



UNIVERSIDAD FEDERAL DE SERGIPE
PRO-RECTORIA DE POS-GRADUACION Y PESQUISA
PROGRAMA DE POS-GRADUACION EN RECURSOS HÍDRICOS

RICARDO DAVID CASTILLO SALAZAR

MODELAMIENTO HIDROSEDIMENTOLOGICO DE LA
CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RIO BETUME, BAJO
SAN FRANCISCO SERGIPANO

São Cristóvão

2016

RICARDO DAVID CASTILLO SALAZAR

**MODELAMIENTO HIDROSEDIMENTOLOGICO DE LA
CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RIO BETUME, BAJO
SAN FRANCISCO SERGIPANO**

Disertación del Curso de Maestría presentada al Núcleo del Programa de Pós-graduação en Recursos Hídricos (PRORH) de la Universidad Federal de Sergipe, como parte de los requisitos exigidos para obtener el título de Master en Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Antenor de Oliveira Aguiar Netto

São Cristóvão

2016

Epígrafa

Porque la tierra que bebe la lluvia que muchas veces cae sobre ella, y produce hierba provechosa a aquellos por los cuales es labrada, recibe bendición de Dios. (Hebreos 6:7)

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco inmensamente a Dios por las bendiciones que he recibido sin merecerlas, y por ayudarme e iluminarme siempre en mi vida personal y profesional.

A mis padres Rosa, Arnaldo y a mi abuelita Aidita; por estar siempre apoyandome, alentando y orando para alcanzar mis objetivos, a pesar de la distancia los sentí cerca de mi. Y a mis Hermanos por estar siempre a mi lado.

Al Profesor Doctor Antenor Aguiar Netto, por la orientación, confianza y amistad. En especial por la paciencia y apoyo incondicional en el desarrollo de esta investigación. ¡Dios lo bendiga siempre!

A Irane Gonçalves por la ayuda para realizar el programa de maestría en la prestigiosa Universidad Federal de Sergipe.

A los profesores del Programa de Posgrado en Recursos Hídricos, por las clases y todo el apoyo para la realización de estudios y ampliación de conocimientos.

A los técnicos e investigadores del Proyecto Águas do São Francisco y al grupo ACQUA, especialmente a Thadeu Ismerim y Ricardo Rogério, muchas gracias por el apoyo logístico y especialmente por la amistad y la ayuda durante la recolección de datos de campo.

A mis compañeros de la maestría, gracias por la calidez, la acogida, la amistad y su camaradería. Especialmente a Julieta, Jeisikailany y Amanda, por el intercambio de experiencias y convivencias. De ustedes aprendí que 'la amistad lo es todo'.

A Natalia Negromonte por su amistad, paciencia, apoyo y ayuda en todo momento desde mi llegada a Brasil.

A Beatriz Santiago, por la amistad, el compañerismo y la ayuda incondicional para completar este trabajo y a los profesores Marinoé y Fabio cuyos aportes fue decisiva para finalizar esta investigación.

A la CAPES por el otorgamiento de la beca.

Esta investigación tuvo el apoyo del proyecto:

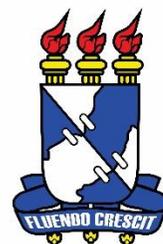
ÁGUAS

do São Francisco

REALIZAÇÃO:



SergipeTec
Sergipe Parque Tecnológico



Universidade Federal de Sergipe

PATROCÍNIO:



PETROBRAS

GOVERNO FEDERAL
BRASIL
PÁTRIA EDUCADORA

RESUMEN

El uso racional de los recursos hídricos en una cuenca hidrográfica es indispensable para su sostenibilidad y desarrollo socioeconómico. El uso adecuado del suelo y la cobertura vegetal está estrechamente relacionado con la conservación de los recursos hídricos, como a la preservación del medio ambiente. Una herramienta importante para la representación y comprensión del comportamiento hidrológico de una cuenca es el modelamiento matemático. En este sentido, a partir del monitoreo cuantitativo del caudal, se utilizó el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool), con el que se utilizó la dinámica hidrosedimentológica de la cuenca del río Betume en el Bajo São Francisco Sergipano, el modelo utiliza una base de datos especializada de la cuenca, que consiste en información geográfica, pedológica, hidrológica y climática. Se realizaron tres escenarios debido al uso de la tierra simulando la producción de agua y sedimentos. El modelamiento mostró que la dinámica de la cuenca se basa principalmente en el flujo de escurrimiento de base. De los 3 escenarios hipotéticos realizados, el escenario de Reforestación produjo la tasa más baja de producción de agua y sedimentos, y el escenario de Agricultura presentó las tasas más altas. Se observa que los cambios en el uso y ocupación de la tierra influyen en el régimen de producción de agua y sedimentos en la cuenca. Con todo se destaca que la presencia de vegetación nativa asegura una mayor disponibilidad de agua para los múltiples usos del agua en la región.

PALABRAS CLAVE: Recursos Hídricos, Cuenca Hidrográfica, Modelamiento Hidrológico, SWAT

ABSTRACT

The rational use of water resources of a river basin is essential for sustainability and socio-economic development. Proper land use and vegetation cover is directly related to the conservation of water resources and the preservation of the environment. An important tool for the representation and understanding of the hydrological behavior of a watershed is modeling. In this sense, from the quantitative monitoring of the flow, used the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model, which is used to study the dynamics of the hydrossedimentological river basin Betume in the Lower São Francisco in the estate of Sergipe. The model uses a specialized database of the basin, consisting of geographical, soil, hydrological and climate information. Had accomplished three scenarios depending on the land use simulating the production of water and sediments. The modeling demonstrated that the dynamics of the basin is mainly based on the base flow stream. Of the three hypothetical scenarios performed, the Reforestation scenario produced the lowest water and sediment production rate, and the Agriculture scenario had the highest rates. Having noticed the changes in land use and occupation influence the water production system and sediments in the basin. Overall, it is noteworthy that the presence of native vegetation ensures the highest water availability for multiple uses of water in the region.

KEYWORDS: Water Resources, Hydrographic basin, Hydrological modeling, SWAT.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Mapa de localización de la cuenca del río rio Betume.....	23
Figura 3.2 – Modelo digital de elevación de la cuenca del río Betume.....	25
Figura 3.3 – Tipos de suelo y puntos de muestreo en la cuenca del río Betume.....	27
Figura 3.4 – Mapa de uso de la tierra de la cuenca del río Betume.....	28
Figura 3.5 – Perfil de la sección transversal aguas arriba del río en el puente Serigy con el ancho y las profundidades para la determinación del caudal del río Betume.....	29
Figura 3.6 A – Mapa de puntos de monitoreo de caudal	30
Figura 3.6 B – Molinete hidrométrico	30
Figura 3.6 C – Medición de la anchura de la sección del río Betume	30
Figura 3.6 D – Medición de la profundidad de la sección del río Betume	30
Figura 3.6 E – Medición de la velocidad con molinete digital GlobalWater	30
Figura 3.7 – Parámetros más sensibles determinados en SWAT-CUP para el modelamiento río Betume	34
Figura 4.1 – Hidrograma para evaluar los resultados del monitoreo del caudal del río Betume em la Estación Puente Serigy	41
Figura 4.2 – Hidrograma de las estaciones de monitoreo del Pte Serigy y SEMARH.....	42
Figura 4.3 – Curva-chave da vazão para o rio Betume.....	43
Figura 4.4 – Modelo Digital de Elevación de la cuenca hidrográfica del rio Betume usado en el SWAT con la delimitación del área de estudio.....	47
Figura 4.5 A – Subcuenas generadas en SWAT em la cuenca hidrográfica del rio Betume.....	48
Figura 4.5 B – Unidades de respuesta hidrológica generadas con SWAT.....	48
Figura 4.6 C – Mapa del tipo de suelos generado con SWAT	50
Figura 4.6 D – Mapa de uso y ocupación del suelo generados con SWAT	50
Figura 4.7 – Hidrograma de caudal mensual referente a la calibración.....	51
Figura 4.8 – Hidrograma de caudal mensual referente a la validación.....	51
Figura 4.9 – Producción de agua escenarios 1, 2 e 3	57
Figura 4.10 – Producción de sedimentos escenarios 1, 2 e 3	59

LISTA DE CUADROS

Tabla 3.1 – Asociación de uso y ocupación del suelo en la cuenca del río Betume compatible con la base de datos SWAT	32
Tabla 3.2 - Parámetros y límites de los parámetros utilizados en el análisis de sensibilidad	35
Tabla 3.3 – Criterios de evaluación del rendimiento de los modelos hidrológicos y sus respectivas clasificaciones.....	37
Tabla 4.1 – Datos de caudales medidos en la estación Puente Serigy del rio Betume	40
Tabla 4.2 – Orden de sensibilidad de los parámetros para la simulación de caudales de la cuenca hidrográfica del río Betume.....	45
Tabla 4.3 – Clasificación del suelo em el modelamiento SWAT de la cuenca hidrográfica del río Betume	49
Tabla 4.4 – Uso y ocupación del suelo con el modelo SWAT.....	49
Tabla 4.5 – Valores medios anuales de los resultados de la simulación para los tres escenarios entre 2002 y 2014	54

SUMARIO

1. INTRODUCCIÓN	10
2. MARCO TEÓRICO	
2.1 Recursos Hídricos	12
2.2 Cuenca Hidrográfica	14
2.3 Modelamiento Hidrológico	15
2.4 Modelo SWAT.....	17
3. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN	
3.1 Área de Estudio.....	22
3.2 Datos de entrada em el modelo SWAT.....	24
3.2.1 Modelo Digital de Elevación - DEM.....	24
3.2.2 Muestras de Suelo, Mapas de Suelo e Uso del Suelo.....	25
3.2.3 Monitoramiento de Caudales	28
3.2.4 Datos Climáticos	31
3.3 Modelamiento	31
3.4 Analisis de Sensibilidad, Calibración e Validación de Parámetros	33
3.5 Construcción de Escenários.....	37
4. RESULTADOS	
4.1 Monitoreo de caudales	40
4.2 Analisis de sensibilidad.....	44
4.3 Modelamiento de la cuenca hidrográfica del rio Betume.....	46
4.4 Calibración e Validación del modelo SWAT.....	50
4.5 Escenários.....	54
5. CONCLUSIONES	62
6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	64
ANEXOS	79

1. INTRODUCCIÓN

Los recursos hídricos de una cuenca hidrográfica y su uso racional son indispensables para la sostenibilidad y desarrollo socioeconómico. El uso adecuado del suelo y la cobertura vegetal está estrechamente relacionado con la conservación de los recursos hídricos y la preservación del medio ambiente. En esta interrelación entre el uso de la tierra, el suelo y el agua; lo que le sucede a uno afecta a los otros. Por ello, la importancia del conocimiento de los procesos que pueden afectar a esta relación es fundamental para cuantificar los cambios que pueden sufrir en la cantidad, calidad y régimen de los recursos hídricos.

El desarrollo promovido por la sociedad ha hecho cambios en la naturaleza y el medio ambiente. Una de las consecuencias negativas es el uso y manejo inadecuados del suelo en las actividades agrícolas y puede ocurrir a diferentes escalas; es por ello que existe un creciente interés y la necesidad de establecer políticas adecuadas para la gestión del uso de la tierra y los recursos naturales para evitar la escasez de agua y la degradación de las cuencas fluviales.

Aunque Brasil tiene abundantes recursos hídricos, su distribución no es favorable, mientras que la región amazónica tiene abundante agua y poca población, el resto de las regiones tienen una mayor población y menor disponibilidad de agua, en la que el nordeste es el más afectado (BRASIL, 2007). Debido a los problemas relacionados con un sistema adecuado de gestión del agua, se establece en Brasil la Ley 9.433/97, que determina la Cuenca Hidrográfica como una unidad de planificación y gestión, permitiendo así determinar las prioridades de la gestión y ocupación de las áreas de una cuenca con mayor facilidad, para mitigar los impactos ambientales negativos.

El estado de Sergipe se divide en ocho cuencas fluviales, una de ellas es la cuenca baja del río São Francisco, en la que se inserta la cuenca del río Betume, afluente de la margen derecha del Bajo São Francisco; donde el perímetro de regadío instalado en esta región tiene la rizocultura como principal actividad agrícola, y ha estado sufriendo dificultades en la captación de agua para abastecer el perímetro de regadío de la zona, así como problemas de contaminación por el uso de pesticidas en la creciente demanda de actividades agrícolas, la degradación de manantiales y el medio ambiente (SANTOS et al, 2015; BRITTO et al, 2015)

El comportamiento hidrológico de una cuenca puede ser estudiado y comprendido a través de una simulación hidrológica a través de modelos matemáticos, convirtiéndose en una de las principales herramientas en la gestión de los recursos hídricos. El modelamiento permite anticipar eventos, como la representación del impacto de la deforestación de una cuenca antes de que ocurra, la predicción de una inundación en tiempo real, el impacto de la alteración de un río, la ocurrencia de eventos extremos estadísticamente posibles (TUCCI, 2005), ayudando en la planificación y gestión en la toma de decisiones.

Actualmente, se ha desarrollado el avance tecnológico de herramientas computacionales de modelos hidrológicos para predecir la erosión, la producción de agua y la producción de sedimentos los cuales pueden ser utilizados en la planificación racional y sostenible de los recursos naturales. A través del modelado es posible crear escenarios actuales y futuros donde los cambios en el clima, el uso y la gestión del suelo se pueden cambiar para estudiar las respuestas causadas a la hidrología, al suelo y a la cantidad y calidad del agua. A través de la creación de escenarios, es posible buscar formas de organizar el uso de la tierra de una manera sostenible donde la sociedad pueda utilizar estos recursos, pero preservándolos para las generaciones futuras.

Uno de estos modelos, es el Soil and Water Assessment Tool - SWAT, que permite una gran flexibilidad en la configuración de las cuencas hidrográficas. Este modelo destaca porque es una plataforma libre y permite simular una serie de procesos físicos diferentes. El modelo fue desarrollado para predecir el efecto de diferentes escenarios de gestión sobre la calidad del agua, la producción de sedimentos y las cargas contaminantes en las cuencas hidrográficas agrícolas (NEITSCH et al, 2005).

En este contexto, el presente trabajo estudió la dinámica hidrosedimentológica de la cuenca del río Betume a partir del monitoreo cuantitativo, evaluando la producción de agua y sedimentos utilizando la herramienta de modelamiento SWAT, simulando escenarios en función del uso del suelo.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Recursos Hídricos

Los recursos hídricos ocupan un lugar especial entre otros recursos naturales. El agua es la sustancia más ampliamente distribuida en nuestro planeta, aunque en diferentes cantidades, que está disponible en todas partes y desempeña un papel vital tanto en el medio ambiente como en la vida humana (SHIKLOMANOV, 1998).

Según Setti et al. al (2001) el agua es un recurso renovable debido a su capacidad de reconcentrarse en cantidad a través del llamado ciclo hidrológico, principalmente por las lluvias, pero se considera un recurso finito, ya que puede verse fácilmente comprometida por la contaminación, lo que la hace inadecuada para el uso humano. Es aleatoria, debido a que su distribución es irregular en el tiempo y el espacio, estando influenciada por las condiciones climáticas y meteorológicas.

Del total de agua del planeta, el agua salada corresponde al 97,5%, frente al 2,5% de agua dulce. Del agua dulce disponible, el 68,9% se encuentra en casquetes polares, el 0,3% en ríos y lagos, el 29,9% en acuíferos y el 0,9% en biomasa, humedad del suelo y vapor de la atmósfera (RODRIGUES et. al., 2013).

La creciente demanda de agua causa problemas en muchas partes del mundo. En algunos casos, su uso indiscriminado y sus acciones antrópicas han provocado la sequedad parcial y a veces total de ríos, presas, lagos y acuíferos subterráneos como los ocurridos con el mar de Aral, en Asia Central, y con la laguna de Nakuru, en Kenia. Además del crecimiento de la población, la urbanización y la industrialización que están creciendo cada vez más, combinado con la deforestación y la contaminación de los cuerpos de agua han ido cambiando el clima, produciendo importantes impactos en el medio ambiente que afecta la producción de agua, como el derretimiento del glaciar Columbia en Alaska y la Sierra de California (LIMA COP20, 2014)

Según bio (1999), actualmente, 29 países no tienen agua dulce para toda la población. Para 2025 según el pronóstico de las Naciones Unidas - la ONU será de 48 países y para 2050 unos 50 países sin suficiente agua para toda la población. En regiones donde la situación de falta de agua ya alcanza tasas críticas de disponibilidad, como en los países del continente africano, donde el consumo medio de agua por persona es de diecinueve metros cúbicos/día, o de diez a quince

litros/persona. En Nueva York, hay un consumo exagerado de agua dulce tratada y potable, donde un ciudadano gasta 2.000 litros/día. (BRASIL, 2015).

Resolución No. 32 del 15 de octubre – CONAR (Consejo Nacional de Recursos Hídricos) divide el territorio brasileño en 12 regiones hidrográficas, a saber: Amazonas, Tocantins-Araguaia, Noreste Atlántico Oeste, Atlántico Nordeste, Atlántico Nordeste, Parnaíba, San Francisco, Atlántico Este, Atlántico Sudeste, Atlántico Sur, Paraná, Paraguay y Uruguay. La región de São Francisco se divide en tres (3) subregiones: alta, media y baja de San Francisco. Es en la parte baja de São Francisco donde se encuentra la cuenca del río Bitume, en el Estado de Sergipe.

Según Rodrigues et al. (2013); Brasil es un país privilegiado en relación con la disponibilidad de agua, pero alrededor del 70% del agua dulce del país se encuentra en la región amazónica, que está habitada por menos del 5% de la población, el caudal promedio de esta región es casi tres veces mayor que la suma de los flujos de las otras regiones hidrográficas. La menor disponibilidad de agua por habitante/año se encuentra en las regiones hidrográficas ubicadas en el nordeste de Brasil (Atlántico Nordeste Oriental con 1.169 m³ por habitante/año)

Rebouças (2002) y Tundisi (2003) dice que la distribución de agua en las actividades humanas en Brasil corresponde al riego 69% del consumo de agua, 10% para el suministro urbano, 7% en la industria y 14% en otras actividades. Los problemas de la escasez de agua en Brasil provienen, fundamentalmente, de la combinación entre el crecimiento exagerado de las demandas localizadas y la degradación de la calidad del agua. Esta situación es consecuencia de los procesos desordenados de urbanización, industrialización y expansión agrícola (SETTI et al., 2001).

En el Estado de Sergipe existen 08 (ocho) Cuencas Hidrográficas: Cuencas hidrográficas de São Francisco, Río Vaza Barris, Río Real, Río Japaratuba, Río Sergipe, Río Piauí, Cuenca Costera Grupo 1 (GC1) y Cuenca Costera Grupo 2 (GC2). Los ríos São Francisco, Vaza Barris y Real son ríos federales que cruzan más de un estado. Mientras que los ríos Japaratuba, Sergipe y Piauí son ríos estatales, porque sus cuencas están dentro del Estado de Sergipe (BRASIL 2015).

Debido a los problemas relacionados con la falta de un sistema de gestión del agua adecuado cada vez más evidente, el sector de los recursos hídricos ha ido ganando importancia e interés por parte de la sociedad brasileña. Con base en la Ley N° 9.433/97, la Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) busca garantizar a las generaciones actuales y futuras la necesaria disponibilidad

de agua, en cantidad y calidad adecuadas a sus usos, estableciendo el uso racional e integrado de los recursos hídricos, incluido el transporte hídrico, con miras al desarrollo sostenible.

