporcionar estimaciones más realistas del número de la curva.

El cálculo del escurrimiento, según la técnica del número de curva propuesto por el U.S. Soil Conservation Service, SCS (1972), se basa en la siguiente ecuación:

$$Q_t = \frac{(P_t - I_a)^2}{P_t - I_a + S_t} \quad (2)$$

donde Q_t es el escurrimiento del día t (mm), P_t es la precipitación total del día t (mm); I_a es la abstracción inicial antes de que el suelo se sature (mm); S_t es la retención potencial máxima del día t (mm).

Al estudiar los resultados obtenidos para muchas cuencas experimentales pequeñas, el SCS desarrolló la siguiente relación empírica:

$$I_a = 0.2S \quad (3)$$

Con base en lo anterior, la ecuación que determina el escurrimiento se transforma en la siguiente expresión:

$$Q_t = \frac{(P_t - 0.2S_a)^2}{P_t - I_a + S_t} \quad (4)$$

donde Q_t es el escurrimiento del día t (mm); P_t es la precipitación del día t (mm); S_t es un parámetro de retención del día t (mm).

La ecuación utiliza un solo parámetro (S_t), que es función de la humedad antecedente y del tipo, uso y manejo del suelo en consideración. El valor de S_t varía entre cero y un valor indeterminado, que en principio puede ser muy grande, y suele cambiarse por otro

parámetro adimensional y estandarizado, CN, que varía entre cero (cuando S_t es muy grande) y 100 (cuando S_t es cero), de acuerdo con la relación:

$$CN = \frac{25400}{S_t + 254} \quad (5)$$

donde CN = valor del nuevo parámetro.

El modelo SWAT también simula el escurrimiento máximo, a través del método racional modificado, el cual se usa ampliamente en el diseño de drenajes, canales y sistemas para el control de crecientes, y está basado en el supuesto de que si una lluvia de intensidad i comienza en el tiempo $t = 0$ y continúa indefinidamente, la cantidad de escurrimiento se incrementará hasta el tiempo de concentración, $t = t_{conc}$, cuando el área de la cuenca entera contribuye al flujo de salida. La fórmula racional modificada se expresa como

$$q_{peak} = \frac{\alpha_{tc} \cdot Q_{surf} \cdot \text{Área}}{3.6 \cdot t_{conc}} \quad (6)$$

donde q_{peak} es la tasa promedio del escurrimiento máximo (m^3/s), α_{tc} es la fracción de la lluvia que ocurre durante el tiempo de concentración, Q_{surf} es el escurrimiento superficial ($mm \text{ H}_2\text{O}$), Área es el área de la cuenca (km^2), t_{conc} es el tiempo de concentración de la cuenca (h), 3.6 es un factor de conversión de unidades.

Además del escurrimiento máximo y la tasa pico de escurrimientos, el modelo SWAT también simula la producción de sedimentos en las cuencas para una unidad de respuesta hidrológica (URH), a través de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos Modificada, MUSLE por sus siglas en inglés (Williams y Berndt, 1977), y de un modelo de movimiento de sedimentos a lo largo de la red de drenaje de la cuenca. MUSLE predice la erosión total anual como una función de la energía cinética de la lluvia, y el factor de energía de la lluvia es reemplazado por el factor de escurrimiento. Esto incrementa la predicción de la producción de los sedimentos, elimina la necesidad de calcular la tasa de descarga y la ecuación se puede aplicar en eventos individuales de lluvia. La predicción

de la producción de sedimentos se incrementa debido a que el escurrimiento es una función de la condición de humedad antecedente, así como de la energía del escurrimiento. La ecuación modificada se expresa de la siguiente forma:

$$sed = 11.8 \cdot (Q_{surf} \cdot q_{peak} \cdot \text{Área}_{hru})^{0.56} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot LS_{USLE} \quad (7)$$

donde *sed* es la producción de sedimentos en un día dado (t/ha año), Q_{surf} es el volumen de escurrimiento superficial (m^3), q_{peak} es la tasa de escurrimiento pico (m^3/s); Área_{hru} es el área de cada unidad de respuesta hidrológica (ha); K_{USLE} es el factor de erodabilidad del suelo de la USLE, C_{USLE} es el factor de cobertura vegetal y manejo (adimensional); P_{USLE} es el factor de prácticas conservacionistas de la USLE (adimensional) y LS_{USLE} es el factor topográfico de la USLE (adimensional).

5.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE CIÉNAGAS FLUVIALES¹⁰

Los balances hídricos de las ciénagas permiten identificar las direcciones principales de comunicación entre los distintos cuerpos de agua y la magnitud de los volúmenes de intercambio resultantes.

Cada ciénaga o conjunto de ciénagas interconectadas se considera compuesta por un conjunto de elementos que interactúan entre sí: la subcuenca de drenaje directo a través de ríos y caños que llegan a la ciénaga; el conjunto de cuerpos lagunares interconectados; los canales de conexión entre éstos, y los canales de interconexión con el río. Los elementos identificados son:

- a. Cuencas tributarias: Corresponden a las áreas que aportan escorrentía directa a la ciénaga. Estas pueden representarse mediante dos subelementos: uno que representa la escorrentía medida en una estación hidrométrica y otro que representa la escorrentía producida en el área tributaria entre la estación hidrométrica y la ciénaga.
- b. Ciénagas: Cada cuerpo de agua representa un elemento de almacenamiento que interactúa a través de canales con otras ciénagas y eventualmente con el río, recibe aportes netos de otros elementos y está sujeto a evaporación y transpiración desde su superficie de agua. Además, recibe precipitación sobre el espejo de agua.
- c. Conexiones: Las ciénagas se comunican por medio de canales que normalmente transportan agua en los dos sentidos, dependiendo de los niveles relativos de la superficie de agua en los dos cuerpos. Los volúmenes de agua de intercambio son función de las diferencias de nivel entre los cuerpos de agua y su variación, además de las características hidráulicas de los canales.
- d. Subcuencas de caños: Los caños pueden recibir escorrentía directa de áreas que tributan directamente a ellos. En estas áreas se presentan los procesos de precipitación, evapotranspiración y transporte de agua hacia las ciénagas.
- e. Río: Condición de frontera que se caracteriza por medio del nivel en la boca del caño de conexión con la ciénaga.

¹⁰ Diaz-Granados M, Camacho L, Maestre A, Modelación de Balances Hídricos de Ciénagas Fluviales y Costeras Colombianas, 2000.

f. Mar: Condición de frontera que define las fluctuaciones periódicas del nivel del mar debido a las mareas, cuyo efecto en la ciénaga se transmite a través de la correspondiente boca de conexión.

Con base en lo anterior, se puede aplicar la ecuación de balance hídrico a la ciénaga:

$$dS / dt = I - O \quad (8)$$

Donde S es el almacenamiento en el cuerpo de agua (volumen de control), dS es el cambio de almacenamiento durante un diferencial de tiempo dt , I representa las entradas al volumen de control durante dt y O las salidas de éste. Esta ecuación se puede simplificar para intervalos de tiempo finitos Δt como $\Delta S / \Delta t = I - O$ la cual, aplicada a una de las ciénagas, resulta en:

$$\begin{aligned} S_2 = S_1 + k_1 E_s A_t + K_2 Q_t Dt \\ + K_3 * 0.5 (Ac_2 + Ac_1) (Pc - EVc) \\ \pm K_2 * 0.5 (Q_{cc_2} + Q_{cc_1}) Dt \\ \pm K_2 * 0.5 * (Q_{rc_2} + Q_{rc_1}) Dt \end{aligned} \quad (9)$$

donde S_1 es el almacenamiento en la ciénaga al comienzo del período, S_2 es el almacenamiento al final, E_s es la escorrentía directa a la ciénaga (subelemento 2 del elemento 1) en mm/período, A_t es el área tributaria del subelemento 2, Q_t es el caudal medio durante Δt de escorrentía directa aportada por el subelemento 1 del elemento 1, Ac_1 y Ac_2 son el área superficial de la ciénaga al comienzo y al final del período Δt , P es la precipitación directa sobre el espejo de agua durante Δt en mm/período, EVc es la evapotranspiración desde el espejo de agua durante Δt en mm/período, Q_{cc_1} y Q_{cc_2} son el caudal de interconexión entre esta ciénaga y las otras conectadas a ésta, al comienzo y al final del intervalo Δt , Q_{rc_1} y Q_{rc_2} son el caudal de interconexión entre la ciénaga y el río, mar u otra ciénaga, al comienzo y al final del intervalo Δt , y K_1 , K_2 y K_3 son constantes para expresar el balance en metros cúbicos (m^3).

El algoritmo de solución de la anterior ecuación, en el caso más general de dos ciénagas interconectadas entre si (ciénagas 1 y 2) y una de ellas (ciénaga 1) conectada con el río es el siguiente:

1. Suponer un nivel en la ciénaga 1 al final de Δt
2. Determinar Ac_2 para la ciénaga 1 con el nivel supuesto en (1)
3. Suponer un nivel en la ciénaga 2 al final de Δt
4. Determinar Ac_2 para la ciénaga 2 con el nivel supuesto en (3)
5. Con los niveles de las ciénagas 1 y 2 de (1) y (3) establecer el caudal de interconexión por los caños entre las ciénagas 1 y 2 al final del período Δt , Q_{cc2}
6. Calcular S_2 para la ciénaga 2 con la ecuación de balance entre las ciénagas 1 y 2
7. Comprobar convergencia entre S_2 calculado en (6) y el S_2 supuesto en (3)
8. Si no hay convergencia, modificar el nivel supuesto en (3) y repetir el proceso. Si hay convergencia ir a (9)
9. Con el nivel del río al final de Δt y el nivel supuesto en (1), establecer Q_{rc2}
10. Calcular S_2 para la ciénaga 1 con la ecuación de balance entre la ciénaga 1 y el río
11. Comprobar convergencia entre S_2 calculado en (10) y el S_2 supuesto en (1)
12. Si no hay convergencia, modificar el nivel supuesto en (1) y repetir el proceso. Si hay convergencia ir a (13)
13. Avanzar Δt en el tiempo y volver a (1).

5.3 DESCRIPCION DE LOS MODELOS DE SEDIMENTOS Y NUTRIENTES PARA EL CUERPO DE AGUA¹¹

SWAT incorpora un modelo de balance de masas simple para simular el transporte de sedimentos de entrada y salida del cuerpo de agua, asumiendo que el sistema esta completamente mezclado.

$$sed_{wb} = sed_{wb,i} + sed_{flowin} - sed_{stl} - sed_{flowout} \quad (10)$$

donde sed_{wb} es la cantidad de sedimentos en el cuerpo de agua al final del periodo (ton), $sed_{wb,i}$ es la cantidad de sedimentos al comienzo del periodo en el cuerpo de agua (ton), sed_{flowin} es la cantidad de sedimentos añadidos al cuerpo de agua en el periodo (ton), sed_{stl} es la cantidad de sedimentos removidos desde el cuerpo de agua por depositación (ton), $sed_{flowout}$ es la cantidad de sedimentos transportados fuera del cuerpo de agua (ton).

De igual manera incorpora un modelo empírico simple de balance de masas para el pronosticar nitrógeno (N) y el fósforo (P), asumiendo que el sistema esta completamente mezclado.

$$\frac{dM}{dt} = V \frac{dc}{dt} = \sum_{i=1}^N (C_i Q_i) - \sum_{i=1}^N (C Q_o) - v C A_s \quad (11)$$

donde V es el volumen del sistema (m^3), C es la concentración del nutriente en el sistema (kg/m^3), C_i es la concentración de entrada al sistema (kg/m^3), Q_i es el caudal de entrada al sistema (m^3), Q_o es el caudal de salida del sistema (m^3), dt es el periodo de tiempo, v es la velocidad de sedimentación (m/día) y A_s es el área de sedimentación.

¹¹ Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, J.R. Williams and K.W. King. 2001b. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation, Version 2000 (Draft). Blackland Research Center. Texas Agricultural Experiment Station, Temple, Texas.

VI. DESCRIPCION DE LOS CASOS DE ESTUDIO

Los hidrosistemas lagunares escogidos son la laguna de Fúquene y las ciénagas de Rinconada y Tesca. Éstos fueron seleccionados debido a que hoy en día presentan pérdida de sus espejos de agua, hay alta actividad agropecuaria en sus cuencas tributarias y se cuenta con la información requerida para su simulación y análisis.

6.1 Laguna de Fuquene¹²

Localizada en la cordillera oriental colombiana a 2539 metros sobre nivel del mar y al norte a 100 kilómetros de la ciudad capital del país, Fúquene es un hábitat excepcional y un recurso natural para ser valorado y para ser manejado según su significación global. En la figura 6.1 se muestra la localización geográfica.

La temperatura del agua es una característica constante todo el año de largo en 17.7°C (promedio mensual). Su humedad es alta: 70-79%. La precipitación en la parte central de la laguna tiene un promedio de 1030 mm/año con dos períodos secos a partir de diciembre a febrero y a partir de julio a agosto. El brillo solar tiene un promedio de 5,3 horas/día. La radiación solar está entre 11-13 cal/cm² por día y la evaporación media mensual está entre 84-110 mm/mes.

Aunque el nivel del agua y la extensión de la superficie de agua fluctúa en respuesta a la pluviosidad estacional y a las actividades de drenaje, el cuerpo de agua principal ocupa aproximadamente 3.000 ha. Su profundidad es escasa y la cobertura vegetal extensa, en respuesta al activo proceso de eutroficación que afecta a la laguna en la actualidad. La vegetación emergente está representada por un amplio cinturón de juncos en las orillas del lago, formado por cuatro especies de juncos y eneas. Buena parte del espejo de agua está cubierto por vegetación flotante (tres especies) y la cobertura subacuática de *Potamogetón illinoensis* es igualmente densa. La laguna cuenta con varias especies

¹² International Foundation for Environment and Nature. Save the lakes of the world. 2005. www.livinglakes.org.

introducidas de peces. La avifauna acuática aparentemente está declinando, pero aún es posible encontrar poblaciones importantes de ocho especies residentes. Tres especies migratorias del Neártico son visitantes regulares. Zona de nidificación de aves acuáticas andinas de distribución restringida (y/o vulnerables): *Ixobrychus exilis bogotensis*, *Rallus semiplumbeus*, *Porphyrio melanops bogotensis*, *Cistothorus apolinari* y *Agelaius icterocephalus bogotensis*; y área de residencia no reproductiva de aves migratorias neárticas, especialmente *Anas discors*, *Charadrius semipalmatus* y *Actitis macularia*.

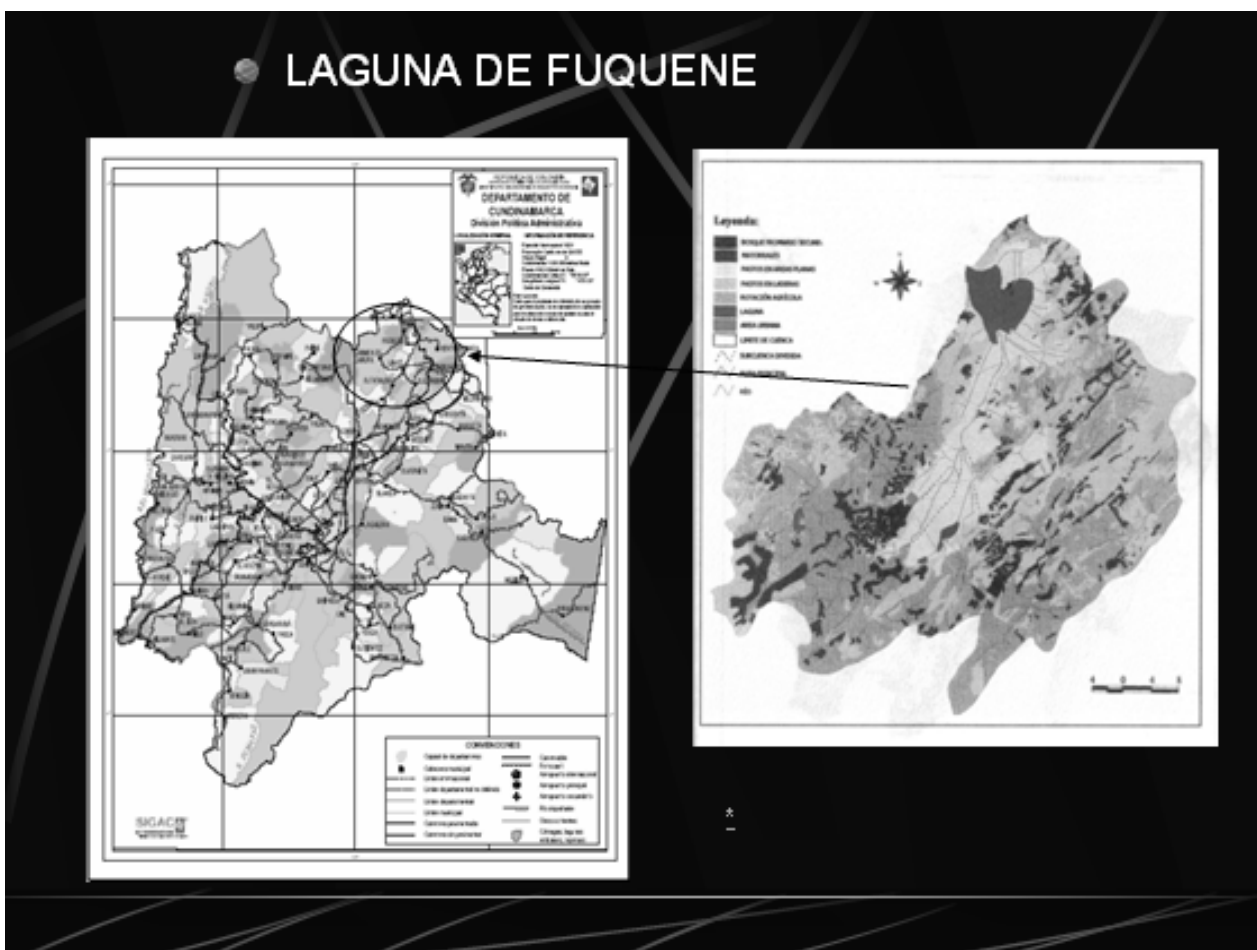


Figura 6.1. Ubicación de la cuenca hidrográfica de la laguna de Fúquene en el Departamento de Cundinamarca, Colombia.

6.2 Ciénagas de Rinconada y Tesca¹³

La ciénaga de La Rinconada se encuentra comunicada con el brazo de Mompós a través del caño Menchiquejo, el cual tiene una longitud aproximada de 15 km y muestra flujo bidireccional según la época del año y el régimen hidrológico presente. En su trayectoria atraviesa las pequeñas ciénagas de Sabato, Gaita y Mangle para terminar en la ciénaga de La Rinconada. Anteriormente existió otro caño denominado Lobato, que comunicaba el río Magdalena con la ciénaga de La Rinconada a través de la ciénaga Mangle (ver Figura 6.2). Este caño se encuentra actualmente completamente obstruido. La ciénaga de Tesca se encuentra comunicada con la ciénaga de La Rinconada mediante dos caños denominados Arenal y Tesca, cuyo flujo bidireccional de interconexión actualmente está limitado por la presencia de taruya en la totalidad de sus trayectorias. Las cuencas tributarias a estas ciénagas están constituidas por áreas de escorrentía de caños como Surrabá, Napóles y el arroyo Dividinal. El área tributaria a la ciénaga de La Rinconada es de 163.55 km² y la de la ciénaga de Tesca es de 27.4 km². Actualmente las ciénagas de este conjunto se encuentran con áreas sedimentadas, aparentemente como consecuencia de la obstrucción del caño Lobato.

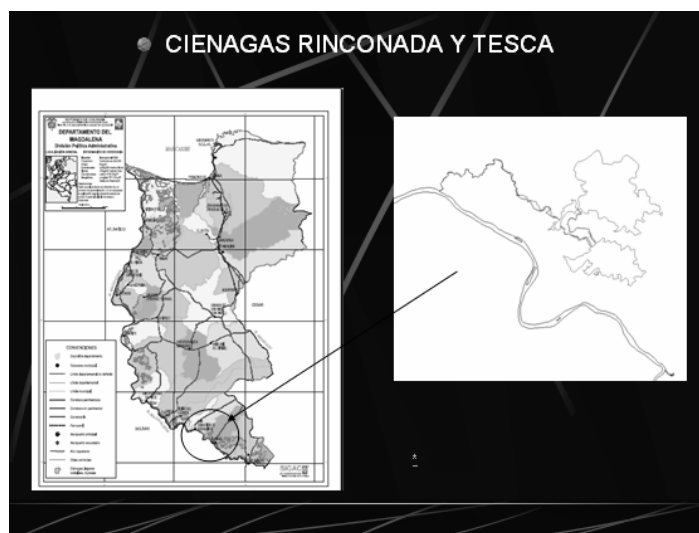


Figura 6.2. Ubicación de la cuenca hidrográfica de las ciénagas de Rinconada y Tesca en el Departamento de Magdalena, Colombia.

¹³ Diaz-Granados M, Camacho L, Maestre A, Modelación de Balances Hídricos de Ciénagas Fluviales y Costeras Colombianas, 2000.

VII. METODOLOGIA

El primer paso consistió en recolectar la información hidroclimatológica disponible, batimetría de los cuerpos de agua, mapas de cobertura vegetal, mapas de suelos y datos edafológicos para cada perfil del suelo.

El segundo paso fue escoger el periodo de simulación en los dos casos teniendo en cuenta los datos disponibles. Para Fúquene se tomaron dos periodos de simulación: el primero entre los años 1966-1980 ya que en esta época no estaban construidas la represa del Hato y las compuertas de regulación de caudales, además la cobertura vegetal natural estaba más preservada; y el segundo periodo entre 1993-2001. En el caso de las ciénagas de Rinconada y Tesca se escogió el periodo de 1986-1994 para su simulación, debido a su concurrencia con el periodo para su validación a través del estudio denominado “Proyecto Piloto de Recuperación de Ciénagas” (Deeb Asociados, 1996).

En el tercer paso se procesó el modelo SWAT y se obtuvieron los resultados de salida para las cuencas tributarias en los dos hidrosistemas

- Cargar el DEM, (ver Figura 7.1).

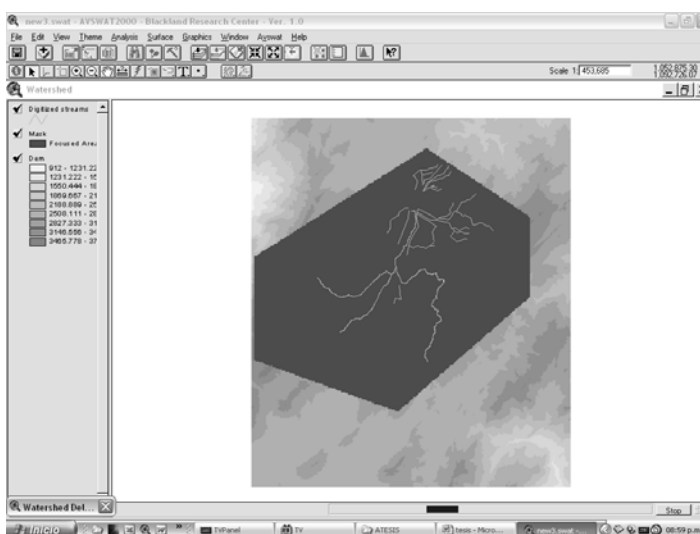


Figura 7.1. DEM de la cuenca tributaria a la laguna de Fúquene, Departamento de Cundinamarca, Colombia.

- Definir de la red de drenaje y la cuenca tributaria (ver Figura 7.2).

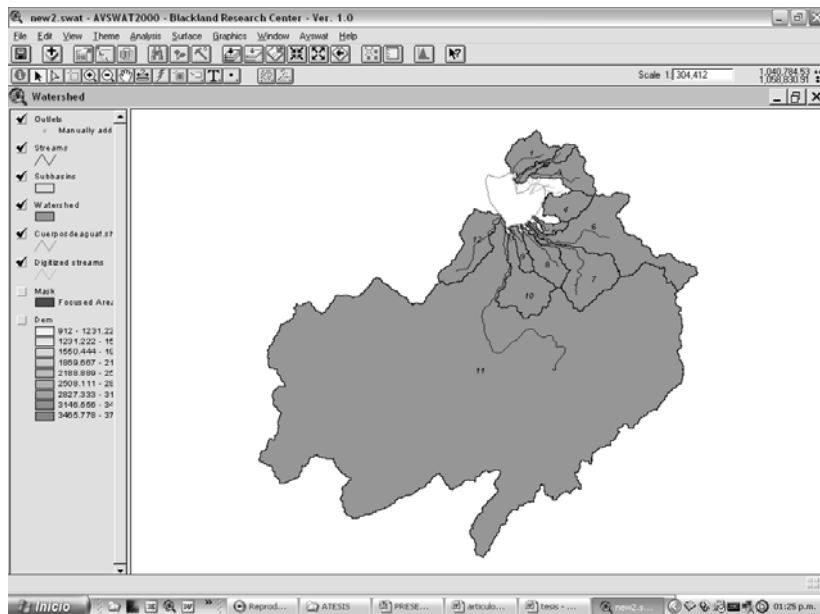


Figura 7.2. Cuenca tributaria generada por SWAT para la laguna de Fúquene, Departamento de Cundinamarca, Colombia.

- Asignar de cobertura vegetal y tipo de suelo (ver Figuras 7.2 a 7.5).

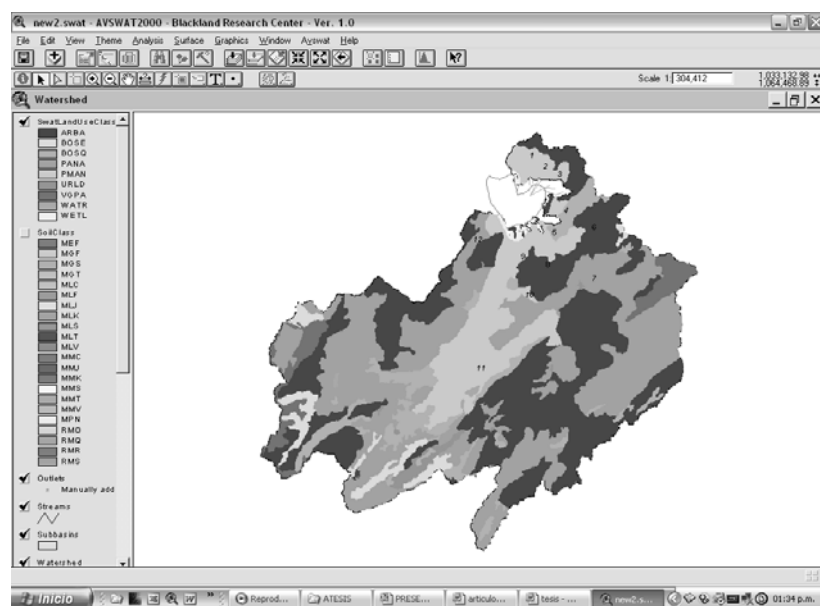


Figura 7.3. Cobertura en la cuenca tributaria de la laguna de Fúquene para el 1966-1980, Departamento de Cundinamarca, Colombia.