La Política Estatal de Recursos Hídricos (PERH) determina la gestión sistemática de los recursos hídricos en la que considera los aspectos cuantitativos y cualitativos del agua, la integración de la gestión de los recursos hídricos con la gestión ambiental y el uso de la tierra, así como las cuencas fluviales con los sistemas estuarinos y las zonas costeras, la articulación de la planificación estatal de los recursos hídricos , regionales y nacionales entre sí y con los sectores usuarios, además de la articulación con los municipios para la gestión de los recursos hídricos de interés común (BRASIL, 2015).

Al igual que la PNRH, la PERH considera algunos instrumentos como herramientas indispensables para ser utilizados con el fin de lograr una adecuada Gestión de los Recursos Hídricos y capaces de proteger y mejorar las condiciones de calidad y cantidad del agua para las generaciones actuales y futuras. Así, la PERH de Sergipe considera como instrumentos el Plan Estatal de Recursos Hídricos, el Encuadramiento de los cuerpos de agua en clases, según usos preponderantes del agua, el Fondo Estatal de Recursos Hídricos, el Otorgamiento de derechos de uso de los recursos hídricos, la Colección para el uso del agua y el Sistema de Información estatal.

2.2 Cuenca Hidrográfica

Silva (2013) menciona que el hombre desde su existencia ha desarrollado sus actividades dentro de una cuenca hidrográfica, que se compone de un sistema dinámico y complejo. Dinámico por la ocurrencia de procesos relacionados con el ciclo hidrológico, y complejos debido a la interacción de estos procesos que ocurren en la cuenca hidrográfica, tales como precipitaciones, escorrentía superficial, infiltración, evapotranspiración y también transporte de sedimentos.

La cuenca hidrográfica es la unidad hidrológica fundamental definida por los divisores de agua que definen un sistema de drenaje (RIGHETTO, 1998). Tucci et al. (1997) describe la cuenca hidrográfica como el área de captación natural de agua de precipitación que converge los flujos a un único punto de salida llamado exutorio.

La cuenca hidrográfica como unidad de planificación ya es de aceptación mundial, ya que constituye un sistema natural bien definido geográficamente, donde los fenómenos y las

interacciones pueden integrarse a priori por entrada y salida. Por lo tanto, las cuencas fluviales pueden tratarse como unidades geográficas, donde los recursos naturales se integran. Además, es una unidad espacial de fácil reconocimiento y caracterización, considerando que no hay superficie de tierra, por pequeña que no se integre en una cuenca hidrográfica y, cuando el problema central es el agua, la solución debe estar estrechamente ligada a su gestión y mantenimiento (SANTOS, 2004).

La planificación de la ocupación de cuencas hidrográficas con miras al desarrollo sostenible está condicionada por un gran número de variables, que están muy complejamente relacionadas y marcadas por la incertidumbre. Como consecuencia de este hecho, se hace difícil formular juicios absolutos sobre los impactos sobre los fenómenos hidrosedimentológicos resultantes de la ocupación humana en estas cuencas hidrográficas. En estos casos, se suelen utilizar estudios de escenarios alternativos que corresponden a combinaciones consistentes de las variables más relevantes (BAHIA, 1995b).

Según Santos (2002), la ley federal 9.433 de enero de 1997 o Ley de Aguas tiene como principio fundamental la gestión de los recursos hídricos por cuenca, de manera descentralizada con la participación de las autoridades públicas, los usuarios y la comunidad.

2.3 Modelamiento Hidrológico

El modelamiento hidrológico es una técnica que posibilita el mejor entendimiento y representación del comportamiento hidrológico de las cuencas hidrográficas, siendo que los modelos hidrológicos poseen un gran potencial para caracterizar la disponibilidad hídrica en condiciones de cambios climáticos y en el uso del suelo (TUCCI, 2005).

Kuwajima (2012) menciona que estos modelos son útiles cuando el monitoreo de los procesos que ocurren en cada terreno y curso de una cuenca es inviable y muy caro. Para Aguiar Netto (2010) los modelos hidrológicos son útiles para estudios ambientales y en la planificación para el uso eficiente del agua en sistemas de irrigación, solucionar conflictos por el uso del agua, evaluar el efecto de los cambios en el uso de la tierra, y en la evaluación de las aguas subterránea y superficial cualitativa y cuantitativamente.

Para Collischonn & Tucci (2001), los modelos hidrológicos son divididos de acuerdo con: los tipos de variables utilizadas (estocástico o determinístico), forma de representación de las variables de entrada (continuo o discreto), representación de los procesos dentro de la estructura matemática del modelo (empírico o de base conceptual), discretización o no de la variabilidad espacial de las variables (concentrado o distribuido) e igualmente, sólo para variabilidad temporal (estático o dinámico). Un modelo hidrológico puede tener más de una de las características citadas anteriormente, no necesariamente pertenecen a un solo grupo.

La estructura de los modelos hidrológicos está basada en los siguientes elementos: discretización de la cuenca hidrográfica (dependiente del modelo), variables de entrada (precipitación, evapotranspiración), estructura básica de la integración de los procesos (cuenca, canal, declive), adquisición de datos físicos de las cuencas y determinación de los parámetros (TUCCI, 2005)

El modelamiento hidrológico es una herramienta para elaborar simulación de caudales en cursos de agua de una cuenca hidrográfica para obtener conocimiento más profundo respecto de los fenómenos físicos envueltos y en la previsión de escenarios. Los procesos de precipitación, evaporación, infiltración, escurrimiento en ríos, dependen de un gran número de variables que no siempre pueden ser medidas. (MORAES, 2003).

La elección del modelo hidrológico depende de una evaluación preliminar involucrando los siguientes aspectos: objetivos del estudio para el cual el modelo va a ser utilizado, características climáticas y físicas de la cuenca y del río; disponibilidad de datos y familiaridad del equipo del proyecto con el modelo. En los modelos lluvia-escorrentía, existen cuatro fases distintas: la elección del modelo, calibración de los parámetros, validación del modelo calibrado y aplicación. (ENOMOTO, 2004).

Según Silva (2013), ninguna metodología substituye las mediciones de informaciones que permitan evaluar los parámetros del modelo utilizado. Cuanto menor es la disponibilidad de información, mayores serán las incertezas de los pronósticos, visto que; una de las limitaciones en la utilización de los modelos hidrológicos es la disponibilidad de datos. Esta disponibilidad se refiere a la cantidad (muchas series de datos hidrológicos presentan fallas) y la calidad (muchos datos son mal medidos o mal observados).

Los modelos precipitación-escorrentía deben describir la distribución espacial de la precipitación, las pérdidas por interceptación, evaporación, depresión del suelo, el flujo a través del suelo por la infiltración, percolación y agua subterránea, escurrimiento superficial, sub-superficial en el cauce del río. Las principales dificultades encontradas en los modelos precipitación-escorrentía, se deben a la gran variabilidad espacial de las precipitaciones, las incertezas de los datos de evaporación, el factor de escala entre procesos puntuales y espaciales y la homogeneidad de los parámetros. (OLIVEIRA, 2003)

Actualmente existen diversos modelos hidrológicos, entre los cuales se destacan: Topography-based hydrological model – TOPMODEL, Kinematic Runoff and Erosion Model - KINEROS, Water Erosion Prediction Project - WEPP; Areal Non-point Source Watershed Environment Response Simulation - ANSWERS; Modelling System for Rivers and Channels – MIKE 11; Kentucky Erosion Model - KYERMO; European Soil Erosion Model - EUROSEM; Chemicals Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems - CREAMS; Simulator for Water Resources in Rural Basins - SWRRB; y Soil and Water Assessment Tool - SWAT.

Em la última década vários modelos fueron desarrollados para dar soporte em el uso del água, del suelo y de la cobertura vegetal buscando la explotación sustentable delos recursos naturales. De esa forma, vários autores como Machado (2002), Santos y Silva (2007), Santos y Kobiyama (2008) y Aguiar Netto y Lucas (2010), usaron modelos hidrológicos para evaluar y auxiliar la planificación y gestión de los recursos hídricos com los modelos SWAT, AÇUMOS, TOPMODEL y MIKE 11, respectivamente.

2.4 Modelo SWAT – Soil and Water Assessment Tool

El modelo SWAT fue desarrollado por USDA-ARS (United States Department of Agriculture-Agricultural Research Service), es un modelo matemático que permite que diferentes procesos físicos sean simulados en una cuenca hidrográfica, con el objetivo de analizar los impactos de las alteraciones del uso del suelo sobre el escurrimiento superficial e subterráneo, producción de sedimentos y calidad del agua, en cuencas hidrográficas agrícolas no monitoreadas (NEITSCH et al, 2005).

Segun Arnorld et al (1998) el modelo SWAT es de tipo distribuido que incorpora las características de vários otros modelos, siendo un resultado directo del SWRRB (Simulator for

Water Resources in Rural Basins). De acuerdo con Gassman et al. (2007) los modelos específicos que contribuyeron de forma significativa para el desarrollo del modelo SWAT fueron los modelos CREAMS (Chemicals, Runoff and Erosion from Agriculture Management Systems), GLEAMS (Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems); EPIC (Erosion-Productivity Impact Calculator) y el modelo ROTO (Routing Outputs to Outlet).

Desde su creación al inicio de la década de 1990, el modelo SWAT fue constantemente revisado, actualizado y expandido, de esta forma aumentaron las potencialidades del modelo; dotando una serie de herramientas las cuales mejoraron la adaptación de este modelo para tratar con una vasta gama de problemas relacionados a la cantidad y calidad del agua, factor fundamental cuando se refiere a acciones de planeamiento y gestión de los recursos naturales en cuencas hidrográficas (ARNOLD, et al. 1998)

Aun cuando, el modelo posee algoritmos para calcular diferentes componentes dinámicos de una cuenca hidrográfica, el modelo sólo conseguirá describir estos procesos si fueren usados datos de entrada de calidad. Los datos de entrada, que describen la estructura física de la cuenca, son generalmente asociados al modelo a través de una interface SIG.

Segun Arnold et al, 2012, el modelo SWAT a partir del modelo digital de elevación, permite que diferentes procesos físicos sean simulados en cuencas hidrográficas. Tiene el objetivo de analizar los impactos de las alteraciones del uso del suelo sobre el escurrimiento superficial y subterráneo, producción de sedimentos calidad del agua en cuencas hidrográficas agrícolas no monitoreadas. El modelo opera en intervalos de tiempo diarios y posibilita la simulación de muchos años, pero, no permite la simulación de eventos aislados (SRINIVASAN E ARNOLD, 1994).

Los datos de entrada del modelo SWAT están organizados para que tengan atributos espaciales. El modelo ofrece tres niveles espaciales: el de cuenca hidrográfica, el de sub-cuencas y el de unidades de respuesta hidrológicas o HRUs. Para cada nivel existe un conjunto de parámetros y datos de entrada para asignación. El nivel espacial mayor, o de cuenca hidrográfica, se refiere a toda área representada por el modelo; el nivel de sub-cuencas se refiere a las subdivisiones de la cuenca hidrográfica que son hidrológicamente conectadas. Las sub-cuencas son subdivididas en HRUs, que viene a ser la representación de áreas dentro de las sub-cuencas que

presentan características de suelo, uso y ocupación de terreno y de declividad o pendiente consideradas iguales.

Tanto las sub-cuencas como las HRUs son definidas por el usuario, es decir, el usuario es quien define los parámetros para tales subdivisiones, de esta forma ofrecen a los usuarios algún control sobre los resultados obtenidos por el modelo SWAT.

El ciclo hidrológico en las simulaciones SWAT es basado en la ecuación del balance hídrico que relaciona la cantidad final de agua en el suelo (SW_t); la cantidad inicial de agua en el suelo (SW); el tiempo (t); la precipitación diaria (R_i); el escurrimiento superficial (Q_i); la evapotranspiración (ET_i); el escurrimiento lateral (P_i); el escurrimiento de retorno (QR_i); y el paso de tiempo (i).

Para calcular el escurrimiento superficial al tipo de suelo el modelo utiliza una formulación modificada del método de la Curva Número – CN de Soil Conservation Service – SCS. Que relaciona el escurrimiento superficial diario; la precipitación diaria y el parámetro de retención (S), el cual varía con la cuenca en función del suelo, uso del suelo y altura; así como, con el tiempo en función de las alteraciones de la humedad del suelo.

El modelo SWAT ofrece tres opciones para estimar la evapotranspiración potencial: Penman – Monteith, Hargreaves & Samani e Priestley – Taylor. El modelo determina la evapotranspiración por la suma de la evaporación desde el suelo y la transpiración de la planta, ambas en función de la evaporación potencial.

Para el cálculo de la percolación usa una técnica de propagación de almacenamiento, que combina un modelo de flujo en fisuras para simular el escurrimiento a través de cada capa de suelo (ARNOLD et al. 2010). Los parámetros usados para este cálculo son la humedad de suelo al inicio y final del día en milímetros (SW e SW_o); el intervalo de tiempo en horas (Δt); el tiempo de propagación a través de la capa i (TT) y el índice de identificación de la capa de suelo (i). Una vez percolada debajo de la zona de raíces, este volumen es almacenado como agua subterránea o surge como escurrimiento de retorno aguas abajo del punto considerado.

El modelo usa la Ecuación Universal de Perdida de Suelo Modificada – MUSLE, para simular la erosión, la cual es una versión modificada de la Ecuación Universal de Perdida de Suelo

– USLE, desarrollada por Wischmeier & Smith (1978). Mientras que, la USLE usa índices de precipitación como indicativo de energía de erosión, la MUSLE usa la cantidad de escurrimiento superficial para simular la producción de sedimentos. Esta ecuación usa los siguientes datos: volumen de escurrimiento superficial en mm/ha (Q_{surf}); caudal de pico de escurrimiento en m^3/s (q_{peak}), el área de las unidades de respuesta hidrológicas en hectáreas ($área_{hru}$); el factor de erosión de suelo (K_{USLE}), factor de uso y manejo de suelo (C_{USLE}), o factor de prácticas conservacionistas (P_{USLE}) y el factor topográfico (LS_{USLE}).

La distribución en el cauce está dividida en dos componentes: la distribución del caudal líquido y la distribución del caudal sólido. Según Moro (2005), en el primer componente la operación se realiza en un período de tiempo diario, el cual permite simular períodos largos (50 – 100 años) sobre cuencas medianas o grandes (1.000 a 10.000 km^2). Los datos requeridos por el modelo incluyen la longitud, pendiente, profundidad, tasa de escurrimiento y la velocidad media, estos dos últimos se calculan usando la ecuación de Manning.

El segundo componente, sigue explicando Moro; depende de dos operaciones simultáneas: la sedimentación y la erosión. La sedimentación en el cauce está basada en la velocidad de caída de la partícula sedimentaria y la erosión en la fuerza de escurrimiento. La cual está definida como un producto de la densidad del agua, tasa de escurrimiento y la pendiente de la superficie del agua.

La calibración de un modelo según Christofolletti (1999), es el proceso de establecer los parámetros adecuados de entrada y las condiciones internas del sistema, con el fin de verificar la adecuación de las respuestas. Debido a complicaciones de la amplitud de datos que usa SWAT y al manejo de estos para ser calibrados e validados, fue desarrollada la herramienta SWAT-CUP (Calibration and Uncertainly Procedures) para auxiliar en el proceso de calibración el cual puede ser hecho manual o automáticamente. El SWAT- CUP permite importar los archivos de salida de SWAT en formato texto (TXT) economizando tiempo y facilitando el proceso de calibración y validación, toda vez que no será necesario la elaboración o edición de tablas (ABBASPOUR et al, 2012)

Actualmente el modelo SWAT viene siendo usado en muchas regiones de Brasil por muchos investigadores para las más diversas aplicaciones, en la mayoría de casos orientadas a la simulación de caudales líquidos y producción de sedimentos. (MACHADO et al, 2003;

BALDISSERA, 2005; LOPES, 2008; MARCHIORO, 2008; BLAINSKI et al, 2010; KUWAJIMA, 2012; UZEIKA et al, 2012; ARROIO JUNIOR et al, 2013; ANDRADE et al, 2013 e OLIVEIRA, 2014). En la literatura también puede encontrarse trabajos simulando diferentes escenarios de uso de tierra usando el modelo SWAT, evaluando y analizando los efectos de esos cambios (TIBEBE & BEWKET, 2010; LELIS et al, 2011; CARVALHO NETRO et al, 2011; PERAZZOLI et al, 2013; ARAGÃO et al, 2013)

En el estado de Sergipe, Silva (2013) aplicó el modelo para estudiar la dinámica hidrosedimentológica del río Poxim-Açu, determinando que la producción de agua, sedimentos y nutrientes se relaciona directamente con las prácticas de manejo y uso del suelo. Por otro lado, Almeida (2013) aplicó el modelo para simulaciones predictivas en la producción de agua en la cuenca hidrográfica del río Poxim-Açu indicando que el modelo es aplicable satisfactoriamente en los estudios de balance hidrológico.

Machado (2013) uso el modelo para monitorear la cuenca hidrográfica del río Siriri, en el cual indicó que la mayor producción de agua se localiza en las áreas de mayores declividades y que son ocupadas por florestas. Aragão (2014) analizó la influencia de la mata ciliar en la cuenca del río Siriri, sobre escurrimiento superficial e producción de sedimentos; en el cual el modelo SWAT fue eficiente en simular el comportamiento de la cuenca en fase de las mudanzas de escenarios de uso de suelo, mostrando que la mata ciliar es un eficiente elemento para reducir la carga de sedimentos.

Santana (2015) utilizó el modelo SWAT para determinar el efecto de la variabilidad de escenarios de uso de suelo sobre la dinámica de caudal y de sedimentos en la cuenca hidrográfica del río Jacaré en la región del Bajo San Francisco no estado de Sergipe, e Britto (2015), utilizó el modelo para evaluar el uso de agrotóxicos en la cuenca hidrográfica del río Betume. De todos estos trabajos se obtienen datos e informaciones importantes para el desarrollo de las cuencas antes mencionadas.

El modelo SWAT también puede ser aplicado en la evaluación de prácticas de gestión y planeamiento de cuencas hidrográficas (JAYAKRISHNAN et al, 2005 e ZHANG, 2012) siendo una herramienta que permite importantes tomas de decisiones para el desarrollo de las regiones.

3. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Área de Estudio

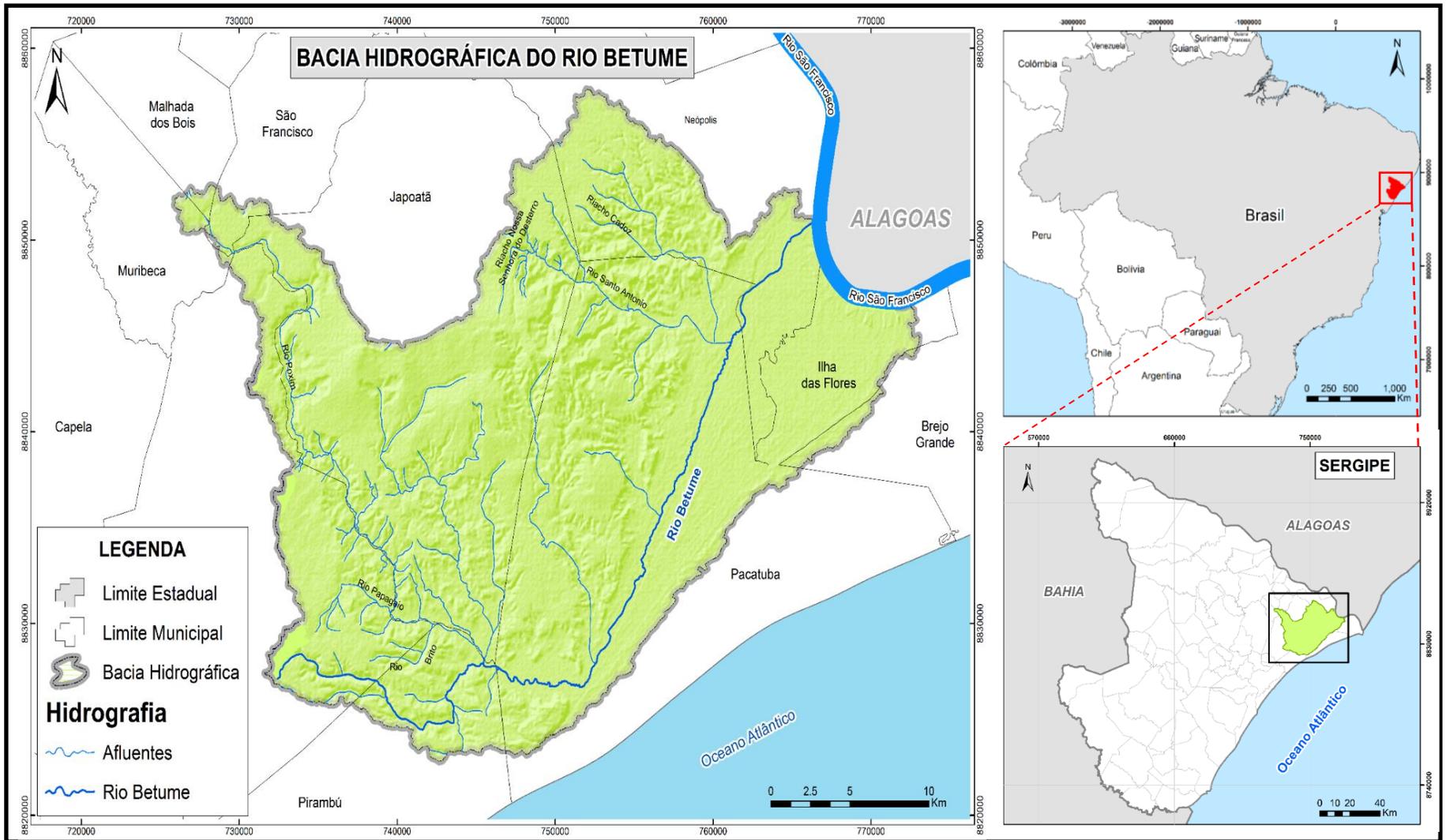
El área de estudio comprende la cuenca hidrográfica del río Betume, uno de los afluentes del río São Francisco, ubicado en la región del Bajo São Francisco, al este del estado de Sergipe, entre las coordenadas UTM 24L 720000, 770000 este y 8820000, 8860000 sur (Figura 3.1) con una superficie de 849,94 km². La mayor parte de la cuenca está ubicada en los municipios de Neópolis, Japaratuba, Pacatuba, Japoatã e Ilha das Flores, y también cubre parte de los municipios de Pirambú, Muribeca, Malhada dos Bois y São Francisco. (SERGIPE, 2014).

La cuenca del río Betume se caracteriza por un clima tropical semihúmedo. La temperatura media anual es de 25°C con una evaporación de 1500 mm por año. La precipitación media anual en la región varía de 500 a 1300 mm. El relieve de la cuenca es accidentado con cimas redondeadas, destaca la planicie costera con una altitud inferior a los 100 m y niveles del grupo Barreiras, con una geología compuesta principalmente por rocas metamórficas y sedimentarias. (SERGIPE, 1997; SERGIPE, 2004).

Los suelos predominantes en la región son: Argissolos Vermelho Amarelo, Neossolos Quartzarrênicos profundos não hidromórficos, Neossolos, Planossolos e Espodossolos (EMBRAPA, 2006). La cuenca hidrográfica del río Betume está ubicada en el bioma de la Mata Atlántica, también conocida como Zona da Mata, una franja costera paralela al Océano Atlántico, actualmente muy degradada. (INFOESCOLA, 2015).

El río Betume, también llamado Aterro o Poxim, es uno de los tres principales afluentes de la margen derecha del río São Francisco, convirtiéndose en una de las cuencas hidrográficas importantes para el estado de Sergipe. La naciente principal del río Betume está ubicado cerca de la localidad de Tiririca en el municipio de Japaratuba (24L 0732594, 8827541 coordenadas UTM elev 91 m) la desembocadura está ubicada en el municipio de Neópolis (24L 765581, 8850399 coordenadas UTM elev 6 m). El río tiene aproximadamente 148 km de longitud total, sin embargo, en el presente estudio se considera una longitud de 59,36 km debido a la existencia de una estación fluviométrica. El río Betume tiene una clasificación de 4 en el orden de Strathaler, coeficiente de compacidad de 3,97 y caudal medio anual 4,227 m³.s⁻¹ (AGUIAR NETTO et al. 2011).

Figura 3.1 – Mapa de ubicación de la cuenca hidrográfica del río Betume, Estado de Sergipe - Brasil.



Fuente: SERGIPE (2014) – Org.: R. C. Salazar.

La mayor parte del cuerpo de agua se encuentra en el municipio de Pacatuba y sus principales afluentes del río que se encuentran en los municipios de Japaratuba, Japoatã y Neópolis son: riacho Nossa Senhora do Desterro, riacho Cadoz, riacho Galante, riacho Timbó, riacho do Sapo, rio Papagaio, rio Poxim, rio Santo Antônio, rio São Francisco e rio do Brito. (Figura 3.1)

En el recorrido realizado en la cuenca del río Betume, se observó que el área de la cuenca se caracteriza por una distribución geográfica aleatoria, plantaciones de subsistencia, y grandes cultivos de caña de azúcar, coco y frutales. El perímetro irrigado dentro de la cuenca tiene como principal cultivo el arroz. También cuenta con sitios de explotación de petróleo y gas natural. La producción pecuaria también está diversificada, siendo la ganadería la más importante. La zona cuenta con granjas de cría extensiva de aves destinadas al mercado y producción de huevos.

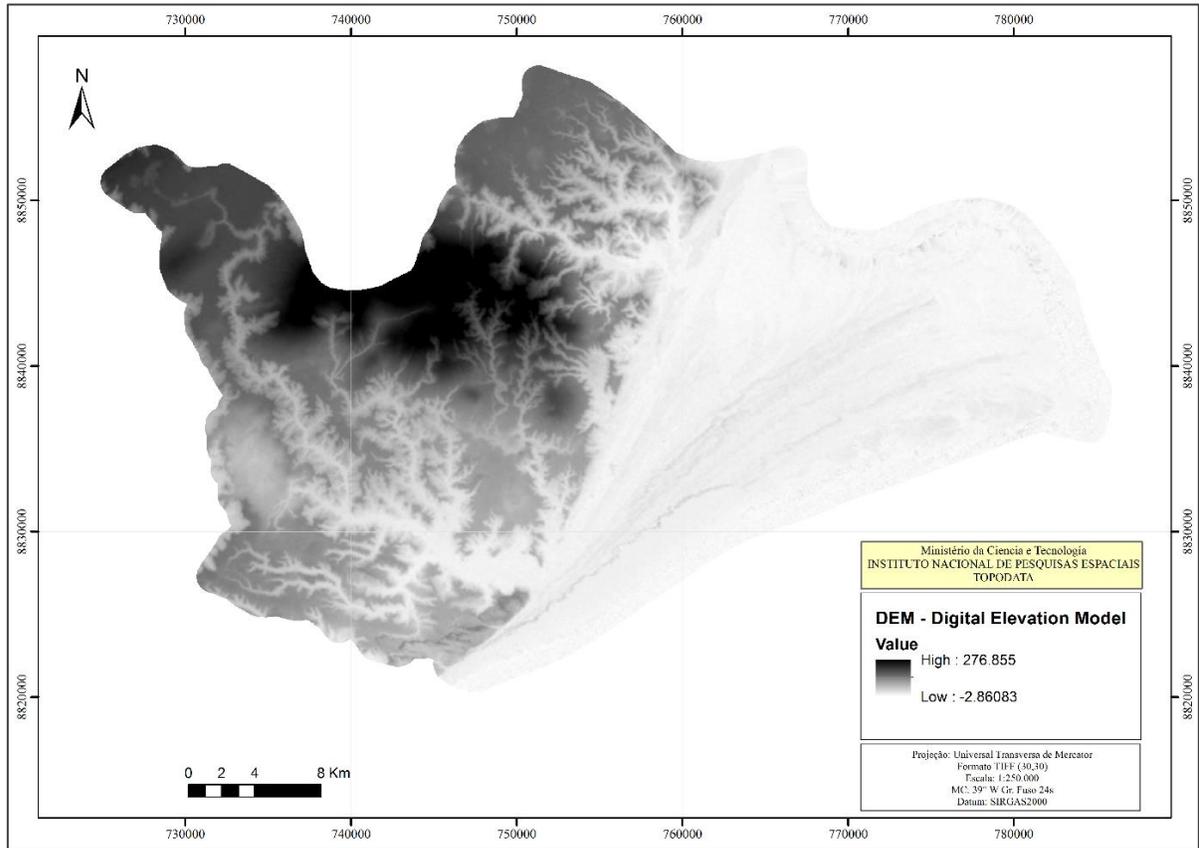
3.2 Datos de entrada en el modelo SWAT

Para la simulación mediante el modelo SWAT, es necesario obtener información y datos hidroambientales, con el fin de conformar una base de datos espacial (mapas) y series temporales (datos diarios) de algunos datos climatológicos y características físico-hídricas del suelo, necesario para la simulación del área de estudio en este modelo. Para ello se consideraron los siguientes datos:

3.2.1 Modelo Digital de Elevación (DEM)

Para la creación del Modelo Digital de Elevación (DEM) de la Cuenca del Río Bitume, se utilizó la hoja SC.24-Z-B con articulación compatible con la escala 1:250.000 (INPE), producida por el equipo de Monitoreo Satelital de la Embrapa (SRTM), elaborado y ajustado por el Banco de Datos Geomorfométricos de Brasil (TOPODATA) que puso a disposición estos datos altimétricos para todo el territorio nacional de Brasil. Los modelos están en Sistema de Coordenadas Geográficas y Datum WGS84 con una resolución de 30 metros como se muestra en la Figura 4.2 (VALERIANO, 2008). Desde el DEM se realizará la delimitación de la cuenca del río Betume, en el sistema de proyección SIRGAS 2000 UTM, zona 24S

Figura 3.2- Modelo Digital de Elevación de la cuenca hidrográfica del río Betume



Fuente: INPE – TOPODATA (2014)

3.2.2 Muestras de Suelo, Mapas de suelos y del Uso de Suelo

Para el análisis de suelos, la recolección de muestras de la región del Betume adoptó la metodología establecida por la EMBRAPA (1997). La clasificación de los suelos pertenecientes al área de estudio se hizo según la EMBRAPA (2006). Se eligieron cinco puntos de muestreo: Punto 1, suelo cercano a la naciente principal del río Betume. Punto 2, suelo con plantaciones de coco y caña de azúcar. Punto 3, suelo con cobertura forestal y pastizales y Puntos 4 y 5, suelos en la zona del perímetro irrigado con cultivos de arroz. (Figura 3.3)

Las muestras de suelo en los puntos antes mencionados, deformadas y sin deformar, se recolectaron en una capa de una profundidad de 0,0 a 0,15 m. Estas muestras fueron enviadas al Laboratorio del Instituto Tecnológico de Pesquisas de Sergipe (ITPS), para la determinación de los parámetros requeridos por el modelo SWAT.

Los parámetros físico-hídricos determinados en laboratorio fueron: densidad del suelo, micro, macro y total porosidad del suelo y humedad, así como análisis granulométrico, cantidad de arena, limo y arcilla para la determinación de la textura. También se determinó la conductividad eléctrica, porcentaje de carbono orgánico, agua disponible, albedo y conductividad hidráulica, como se muestra en el Anexo A..

La estimación de erosionabilidad (KUSLE), que se utiliza para expresar la capacidad de producción de sedimentos de la cuenca, se ha calculado mediante la ecuación 1 (NEITSCH, et al. 2011)

$$K_{USLE} = f_{areia} \cdot f_{cl-si} \cdot f_{orgc} \cdot f_{amax} \quad (1)$$

em que:

f_{areia} factor de baja erosionabilidad de suelo con elevados índices de arena gruesa,

f_{cl-si} factor de baja erosionabilidad de suelo con altas tasas de limo y arcilla,

f_{orgc} factor que reduce la erosionabilidad de suelos con altos contenidos de carbono orgánico y

f_{amax} factor que reduce la erosionabilidad de suelos con altos contenidos de arena.

Estos índices son calculados por medio de las ecuaciones 2, 3, 4 e 5 respectivamente.

$$f_{areia} = \left\{ 0,2 + 0,3 \exp \left[-0,256 m_s \left(1 - \frac{m_{silt}}{100} \right) \right] \right\} \quad (2)$$

$$f_{cl-si} = \left(\frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right)^{0,3} \quad (3)$$

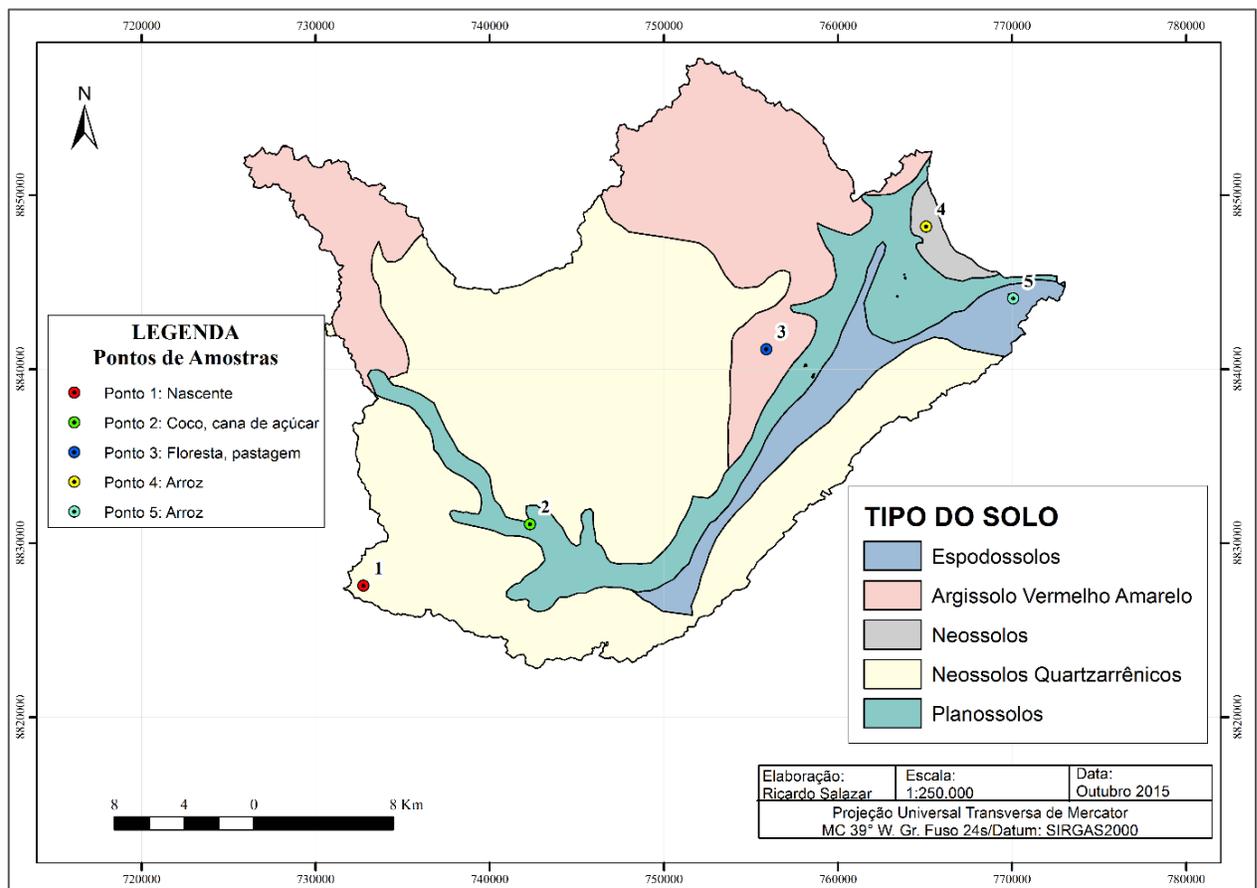
$$f_{orgc} = \left[1 - \frac{0,25 \cdot orgC}{orgC + \exp(3,72 - 2,95 \cdot orgC)} \right] \quad (4)$$

$$f_{amax} = \left\{ 1 - \frac{0,7 \left(1 - \frac{m_s}{100} \right)}{\left(1 - \frac{m_s}{100} \right) + \exp \left[-5,51 + 22,9 \cdot \left(1 - \frac{m_s}{100} \right) \right]} \right\} \quad (5)$$

en que: m_s es el porcentaje de arena; m_{silt} es el porcentaje de limo; m_c es el porcentaje de arcilla y $orgC$ es el porcentaje de carbono orgánico en la capa de suelo.

De acuerdo con el atlas digital de recursos hídricos de Sergipe (Figura 3.3) la cuenca hidrográfica del río Betume los tipos de suelos son el Argissolo Vermelho Amarelo representando 39,39% se encuentra en áreas con altitudes entre 30 a 90 m con relieve ondulado; el Neossolo Quartzarrênico profundo no hidromórfico representando 46,31% de la cuenca, se encuentran en todo el relieve de la cuenca. Los suelos Planossolos, representa 9,49% se inundan a lo largo del curso del río Betume y los suelos Espodossolo (3,94%) y Neossolo (0,87%) se encuentran en la llanura de la cuenca.

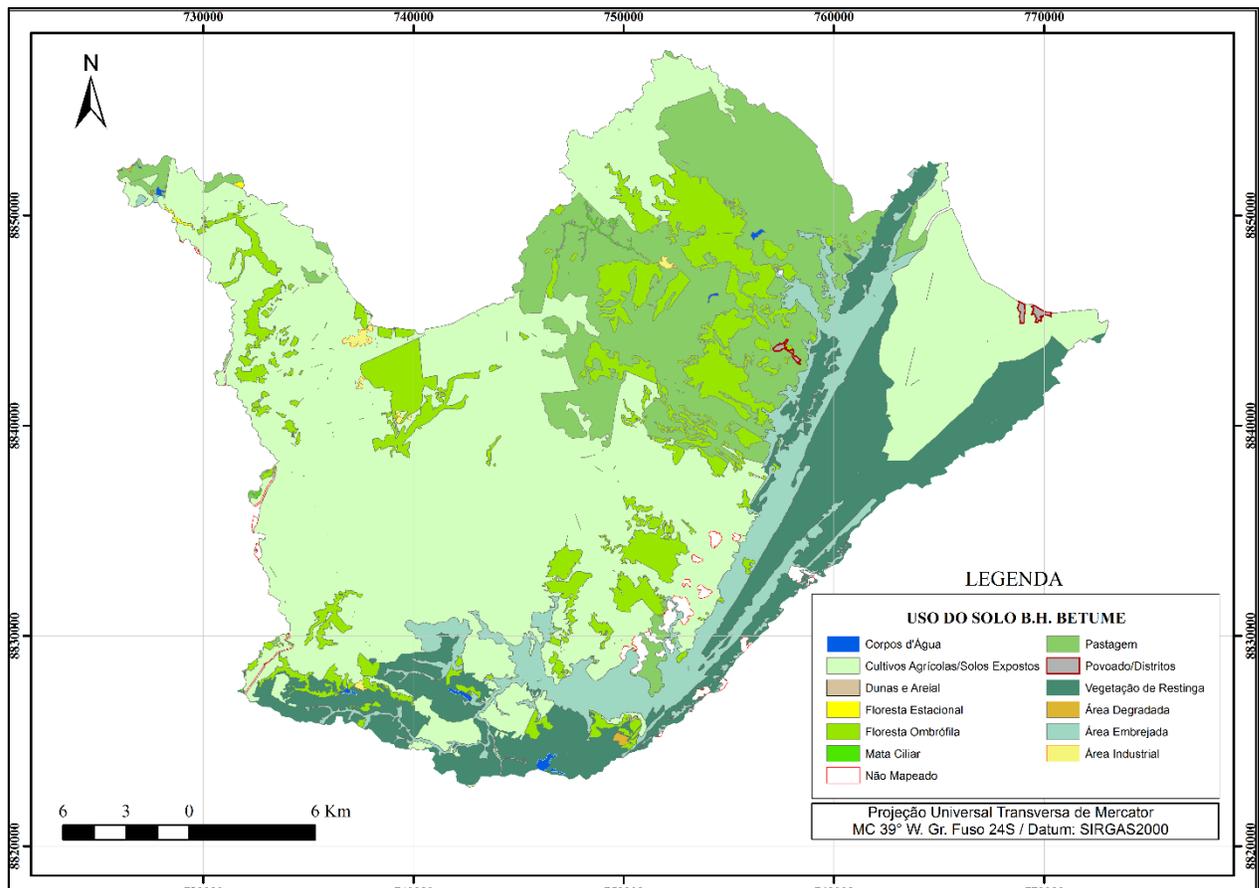
Figura 3.3- Tipos de suelo y puntos de muestreo en la cuenca del río Betume



Fuente: SERGIPE (2014); EMBRAPA (2006).