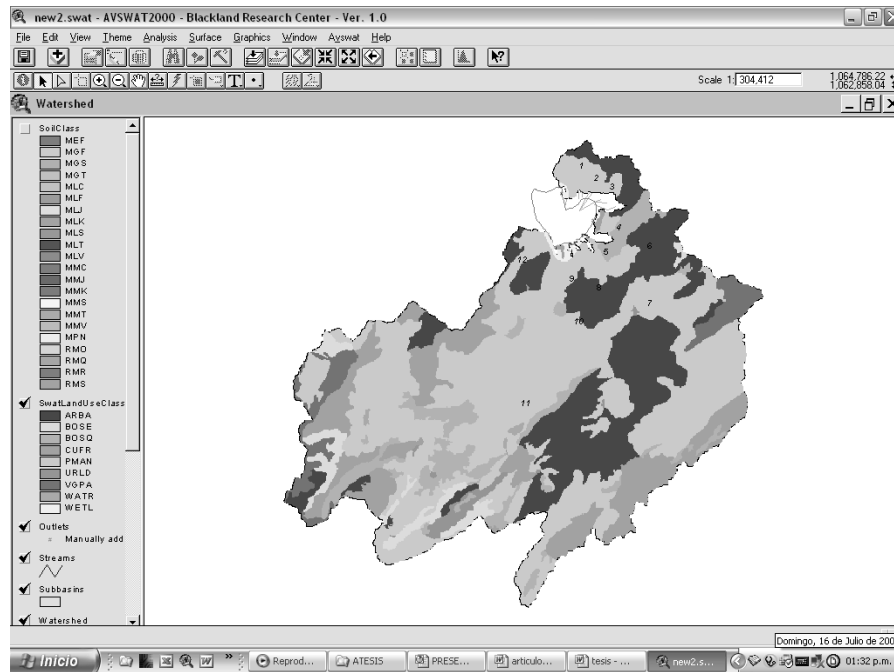


Figura 7.4. Cobertura en la cuenca tributaria de la laguna de Fúquene para el 1993-2001, Departamento de Cundinamarca, Colombia.

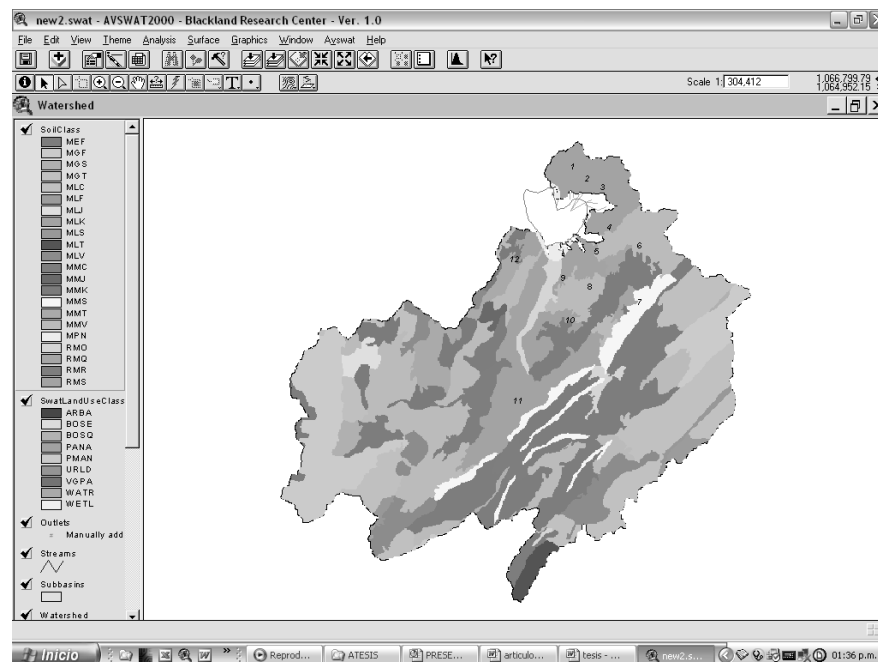


Figura 7.5. Tipo de Suelo en la cuenca tributaria de la laguna de Fúquene, Departamento de Cundinamarca, Colombia.

- Asignar datos climatológicos (ver Figura 7.6).

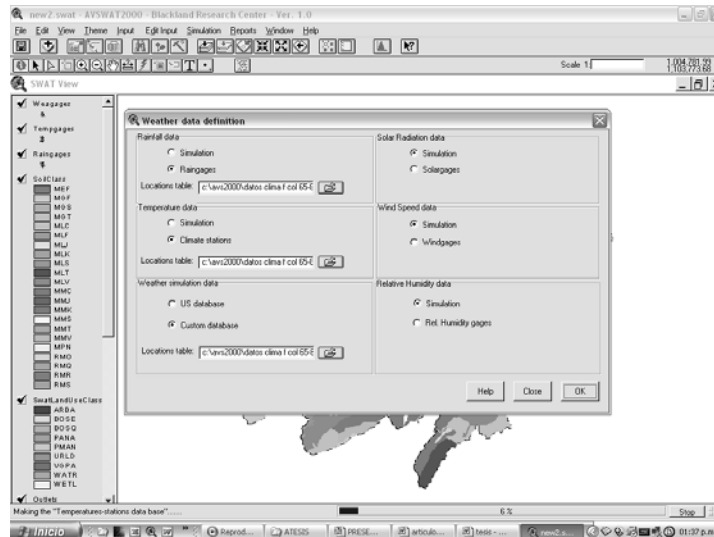


Figura 7.6. Ingreso de las estaciones con los datos climatológicos en la cuenca tributaria de la laguna de Fúquene, Departamento de Cundinamarca, Colombia.

- Después de tener todos los datos para la modelación, hacer un chequeo previo y por último procesar el modelo (ver Figura 7.7).

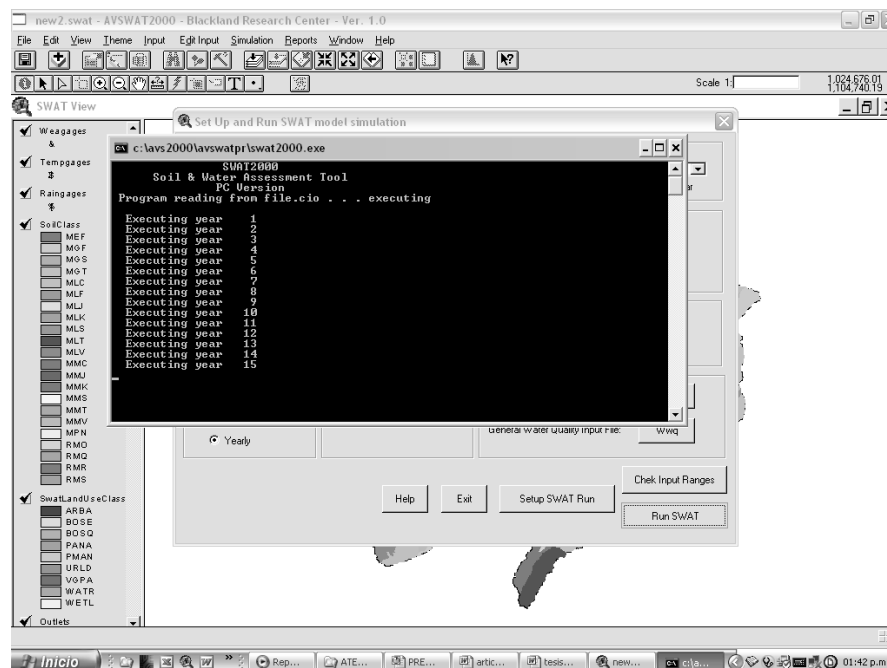


Figura 7.7. Corrida del modelo SWAT en la cuenca tributaria de la laguna de Fúquene, Departamento de Cundinamarca, Colombia.

Para el cuarto paso se generaron las entradas al modelo de ciénagas fluviales, así como también a los modelos de sedimentos y nutrientes para intervalos de tiempo decadal (10 días). Lo anterior mediante un programa en Visual Basic (ver Figura 7.8).

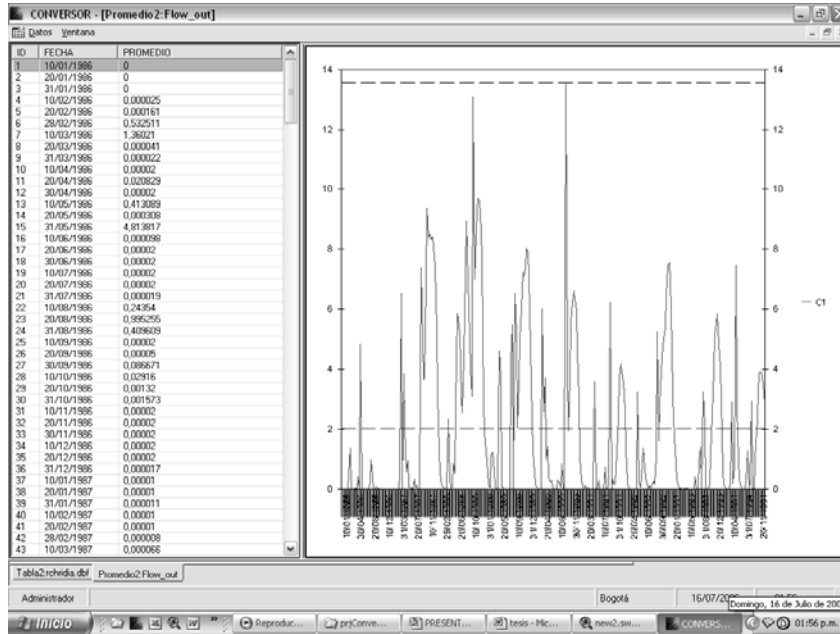
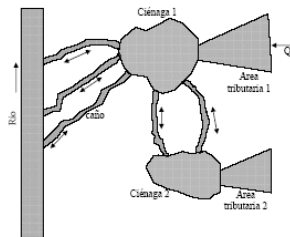


Figura 7.8. Programa de generación de archivos para intervalos decadales (10 días).

Por último se procesaron los modelos de ciénagas fluviales, sedimentos y nutrientes para realizar el balance de los cuerpos de agua en estudio (ver figura 7.9).

FIGURA 2 ESQUEMA GENERAL DE SISTEMA CENAGOSO FLUVIAL



```

C:\DOCUME~1\usuario\MISDOC~1\Paolo\UNIVER~1\POSGRADO\TES...
NUMERO DE AÑOS 4
AÑO INICIAL DE SIMULACION 1980
NUMERO DE INTERVALOS DE DIVISION DE LA DECADA <1 A 10> 4
NUMERO DE CIENAGAS <MAX 2> 1
NUMERO DE CANOS CIENAGA-RIO <MAX 3> 1
PARA LA CIENAGA 1:
CANO I =
NOMBRE ARCHIVO CURVA ENTREGA CANO I entbet1.csv
NOMBRE ARCHIVO NIVELES RIO-CANO I cotsibe5.csv
NOMBRE ARCHIVO COTA-AREA-VOL CIENAGA 1 cavbet1.csv
NOMBRE ARCHIVO PRECIPITACION <mm> prebet.csv
NOMBRE ARCHIVO EUAPORACION <mm> evapobet.csv
NOMBRE ARCHIVO ESCORRENTIA NETA CIENAGA 1 <mm> escobet2.csv
HAY ENTRADA DE CAUDAL PUNTUAL A LA CIENAGA 1 ? <S/N> n
NIVEL INICIAL CIENAGA 1 <MSNM> 20
AREA TRIB CUENGA 1 <KM2> = 500
ESCRIBA NOMBRE DE ARCHIVO DE RESULTADOS : Resultados.out
    
```

Figura 7.9. Esquema del modelo de ciénagas fluviales y corrida del mismo.

VIII. RESULTADOS Y DISCUSION

Se hizo una calibración manual de los parámetros de mayor influencia basándose en el manual de SWAT y en estudios previos como el de Maldonado et al. (2001). De los parámetros, el número de curva (CN2) tiene mayor influencia en el cálculo de la escorrentía superficial; por tanto, dicho parámetro junto con otros parámetros (SOL_AWC: capacidad del agua disponible en el suelo, CH_N: "n" Manning; GWQMN: Umbral de la altura del acuífero menos profundo, GW_REVAP: coeficiente revap del agua subterránea) fueron variados dentro de un rango admisible para cada unidad de respuesta hidrológica.

Se encontró que la respuesta del modelo SWAT no varió significativamente con la variación de los anteriores parámetros (SOL AWC, CH_N, GWQMN Y GW_REVAP). Pero SI con la selección del método de estimación de la evapotranspiración (ver Figura 8.1).

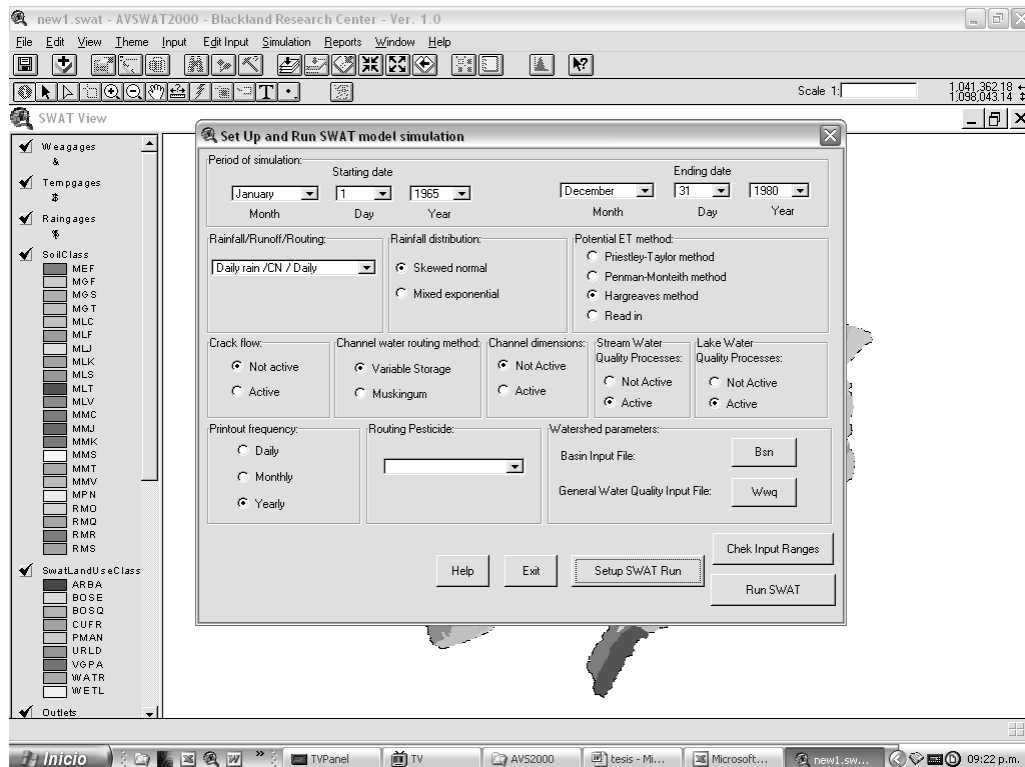


Figura 8.1. Método de evapotranspiración Potencial seleccionado (Hargreaves).

8.1 Laguna de Fúquene

En la calibración para el periodo de 1966-1980 en la estación de Puente Colorado el valor de R^2 fue de 0.76 y el coeficiente de correlación de 0.86 (promedio de caudal medio mensual simulado de $5 \text{ m}^3/\text{s}$ y observado de $4 \text{ m}^3/\text{s}$) donde se aprecia que la tendencia y los valores en general no presentan una gran diferencia, aunque no deja de ser considerable (Figura 8.2). Mientras que en la simulación para el periodo de 1993-2001 en la misma estación los criterios de ajuste disminuyen notablemente debido a que los caudales medidos en este periodo son regulados por las compuertas de Cartagena y el Cubio ($R^2 = 0.07$ y coeficiente de correlación = 0.66), pero se observa que el promedio del caudal medio mensual tiene el mismo orden de magnitud (simulado = $2.71 \text{ m}^3/\text{s}$, observado $2.18 \text{ m}^3/\text{s}$).

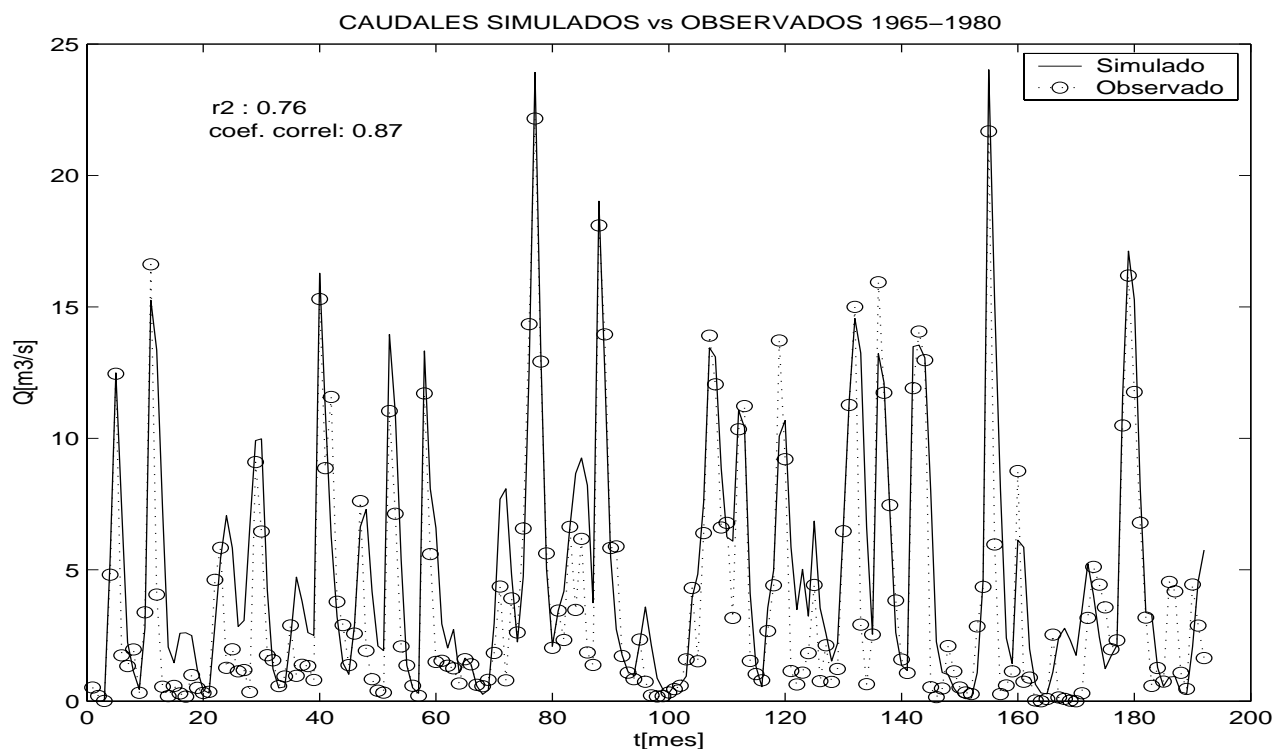


Figura 8.2. Valores de Caudales Medios mensuales Observados versus Simulados durante el periodo 1966-1980 en la estación Puente colorado (Cuenca Laguna de Fúquene).

En la Tabla 8.1 se muestran los valores de los criterios de ajuste para todas las estaciones dentro de la cuenca hidrográfica de la laguna de Fúquene para el periodo de 1993-2001; destacándose que dentro de las estaciones con caudales medidos que no se encuentran regulados ni por la Represa del Hato o por las compuertas, y además que tiene características fisiográficas y climáticas similares, las que cuentan con una cobertura vegetal mas preservada tiene una mejor simulación que las de menos preservación. Resaltando la estación Represa del Hato que se encuentra aguas arriba de la misma.

Tabla 8.1. Estaciones simuladas en la cuenca hidrográfica de la laguna de Fúquene en el periodo 1993-2001.

ESTACION	CORRIENTE	ALTURA	COORD Y	COORD X	R ²	COEF CORREL	AREA SUBCUENCA km ²	% BOSQUES, ARBUSTOS, VEG PARAMO Y PASTOS NAT	% DE CULTIVOS Y PASTOS MANEJADOS
PTE COLORADO *	R. UBATE	2544	1086738	1034990	0,07	0,66	745,2	32,3	66,2
LA BOYERA *	R. UBATE	2598	1081205	1027443	0,12	0,35	182,6	34,4	65,1
EL BOQUERON	R. LENGUAZAQUE	2558	1081213	1042223	0,05	0,21	253,6	31,6	68,2
TAPIAS	R. LENGUAZAQUE	2572	1077525	1040377	0,03	0,19	172	19,1	80,7
PINO EL	R. SUTA	2600	1074358	1026848	0,33	0,57	84,9	18,7	73,3
CORRALEJAS	Q. EL MOLINO	2830	1079359	1018206	0,52	0,64	17,9	29,7	70,3
REPRESA EL HATO	R. EL HATO	2840	1071987	1018208	0,73	0,85	33,8	75,9	24,1

* ESTACIONES CON CAUDALES REGULADOS

Al realizar el balance del cuerpo de agua para los dos periodos, se observó que en el periodo de 1966-1980 las cotas simuladas y las registradas variaron en un promedio anual de 19 cm, que representa un volumen de 4'904.596 m³ (0.16 m³/s), mientras que para el periodo de 1993-2001 la variación aumentó a 59 cm, representando un volumen de 14'638.377 m³ (0.46 m³/s) (Figura 8.3). Se Observa que la variación del volumen de agua aumentó el triple entre los dos periodos.

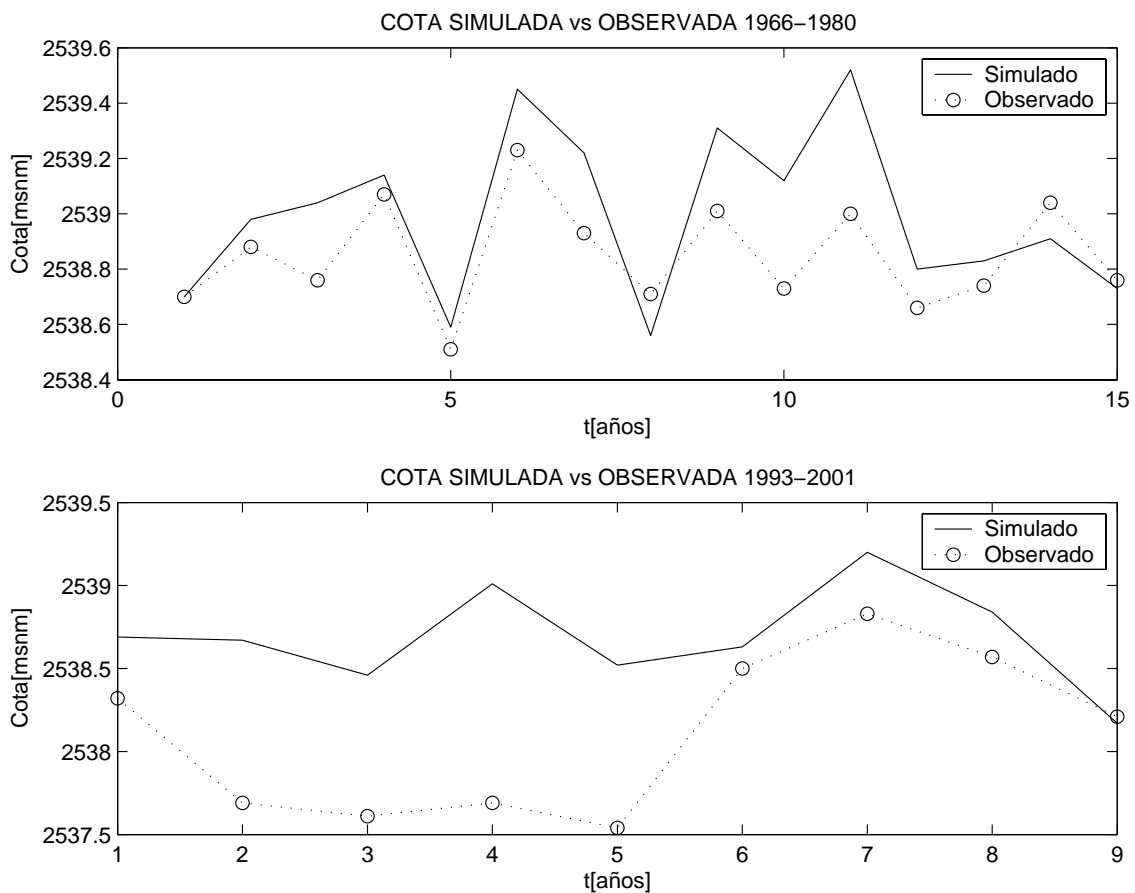


Figura 8.3. Valores de Cotas Medias Anuales Observadas versus Simuladas durante el periodo 1966-1980 y 1993-2001 en la Laguna de Fúquene.

Referente a los sedimentos producidos por el modelo SWAT, estos son de 21142 m³/año promedio anual para el periodo de 1966-1980, mientras que para el periodo 1993-2001 aumentó a 27923 m³/año, comparando este último periodo con el estimado en el estudio de la Corporación Autónoma Regional (CAR) cuyo valor es de 16068 m³/año, SWAT generó una mayor cantidad de sedimentos pero el orden de magnitud es equivalente con respecto al Observado por la entidad Ambiental (Tabla 8.2).

Tabla 8.2. Producción promedio anual de sedimentos en las cuencas tributarias en la Laguna de Fúquene en los periodos evaluados.

Sedimentos Periodo	SWAT		CAR	
	ton/año	m ³ /año	ton/año	m ³ /año
1965-1980	38055	21142	-	-
1993-2001	50261	27923	28949	16083

En cuanto a la producción de nutrientes en las cuencas tributarias a la laguna, el modelo SWAT estimó una concentración promedio anual semejante a las medidas en campo para el periodo de 1993-2001, En cuanto al periodo 1966-1980 se observó que el modelo generó menos concentración que para el periodo 1993-2001 (Tabla 8.3).

Tabla 8.3. Generación promedio anual de nutrientes en la cuenca tributaria del río Ubate en los periodos evaluados para la Laguna de Fúquene.

Nutrientes Periodo	N-Total		P-Total	
	simulado (mg/l)	observado (mg/l)	simulado (mg/l)	observado (mg/l)
1965-1980	0.90	-	0.06	-
1993-2001	1.70	1.50	0.15	0.11

Se realizó el balance de nutrientes en el cuerpo de agua para el periodo de 1993-2001 arrojando resultados similares a los tomados en campo, por lo que se puede considerar que la laguna de Fúquene excede los niveles del criterio de eutrofización en lagos (N-Total > 0.2 mg/l; P-Total > 0.02 mg/l) (Tabla 8.4).

Tabla 8.4. Balance de nutrientes en el cuerpo de agua en el periodo 1993-2001 en la Laguna de Fúquene.