Los datos vectoriales de uso del suelo se obtuvieron del atlas digital de Sergipe (2014) como se muestra en la Figura 3.4, donde en relación al uso y ocupación del suelo, la vegetación predominante en la cuenca es la Mata Ciliar (0,97%) vegetación de Restinga (10,34%), Floresta Ombrófila (5,99%) y Floresta Estacional (0,18%). Las pasturas ocupan 39,98% de la cuenca y los cultivos agrícolas 33,53%. El área inundada 4,19%, Área Industrial 0,09%, Área degradada 0,10% y ocupaciones urbanas 0,04%.

Figura 3.4 – Mapa de uso de la tierra de la cuenca hidrográfica del río Betume



Fuente: SERGIPE (2014)

3.2.3 Monitoreo de Caudales del Río Betume

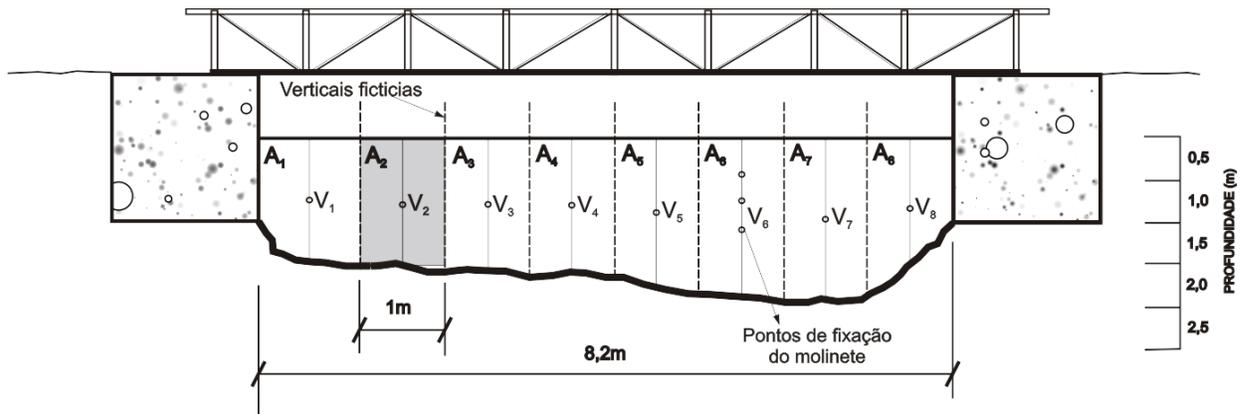
La metodología de monitoreo escogida en esta investigación consiste en realizar la batimetría de una sección transversal del río Bitume y luego medir la velocidad del agua a través del molinete hidráulico, que es uno de los métodos más difundidos, fácil de manejar, fácil de

transportar y de bajo costo. costo (CHOW, 1994; USDI, 2001; CORREA, 2008). La batimetría del río se realizó en el primer punto de monitoreo aguas arriba del río, (Figura 3.6-A) ubicado en el municipio de Pacatuba, en Ponte Serigi (24L 752071, 8827032), de 8,20 m de ancho.

El caudal del río en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Q) se obtuvo integrando el producto de la velocidad media del caudal en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (V_i) por el área cubierta en m^2 (A_i) (CÔRREA, 2008), representado en la Ecuación 6. Para determinar el área del río, se dividió el ancho en segmentos con un espaciamiento de 1m, obteniendo 8 tramos (GOMES y SANTOS, 2003). Las profundidades de cada sección se midieron con una regla y la velocidad se determinó utilizando un correntómetro marca Global Water FP 111, con sensor turbohélice telescópico de lectura digital y precisión de $0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (GLOBAL WATER, 2009); se realizaron tres mediciones de velocidad (0,2; 0,6 y 0,8 m) en la vertical de cada segmento (ALMEIDA JUNIOR et al, 2010; CARVALHO, 2008), como se muestra en la Figuras 3.5 e 3.6 – B, C, D, E.

$$Q = \sum Q_i = \sum A_i \cdot V_i \quad (6)$$

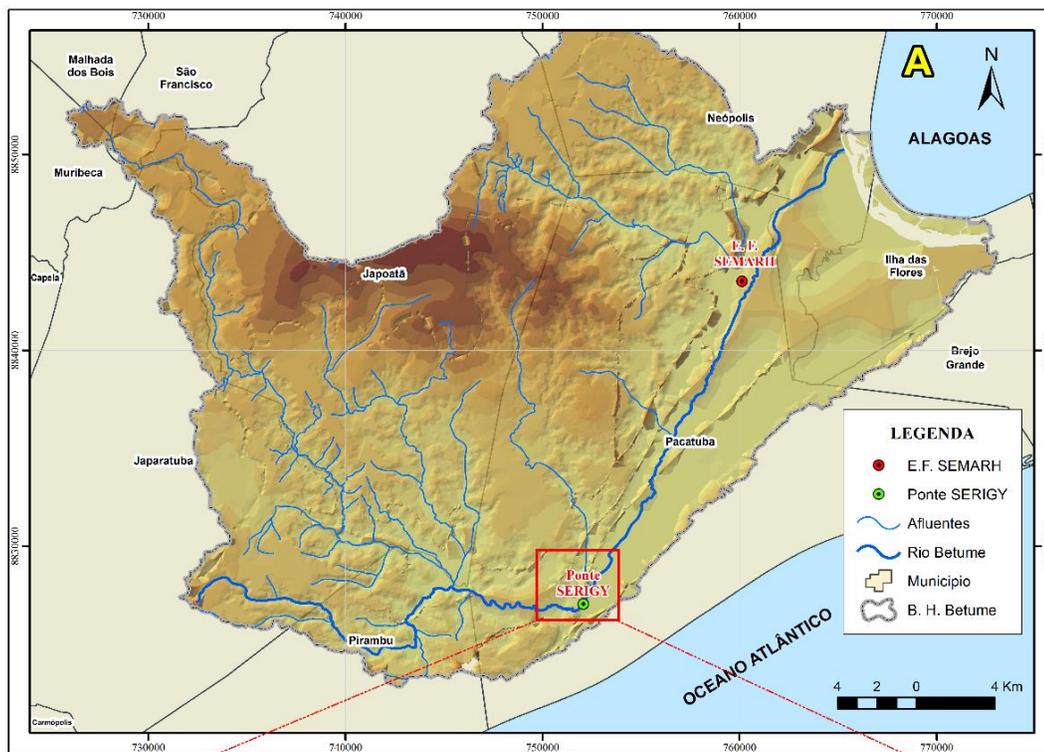
Figura 3.5 - Perfil da seção transversal aguas arriba del rio Ponte Serigi, formado con el ancho y las profundidades para calcular el caudal del rio Betume.



Fuente: Autor

El punto considerado aguas abajo del río Bitume fue la estación fluviométrica código 49744000 (Latitud-10:28:10, Longitud -36:37:41) de la SEMARH, ubicada en el municipio de Pacatuba en el poblado de Alagamar, la cual fue utilizada como una salida para el modelamiento (Fig. 3.6-A).

Figura 3.6 – A: Mapa puntos de monitoreo del caudal. B: molinete, C: medición del ancho, D: medición de la profundidad y E: medición de la velocidad.



Fuente: SERGIPE (2014), Proyecto Aguas do São Francisco (2014).

Las mediciones de caudal realizadas en el Puente Serigy se realizaron durante la estación seca (octubre a febrero) y la estación lluviosa (marzo a septiembre) de los años 2014 y 2015. En la estación fluviométrica de la SEMARH se consideraron dos años de datos de caudal diario (octubre/2012 a septiembre/2014), utilizado para la calibración del modelo

3.2.4 Datos Climáticos

Los datos climáticos se necesitan en dos momentos del modelado, el primero es en la parametrización de la Estación de Generación de Clima SWAT, la cual estima automáticamente los datos climáticos faltantes cuando no se cuenta con registros climáticos. En el segundo momento, ya está en la ejecución real de la ejecución del modelado con el modelo SWAT (ALMEIDA, 2013).

En la presente investigación, los datos necesarios para el cálculo de los parámetros se obtuvieron de la serie histórica ofrecida en las estaciones meteorológicas convencionales del Instituto Nacional de Meteorología (INMET) en Propriá en las coordenadas UTM 24L 736626; 8870574 y Altitud: 19,92 m y Pan de Azúcar en las coordenadas 24L 672215; 8921824 y Altitud: 21 m. y por el Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (INPE) las estaciones de Japarutuba en las coordenadas UTM 24L 724579; 8846893 y Neopolis en las coordenadas 24L 762676; 8836453.

De la estación Propriá se obtuvieron datos de radiación solar (MJ. m². día⁻¹), temperatura máxima (°C), temperatura mínima (°C), velocidad media del viento (m.s⁻¹) y humedad relativa media (%). En cuanto a los datos diarios de Precipitación (mm) se obtuvieron de todas las estaciones. Se analizaron los datos de la serie histórica de todas las estaciones para determinar la incidencia de datos faltantes en sus registros y se seleccionaron 16 años de muestreo (1999 - 2014). Estos datos sirvieron para simular el clima de la cuenca del río Bitume, a través del Generador Climático de la SWAT (Ver anexo B).

3.3 Modelamiento

A partir de los datos presentados anteriormente, se llevaron a cabo los pasos de entrada en la parametrización inicial del modelo. Utilizando el DEM (Digital Elevation Model) el SWAT determina la dirección del flujo de la red de drenaje (ríos principal y secundario) generando puntos

de “salida” para este caso si la salida se adicionó aguas abajo del río Bitume, en las coordenadas UTM 24L 759642 , 8841706, que corresponden a la estación fluviométrica de la SEMARH, a partir de la cual se inicia la delimitación de la cuenca, al mismo tiempo que el modelo delimita la cuenca automáticamente la divide en subcuencas teniendo como referencia el número de “salidas” a lo largo del río en el área delimitada. (GALVAN et al., 2009; KUWAJIMA, 2012; SILVA, 2012)

En la etapa de procesamiento Análisis y Definición de HRU's (Unidad de Respuesta Hidrológica), es donde el SWAT determina los parámetros hidrológicos de cada subcuenca, para lo cual se intercalan las capas vectoriales de uso de suelo, el tipo de suelo y la pendiente. Así, los tipos de uso de suelo identificados en la cuenca del río Bitume deben asociarse con las categorías presentes en la base de datos de uso y ocupación de suelo SWAT, de acuerdo con sus similitudes conceptuales y estructurales como se muestra en la Tabla 3.1.

Tabela 3.1 - Asociación elo uso y ocupación de la tierra en la cuenca hidrográfica del rio Betume compatible con el banco de datos de SWAT.

VALOR	USO DE LA TIERRA	SWAT	
0	Corpos d'agua	WATR	CROP
1	Cultivos agrícolas / Solos expostos	AGRL	CROP
2	Dunas e areal	COCO	CROP
3	Floresta estacional	FRST	CROP
4	Floresta ombrófila	FRSD	CROP
5	Mata ciliar	FRSD	CROP
6	Não mapeado	RICE	CROP
7	Pastagem	PAST	CROP
8	Vegetação e restinga	RNGB	CROP
9	Povoado / Distritos	URBN	URBAN
10	Área degradada	UTRN	URBAN
11	Área embrejada	WETL	URBAN
12	Área industrial	UIDU	URBAN

Fuente: Adaptado de Santos (2011) e SWAT (2012)

Para los tipos de suelo, se registró los Argissolos Vermelho Amarelo, Neossolos Quartzarrênicos, Neossolos, Planossolos y Espodossolos. Para el declive las categorías fueron establecidas de acuerdo con la EMBRAPA (2006) en 4 clases: 0 a 3% (relieve plano), de 3 a 8%

(suave ondulado), de 8 a 20% (ondulado) y de 20 a 45% (fuertemente ondulado). Así SWAT crea un nuevo mapa de suelos redefinidos.

Para la definición del SWAT de la HRU permite establecer rangos de corte entre Tipo de suelo, Uso de Suelo y Pendiente, los valores determinados fueron 10%, 20% y 10% respectivamente. Estos rangos porcentuales también fueron utilizados por Machado (2002), Boskidis et al. (2012) y Silva (2013).

Una vez definidas las HRU's de la cuenca, se requiere la ubicación de las estaciones meteorológicas y del generador de clima, las cuales fueron obtenidas conforme lo indicado en el ítem 3.2.4. Los datos climáticos se ingresaron mediante la herramienta 'Inserción de Tablas' (Write Input Tablets) > 'Estación Meteorológica' (Weather Station), la cual brinda cinco pestañas para insertar los archivos en formato de texto (.txt) referentes a radiación solar, humedad relativa, temperaturas máximas y mínimas, velocidad del viento y precipitación.

Después de haber completado todos estos pasos requeridos por el modelo, se realizó el paso final ejecutando el modelo para realizar la simulación de flujo, generando el 'resultado estándar' del modelo; del período 01/01/1999 al 30/12/2014. En este trabajo, el mismo procedimiento fue adoptado por Peterson y Hamlet (1998), White y Chaubey (2005), Oliveira et al. (2006), Almeida (2013) y Oliveira (2014), quienes utilizaron la práctica de separar los primeros tres años de simulación, con el objetivo de calentar el modelo. Este procedimiento se realiza para estabilizar las condiciones iniciales de humedad del suelo. (CARVALHO NETO et al. 2011).

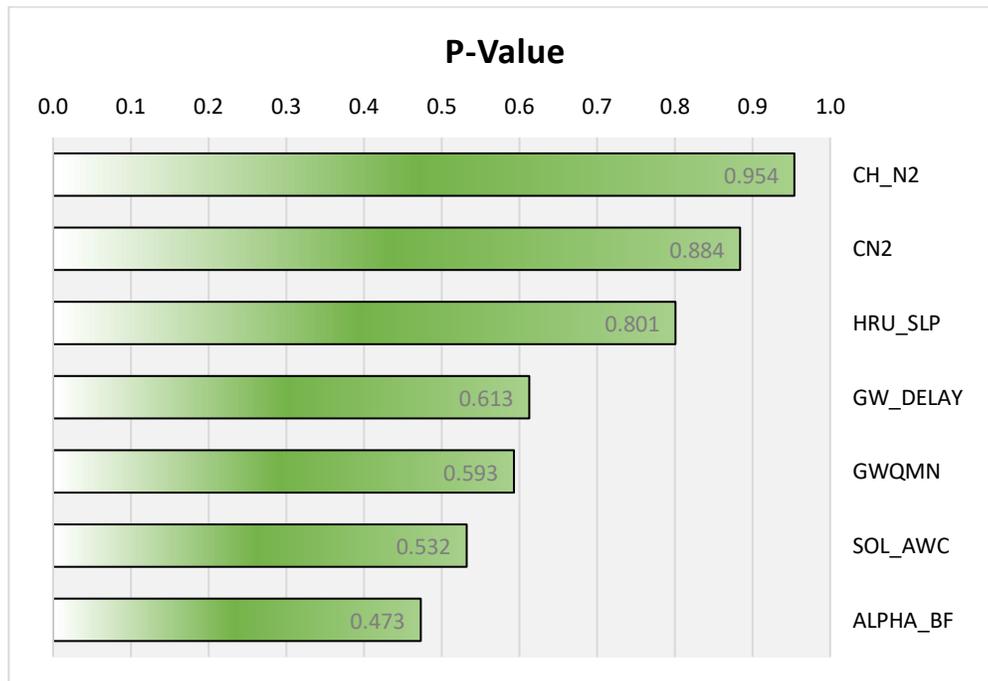
4.4 Análisis de Sensibilidad, Calibración y Validación de Parámetros

Para el Análisis de Sensibilidad se utilizó el software SWAT-CUP, también utilizado por Yang et al. (2008), Strauch et al. (2012), Rouholahnejad et al. (2012), Rocha (2013) y Oliveira (2014). El método analizó las incertidumbres de los parámetros con el factor P, que es el porcentaje de datos observados dentro del 95% de la incertidumbre prevista (95PPU), teniendo como función objetivo el coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe (NS), R^2 , PBIAS e RSR (ABBASPOUR, 2012).

El Análisis de Sensibilidad permite identificar los parámetros más sensibles que modifican la variable a calibrar en el modelo, y sirve como ayuda y guía para futuras investigaciones como lo sugieren Lelis et al. (2012), Cibin et al. (2010) y también Baltokoski et al. (2010). Los parámetros

seleccionados fueron señalados como los más sensibles en la simulación de flujo en varios trabajos (van GRIENSVEN et al., 2006; LELIS, 2001; STRAUCH et al, 2012; ALMEIDA, 2013; SILVA, 2013; OLIVEIRA, 2014), de los cuales los más sensibles fueron el coeficiente de rugosidad de Manning (CH_N2), el número de curva (CN2), la pendiente media (HRU_SLP), el tiempo de retraso del flujo del suelo (GWDELAY), la profundidad del agua límite en el acuífero somero para el flujo base (GWQMN), la capacidad de agua del suelo disponible (SOL_AWC) y la constante de recesión del flujo base (ALPHA_BF), como se muestra en la Figura 3.7, donde se definen los límites inferior y superior de cada parámetro (Tabla 3.2), a partir de un valor inicial (ABBASPOUR, 2012).

Figura 3.7 – Parámetros mas sensibles determinados en SWAT-CUP para modelamiento del rio Betume



Fuente: SWAT-CUP (2012)

Según Green y van Griensven (2008) y también Oliveira (2014), al final de la fase de análisis, el modelo es calibrado con los parámetros identificados como los más sensibles, los datos utilizados para la calibración comprenden el período 2012 a 2013 de la estación SEMARH. La aplicación de SWAT-CUP siguió la metodología descrita por Abbaspour (2012), proceso en el cual se cambia el valor, teniendo en cuenta los límites superior e inferior, de un parámetro a la vez en

cada simulación hasta encontrar valores estadísticos aceptables. entre datos, datos observados y simulados.