Nutrientes Periodo	N-Total		P-Total	
	simulado (mg/l)	observado (mg/l)	simulado (mg/l)	observado (mg/l)
1993-2001	1.67	2.09	0.15	0.10

8.2 Ciénegas de Rinconada y Tesca

Para el caudal generado por SWAT en la cuenca hidrográfica en el periodo de simulación los criterios de ajuste son más aceptables para la ciénaga de Tesca ($R^2 = 0.5$, coeficiente de correlación = 0.74) que para la de Rinconada ($R^2 = 0.24$, coeficiente de correlación = 0.49), teniendo en cuenta que se tomaron los caudales generados en el estudio de Deeb Asociados como referencia. Se observa que el caudal medio mensual generado por SWAT es mayor que dicho estudio, pero sin embargo tiene el mismo orden de magnitud para las dos ciénegas (Figura 8.4).

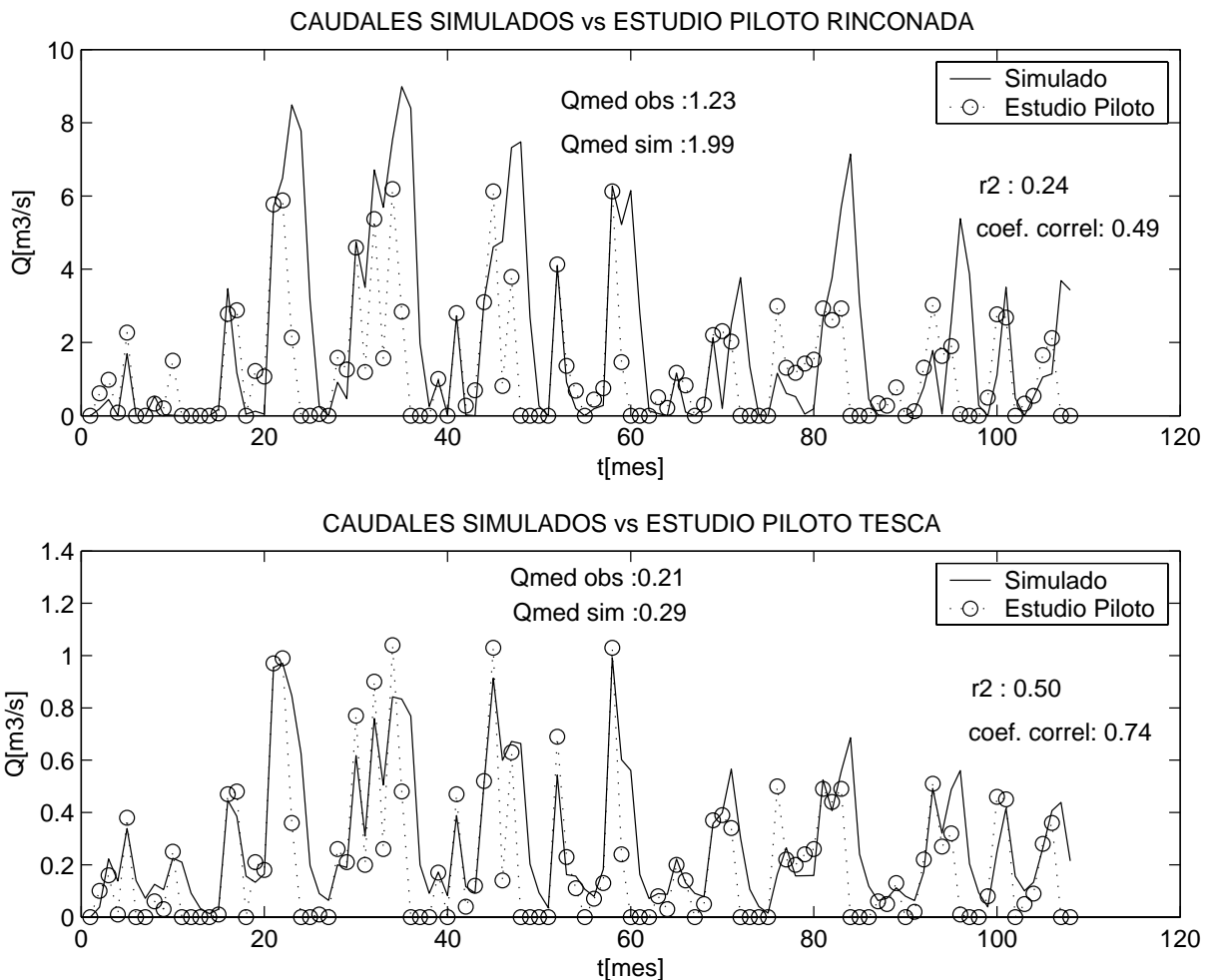


Figura 8.4. Valores de Caudales Medios mensuales Simulados versus Proyecto piloto durante el periodo 1986-1994 (Ciénegas Rinconada y Tesca).

Al realizar el balance hídrico de los cuerpos de agua se observó que para las dos ciénagas las cotas con los caudales obtenidos mediante el modelo SWAT y el proyecto piloto variaron únicamente en un promedio anual de 10 cm, siendo más altas con el modelo SWAT. Esta variación representa un volumen de 1'965.869 m³ para Rinconada y 766.667 m³ para Tesca (Figura 8.5), las direcciones de los flujos son bidireccionales como también se expresa en el proyecto piloto. La variación más importante son la magnitud de los volúmenes netos anuales de entrega del caño Menchiquejo al río Magdalena. Los volúmenes en los caños Arenal y Tesca son similares con respecto al proyecto piloto (Tabla 8.5).

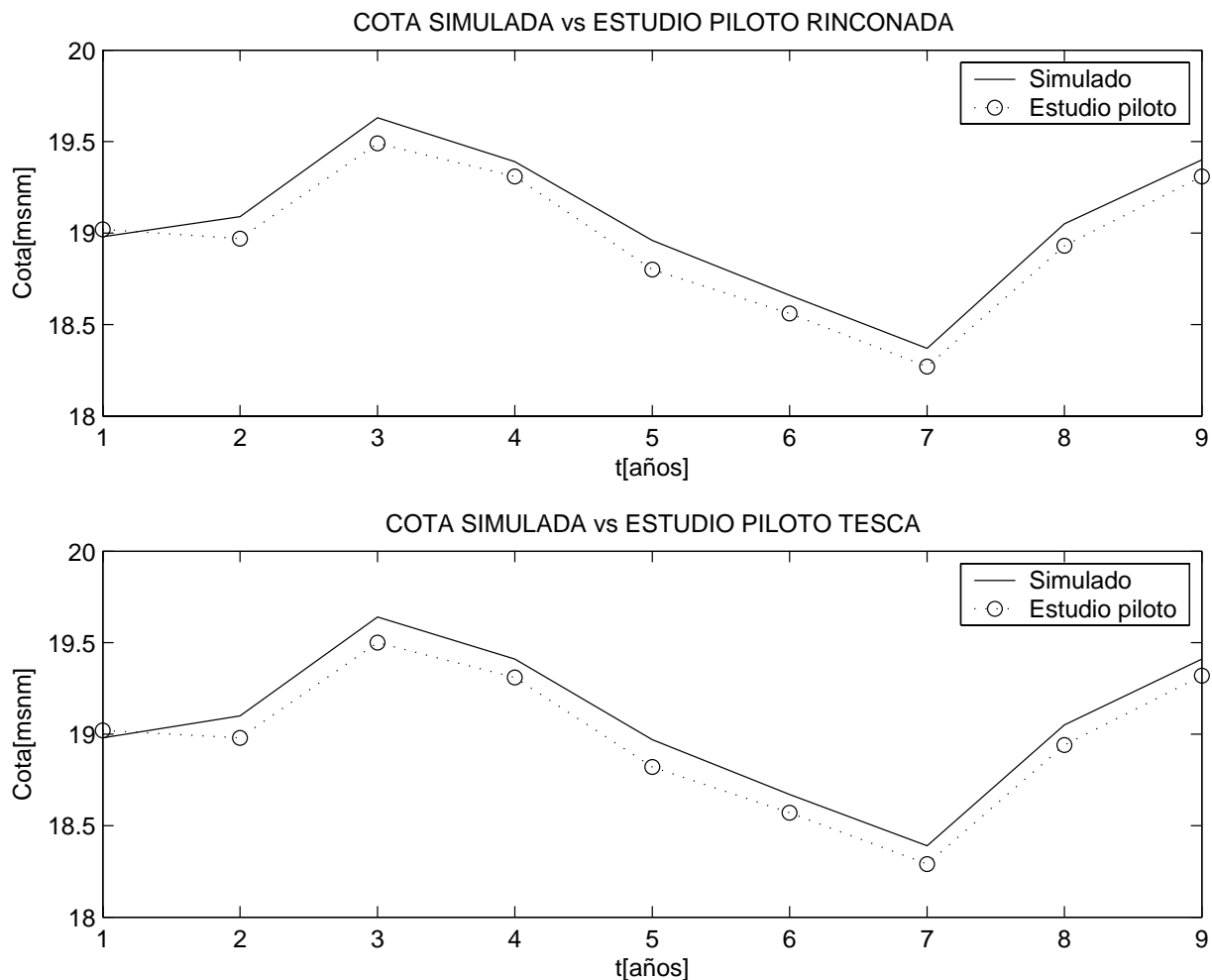


Figura 8.5. Valores de Cotas Medias Anuales simuladas versus Proyecto piloto en las ciénagas de Rinconada y tesca.

Tabla 8.5. Volúmenes de entrega en los caños de conexión entre la ciénaga de Rinconada y el río Magdalena, y entre las ciénagas Rinconada y tesca.

Volúmenes caños	Menchiquejo (m ³)	Arenal (m ³)	Tesca (m ³)
SWAT	72.4	-6.0*	15.1
PROYECTO PILOTO	47.9	-5.2*	12.3

* El signo negativo significa que el flujo va de Rinconada a tesca.

Referente a los sedimentos producidos por el modelo SWAT son de 12338 m³/año promedio anual para Rinconada y 1384 m³/año para Tesca. No se puede hacer una comparación con datos observados pero se puede resaltar que al realizar el balance de las ciénagas se observó que el aumento de los sedimentos en los cuerpos de agua es considerable (Figura 8.6).

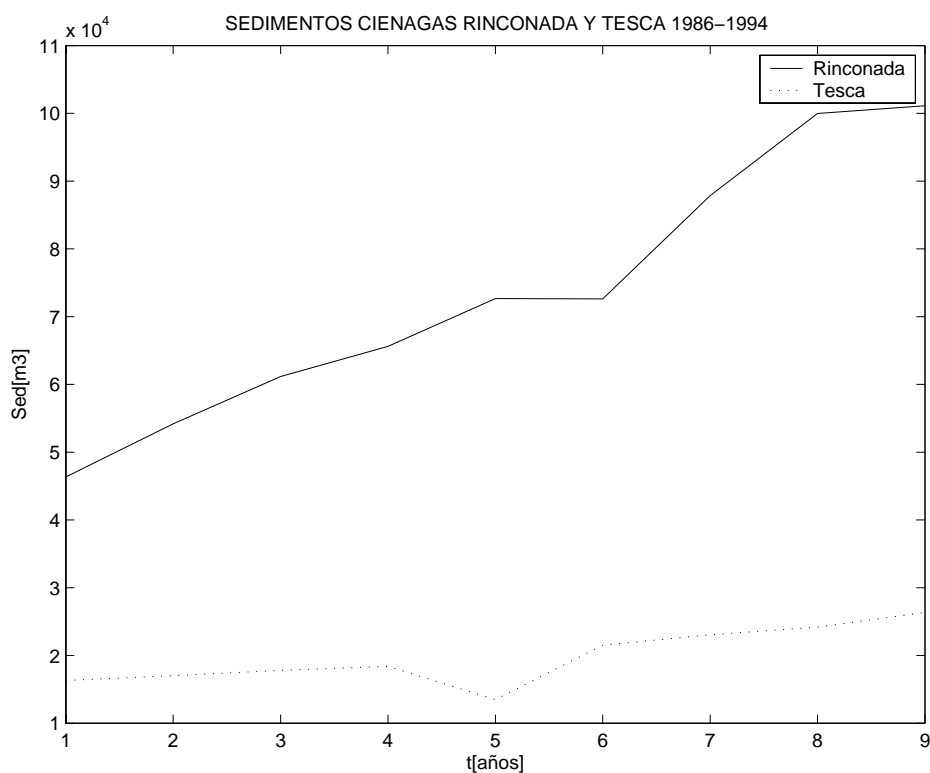


Figura 8.6. Valores promedio anual de los sedimentos simulados en las ciénagas de Rinconada y Tesca para el periodo 1986-1994.

En cuanto a la producción de nutrientes el modelo SWAT estimó concentraciones promedio anuales menores a las medidas en campo, de nitritos (NO_2) y nitratos (NO_3) (Tabla 8.6), Se resalta que los valores observados están por encima de los rangos de criterio para cuerpos eutróficos, excepto los nitratos en Rinconada ($\text{NO}_2 > 0.1 \text{ mg/l}$; $\text{NO}_3 > 0.2 \text{ mg/l}$) según Goldman (1983), mientras que de las concentraciones simuladas os nitratos en la ciénaga de Rinconada están por arriba de dichos valores, esto puede ser debido a que no se tuvieron en cuenta cargas puntuales como lo son la aplicación de fertilizantes. Al hacer el balance de nutrientes en las ciénagas se puede resaltar el aumento en la concentración dentro de los cuerpos de agua.

Tabla 8.6. Generación promedio anual de nitritos y nitratos en las cuencas tributarias de las ciénagas de Rinconada y Tesca.

Nutrientes	Nitritos (NO_2)		Nitratos (NO_3)	
	simulado (mg/l)	observado (mg/l)	simulado (mg/l)	observado (mg/l)
Rinconada	0.018	0.12	0.19	0.28
Tesca	0.010	0.21	0.08	0.87

IX. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El modelo SWAT sobreestimó los caudales picos y medios especialmente en las subcuencas simuladas de la laguna de Fúquene en el periodo 1993-2001. Por lo que también sobreestimó la producción de sedimentos y las tasas de nutrientes.

Al realizar la modelación con SWAT para los diferentes escenarios en la cuenca tributaria de la laguna de Fuquene, se observó que la preservación de las coberturas juega un papel significativo en la generación de la escorrentía superficial, así como en la pérdida del suelo.

La herramienta SWAT ha probado ser un modelo hidrológico y de calidad del agua efectivo para la modelación de múltiples subcuencas en periodos largos con tipos de suelos variados y cambios en el uso del suelo.

La simulación en la cuenca tributaria de la laguna de Fúquene muestra que hay una desviación del caudal natural que debería ir hacia el cuerpo de agua, reflejándose en la diferencia de los niveles simulados y observados al realizar el balance hídrico del mismo. Esto puede deberse al incremento del uso consuntivo de sus aguas.

La elevada producción de sedimentos y la alta tasa de nutrientes que llegan a la laguna de Fúquene después de realizada la simulación corroboran el comportamiento de desecación y eutrofización del cuerpo de agua actual, Por la alta actividad agropecuaria y ganadera en la cuenca hidrográfica.

Para las ciénagas de Rinconada y Tesca el comportamiento hídrico es muy similar con los dos modelos analizados. El incremento en las tasas de concentración de los nutrientes en los cuerpos de agua después de hacer el balance de masas para el periodo de estudio y la alta producción de sedimentos, hacen preveer una eutrofización y pérdida en su espejo de agua progresivamente.

Se recomienda:

Para el problema de la acumulación de sedimentos y el aumento de las tasas de nutrientes en los hidrosistemas modelados, la aplicación de medidas de conservación de los suelos y de cobertura vegetal para la reducción de los procesos de erosión en las cuencas, además un control con el uso de fertilizantes y plaguicidas en las prácticas agropecuarias.

La revisión de los datos hidrometeorológicos y de caudales en las estaciones disponibles, ya que son de gran importancia para poder modelar estos tipos de hidrosistemas con herramientas computacionales.

Continuar con la modelación de los hidrosistemas investigados mediante otros modelos matemáticos para la validación de las herramientas utilizada en el presente estudio.

X. REFERENCIAS

J. Herrero Latarón, M.I. Rodríguez Rojas, A. Aviles Benitez. 2004. Modelos integrales de cuencas hidrográficas y prognosis de escenarios de gestión. SWAT aplicado a la cuenca del guadalfeo. Universidad de Granada.

Diaz-Granados M, Camacho L, Maestre A. 2000. Modelación de Balances Hídricos de Ciénagas Fluviales y Costeras Colombianas. Bogotá, Colombia.

Deeb Asociados. 1996. Proyecto Piloto de Recuperación de Ciénagas. Bogotá, Colombia.

Maldonado de L. O. A., O. L. Palacios V., J. L. Oropeza M., R. Springall G., y D. S. Fernández R. 2001. Empleo del modelo SWRRB para generar alternativas de manejo en la cuenca Itzapa, Guatemala. Agrociencia 35: 335-345.

Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, J.R. Williams and K.W. King. 2001b. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation, Version 2000 (Draft). Blackland Research Center. Texas Agricultural Experiment Station, Temple, Texas.

Saleh, A., J.G. Arnold, P.W. Gassman, L.M. Hauck, W.D. Rosenthal, J.R. Williams, and A.M.S. McFarland. 2000. Application of SWAT for the Upper North Bosque River Watershed. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 43(5):1077-1087.

Rojas Laserna. 1997. Implementación de un SIG para el diagnostico del lago Tota y posibles alternativas de recuperación. Bogotá, Colombia.

Arnold, J. G., J.R. Williams, R.H. Griggs y N.B. Sammons. 1990. SWRRB - a basins scale simulation model for soil and water resources management. texas a&m. universidad press, college station.

Edward b. Barbier, Mike Agremán y Duncan Knowler. 1997. valoración económica de los humedales guía para decisores y planificadores. oficina de la convención de ramsar.

Gpw Jewitt* and R. Schulze. 1999. verification of the acru model for forest hydrology applications. website <http://www.wrc.org.za>.

J. Herrero Lantarón, M.L. Rodríguez Rojas, A. Aviles Benítez. 2004. modelos integrales de cuencas hidrográficas y prognosis de escenarios de gestión. swat aplicado a la cuenca del guadalfeo. universidad de granada.

Ongley, E.D. lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos. (estudio fao riego y drenaje - 55) 1997. capítulo 2. publicación electrónica. revisado 2002.

Sing, v.p. computer models of watershed hydrology. water resources publications 1995. 1130p.

Williams, J.R. 1995. chapter25. the epic model. p. 909-1000. in computer models of

watershed hydrology. water resources publications. highlands ranch, co.

International Foundation for Environment and Nature. save the lakes of the world. 2005.
www.livinglakes.org.

Garcia A., Palacios e. 2005. adaptation of a hydrological simulation model to the río laja watershed, hidrocencias. campus montecillo. colegio de postgraduados. guanajuato, méxico.

ANEXOS

ANEXO 1

CARACTERISTICAS DE LOS SUELOS EN LA CUENCA TRIBUTARIA DE LA LAGUNA DE FUQUENE

NOMBRE	SNAM		MEFe			MGFe			MGsg
CAPAS	NLAYERS		3			3			1
GRUPO SCS	HYDRGP		A			B			B
PROF RAICES	SOL_ZMX	[mm]	640			880			280
VACIOS EXCL	ANION_EXCL	fraction	0,5			0,5			0,5
SOL_CRK		[m3/,m3]	0			0			0
TEXTURA LAYER									
			<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>1</u>
PROFUNDIDAD	SOL_Z	[mm]	300	350	600	220	600	620	280
DENSBULBO	SOL_BD	[g/m3]	1,1	1,3	1,5	1,1	1,3	1,5	1,1
CAPAGUADISP	SOL_AWC	[mmH2O/mm]	0,04	0,04	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
CONDUCTHIDRA	SOL_K	[mm/hr]	20	19	10	3	0,7	0,5	3
CARBORGANIC	SOL_CBN	%Ws	4	4	3	4	3	2	4
ARCILLAS	CLAY	%Ws	15	11	25	38	63	61	50
LIMOS	SILT	%Ws	37	39	25	33	18	22	20
ARENAS	SAND	%Ws	48	50	50	29	19	17	30
GRAVAS	ROCK	%Ws	50	68	30	18	20	1	1
ALBEDO	SOL_ALB		0,2	0,15	0,12	0,2	0,14	0,12	0,2
ERODABILIDAD	USLE K		0,3	0,3	0,4	0,25	0,2	0,25	0,25

NOMBRE	SNAM		MGTd		MLCd				
CAPAS	NLAYERS		2		4				
GRUPO SCS	HYDRGP		A		C				
PROF RAICES	SOL_ZMX	[mm]	1200		1400				
VACIOS EXCL	ANION_EXCL	fraction	0,5		0,5				
SOL_CRK		[m3/,m3]	0		0				
TEXTURA LAYER									
			-	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>
PROFUNDIDAD	SOL_Z	[mm]		450	670	220	310	340	570
DENSBULBO	SOL_BD	[g/m3]		1,1	1,3	1,1	1,3	1,3	1,5
CAPAGUADISP	SOL_AWC	[mmH2O/mm]		0,04	0,04	0,21	0,21	0,21	0,21
CONDUCTHIDRA	SOL_K	[mm/hr]		20	19	3	0,7	0,7	0,5
CARBORGANIC	SOL_CBN	%Ws		4	4	4	4	4	2
ARCILLAS	CLAY	%Ws		15	5	38	60	60	61
LIMOS	SILT	%Ws		35	15	33	18	18	22
ARENAS	SAND	%Ws		50	80	29	22	22	17
GRAVAS	ROCK	%Ws		5	5	1	1	1	1
ALBEDO	SOL_ALB			0,2	0,15	0,2	0,15	0,15	0,12
ERODABILIDAD	USLE K			0,3	0,3	0,25	0,25	0,25	0,25

NOMBRE	SNAM			MLFf	MLJb			MLKd		
CAPAS	NLAYERS			2		2		3		
GRUPO SCS	HYDRGP			B		B		A		
PROF RAICES	SOL_ZMX	[mm]		500		1200		1800		
VACIOS EXCL	ANION_EXCL	fraction		0,5		0,5		0,5		
SOL_CRK		[m3/,m3]		0		0		0		
TEXTURA LAYER										
				<u>1</u>	<u>2</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>
PROFUNDIDAD	SOL_Z	[mm]		220	270	450	750	500	620	680
DENSBULBO	SOL_BD	[g/m3]		1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,3	1,3
CAPAGUADISP	SOL_AWC	[mmH2O/mm]		0,21	0,21	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
CONDUCTHIDRA	SOL_K	[mm/hr]		3	3	20	20	20	19	19
CARBORGANIC	SOL_CBN	%Ws		4	4	4	4	4	4	4
ARCILLAS	CLAY	%Ws		30	50	15	14	15	5	5
LIMOS	SILT	%Ws		35	20	35	34	37	15	5
ARENAS	SAND	%Ws		35	30	50	52	48	80	90
GRAVAS	ROCK	%Ws		1	1	5	1	1	5	5
ALBEDO	SOL_ALB			0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,15	0,15
ERODABILIDAD	USLE K			0,25	0,25	0,25	0,3	0,3	0,3	0,3

NOMBRE	SNAM		MLSg		MLTd					MLVf
CAPAS	NLAYERS		3		4					4
GRUPO SCS	HYDRGP		B		B					B
PROF RAICES	SOL_ZMX	[mm]	720		1700					1100
VACIOS EXCL	ANION_EXCL	fraction	0,5		0,5					0,5
SOL_CRK		[m3/,m3]	0		0					0
TEXTURA LAYER										
			<u>2</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	
PROFUNDIDAD	SOL_Z	[mm]	560	400	401	402	450	500	860	
DENSBULBO	SOL_BD	[g/m3]	1,4	1,1	1,1	1,1	1,5	1,1	1,1	
CAPAGUADISP	SOL_AWC	[mmH2O/mm]	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,1	0,21	
CONDUCTHIDRA	SOL_K	[mm/hr]	1	3	3	3	0,5	7	3	
CARBORGANIC	SOL_CBN	%Ws	3	4	4	4	2	4	4	
ARCILLAS	CLAY	%Ws	54	49	50	40	61	25	40	
LIMOS	SILT	%Ws	21	18	19	32	22	25	32	
ARENAS	SAND	%Ws	25	33	31	28	17	50	28	
GRAVAS	ROCK	%Ws	1	1	1	1	1	5	1	
ALBEDO	SOL_ALB		0,15	0,2	0,2	0,2	0,12	0,16	0,2	
ERODABILIDAD	USLE K		0,22	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	

NOMBRE	SNAM				MMCd		MMJb		MMSg
CAPAS	NLAYERS				4			2	2
GRUPO SCS	HYDRGP				B			B	A
PROF RAICES	SOL_ZMX	[mm]			660			1200	1500
VACIOS EXCL	ANION_EXCL	fraction			0,5			0,5	0,5
SOL_CRK		[m3/,m3]			0			0	0
TEXTURA LAYER									
			1	2	3	4	1	2	1
PROFUNDIDAD	SOL_Z	[mm]	160	340	341	540	430	770	150
DENSBULBO	SOL_BD	[g/m3]	1,1	1,3	1,3	1,5	1,3	1,5	1,1
CAPAGUADISP	SOL_AWC	[mmH2O/mm]	0,04	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,24
CONDUCTHIDRA	SOL_K	[mm/hr]	20	0,7	0,7	0,5	0,7	0,5	3
CARBORGANIC	SOL_CBN	%Ws	4	3	4	2	3	2	4
ARCILLAS	CLAY	%Ws	15	63	60	61	63	61	35
LIMOS	SILT	%Ws	35	18	18	22	18	22	55
ARENAS	SAND	%Ws	50	19	22	17	19	17	10
GRAVAS	ROCK	%Ws	5	1	1	1	1	1	1
ALBEDO	SOL_ALB		0,2	0,14	0,15	0,12	0,14	0,12	0,2
ERODABILIDAD	USLE K		0,25	0,2	0,25	0,25	0,2	0,25	0,25

NOMBRE	SNAM					MMKd			MMTd
CAPAS	NLAYERS					5			3
GRUPO SCS	HYDRGP					C			B
PROF RAICES	SOL_ZMX	[mm]				330			490
VACIOS EXCL	ANION_EXCL	fraction				0,5			0,5
SOL_CRK		[m3/,m3]				0			0
TEXTURA LAYER									
			1	2	3	4	5	1	2
PROFUNDIDAD	SOL_Z	[mm]	130	200	210	360	710	170	200
DENSBULBO	SOL_BD	[g/m3]	1,3	1,3	1,4	1,4	1,5	1,3	1,3
CAPAGUADISP	SOL_AWC	[mmH2O/mm]	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,24	0,24
CONDUCTHIDRA	SOL_K	[mm/hr]	0,7	0,7	0,6	0,6	0,5	0,7	0,7
CARBORGANIC	SOL_CBN	%Ws	3	4	2	2	2	3	3
ARCILLAS	CLAY	%Ws	63	60	60	60	61	15	30
LIMOS	SILT	%Ws	18	18	21	21	22	65	60
ARENAS	SAND	%Ws	19	22	19	19	17	20	10
GRAVAS	ROCK	%Ws	1	1	1	1	1	1	1
ALBEDO	SOL_ALB		0,14	0,15	0,12	0,12	0,12	0,14	0,14
ERODABILIDAD	USLE K		0,2	0,25	0,25	0,25	0,25	0,2	0,2