Para validar el modelo se mantuvieron constantes los parámetros ya calibrados en el paso anterior. En este paso se utilizaron datos de caudales del periodo 2014 a 2015, realizando una última simulación de caudales con SWAT. Los resultados del período de validación del modelo también se analizaron utilizando los índices estadísticos que se muestran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.2 – Parámetros y límites de los parámetros usados en el análisis de sensibilidad

PARAMETROS	DESCRIPCION	UNIDADES	LÍMITES		MÉTODO DE VARIACION
			Min	Max	
CN2	Número da curva na condição II de umidade	adimensional	-0.2	0.2	Multiplicar
ALPHA_BF	Constante de recessão do escoamento de base	dias	0	1	Igualar
GW_DELAY	Tempo de retardo do fluxo subterrâneo	dias	30	450	Igualar
GWQMN	Profundidade limite de água no aquífero raso para o escoamento de base	metros	0	2	Igualar
CH_N2	Coefficiente de rugosidade de Manning (n) para o canal principal	adimensional	0	0.3	Igualar
HRU_SLP	Declividade media (influencia no fluxo lateral e no tempo de concentração)	m.m ⁻¹	0	0.2	Igualar
SOL_AWC	Capacidade de água disponível no solo	mm H ₂ O. mm solo ⁻¹	-0.2	0.4	Multiplicar

Fuente: Adaptado de Silva (2013)

En el proceso de análisis de las respuestas del modelo, la comparación gráfica y los criterios estadísticos utilizados por Machado (2002), Moro (2005), Moriasi et al. (2007), Almeida (2013), Silva (2013) y Oliveira (2014). Quienes consideren muy importante el Coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NS) (Ecuación 7), este coeficiente puede variar desde infinito negativo hasta 1, donde 1 indica un ajuste perfecto.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (7)$$

en que:

O_i = evento observado,
 S_i = evento simulado por el modelo,

\bar{O} = media del evento observado en el período de simulación y
 n = número de eventos.

Otro criterio utilizado fue el Coeficiente de Determinación R² (Ecuación 8), que describe la razón de dispersión de los datos simulados alrededor de la media de los valores observados, indicando la proporción de la varianza total de los datos observados con los datos simulados. Los valores de R² van de 0 a 1, los valores superiores a 0,5 se consideran satisfactorios (MORIASI et al, 2007; GREEN e van GRIENSVEN, 2008).

$$R^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S}) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2} \quad (8)$$

en que:

O_i = evento observado en el período analizado

S_i = evento simulado en el período.

i = secuencia de serie temporal de los pares medidos y simulados.

n = número de pares de las variables medidas y simuladas.

Como último criterio se utilizó el Porcentaje de Tendencias (PBIAS) y la Relación entre el Error Estándar Promedio y la Desviación Estándar de las Observaciones (RSR), que como mencionan Moriasi et al. (2007) se destacan en técnicas de evaluación estadística en investigaciones de aplicabilidad SWAT. El índice PBIAS (Ecuación 9) indica la tendencia promedio de los datos simulados a ser mayores o menores que los datos observados. Si el valor es cero, PBIAS se considera óptimo. Valores con baja magnitud indican precisión en la simulación del modelo, mientras que valores positivos indican sobreestimación (MORIASI, 2007).

El índice RSR, como se muestra en la Ecuación 10, donde RMSE es la raíz cuadrada del error cuadrático medio y STDEV es la desviación estándar, es una versión estandarizada que incluye una estadística de error; el valor considerado óptimo para el RSR es cero, lo que indica una simulación perfecta. Significa que mientras el valor de RSR es más pequeño, mejor es el rendimiento de la simulación del modelo. (MORIASI, 2007; OLIVEIRA, 2014).

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i) \cdot 100}{\sum_{i=1}^n O_i} \right] \quad (9)$$

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad (10)$$

Segundo Silva (2013) citando a Loague y Green (1991) no existe un estándar de valores de estas medidas estadísticas para juzgar el desempeño del modelo como aceptable. En este caso, los intervalos propuestos por Moriasi et al. (2007) y Silva (2013). Los resultados de la simulación se consideraron aceptables según los valores de NS, R2, RSR y PBIAS (Tabla 3.3), teniendo en cuenta los rangos máximos y mínimos para mantener los valores de salida razonables.

Tabla 3.3 – Critérios de avaliação de desempenho de modelos hidrológicos y sus respectivas classificações.

CLASSIFICAÇÃO	NS	RSR	PBIAS (vazão)	R ²
Muito bom	0.75 < NS ≤ 1.00	0.00 ≤ RSR ≤ 0.50	PBIAS < ±10	
Bom	0.65 < NS ≤ 0.75	0.50 ≤ RSR ≤ 0.60	±10 ≤ PBIAS < 15±	
Satisfatório	0.50 < NS ≤ 0.65	0.60 ≤ RSR ≤ 0.70	±15 ≤ PBIAS < 25±	R ² > 0.50
Insatisfatório	NS ≤ 0.5	RSR > 0.70	PBIAS ≥ ±25	

Fuente: Adaptado de Moriasi et al. (2007) e Silva (2013).

3.5 Construcción de Escenarios

Los escenarios fueron dirigidos en relación al problema hídrico del perímetro irrigado de Betún y deforestación para favorecer la creciente agricultura de la región del Bajo São Francisco, en la que, a través del proyecto Aguas do São Francisco, se desarrollaron actividades para reforestar los bosques ribereños a orillas del río Bitume con el fin de garantizar la regularización de la producción de agua en la cuenca. (AGUIAR NETTO, et al. 2015).

Silva et al (2015) en la caracterización macroscópica del estado de impacto ambiental de las fuentes del río Betume, determinaron que de las 6 fuentes observadas y analizadas se encuentran en un estado razonable de conservación. Sin embargo, el nacimiento principal del río Bitume sufrió el mayor impacto antrópico, donde es claro que no se cumple con la ley del Código Forestal vigente.

Para simular los escenarios, se utilizó la metodología adoptada por Carvalho Netto et al (2010) y Silva (2013), que consiste en modificar la curva numérica ajustando el valor para diferentes usos del suelo. El modelo SWAT utiliza la curva numérica (CN) para modificar la condición de humedad del suelo para estimar la escorrentía superficial. (NEITSCH et al, 2005).

Los escenarios considerados están en función del uso y ocupación del suelo para identificar sus diferencias e influencia en la producción de agua y sedimentos. Se realizaron tres situaciones diferentes considerando el área de estudio y teniendo en cuenta los parámetros calibrados del modelo, ya que la calibración y validación fueron satisfactorias.

ESCENARIO 1: Uso actual del suelo en la cuenca del río Betume, manteniendo las prácticas agrícolas actuales en las áreas en uso. Con valor promedio de número de curva de 71.9

ESCENARIO 2: Cobertura vegetal nativa (Bosque mixto), simulando una reforestación de áreas de uso agrícola. Para este escenario se utilizó CN igual a 55.

ESCENARIO 3: El avance de los cultivos predominantes (arroz, caña de azúcar y pastos), simulando deforestación, ampliando el uso del área agrícola. En este caso, el valor de la curva numérica fue 77.

Con los valores de la curva numérica para cada escenario, se inició el procesamiento de datos en el modelo SWAT, eligiendo las subcuencas, uso y ocupación del suelo, tipo de suelo y pendiente del terreno, para simular cada escenario.

En este contexto, se simularon escenarios con el fin de buscar la situación más favorable para el mantenimiento sostenible del uso y ocupación del suelo de la cuenca del río Bitume, y garantizar la cantidad y calidad del agua con niveles aceptables que no perjudiquen la actividad para el cual está destinado.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Monitoreo del caudal del río Betume

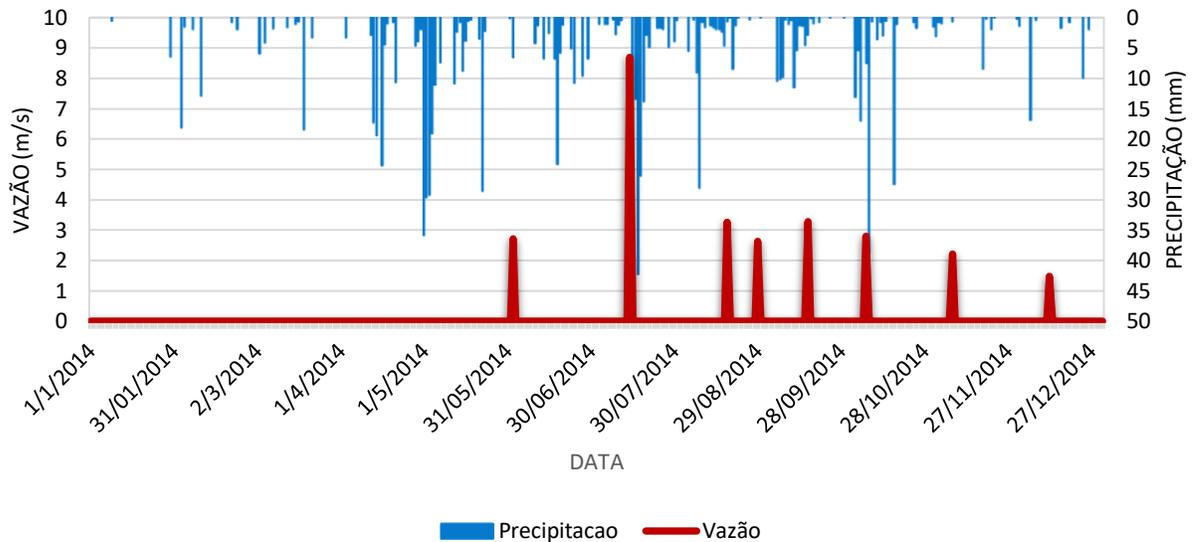
En el presente estudio se utilizó la serie de datos de precipitación del año 2013 y 2014 de la estación Propriá. La Tabla 4.1 muestra las medidas de caudal desde el 14/junio hasta el 15/agosto. Observando el gráfico de la Figura 4.1, se puede apreciar una adecuación satisfactoria a los resultados medidos en campo, pero es importante señalar que la estación de Propriá fue la única que tuvo datos de lluvia diaria para todo el año 2014. Los datos de caudal medidos en el campo, sirvieron para mostrar el comportamiento del río en el punto de monitoreo de la Estação del Puente Serigy.

Tabla 4.1 – Datos de caudales medidos en la estación Puente Serigy del rio Betume

Data	Vazão (m³/s)
02/06/14	2.71
14/07/14	8.69
18/08/14	3.25
29/08/14	2.63
16/09/14	3.28
07/10/14	2.79
07/11/14	2.22
12/12/14	1.48
15/01/15	1.25
22/01/15	0.70
04/02/15	0.89
11/02/15	0.68
27/02/15	1.72
04/03/15	0.75
13/03/15	1.69
27/03/15	0.69
10/04/15	0.75
15/05/15	0.77
12/06/15	2.68
14/07/15	4.79
24/07/15	3.17
03/08/15	5.29

Fuente: Autor

Figura 4.1 – Hidrograma para evaluación de los resultados del monitoreo del caudal del río Betume en la estación Puente Serigy.

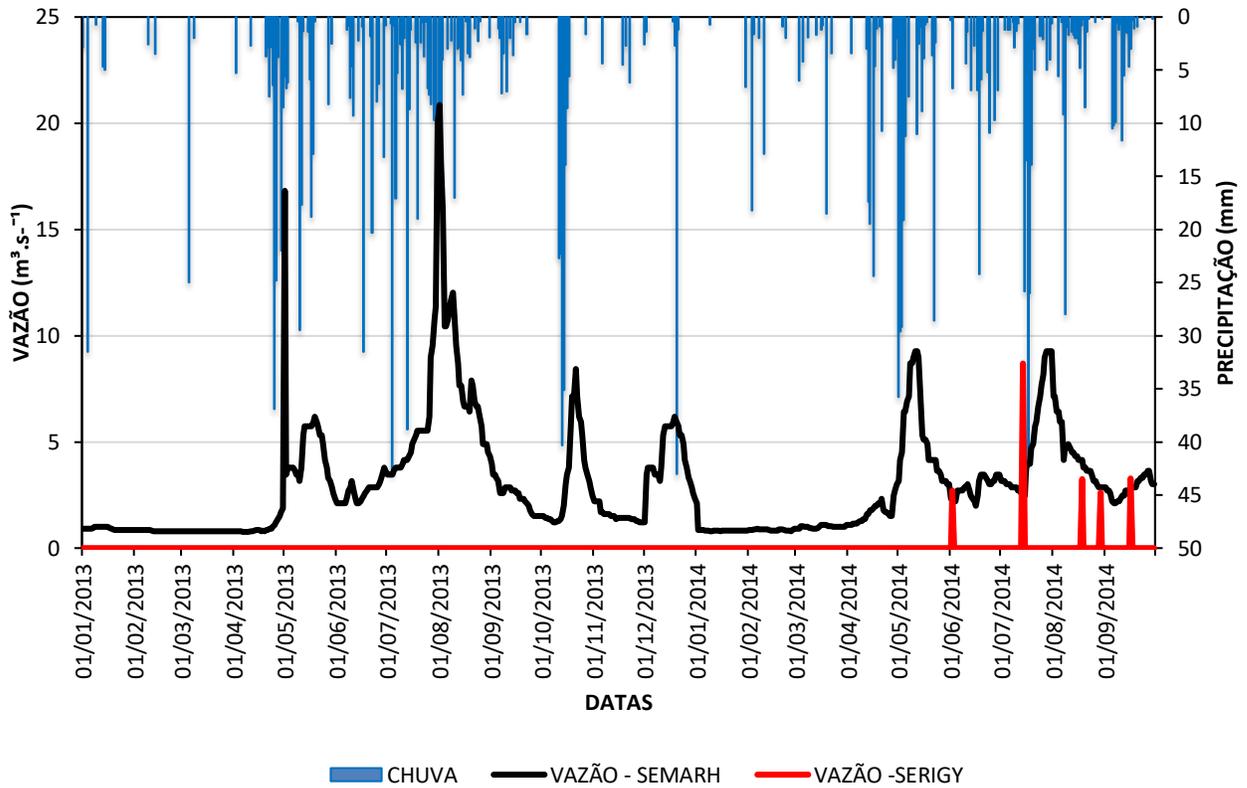


Fuente: Autor

Como se puede observar en el hidrograma de la Figura 4.1, el caudal máximo (8,69 m³.s⁻¹) coincide con la época de lluvias en julio, mientras que, para la época seca, de septiembre a diciembre, los valores de caudal son menores. En diciembre, el caudal mínimo registró un valor de 1,48 m³.s⁻¹. Las mediciones de caudal se realizaron de junio a diciembre/2014 y sirvieron para ver el comportamiento de la cuenca del río Betume con relación a los datos de lluvia de la estación en los meses de junio a diciembre de ese año.

En el hidrograma de la Figura 4.2 en la serie histórica de datos de la SEMARH de Ene/2013 a Sep/2014; en la época de lluvias (abril a agosto/2013) se observa que los picos de caudal coinciden con los picos de precipitación. El primer día de mayo de 2013, el caudal alcanzó el valor máximo (16,82 m³.s⁻¹) con una precipitación de solo 5,6 mm para ese día, lo que se explica en relación a este hecho, es que los días anteriores registraron precipitación de 36,9; 24,8; y 22 mm los días 25, 26 y 29 de abril/2013 respectivamente. Considerando que el tipo de suelo en la cuenca es en su mayoría suelos Neosoles, caracterizados por ser arenosos no hidromórficos y de mediana permeabilidad (EMBRAPA, 1999) y una precipitación que se presenta cuando el suelo está húmedo por una lluvia anterior, tendrá mayor facilidad de salida.

Figura 4.2 – Hidrograma de las estaciones de monitoreo Puente Serigy y SEMARH



Fuente: Autor

.El otro pico de caudal de la época lluviosa ocurre en el mes de julio/2013, que alcanza un valor de $19,98 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ con una precipitación de 15,8 mm, producto, según explicó, de la ocurrencia de lluvias anteriores. Para la época poco lluviosa (septiembre/2013 a marzo/2014) se registraron picos de caudal de 8,43 y $5,31 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ con precipitaciones de 40,3 y 40 mm respectivamente. En la segunda temporada de lluvias (abril a agosto/2014) de esta serie, se registraron dos picos de caudal de 8,98 y $9,26 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ para precipitaciones de 35,8 y 42,2 mm, respectivamente.

Los valores medidos referentes a las cuotas y caudales respectivos para el tramo del río Bitume de la E.F. SEMARH, se presentan en el Anexo C, con lo cual se generó la Curva Clave del río. Para ello, a los datos tabulados se les aplicó los modelos de regresión polinómica (11) y exponencial (12) del software Excel, obteniendo las respectivas ecuaciones de regresión de la curva clave del río Betume (Figura 4.3).

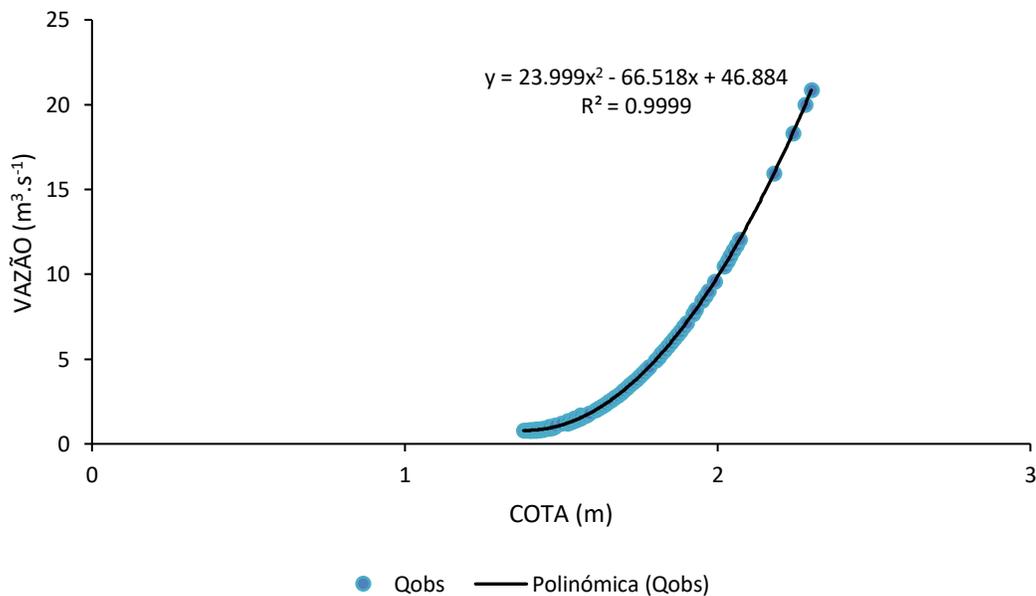
Para determinar la ecuación de la curva clave a partir de la ecuación exponencial, se utilizó la metodología propuesta por Porto, Zahed Filho y Silva (2001), los parámetros de ajuste se calcularon a partir de los pares (Q, h) se linealiza la expresión general determinando- si a y b por regresión lineal y h_0 por prueba y error. Se utilizó la herramienta Solver de Excel.

$$Q = 23,999h^2 - 66,518h + 46,884 \quad (11)$$

$$Q = 11,28(h - 1,05)^{2,83} \quad (12)$$

en que: Q es el caudal ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) y
 h es el nivel de la regla (m)

Figura 4.3 – Curva llave del caudal para el rio Betume



El coeficiente de correlación (R^2) entre el caudal observado y el calculado a través de la ecuación exponencial de 0,99, indicando una alta correlación positiva entre las variables. Considerando la ecuación polinomial y el coeficiente entre variables de 0,99 mostrando también una alta correlación entre los datos observados y calculados. También se aplicó el Coeficiente de Nash-Sutcliffe, NS (Ecuación 7), el cual varía de infinito negativo a uno, indicando este último que el modelo alcanzó un ajuste perfecto. (LINO et al., 2009).