NOMBRE	SNAM					RMQa			
CAPAS	NLAYERS					8			
GRUPO SCS	HYDRGP					B			
PROF RAICES	SOL_ZMX	[mm]				1430			
VACIOS EXCL	ANION_EXCL	fraction				0,5			
SOL_CRK		[m3/,m3]				0			
TEXTURA LAYER									
			<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>	<u>7</u>
PROFUNDIDAD	SOL_Z	[mm]	115	120	125	195	200	201	202
DENSBULBO	SOL_BD	[g/m3]	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
CAPAGUADISP	SOL_AWC	[mmH2O/mm]	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,04	0,04
CONDUCTHIDRA	SOL_K	[mm/hr]	3	3	3	3	3	20	20
CARBORGANIC	SOL_CBN	%Ws	4	4	4	4	4	4	4
ARCILLAS	CLAY	%Ws	38	38	38	50	50	15	15
LIMOS	SILT	%Ws	33	33	33	20	20	37	37
ARENAS	SAND	%Ws	29	29	29	30	30	48	48
GRAVAS	ROCK	%Ws	1	1	1	1	1	5	5
ALBEDO	SOL_ALB		0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
ERODABILIDAD	USLE K		0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,3	0,3

NOMBRE	SNAM		MMVe		MPNd		RMOa		
CAPAS	NLAYERS		3			2		3	
GRUPO SCS	HYDRGP		B			C		C	
PROF RAICES	SOL_ZMX	[mm]	800			950		370	
VACIOS EXCL	ANION_EXCL	fraction	0,5			0,5		0,5	
SOL_CRK		[m3/,m3]	0			0		0	
TEXTURA LAYER									
			<u>2</u>	<u>3</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>
PROFUNDIDAD	SOL_Z	[mm]	220	400	400	720	150	220	830
DENSBULBO	SOL_BD	[g/m3]	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,5	1,5
CAPAGUADISP	SOL_AWC	[mmH2O/mm]	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,21	0,21
CONDUCTHIDRA	SOL_K	[mm/hr]	0,7	0,7	0,2	0,2	0,7	0,5	0,5
CARBORGANIC	SOL_CBN	%Ws	3	3	3	3	3	2	2
ARCILLAS	CLAY	%Ws	45	45	35	35	30	61	61
LIMOS	SILT	%Ws	45	45	55	55	60	22	22
ARENAS	SAND	%Ws	10	10	10	10	10	17	17
GRAVAS	ROCK	%Ws	1	35	1	1	1	1	1
ALBEDO	SOL_ALB		0,13	0,13	0,14	0,14	0,14	0,12	0,12
ERODABILIDAD	USLE K		0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,25	0,25

NOMBRE	SNAM				RMRa			RMSa	
CAPAS	NLAYERS				4			4	
GRUPO SCS	HYDRGP				C			C	
PROF RAICES	SOL_ZMX	[mm]			810			80	
VACIOS EXCL	ANION_EXCL	fraction			0,5			0,5	
SOL_CRK		[m3/m3]			0			0	
TEXTURA LAYER									
			<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>1</u>	<u>3</u>	<u>4</u>
PROFUNDIDAD	SOL_Z	[mm]	120	210	490	790	80	550	570
DENSBULBO	SOL_BD	[g/m3]	1,3	1,3	1,3	1,3	1,5	1,5	1,5
CAPAGUADISP	SOL_AWC	[mmH2O/mm]	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
CONDUCTHIDRA	SOL_K	[mm/hr]	0,7	0,7	0,7	0,7	0,2	0,2	0,2
CARBORGANIC	SOL_CBN	%Ws	3	3	3	3	2	2	2
ARCILLAS	CLAY	%Ws	30	30	30	30	0	0	0
LIMOS	SILT	%Ws	60	60	60	60	100	100	100
ARENAS	SAND	%Ws	10	10	10	10	0	0	0
GRAVAS	ROCK	%Ws	1	1	1	1	0	0	0
ALBEDO	SOL_ALB		0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
ERODABILIDAD	USLE K		0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1

ANEXO 2

CARACTERISTICAS DE LOS SUELOS EN LA CUENCA TRIBUTARIA DE LAS CIENAGAS DE RINCONADA Y TESCA

NOMBRE	SNAM			HV		MO		
CAPAS	NLAYERS			2		4		
GRUPO SCS	HYDRGP			A		D		
PROF RAICES	SOL_ZMX	[mm]		160		400		
VACIOS EXCL	ANION_EXCL	fraction		0,5		0,5		
SOL_CRK		[m3/m3]		0		0		
TEXTURA LAYER								
			<u>1</u>	<u>2</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>
PROFUNDIDAD	SOL_Z	[mm]	400	900	50	450	500	501
DENSBULBO	SOL_BD	[g/m3]	1,1	1,1	1,1	1,3	1,3	1,1
CAPAGUADISP	SOL_AWC	[mmH2O/mm]	0,04	0,21	0,04	0,21	0,21	0,21
CONDUCTHIDRA	SOL_K	[mm/hr]	20	3	20	0,7	0,7	3
CARBORGANIC	SOL_CBN	%Ws	4	4	4	3	3	4
ARCILLAS	CLAY	%Ws	15	38	15	63	63	38
LIMOS	SILT	%Ws	35	33	35	18	18	33
ARENAS	SAND	%Ws	50	29	50	19	19	29
GRAVAS	ROCK	%Ws	5	0	5	0	0	0
ALBEDO	SOL_ALB		0,2	0,2	0,2	0,14	0,14	0,2
ERODABILIDAD	USLE K		0,25	0,25	0,25	0,2	0,2	0,25

NOMBRE	SNAM				UQBC		
CAPAS	NLAYERS				5		
GRUPO SCS	HYDRGP				A		
PROF RAICES	SOL_ZMX	[mm]			1100		
VACIOS EXCL	ANION_EXCL	fraction			0,5		
SOL_CRK		[m3/,m3]			0		
TEXTURA LAYER							
			<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>
PROFUNDIDAD	SOL_Z	[mm]	100	250	350	400	500
DENSBULBO	SOL_BD	[g/m3]	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
CAPAGUADISP	SOL_AWC	[mmH2O/mm]	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
CONDUCTHIDRA	SOL_K	[mm/hr]	19	19	19	19	19
CARBORGANIC	SOL_CBN	%Ws	4	4	4	4	4
ARCILLAS	CLAY	%Ws	5	5	5	5	5
LIMOS	SILT	%Ws	5	5	5	5	15
ARENAS	SAND	%Ws	90	90	90	90	80
GRAVAS	ROCK	%Ws	5	5	5	5	5
ALBEDO	SOL_ALB		0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
ERODABILIDAD	USLE K		0,3	0,3	0,3	0,3	0,3

NOMBRE	SNAM			GL				UQAB	
CAPAS	NLAYERS			4				3	
GRUPO SCS	HYDRGP			B				B	
PROF RAICES	SOL_ZMX	[mm]		650				100	
VACIOS EXCL	ANION_EXCL	fraction		0,5				0,5	
SOL_CRK		[m3/,m3]		0				0	
TEXTURA LAYER									
			<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>
PROFUNDIDAD	SOL_Z	[mm]	100	140	410	850	150	450	500
DENSBULBO	SOL_BD	[g/m3]	1,1	1,3	1,1	1,3	1,1	1,1	1,3
CAPAGUADISP	SOL_AWC	[mmH2O/mm]	0,04	0,21	0,21	0,21	0,04	0,21	0,21
CONDUCTHIDRA	SOL_K	[mm/hr]	20	0,7	3	0,7	20	3	0,7
CARBORGANIC	SOL_CBN	%Ws	4	3	4	3	4	4	3
ARCILLAS	CLAY	%Ws	15	63	38	63	15	38	63
LIMOS	SILT	%Ws	35	18	33	18	37	33	18
ARENAS	SAND	%Ws	50	19	29	19	48	29	19
GRAVAS	ROCK	%Ws	5	0	0	0	5	0	0
ALBEDO	SOL_ALB		0,2	0,14	0,2	0,14	0,2	0,2	0,14
ERODABILIDAD	USLE K		0,25	0,2	0,25	0,2	0,3	0,25	0,2

NOMBRE	SNAM				CL		
CAPAS	NLAYERS				5		
GRUPO SCS	HYDRGP				B		
PROF RAICES	SOL_ZMX	[mm]			540		
VACIOS EXCL	ANION_EXCL	fraction			0,5		
SOL_CRK		[m3/,m3]			0		
TEXTURA LAYER							
			<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>
PROFUNDIDAD	SOL_Z	[mm]	100	101	150	190	960
DENSBULBO	SOL_BD	[g/m3]	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
CAPAGUADISP	SOL_AWC	[mmH2O/mm]	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
CONDUCTHIDRA	SOL_K	[mm/hr]	20	20	20	20	20
CARBORGANIC	SOL_CBN	%Ws	4	4	4	4	4
ARCILLAS	CLAY	%Ws	15	15	15	15	15
LIMOS	SILT	%Ws	35	35	35	35	35
ARENAS	SAND	%Ws	50	50	50	50	50
GRAVAS	ROCK	%Ws	5	5	5	20	10
ALBEDO	SOL_ALB		0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
ERODABILIDAD	USLE K		0,25	0,25	0,25	0,25	0,25

NOMBRE	SNAM			SA		
CAPAS	NLAYERS			4		
GRUPO SCS	HYDRGP			A		
PROF RAICES	SOL_ZMX	[mm]		1000		
VACIOS EXCL	ANION_EXCL	fraction		0,5		
SOL_CRK		[m3/,m3]		0		
TEXTURA LAYER						
			<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>
PROFUNDIDAD	SOL_Z	[mm]	130	420	450	500
DENSBULBO	SOL_BD	[g/m3]	1,3	1,3	1,3	1,1
CAPAGUADISP	SOL_AWC	[mmH2O/mm]	0,04	0,04	0,04	0,21
CONDUCTHIDRA	SOL_K	[mm/hr]	19	19	19	3
CARBORGANIC	SOL_CBN	%Ws	4	4	4	4
ARCILLAS	CLAY	%Ws	5	5	5	50
LIMOS	SILT	%Ws	15	15	15	20
ARENAS	SAND	%Ws	80	80	80	30
GRAVAS	ROCK	%Ws	5	5	5	5
ALBEDO	SOL_ALB		0,15	0,15	0,15	0,2
ERODABILIDAD	USLE K		0,3	0,3	0,3	0,25

ANEXO 3

NUMERO DE CURVA PARA LAS DIFERENTES COBERTURAS VEGETALES

ICNUM	CPNM	IDC	CROPNAME	CN2A	CN2B	CN2C	CN2D
1	ARBA	6	ARBUSTAL	32,00	56,00	65,00	73,00
2	RABO	6	Rastrojos y bosques	36,00	58,00	71,00	78,00
3	PARA	6	Pastos y rastrojos	46,00	67,00	78,00	83,00
4	PANA	6	PASTOS NATURALES	49,00	69,00	79,00	84,00
5	PMAN	6	PASTOS MANEJADOS	54,00	71,00	80,00	85,00
6	BOSQ	7	BOSQUE	30,00	55,00	73,00	79,00
7	BOSE	7	Bosque secundario	45,00	66,00	77,00	83,00
8	BOAA	7	Bosque alto-andino	33,00	57,00	70,00	74,00
9	CUFR	4	Cultivos generales frio	67,00	77,00	83,00	87,00
10	VGPA	6	PAJONALES DE PARAMO	28,00	45,00	63,00	71,00

ANEXO 4

COTA-AREA-VOLUMEN LAGUNA DE FUQUENE

COTA (msnm)	AREA (m2)	VOLUMEN (m3)
2533	0	0
2534	1000000	700000
2535	1750000	1800000
2536	2750000	3800000
2537	7000000	8200000
2537,5	18000000	14100000
2538	23000000	23800000
2539	29500000	51000000
2540,15	33000000	81000000

ANEXO 5

NIVELES, VOLUMENES Y AREAS ANUALES SIMULADOS CON LOS CAUDALES GENERADOS POR SWAT EN LA LAGUNA DE FUQUENE PARA EL PERIODO 1966-1980

	SWAT		
	PROMEDIO FUQUENE		
	NIVEL (m)	VOLUMEN (m ³)	AREA (m ²)
1966	2538,70	42697745,00	27445128,44
1967	2538,98	50209087,00	28802740,50
1968	2539,04	51969267,44	29079903,83
1969	2539,14	54654857,89	29554034,94
1970	2538,59	39758321,00	26740951,11
1971	2539,45	62583033,22	30773119,39
1972	2539,22	56618870,44	29637398,50
1973	2538,56	38820162,22	26192636,28
1974	2539,31	59137065,33	30216357,06
1975	2539,12	54004511,44	29643340,72
1976	2539,52	64410951,89	30910436,78
1977	2538,80	45230935,50	27225108,50
1978	2538,83	46259202,28	27916862,22
1979	2538,91	48205518,94	28204473,78
1980	2538,73	43612263,83	27324432,50
PROMEDIO	2538,99	50544786	28644462
MAX	2539,52	64410952	30910437
MIN	2538,56	38820162	26192636
RANGO VAR	0,96	25590790	4717801

ANEXO 6

NIVELES, VOLUMENES Y AREAS ANUALES OBSERVADOS EN LA LAGUNA DE FUQUENE EN EL PERIODO DE 1966-1980

		OBSERVADO	
		PROMEDIO FUQUENE	
	NIVEL (m)	VOLUMEN (m ³)	AREA (m ²)
1966	2538,70	42840000	27550000
1967	2538,88	47736000	28720000
1968	2538,76	44472000	27940000
1969	2539,07	52826087	29713043
1970	2538,51	37672000	26315000
1971	2539,23	57000000	30200000
1972	2538,93	49096000	29045000
1973	2538,71	43112000	27615000
1974	2539,01	51260870	29530435
1975	2538,73	43656000	27745000
1976	2539,00	51000000	29500000
1977	2538,66	41752000	27290000
1978	2538,74	43928000	27810000
1979	2539,04	52043478	29621739
1980	2538,76	44472000	27940000
PROMEDIO	2538,85	46857762	28435681
MAX	2539,23	57000000	30200000
MIN	2538,51	37672000	26315000
RANGO VAR	0,72	19328000	3885000

ANEXO 7

NIVELES, VOLUMENES Y AREAS ANUALES SIMULADOS CON LOS CAUDALES GENERADOS POR SWAT EN LA LAGUNA DE FUQUENE PARA EL PERIODO 1993-2001

		SWAT	
		PROMEDIO FUQUENE	
	NIVEL	VOLUMEN	AREA
1993	2538,69	42518446	27308867
1994	2538,67	41870461	27111774
1995	2538,46	36330249	25958007
1996	2539,01	50888614	28739244
1997	2538,52	38130706	25863254
1998	2538,63	40927815	26815947
1999	2539,20	55985627	29614742
2000	2538,84	46575406	27826540
2001	2538,17	28943496	23794361
PROMEDIO	2538,66	41777715	26966182
MAX	2539,20	55985627	29614742
MIN	2538,17	28943496	23794361
RANGO VAR	1,03	27042131	5820381

ANEXO 8

NIVELES, VOLUMENES Y AREAS ANUALES OBSERVADOS EN LA LAGUNA DE FUQUENE EN EL PERIODO DE 1993-2001

		OBSERVADO	
		PROMEDIO FUQUENE	
	NIVEL	VOLUMEN	AREA
1993	2538,32	32426286	25061429
1994	2537,69	17708400	19860000
1995	2537,61	16137000	19050000
1996	2537,69	17866833	19941667
1997	2537,54	14940667	18433333
1998	2538,50	37325818	26232273
1999	2538,83	46456535	28414245
2000	2538,57	39232147	26687829
2001	2538,21	29555248	24375335
PROMEDIO	2538,11	27960993	21429784
MAX	2538,83	46456535	28414245
MIN	2537,54	14940667	18433333
RANGO VAR	1,29	31515868	9980912

ANEXO 9

NIVELES, VOLUMENES Y AREAS ANUALES SIMULADOS CON LOS CAUDALES GENERADOS POR SWAT EN LAS CIENAGAS DE RINCONADA Y TESCA EN EL PERIODO DE 1986-1994

					SWAT				
		PROMEDIO RINCONADA					PROMEDIO TESCA		
	NIVEL	VOLUMEN	AREA	CAUDAL MEN	NIVEL	VOLUMEN	AREA	CAUDAL ARENAL	CAUDAL TESCA
1986	18,98	44794512	20201686	-0,70	18,98	9041383	7374757	-0,19	-0,01
1987	19,09	46468961	20541998	3,25	19,10	9846753	8050988	-0,12	0,51
1988	19,63	54987698	22273155	4,79	19,64	14156356	8663779	-0,02	0,46
1989	19,40	51321025	21528208	4,43	19,41	12213544	8473803	-0,06	0,84
1990	18,96	44481140	20138466	2,56	18,97	8855761	8016629	-0,24	0,56
1991	18,66	39761972	19178871	1,54	18,67	6480458	7720504	-0,27	0,57
1992	18,38	35271038	18265165	2,41	18,39	4360008	7297477	-0,32	0,65
1993	19,05	45859695	20418151	0,85	19,05	9474250	8105970	-0,33	0,37
1994	19,41	51430103	21550264	1,81	19,41	12273053	8462330	-0,19	0,42
PROM	19,12	46041794	20455107	2,33	19,07	9633507	8018470	-0,19	0,49
MAX	19,63	54987698	22273154	4,79	19,64	14156356	8663778	-0,02	0,84
MIN	18,38	35271038	18265164	-0,70	18,39	4360008	7297477	-0,33	-0,01
RANGO VAR	1,25	19716661	4007990	5,48	1,24	9796348	1366301	0,31	0,85

ANEXO 10

NIVELES, VOLUMENES Y AREAS ANUALES EN LAS CIENAGAS DE RINCONADA Y TESCA EN EL PERIODO DE 1986-1994 GENERADOS POR EL PROYECTO PILOTO.

					PROYECTO PILOTO				
		PROMEDIO RINCONADA					PROMEDIO TESCA		
	NIVEL	VOLUMEN	AREA	CAUDAL MEN	NIVEL	VOLUMEN	AREA	CAUDAL ARENAL	CAUDAL TESCA
1986	19,02	45404510	20325586	-0,27	19,02	9386036	7506958	-0,20	0,01
1987	18,97	44630620	20168326	2,39	18,98	9057125	7328139	-0,05	0,42
1988	19,49	52776956	21823815	2,36	19,50	13130978	7989702	-0,02	0,30
1989	19,31	49869884	21233254	3,43	19,31	11485195	8377611	-0,13	0,90
1990	18,81	41969805	19627905	1,45	18,82	7708440	7455786	-0,19	0,39
1991	18,56	38041165	18828840	1,24	18,57	5696029	7300321	-0,24	0,47
1992	18,27	33570282	17919868	1,93	18,29	3738655	6395479	-0,32	0,64
1993	18,94	44074622	20055013	0,31	18,94	8698477	7482775	-0,17	0,10
1994	19,31	49995476	21258551	1,01	19,32	11589940	8363690	-0,18	0,32
PROM	19,03	44481480	20137906	1,54	18,97	8943430	7577828,83	-0,17	0,39
MAX	19,49	52776956	21823815	3,43	19,50	13130977	8377610,65	-0,02	0,90
MIN	18,27	33570282	17919868	-0,27	18,29	3738654	6395478,52	-0,32	0,01
RANGO VAR	1,22	19206674	3903947	3,69	1,20	9392322	1982132,13	0,30	0,89

ANEXO 11

SEDIMENTOS GENERADOS POR SWAT EN LA LAGUNA DE FUQUENE PARA LOS DOS PERIODOS

PERIODO 1966-1980

	ENTRADA
	SEDIMENTOS (ton)
1966	91506
1967	32627
1968	31960
1969	58246
1970	11387
1971	59137
1972	40355
1973	76790
1974	16110
1975	20620
1976	39385
1977	47452
1978	30804
1979	13320
1980	1129
	SED (ton/año)
	38055
	SED (m3/año)
	21142

PERIODO 1993-2001

	ENTRADA			
	SEDIMENTOS (ton)		BALANCE	NO HAY DATOS OBSERV
	SWAT	CAR (OBSERV)	(ton)	
1993	16574		19327	
1994	31946		21273	
1995	13515		34788	
1996	48243		43032	
1997	40804		53836	
1998	91141		64977	
1999	168446		83423	
2000	20951		94374	
2001	20729		105103	
PROM SED (ton/año)	50261	28949	57793	
PROM SED (m3/año)	27923	16083	32107	

ANEXO 12

NITROGENO GENERADO POR SWAT
EN LA CUENCA TRIBUTARIA
LAGUNA DE FUQUENE EN EL
PERIODO DE 1993-2001

	ENTRADA LAGUNA		
	SWAT		OBSER VADO
	N total	N total	N total
	(kg/m3)	(mg/l)	(mg/l)
1993	0,0048	4,78	
1994	0,0009	0,93	
1995	0,0010	1,00	
1996	0,0019	1,88	1,39
1997	0,0009	0,85	0,90
1998	0,0008	0,77	
1999	0,0024	2,36	2,2
2000	0,0002	0,24	
2001	0,0005	0,46	
PROM	0,0014	1,40	
PROM		1,70	1,50

BALANCE DE NITROGENO EN LA
EN LA LAGUNA DE FUQUENE PARA EL DE LA
PERIODO DE 1993-2001

	BALANCE LAGUNA		
	SWAT		OBSER VADO
	N total	N total	N total
	(kg/m3)	(mg/l)	(mg/l)
1993	0,0041	4,1	
1994	0,0017	1,7	
1995	0,0008	0,8	
1996	0,0023	2,3	3,01
1997	0,0011	1,1	1,33
1998	0,0008	0,8	
1999	0,0016	1,6	1,94
2000	0,0018	1,8	
2001	0,0021	2,1	
PRO M	0,0018	1,81	
PRO M		1,67	2,09

ANEXO 13

FOSFORO GENERADO POR SWAT
EN LA CUENCA TRIBUTARIA DE LA
LAGUNA DE FUQUENE EN EL
PERIODO DE 1993-2001

	ENTRADA LAGUNA		
	SWAT		OBSER VADO
	P total	P total	P total
	(kg/m3)	(mg/l)	(mg/l)
1993	0,00042	0,42	
1994	0,00009	0,09	
1995	0,00010	0,10	
1996	0,00010	0,10	0,04
1997	0,00009	0,09	0,16
1998	0,00017	0,17	0,06
1999	0,00023	0,23	0,18
2000	0,00002	0,02	
2001	0,00002	0,02	
PROM	0,00014	0,14	
PROM		0,15	0,11

BALANCE DE FOSFORO
EN LA LAGUNA DE FUQUENE PARA EL
PERIODO DE 1993-2001

	BALANCE LAGUNA		
	SWAT		OBSER VADO
	P total	P total	P total
	(kg/m3)	(mg/l)	(mg/l)
1993	0,0001	0,1	
1994	0,0001	0,1	
1995	0,0002	0,2	
1996	0,00009	0,09	0,06
1997	0,00016	0,16	0,11
1998	0,00014	0,14	0,07
1999	0,00019	0,19	0,15
2000	0,00018	0,18	
2001	0,00012	0,12	
PROM	0,00014	0,14	
PROM		0,15	0,10

ANEXO 14

SEDIMENTOS GENERADOS POR SWAT
EN LAS CIENAGAS DE RINCONADA
PARA EL PERIODO 1993-2001.

ENTRADA SEDIMENTOS (ton)	
RINCONADA	
1986	33710
1987	13829,1
1988	12555,8
1989	7984
1990	12714,9
1991	36701
1992	27731
1993	21775,5
1994	32869
SED (ton/año)	
22208	
SED (m3/año)	
12338	

BALANCE DE SEDIMENTOS EN LA CIENAGA DE
RINCONADA PARA EL PERIODO 1993-2001.

	BALANCE (ton)	RINCONADA (m3)
1986	83410	46339
1987	97539	54188
1988	110095	61164
1989	118079	65599
1990	130794	72663
1991	130692	72607
1992	158165	87869
1993	179941	99967
1994	182014	101119

ANEXO 15

SEDIMENTOS GENERADOS POR SWAT
EN LAS CIENAGAS DE TESCA
PARA EL PERIODO 1993-2001.

ENTRADA SEDIMENTOS (ton)	
TESCA	
1986	4366
1987	1261
1988	1392
1989	1081
1990	1180
1991	4426
1992	2810
1993	2028
1994	3880
SED (ton/año)	
2492	
SED (m3/año)	
1384	

BALANCE DE SEDIMENTOS EN LA CIENAGA DE
TESCA PARA EL PERIODO 1993-2001.

	BALANCE (ton)	TESCA
1986	29366	16314
1987	30627	17015
1988	32019	17788
1989	33100	18389
1990	24280	13489
1991	38706	21503
1992	41516	23064
1993	43544	24191
1994	47424	26347

NITRATOS GENERADO POR SWAT
CUENCA TRIBUTARIA
DE LA CIENAGA DE RINCONADA EN EL
PERIODO DE 1986-1994

	ENTRADA RINCONADA		
	SWAT		OBSERVADO
	NO3	NO3	NO3
	(kg/m3)	(mg/l)	(mg/l)
1986	0,000766	0,77	
1987	0,000164	0,16	
1988	0,000063	0,06	
1989	0,000110	0,11	
1990	0,000127	0,13	
1991	0,000251	0,25	
1992	0,000055	0,05	
1993	0,000091	0,09	
1994	0,000121	0,12	
PROM	0,00019	0,19	0,28
PROM			

ANEXO 16

BALANCE DE NITRATOS EN LA
CIENAGA DE RINCONADA PARA EL
PERIODO DE 1993-2001.

	BALANCE RINCONADA		
	SWAT		OBSERVADO
	NO3	NO3	NO3
	(kg/m3)	(mg/l)	(mg/l)
1986	0,000136	0,136	
1987	0,00015	0,15	
1988	0,000156	0,156	
1989	0,00022	0,22	
1990	0,000233	0,233	
1991	0,000195	0,195	
1992	0,00024	0,24	
1993	0,00028	0,28	
1994	0,0003	0,3	
PROM	0,0002122	0,212	
PROM			

NITRATOS GENERADO POR SWAT
EN LA CUENCA TRIBUTARIA
DE LA CIENAGA DE TESCA EN EL
PERIODO DE 1986-1994

	ENTRADA TESCA		
	SWAT		OBSERVADO
	NO3	NO3	NO3
	(kg/m3)	(mg/l)	(mg/l)
1986	0,00008	0,08	
1987	0,00011	0,11	
1988	0,00007	0,07	
1989	0,00009	0,09	
1990	0,00010	0,10	
1991	0,00007	0,07	
1992	0,00004	0,04	
1993	0,00005	0,05	
1994	0,00008	0,08	
PROM	0,0000798	0,08	0,87
PROM			

ANEXO 17

BALANCE DE NITRATOS EN LA CIENAGA DE
TESCA PARA EL PERIODO DE 1993-2001.

	BALANCE TESCA		
	SWAT		OBSERVADO
	NO3	NO3	NO3
	(kg/m3)	(mg/l)	(mg/l)
1986	0,0000135	0,0135	
1987	0,000014	0,014	
1988	0,000016	0,016	
1989	0,000015	0,015	
1990	0,000017	0,017	
1991	0,000018	0,018	
1992	0,000018	0,018	
1993	0,000019	0,019	
1994	0,0000205	0,0205	
PROM	0,00002	0,017	
PROM			