Los valores de NS encontrados para las dos situaciones de determinación de la curva clave, regresión polinomial y exponencial, 0,99 en ambos casos. Estos resultados indican un ajuste perfecto de las ecuaciones utilizadas para los pares de valores de elevación y flujo. Los valores del coeficiente de eficiencia $NS > 0,4$ y coeficiente de determinación, $R^2 > 0,5$ indican el muy buen desempeño del modelo (GREEN e van GRIENSVEN, 2008).

Silva (2013) encontró valores de R^2 y NS de 0,96 y 0,93 respectivamente para las dos situaciones de determinación de la curva clave, regresión polinomial y exponencial, para el río Poxim-Açu. En el Anexo D se presentan los valores de caudal calculados (Q_{cal}) a partir de las ecuaciones de la curva clave polinomial y exponencial para el río Betume.

4.2 Análisis de sensibilidad

La Tabla 4.2 muestra el orden de importancia de los parámetros que más pueden influir en la simulación de caudales en la cuenca del río Bitume. Estos valores se obtuvieron en base a las funciones objetivo NS, PBIAS, R^2 y RSR utilizando el método SUFI-2. El valor p (*p-Value*) determina la significancia de la sensibilidad donde los valores cercanos a cero tienen mayor significancia (ABBASPOUR et al. 2011)

El análisis de sensibilidad determinó que la variación de los parámetros ALPHA_BF, GWQMN, GW_DELAY y SOL_AWC se comprometen con el flujo subterráneo y evalúan directamente la respuesta del flujo subterráneo en función de la recarga y en las capas del suelo. El parámetro SOL_AWC es un indicador del contenido de humedad disponible en el suelo, este índice es importante ya que dependiendo del valor se alcanza la capacidad de campo, el exceso se drena bajo tierra y superficialmente. Aguiar Netto (1999) explica que en casos de suelos permeables,

como los suelos de la cuenca del río Betume, este fenómeno ocurre dos o tres días después de la lluvia o riego.

Tabla 4.2 – Orden de sensibilidad dos parâmetros para simulação de vazão da bacia hidrográfica do rio Betume.

Parâmetro	Descrição	Ordem Sensibilidade	Processo
ALPHA_BF	Constante de recessão do escoamento de base	0.473	Fluxo subterrâneo
SOL_AWC	Capacidade de água disponível no solo	0.532	Armazenamento, Escoamento Base, Escoamento Superficial
GWQMN	Profundidade limite de água no aquífero raso para o escoamento de base	0.593	Fluxo subterrâneo
GW_DELAY	Tempo de retardo do fluxo subterrâneo	0.613	Fluxo subterrâneo
HRU_SLP	Declividade media (influencia no fluxo lateral e no tempo de concentração)	0.801	Declividade
CN2	Número da curva na condição II de umidade	0.884	Escoamento superficial
CH_N2	Coefficiente de rugosidade de Manning (n) para o canal principal	0.954	Escoamento superficial

Fuente: SWAT-CUP (2012) – Org: R. C. Salazar

Cuanto mayor sea el valor de ALPHA_BF, mayor será la recarga del acuífero y menor el caudal base. Los valores de este parámetro varían entre 0,1 y 0,3 para lugares cuyas respuestas a las recargas son bajas y de 0,9 a 1,0 en lugares sensibles a la recarga (ECKHARDT, 2001; NEITSCH et al, 2011; ARNOLD et al., 2012). El valor encontrado para este parámetro (0.473) indica que la respuesta de recarga en la cuenca no es ni demasiado lenta ni demasiado rápida. Es decir, que la cuenca del río Bitume presenta una recarga promedio, lo cual se refleja en las mediciones de caudal realizadas en campo, al compararlo con la precipitación.

Los demás parámetros fueron HRU_SLP, CN2 y CH_N2 relacionados con el coeficiente de rugosidad de Manning (n), indicando que tiene gran influencia la pendiente, la textura del suelo y el relieve ondulado del área. Chow (1994) y Lyra (2010) explican que en la mayoría de los caudales el valor n disminuye al aumentar el nivel del agua, y cuando el nivel del agua baja, la irregularidad del fondo del cauce queda expuesta a su efecto, aumentando el valor de este valor. parámetro. El río Bitume tiene una altura de agua que varía de 0,50 a 2,20 m. Por lo tanto, se explican los valores de estos parámetros en la cuenca.

Strauch et. al (2012) en el análisis de incertidumbres simulando el caudal del arroyo Pipiripau, en el Distrito Federal con clima semihúmedo; obtuvo el CN2, ALPHA_BF y GWQMN como los parámetros más influyentes, el autor presentó una discusión respecto a la intensidad de la precipitación en la zona, el tipo de suelo y el caudal del río cargado de bosque y maleza. El estudio reveló que la incertidumbre del parámetro varía significativamente según el procedimiento de optimización utilizado. Aragón et. al (2013) modelando con SWAT la cuenca del río Japarutuba Mirim, en la zona salvaje del estado de Sergipe, en el análisis de sensibilidad destacaron los parámetros ALFA_BH, CN2, GW_DELAY que tuvieron mucha influencia en los resultados de la simulación, y se consideraron compatibles con las condiciones geológicas y climáticas de la región, así como el tipo de cobertura del suelo.

Pereira (2014), aplicando el modelo SWAT en la cuenca del arroyo Galo en Domingos Martins, estado de Espírito Santo, también presentó los parámetros antes mencionados como los más influyentes en el modelado de la cuenca. Diferentes investigadores como Adriolo et al (2008), Lino et al (2009), Jha (2009), Lelis et al (2012), Durães et al (2012) y Andrade et al (2013) utilizando el modelo SWAT en cuencas brasileñas en sus análisis de sensibilidad, los resultados obtenidos concuerdan con los parámetros más sensibles indicados en este estudio.

Algunos de los parámetros identificados como los más sensibles no son fácilmente medibles o estimables porque no se dispone de valores realistas. En términos generales, el modelo SWAT mostró un alto grado de sensibilidad a los parámetros relacionados con las aguas subterráneas (caudal base), el tipo de suelo y la escorrentía superficial en el cauce principal.

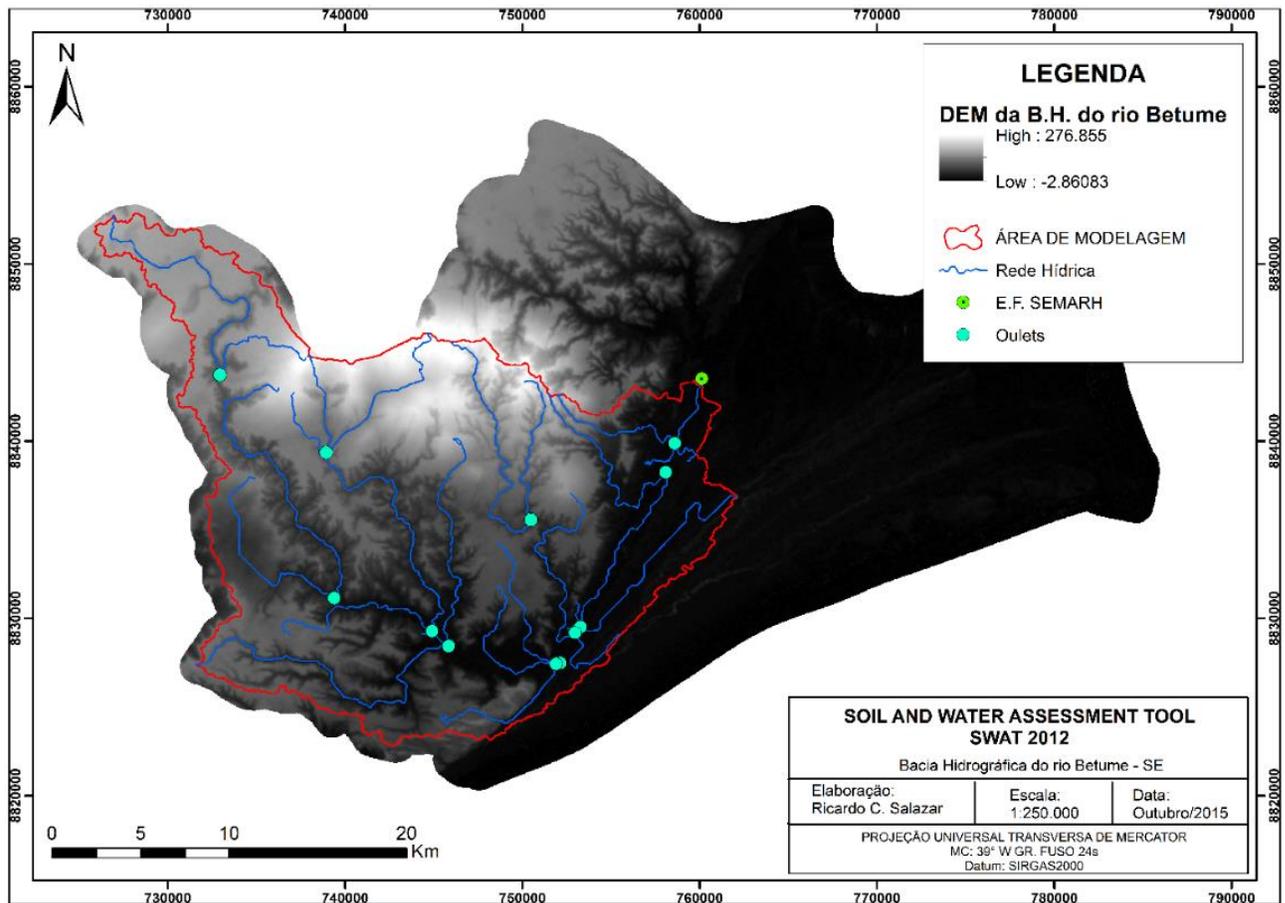
4.3 Modelamiento de la Cuenca Hidrográfica del río Betume

En el proceso de modelado SWAT del área de estudio en la cuenca del río Bitume (Figura 4.4), a partir del DEM, el modelo utilizando como desagüe la E.P.SEMARH, delimitó un área de 553.63 km², dividida en 26 subcuencas y con 192 unidades de respuesta hidrológica (HRU) como se muestra en Figura 4.5 (A; B).

Silva (2013) usando SWAT para modelar la cuenca del río Poxim-Açu, usando un DEM de 90m de resolución, delimitó un área de 116,11km², obteniendo 25 subcuencas y 209 HRUs. Oliveira (2014) modelando la cuenca en el municipio de Aracruz, estado de Espírito Santo, utilizó

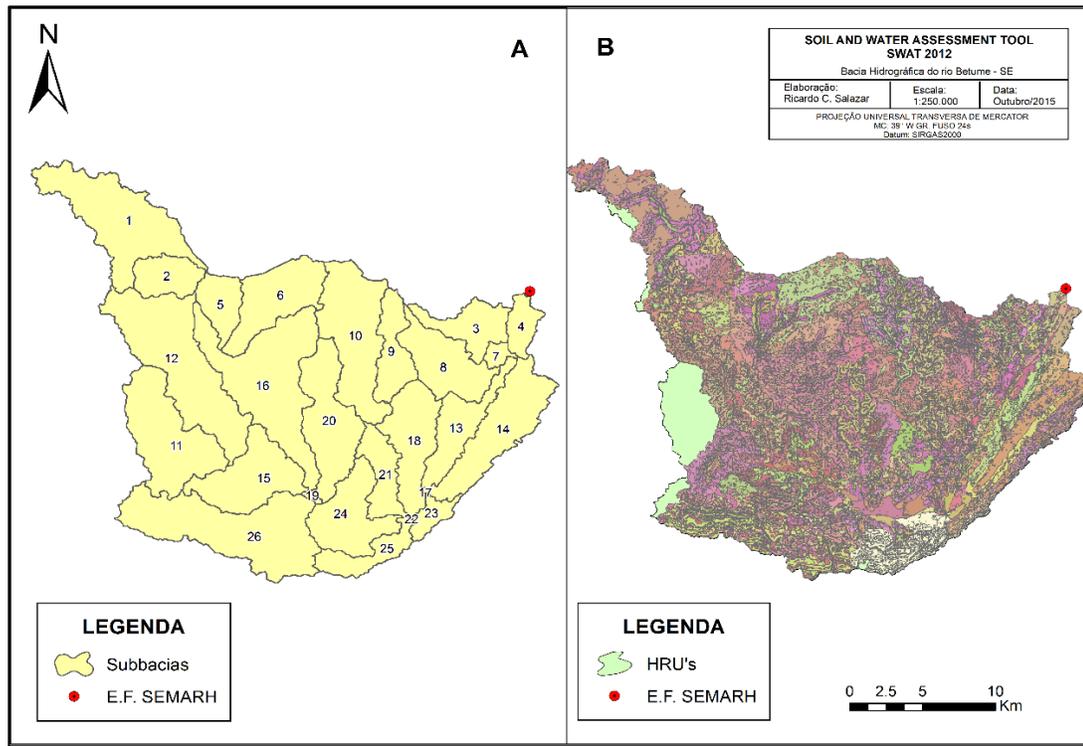
un DEM con una resolución espacial de 5x5 m, delimitó un área de 500 km² en la que SWAT determinó 22 subcuencas y 276 HRU. Souza y Santos (2013) en la modelación de la cuenca del Alto Río Negro con un área de 788 km², el modelo delimitó 47 subcuencas y el número de URH fue de 436.

Figura 4.4 – Modelo Digital de Elevación de la cuenca hidrográfica del río Betume usado SWAT con la delimitación del área de estudio.



Fuente: SWAT – Org: R. C. Salazar

Figura 4.5 – Mapas gerados pelo SWAT: A) Subbacias B) Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs).



Fonte: SWAT – Org: R. C. Salazar

Moro (2005) determinó mediante SWAT 38 subcuencas en la microcuenca hidrográfica de Ribeirão do Marins en un área de 597,3 km².

Según Machado et al (2003) la discretización no aclara la precisión de los resultados simulados y puede conducir a un aumento en el tiempo de simulación y el tamaño de los archivos generados. Una discretización basta puede conducir a resultados deficientes, mientras que una muy detallada requiere más datos de entrada y no garantiza resultados óptimos.

El modelo clasifico los suelos conforme se muestra en la Tabla 4.3 y en la Figura (4.6-C) segun la clasificación de la EMBRAPA (2006) en: Neossolos ocupando la mayor área con 259,68 km² que representa el 50,66% del área total delimitada, Planossolos con 79,5 km² (15,51 %), Argissolos con 107,13 km² representando el 20,9% y Espodosolos con 66,3 km² representando el 12,93%.

Para el uso y ocupación del suelo, el modelo se clasificó como se muestra en la Tabla 4.4 y la Figura 4.6-D, donde la mayor superficie la ocupa la Agricultura 67.293,77 Ha, que representa el

36,90% del área de estudio; seguido de Pasto y Bosque Ombrófilo Mixto con 34.14 y 17.07 % respectivamente.

Tabla 4.3 – Clasificación de suelos para modelamiento con SWAT de la cuenca hidrográfica del río Betume.

SIGLA	SUELO	ÁREA (km²)	%
RQd2	Nesosolos Quartzarrênicos	259.68	50.66
SNd	Planossolos	79.5	15.51
PVA10	Argissolos Vermelho Amarelo	107.13	20.90
ES	Espodossolos	66.3	12.93
Total		512.61	100

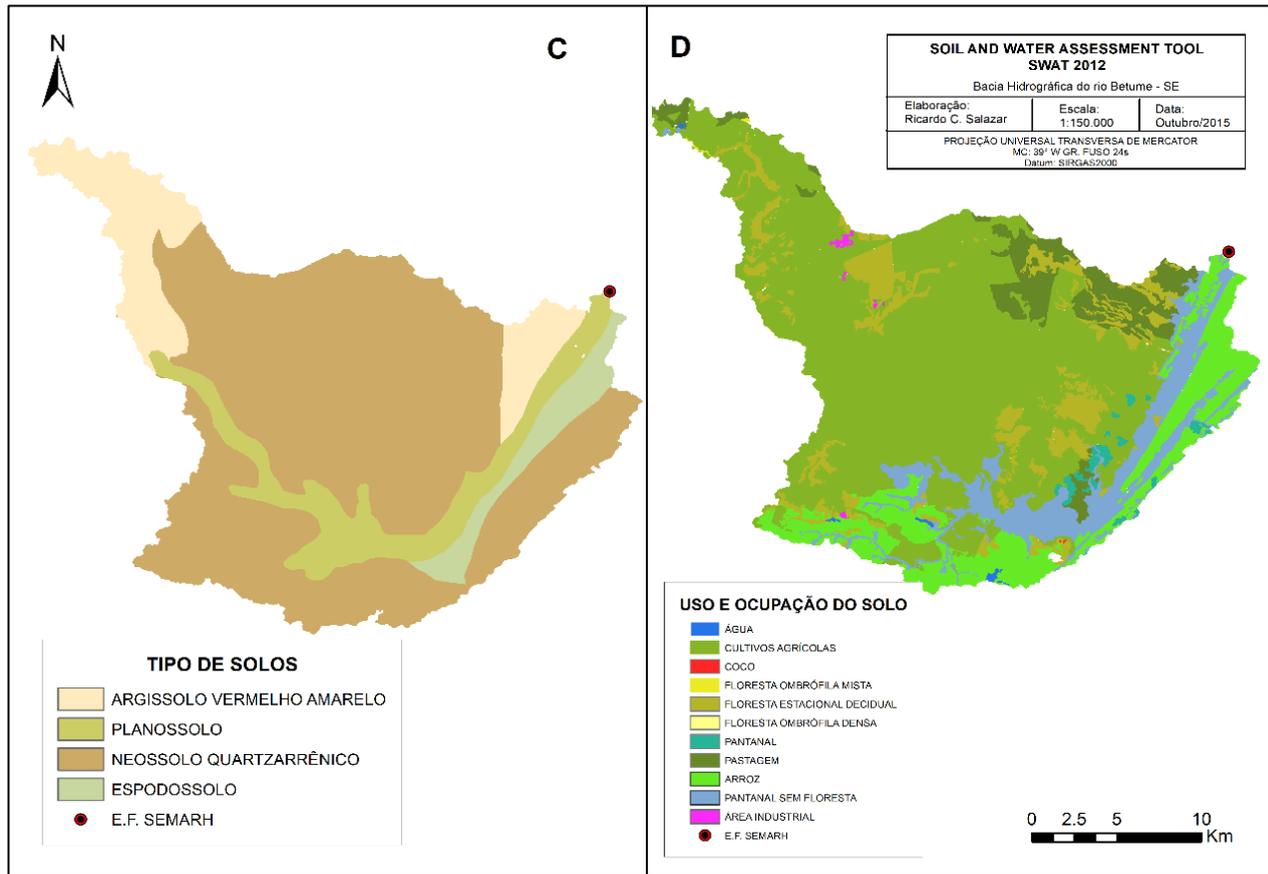
Fuente: SWAT (2012) y EMBRAPA (2006) – Org: R. C. Salazar

Tabla 4.4 – Uso y Ocupación del Suelo para modelamiento con SWAT de la cuenca hidrográfica río Betume.

ID	USO DEL SUELO	AREA (Ha)	%
0	Agua	3.043,93	1,67
1	Agricultura	67.293,77	36,90
2	Coco	5.585,34	3,06
3	Floresta ombrófila mista	31.122,46	17,07
4	Floresta estacional decidual	10.334,71	5,67
5	Floresta ombrófila densa	1.333,84	0,73
6	Pantanal	906,88	0,50
7	Pastagem	62.260,64	34,14
8	Arroz	82,65	0,05
10	Pantanal sem floresta	219,21	0,12
12	Área industrial	184,71	0,10
TOTAL		182.368,14	100

Fuente: SWAT (2012) – Org: R. C. Salazar

Figura 4.6 – Mapas generados por SWAT: C) Tipos do Suelo D) Uso y Ocupación de la tierra



Fonte: SWAT – Org: R. C. Salazar

4.4 Calibración e Validación del modelo SWAT

Los resultados de la calibración mediante SWAT-CUP, se pueden observar en el análisis visual del hidrograma simulado en relación al observado, lo cual es una herramienta importante para evaluar el ajuste básico para una correcta forma de evaluación del modelo. En las Figuras (4.7) y (4.8) se puede analizar el hidrograma observado y simulado, en las fases de calibración y validación del modelo SWAT.

Para la calibración se utilizaron datos de enero/2013 a marzo/2014, en los que se puede observar que para la época seca, enero a marzo de los años 2013 y 2014, el caudal fue levemente sobreestimado; en los meses de septiembre a diciembre de 2013, los valores de recesión fueron levemente subestimados. Mientras que para la temporada de lluvias, de abril a agosto de 2013, el modelo subestimó levemente los picos de caudal, considerándolo satisfactorio para el modelo..

Figura 4.7 – Hidrograma del caudal mensual referente a la calibración período jan-2013 a mar-2014

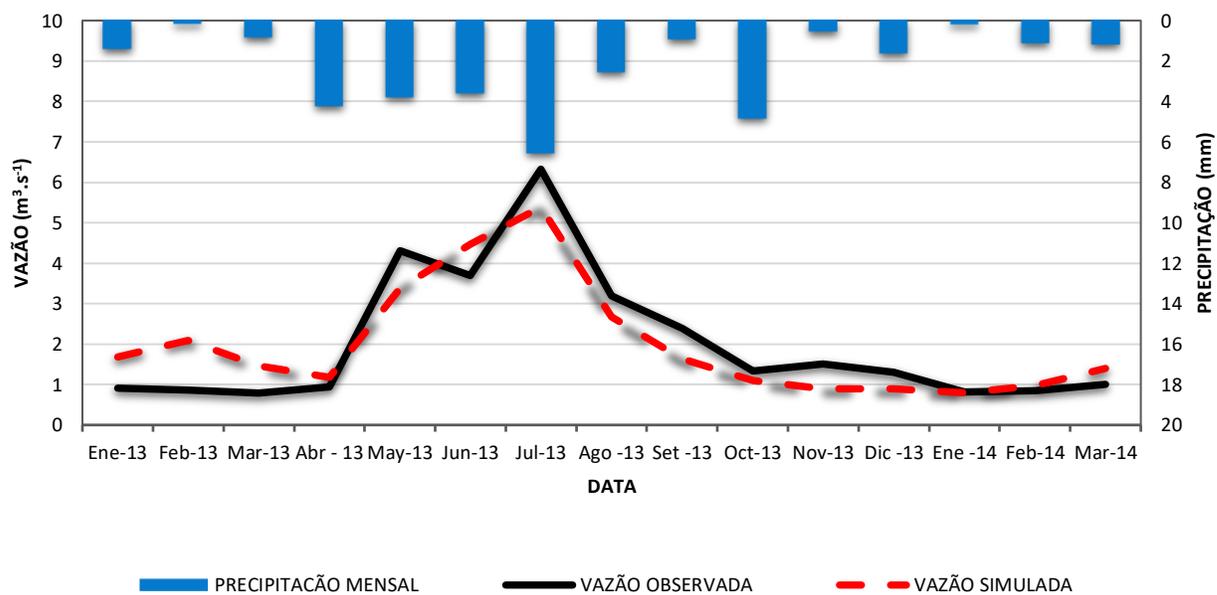
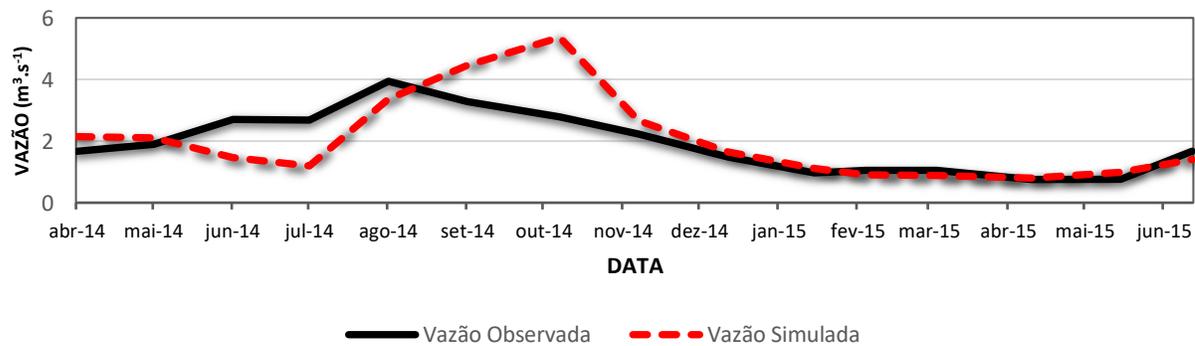


Figura 4.8 – Hidrograma de caudal mensual referente a la validación no período abril-2014 a jun-2015



Esta simulación indica que el modelo es más eficiente en la simulación de caudales mínimos (ANDRADE et al. 2013)

De acuerdo a los valores de desempeño propuestos por Moriasi et al (2007) y utilizados por muchos investigadores en el análisis de modelos hidrológicos; los valores de desempeño en la fase de calibración fueron considerados muy buenos, donde el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) tuvo un valor de 0.80, el coeficiente de determinación (R^2) de 0.81; el porcentaje de tendencia (PBIAS) de -1,3 y la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RSR) de 0,44.

La mayoría de los trabajos encontrados en la literatura utilizan NS, R^2 , PBIAS y RSR para probar la eficiencia de SWAT en la simulación del comportamiento de flujos en cuencas hidrográficas. Aragão et al (2013) en la calibración de caudal de la cuenca del río Japarutuba obtuvieron NS (0,83) y PBIAS (8,5) considerados muy buenos. Andrade et al (2013) en la fase de calibración en Alto Rio Grande lograron NS (0.66) y PBIAS (4.33) colocando el modelo en la categoría muy bueno.

En el estado de Sergipe, Silva (2013) encontró NS (0,74), PBIAS (4,79), R^2 (0,75) y RSR (0,51) que fue considerado muy bueno en el desempeño del modelo para el análisis hidrográfico de la cuenca del Poxim-Açu río, en la simulación de flujo en el paso de tiempo mensual. Almeida (2013) en el proceso de calibración en la producción de agua de la cuenca del río Poxim-Açu obtuvo NS (0,74), PBIAS (-5,22) y RSR (0,51) consideró el desempeño del modelo SWAT de buena.

En base a los trabajos encontrados en la literatura sobre la aplicación del modelo SWAT y el desempeño en la fase de calibración, se puede observar que los valores de desempeño para la cuenca del río Betume fueron considerados satisfactorios en la fase de calibración.

Luego de obtener resultados satisfactorios en el proceso de calibración, se procedió a la validación, la cual se realiza con el propósito de confirmar la precisión del modelo con el objetivo de simular procesos en cuencas monitoreadas hidrológicamente. (ARABI et al. 2007).

El periodo de validación fue de abril de 2014 a junio de 2015, el hidrograma muestra gráficamente el comportamiento de los caudales simulados por SWAT en relación a los caudales

observados en el monitoreo (Figura 4.8) el mismo que se realizó manteniendo los valores de los parámetros de calibración.

Los criterios de evaluación del desempeño del modelo en la etapa de validación muestran que los picos de caudal no coincidieron (Figura 4.8), pero hubo una tendencia hacia un mejor ajuste en los caudales mínimos. Los valores simulados se ajustan mejor en los caudales mínimos, mientras que para los caudales pico más altos se sobrestimaron.

Según Krausse et al. (2005) la eficiencia del modelo aumenta cuando la escorrentía superficial es muy baja o nula, en los que los errores relacionados con valores de caudales bajos tienden a ser menores que los asociados a caudales más altos. Strauch et al (2012) y Aragão et al (2013) encontraron una situación similar al validar el modelo. En estos casos la simulación fue mejor para caudales mínimos.

Andrade et al. (2013) también observaron que estas diferencias en el modelo SWAT tienden a disminuir el NS cuando los caudales máximos difieren mucho de los caudales mínimos. En el proceso de validación en la modelación de la cuenca del Alto Rio Grande en Minas Gerais, se observó que el modelo tuvo un mejor ajuste en los caudales mínimos, por lo que sube el valor de NS, con lo cual en el periodo de validación los valores fueron subestimados..

Aragão et al. (2013), al validar el modelo para la cuenca del río Japaratuba, sobreestimó los valores pico, explicando este resultado en un NS bajo (0,41), sin embargo, el desempeño fue considerado satisfactorio. Silva (2013), al validar el modelo para la cuenca del río Poxim-Açu, notó que los picos de caudal de los datos simulados y observados no coincidían, sobreestimando el caudal. Explicar que el valor negativo del estadístico indica la tendencia a la sobreestimación del modelo.

A través de los resultados referentes a los criterios estadísticos R^2 (0.55) y PBIAS (-6.1) se puede afirmar que el modelo logró reproducir el patrón del hidrograma; con el cual el modelo es capaz de describir los procesos hidrológicos de la cuenca del río Betume.

Cabe señalar que la producción de sedimentos no fue calibrada por falta de datos, lo que no impide que se analice el estudio de su variabilidad espacial, pues según los desarrolladores del modelo SWAT, también se hizo para ser aplicado en cuencas no instrumentadas. (NEITSCH et al.,

2011; UZEIKA et al, 2012), en este caso el estudio se utiliza para hacer inferencias sobre las principales áreas productoras de sedimentos en función del uso del suelo en la cuenca del río. Betume.

4.5 . Escenarios

Luego de los procesos de calibración y validación, se aplicó el modelo SWAT para simular los escenarios descritos en la metodología, los cuales fueron diseñados para estimar cambios en la producción de agua y sedimentos por cambios en el uso de suelo para un periodo de 13 años, del 2002 al 2014.

El resumen de los resultados de la simulación en los tres escenarios descritos en la metodología se presenta en la Tabla 4.5. La columna titulada “Uso Actual” trata sobre el cuadro real de la cuenca del río Betume, que tiene la existencia de diversas coberturas de suelo: cocoteros, frutales, pastos, grass, bosques variados, caña de azúcar, arroz, y otros cultivos de subsistencia.

Tabla 4.5- Valores de média anual de los resultados da simulación de tres escenarios período de 2002 a 2014

Média Anual	Escenário 1	Escenário 2	Escenário 3
	Uso Actual	Reforestación	Agricultura
Escorrimento superficial (mm)	211.66	219.46	183.18
Producción de agua (mm)	9.78	7.25	16.63
Producción sedimentos (ton.ha ⁻¹)	10.37	8.73	12.83

Fuente: Autor

El escenario 2, de reforestación con bosque mixto (bosque ombrófila y mata ciliar), presenta un ligero incremento en la esorrentía superficial, este hecho es interesante porque el comportamiento hidrológico de la cuenca se encuentra principalmente en el caudal base, como se demostró en el análisis de sensibilidad. Cuando la cobertura del suelo es forestal, se produce una mayor cantidad de materia orgánica y, en consecuencia, los suelos están mejor estructurados, aumentando la infiltración de agua en el suelo. (Uzeika, 2009; Lelis, 2012; Silva, 2013)

La reforestación presenta la situación de mayor protección contra la erosión del suelo, Carvalho Netto (2011) encontró una reducción de los sedimentos y una mayor conservación del

suelo cuando simuló la reforestación con Algaroba. Mientras que el cultivo de maíz mostró una alta degradación del suelo. Perazzoli (2013) y Aragão obtuvieron resultados similares donde el suelo se conserva mejor con Mata Nativa.

El escenario agrícola 3 muestra una disminución de la esorrentía superficial de -13,45% en comparación con el escenario de uso actual. En este caso la producción de agua y sedimento aumentó en 70.04 y 23.72% respectivamente, este último escenario tuvo un mayor impacto en la cuenca aumentando la erosión hídrica y la carga de sedimentos. Perazzoli (2013), en su estudio, encontró casi el triple de producción de sedimentos en el escenario Agricultura en comparación con el escenario Mata Nativa.

La Figura (4.9) muestra los mapas de producción de agua para las subcuencas, referentes al período de 2002 a 2014 en los tres escenarios propuestos: Escenario 1 - Uso actual, Escenario 2 - Reforestación y Escenario 3 - Agricultura. Los valores medios de producción de agua en el escenario 1 oscilaron entre 2,17 y 25,26 mm.año⁻¹. Las subcuencas 5 y 11 tuvieron la menor producción de agua entre 2.17 y 2.77 mm.año⁻¹. Se observa que la subcuenca 5 tiene un área industrial de 47.7 ha, el uso de suelo es forestal y agrícola; lo que justifica los bajos valores simulados. Las subcuencas 1, 6, 9, 10 y 26 tienen valores medios de producción de agua entre 7,87 y 11,65 mm.año⁻¹. En estas subcuencas se ubican la mayoría de las nacientes del río Betume y el suelo predominante es Neossolos con cobertura vegetal de cultivos agrícolas.

or su parte, las subcuencas 3 y 8 son las principales productoras de agua 25,26 y 16,80 mm.ha-1.año-1 respectivamente. Estas subcuencas tienen en común suelos Argissolos Vermelho Amarelo y Neossolos Quartzarrênicos, los cuales tienen velocidades de infiltración muy altas, superiores a 3 cm.h-1 (Silva, 2013), y más del 60% de sus áreas están ocupadas por pastizales y bosque nativo. Silva (2013), al evaluar la distribución de la producción de agua en la cuenca del río Poxim-Açu, también encontró que las principales subcuencas productoras de agua eran aquellas que tenían áreas ocupadas por pastos como clase de suelo predominante del tipo Argissolos.

Para el escenario 2, la producción de agua disminuyó un -26%. Varios factores contribuyen a este resultado, entre ellos podemos mencionar el menor valor de la CN de 55 y el aumento de la evapotranspiración, que según Lino (2009), contribuye a la menor esorrentía superficial. En este escenario, la producción media anual de agua consideró valores entre 0,69 y 15,00 mm.año⁻¹. Las

subcuencas 1, 2, 5 y 11 presentaron los menores valores de producción, entre 0,69 a 2,83 mm.año⁻¹, mientras que la subcuenca 3 sigue siendo la mayor productora de agua (15,00 mm.año⁻¹). En este escenario, las subcuencas 13, 15, 19, 20, 21, 23 y 24 con suelos tipo Planosoles y Spodosoles con humedales presentaron una producción de agua mayor a 8.24 mm.año⁻¹.

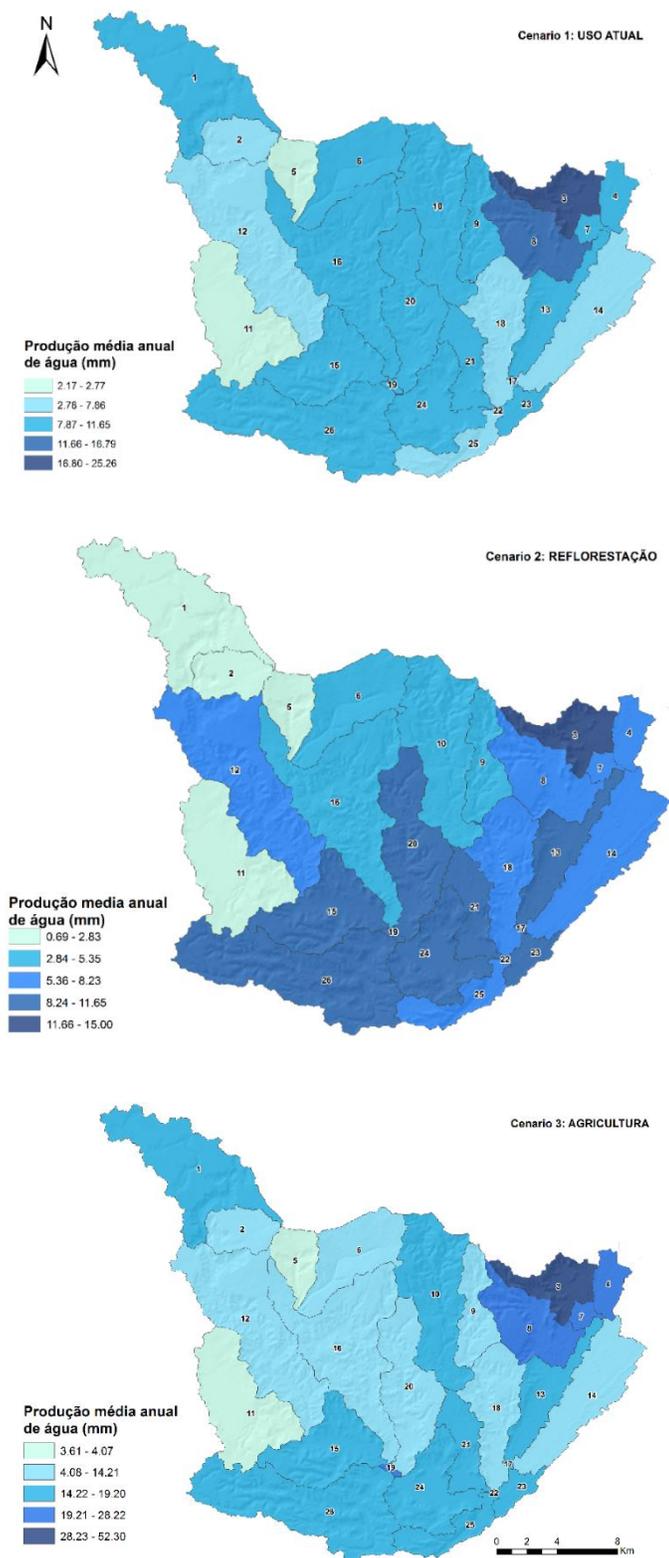
Lelis (2011) encontró una reducción en la producción de escorrentía superficial y sedimentos al reemplazar el 15% de la pradera por uso forestal, mientras que al reemplazar la superficie forestal por pradera en un 25% hubo un aumento en la producción de sedimentos y una disminución en la producción de escorrentía superficial. Carvalho Netto (2011) simulando escenarios para la cuenca del riacho dos Namorados en la región de Cariri de Paraíba utilizando vegetación nativa frente a Algaroba y un valor de CN de 77 en ambos casos, los resultados mostraron una pérdida de suelo de casi el doble, ya en la producción de escorrentía superficial fue mayor en el escenario de vegetación nativa.

En el escenario 3, la producción media anual de agua aumentó en un 70% con relación al escenario 1. Las subcuencas 5 y 11 fueron nuevamente las de menores valores de producción (< 4,07 mm.año⁻¹). Y la subcuenca 3 se mantiene con la mayor producción de agua (52,30 mm.año⁻¹). La subcuenca 26, donde se encuentra la nascente principal del río Betume, presentó una producción media anual de agua entre 14,22 y 19,20 mm.año⁻¹.

La producción de agua en las subcuencas tiende a incrementarse en dirección naciente-desembocadura en los tres escenarios simulados (Figura 4.9), se observa que las subcuencas que más agua producen están a lo largo del río Betume. La legislación brasileña adopta un ancho mínimo de acuerdo con el ancho del curso de agua (Machado, Vettorazzi y Xavier, 2003). Se puede ver la importancia de las acciones de conservación y preservación de los bosques en las márgenes del cuerpo de agua, como el Proyecto Aguas de São Francisco; para garantizar la cantidad y calidad de los recursos hídricos en la cuenca hidrográfica.

El cuidado y mantenimiento de los bosques promueve cambios en las propiedades del suelo tales como aumento de la conductividad hidráulica del suelo, reducción de la densidad, aumento de la capacidad de almacenamiento de agua, que contribuyen a un aumento de la disponibilidad promedio de agua a lo largo del tiempo. (BLAINSKI, ARAUJO E GOMES, 2011).

Figura 4.9 - Produção de água escenários 1, 2 e 3 em la cuenca hidrográfica del rio Betume



A través de los escenarios simulados, se puede verificar que los cambios en el uso y ocupación del suelo, promueven cambios en la producción de agua, ya que se modifican las propiedades físico-hídricas de los suelos, como densidad, porosidad, contenido de materia orgánica, entre otras. (SILVA, 2013).

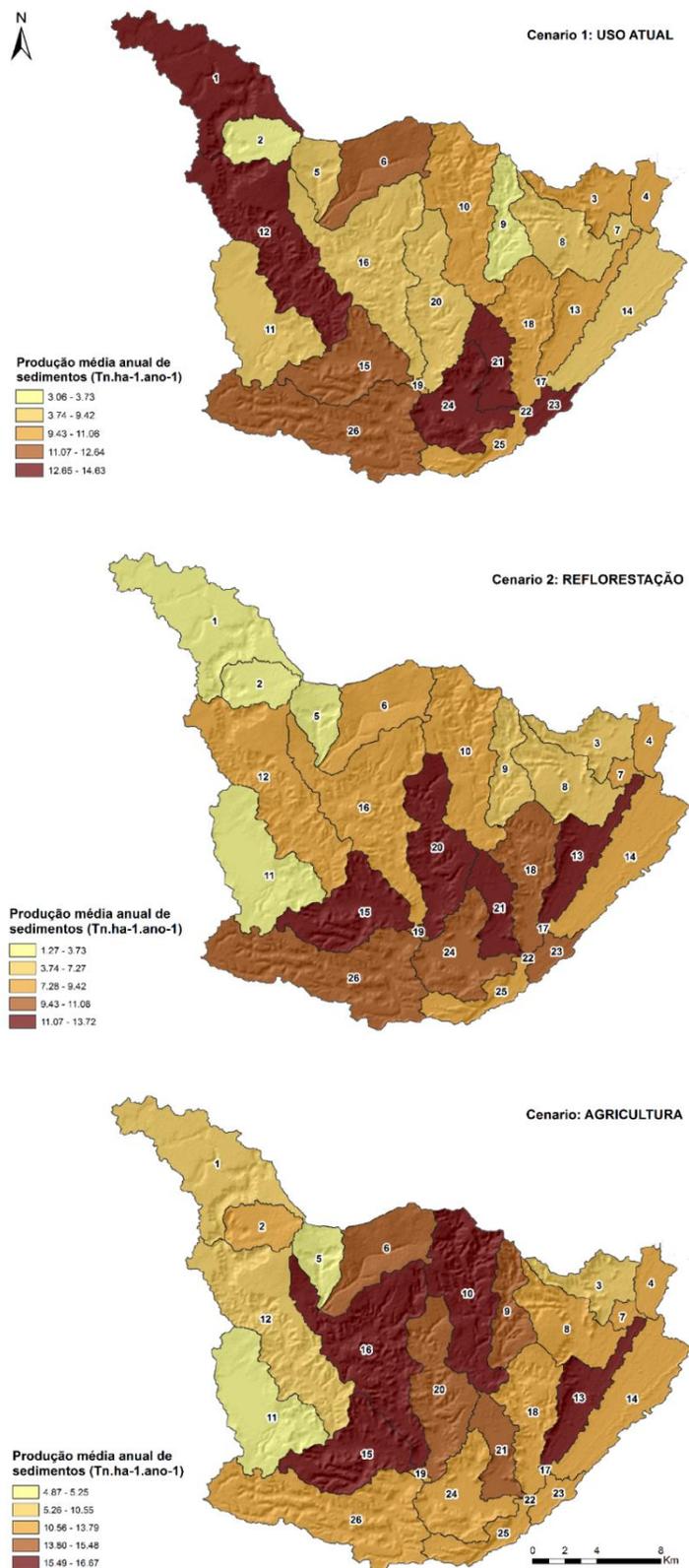
La producción de sedimentos en la cuenca del río Bitume mostró una mayor variación con el cambio de uso de suelo de los escenarios simulados, en comparación con la producción de agua. La Figura 4.10 muestra la producción de sedimentos para cada escenario simulado en las diferentes subcuencas.

En el escenario 1 se puede observar que la mayor tasa de producción de sedimentos se concentra en las subcuencas 1, 12, 21,23 y 24 con valores de 12,65 a 14,63 tn.ha-1.año-1. Estas subcuencas se caracterizan por tener grandes extensiones de suelos Argissoles e Neossoles y la mayoría de ellos son utilizados para cultivos agrícolas y pastos. Las subcuencas 2 y 9 fueron las que presentaron los valores más bajos de producción de sedimentos (< 3.73 tn.ha⁻¹.año⁻¹) y se observó que en estas subcuencas tienen casi un 15% de bosque, el predominante el suelo es Neossoles Quartzarenicos, que son suelos con una alta capacidad de infiltración, lo que reduce el transporte de sedimentos. (SILVA, 2013).

El escenario 2 mostró una menor producción de sedimentos en comparación con los escenarios 1 (uso actual) y 3 (agricultura) con -15,81 % (1,64 tn.ha-1) y -46,96 % (4,1 tn.ha-1) respectivamente. Corroborando estos resultados con los estudios realizados por Carvalho Netto (2010), Silva (2013) y Perazzoli (2013) donde se encontró que la menor pérdida de suelo fue en la simulación de escenarios alternativos, cuando el uso del suelo fue sustituido por bosques. De igual manera, estos autores enfatizaron que las mayores pérdidas de suelo están relacionadas con la agricultura.

La diferencia entre el escenario 2 y los escenarios 1 y 3 es que un suelo cubierto de bosques actúa como una barrera contra los sedimentos, protegiendo el suelo de la erosión por la lluvia y el viento. De esta forma, los bosques actúan como filtro para la producción de sedimentos y otros sólidos en suspensión provenientes de la escorrentía superficial, reduciendo así los procesos erosivos y consecuentemente la producción de sedimentos. (MACHADO; VETTORAZZI; XAVIER, 2003; PINTO, 2011)

Figura 4.10 – Produção de sedimentos cenários 1, 2 e 3 en la cuenca hidrográfica do rio Betume



Las subcuencas 1, 2, 5 y 11, en el escenario 2, fueron las que presentaron los valores más bajos en la producción de sedimentos con valores de 1,27 a 3,37 $\text{tn}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$. Estos resultados se explican por la baja producción de agua para el mismo escenario (Fig. 4.9). Las subcuencas 13, 15, 20 y 21 presentaron los mayores valores de producción de sedimentos entre 11,07 y 13,72 $\text{tn}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$. Sin embargo, se observa que la producción de sedimentos en estas subcuencas aumenta de manera alarmante. A partir de este escenario la tasa de producción es menor. Ante estos resultados, es necesario utilizar medidas que, junto con el Código Forestal, ayuden a solucionar el problema del agua en la región semiárida de Sergipe.

El escenario 3 presenta la mayor tasa de producción de sedimentos, al compararse con el escenario 1 presentaron un aumento de 23,7% y con el escenario 2 un 46,9% en producción; presentando valores desde 4,87 a 16,67 $\text{tn}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$. En este escenario, las subcuencas 5 y 11 presentaron la menor tasa de producción de sedimentos. Las mayores pérdidas de suelo se observaron en las subcuencas 10, 13, 15 y 16 con valores de 13,80 a 15,48 $\text{tn}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$. Estas subcuencas tienen como suelos predominantes los Neossolos Quartzarrênicos y Planossolos.

Perazzoli (2013) comenta que las actividades agrícolas alteran la protección del suelo, dejándolo susceptible a la acción del impacto de la lluvia y la escorrentía superficial, además de promover la disrupción de la capa superficial del suelo, justificando así los resultados de valores más altos en este escenario.

En el escenario 3, la mayor producción de sedimentos se concentró en la parte alta de la cuenca, donde se encuentran las nacientes del río Bitume; a diferencia de Machado y Vettorazzi (2003) quienes encontraron que la mayor producción de sedimentos se presenta en la cuenca baja, mientras que en la cuenca alta se presenta la menor producción de sedimentos. Arroio Junior, et al (2013) encontraron en su estudio que las áreas con mayor producción de sedimentos ocurrieron cerca de las fuentes de Ribeirão do Lobo y el río Itaqueri, combinado con el alto potencial para generar escorrentía superficial y suelos tipo Argissolos Vermelho Amarelo y Neossolos Quartzarenicos, generando mayor pérdida de suelo y, en consecuencia, mayor producción de sedimentos.

La pérdida de suelo ocasionada en las cuencas hidrográficas por erosión y cambios en la estructura del suelo, principalmente por acciones humanas, es de gran preocupación, pues además

de la pérdida de tierras cultivables, los sedimentos en los cuerpos de agua, deterioran la calidad del agua a través de patógenos, agroquímicos y otros contaminantes que pueden ser transportados en solución o ligados a sedimentos (CHU, 2004).

En general, en los escenarios presentados, los resultados muestran que más del 69% de la producción de agua es caudal base, lo que indica que el régimen del río Betume depende principalmente de las aguas subterráneas y la mayor producción de sedimentos se origina en las actividades agrícolas. Con estas visualizaciones de los resultados es posible identificar rápidamente en los tres escenarios las subcuencas más susceptibles a la baja producción de agua como la alta producción de sedimentos. Por tanto, a la vista de los resultados analizados, es necesario buscar los correctivos necesarios para reducir los impactos derivados de la deforestación, y el desarrollo desproporcionado de las actividades agropecuarias.

5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el presente estudio conducen a las siguientes conclusiones:

La dinámica hidrosedimentológica de la cuenca del río Betume se puede estudiar a partir del monitoreo cuantitativo, simulando la producción de agua y sedimentos a través de la herramienta SWAT para diferentes escenarios hipotéticos.

La dinámica hidrosedimentológica de la cuenca del río Betume se basa principalmente en el flujo de escorrentía de base, donde los parámetros más sensibles determinados a partir de la modelación SWAT fueron: Constante de recesión del caudal base (ALPHA_BF), Capacidad disponible del suelo (SOL_AWC), Profundidad límite del agua en el acuífero raso para flujo base (GWQMN), tiempo de retraso del flujo de agua subterránea (GW_DELAY), pendiente media (HRU_SLP), número de curva en condición de humedad II (CN2) y coeficiente de rugosidad de Manning (CH_N2).

La simulación del caudal del río Betume con el modelo SWAT mostró un ajuste satisfactorio, especialmente en cuanto a caudales mínimos, con NS de 0,80; PBIAS de -1.3; R2 de 0,81 y RSR de 0,44. Demostrando que el modelo SWAT puede representar satisfactoriamente el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Betume.

La curva-llave del río Betume se generó a través de las mediciones de caudal en el río. El monitoreo del caudal a través de la curva-llave es un instrumento importante para la planificación de una cuenca hidrográfica, permitiendo cuantificar el volumen de agua en el río Betume en función del tiempo y el espacio, de forma sencilla y rápida.

La simulación de escenarios alternativos permitió una evaluación objetiva de los procesos hidrosedimentológicos, observando que los cambios de uso y ocupación del suelo influyen en el régimen de producción de agua y sedimentos en la cuenca del río Betume y los mapas generados a partir de la salida de los resultados del modelo SWAT, permiten una visualización global de la distribución espacial, posibilitando la identificación rápida de áreas con grandes riesgos de erosión hídrica y ambientalmente más frágiles, que sirven para la planificación de la cuenca en la definición de actuaciones que puedan garantizar la cantidad y calidad del agua en la región de estudio.

El escenario de ocupación de la cuenca por bosque presentó la menor producción anual promedio de agua y sedimentos, demostrando ser un elemento eficiente para reducir la carga de sedimentos y además asegurar una mayor disponibilidad de agua para los usos múltiples del agua en la región. Esos aspectos muestran la importancia de los programas de restauración y reforestación de áreas degradadas como el Proyecto Águas de São Francisco.

El escenario agrícola presentó la tasa media anual más alta de producción de sedimentos en la cuenca del río Betume, donde las subcuenas que tienen predominio de Argissolos Vermelho Amarelo e Neossolos Quartzarrênicos asociados a pastos son las principales productoras de sedimentos. La obtención de este escenario es importante para la planificación de la cuenca en estudio, ya que permite compatibilizar la capacidad de uso del suelo de acuerdo a las debilidades detectadas. Con lo cual es necesario establecer prácticas de manejo de suelos adecuadas para evitar el acarreo de sedimentos a los cuerpos de agua en la cuenca hidrográfica.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ABBASPOUR, K.C. SWAT-CUP2009: *SWAT Calibration and Uncertainty Programs – a user manual*. Department of Systems Analysis, **Integrated Assessment and Modelling** (SIAM), Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland, 95 p.2011.

ABBASPOUR, K. C. **SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual**. 2012. 103 p. Disponível em: <[http://www.neprashtechonology.ca/ Downloads.aspx](http://www.neprashtechonology.ca/Downloads.aspx)>. Acesso em: 06 de jun. 2015.

ADRIOLO M. C.; SANTOS. I. DOS; GIBERTONI, R. C.; CAMARGO, A. S. G. **Calibração do modelo SWAT para a produção e transporte de sedimentos**. VI Simpósio Brasileiro sobre Pequenas e Médias Centrais Hidroelétricas. Belo Horizonte, MG. T24-A03, 18p. 2008.

AGUAS DO SÃO FRANCISCO. Disponível em: <http://aguasdosaofrancisco.org.br/> Acesso em 05 abril 2014.

AGUIAR NETTO, A. O.; NACIF, P. G. S.; REZENDE, J. O. Avaliação do conceito de capacidade de campo para um latossolo amarelo coeso do estado da Bahia. **Revista Brasileira Ciência e Solo**, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 661-667. 1999.

AGUIAR NETTO, A. O; LUCAS, A. AN. T. SANTOS, A. G; ALMEIDA, C. A. Água e ambiente no Baixo São Francisco Sergipano. In: AGUIAR NETTO, A. O; LUCAS, A. AN. T. **Águas do São Francisco**. São Cristóvão: Editora UFS, 312p. 2011.

AGUIAR NETTO, A. O. et al. Calibração do modelo hidrodinâmico MIKE 11 para sub-bacia hidrográfica do rio Piautinga, Sergipe, Brasil. **Ambi-Agua, Taubaté**, v.5, n3, p.195-207, 2010.

AGUIAR NETTO, A. O.; GOMES, C. C. S.; LINS, C. C. V.; BARROS, C. B.; CAMPECHE, L. F. de S. M.; BLANCO, F. F. Características Químicas e salino-sodicidade dos solos do perímetro irrigado Califórnia, SE, Brasil. **Ciência Rural, Santa Maria-RS**, v. 37, n. 6, p. 1640-1645. Novembro, 2007a.

AGUIAR NETTO, A. O.; MACHADO, R.; VARGAS, M. A. M. Sustentabilidade do perímetro irrigado Jabiberi. **RA EGA (UFPR)**, v. 12, p. 153-159, 2006a.

AGUIAR NETTO, A. O.; SANTANA, N. R. F. Contexto socioambiental das águas do rio São Francisco. 1. Ed. São Cristóvão: Editora UFS, 341p. 2015.

ALMEIDA, C. A. P. de. **Estudos preditivos da produção de água na bacia hidrográfica do Rio Poxim-Açu em Sergipe**. Dissertação (Mestrado) – Programa em Desenvolvimento e Meio Ambiente – Universidade Federal de Sergipe/SE, 100 p. 2013.

ANDRADE, M. A.; MELLO, C. R. de; BESKOW, S. Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 1, p. 69-76, 2013

ARABI, M.; GOVINDARAJU, R. S.; HANTUSH, M. M. A probabilistic approach for analysis of uncertainty in the evaluation of watershed management practices. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 333, p. 459-471, 2007.

ARAGAO, R. de et al. Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo SWAT e simulação dos processos hidrossedimentológicos em uma bacia no agreste nordestino. **Revista Brasileira Ciência e Solo**, Viçosa, v.37, n.4, p.1091-1102, agosto, 2013.

ARNOLD, J. G., R. SRINIVASAN, R. S. MUTTIAH, AND J. R. WILLIAMS. Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development. **Journal of the American Water Resources Association** 34: 73-89. 1998.

ARNOLD, J. G.; MORIASI, D. N.; GASSMAN, P. W.; ABBASPOUR, K. C.; WHITE, M. J.; SRINIVASAN, R.; SANTHI, C.; HARMEL, R. D.; VAN GRIENSVEN, A.; VAN LIEW, M. W.; KANNAN, N.; JHA, M. K.) SWAT: Model Use, Calibration, and Validation. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, Transactions of the ASABE, v. 55(4), p. 1491-1508. 2012.

ARNOLD, J. G.; FOHRER, N. Swat 2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. **Hydrological Processes**, v. 19, p. 563-572, 2005.

ARNOLD, J. G; WINCHELL, M; SRINIVASAN, R. AND DI LUZIO AND, **ArcSWAT Interface for SWAT2009 User's Guide**, Texas A&M University, August 2010.

ARROIO JUNIOR, P. P.; KUWAJIMA, J. I.; MAUAD, F. F. Avaliação da produção de sedimentos em uma bacia de pequeno porte por meio do simulador SWAT. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. 20. 2013. BENTO GONÇALVES / RS. **Anais**: Bento Gonçalves / RS: ABRH, 2013.

BAHIA. SEPLANTEC-SECRETARIA DO PLANEJAMENTO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA: **Recursos Hídricos no Estado da Bahia – Ênfase no semi-árido**. Salvador, 105p. 1995b.

BALDISSERA, G. C. **Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool), para a bacia hidrográfica do Rio Cuiabá/MT**. 2005. 144 f. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) - Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, MT, 2005.

BALTOKOSKI, V.; TAVARES, M. H. F.; MACHADO, E. R.; OLIVEIRA, M. P. Calibração de modelo para a simulação de vazão e de fósforo total nas sub- bacias dos rios Conrado e Pinheiro – Pato Branco (PR). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 1, 2010.

BLAINSKI, E.; GARBOSSA, L. H. P.; MALUTTA, S. Aplicação do modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para a simulação da perda de solo e da disponibilidade hídrica em uma bacia hidrográfica não instrumentada. In: SIMÓCIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 10., 2010, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: ABRH, 2010.

BLAINSKI, E.; ARAUJO, I.; GOMES, P. Modelagem e simulação do uso do solo e as alterações no ambiente. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIENCIA DO SOLO, 23., 2011, Uberlandia. **Anais...** , Uberlandia: SBCS, 2011.

BRASIL. Lei Nº 6938/1981 - "Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências" - Data da legislação: 31/08/1981 -. Diário Oficial da União, Brasília, 02 de set. 1981, Seção 1.

_____. Lei Nº 9433/1997 - "Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989" Data da legislação: 08/01/1997 - Diário Oficial da União, Brasília, 09 de jan. 1997, Seção 1. p. 470.

_____. ANA - Agência Nacional das Águas. **GEO Brasil: Recursos Hídricos: Resumo Executivo**. Brasília: MMA: ANA, 2007.

_____. ANA - Agência Nacional das Águas. **GUIA NACIONAL DE COLETA E PRESERVAÇÃO DE AMOSTRAS: Água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos**. Brasília: MMA: ANA, 2011.

_____. ANA - Agência Nacional das Águas. **A gestão dos recursos hídricos no Estado de Sergipe. Série: Sistema Nacional de Informações Sobre Recursos Hídricos**, CD nº 1, versão preliminar, 2011.

_____. CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **O problema da escassez de água no mundo**. Disponível em <http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/%C3%81guas-Superficiais/37-O-Problema-da-Escassez-de-%C3%81gua--no-Mundo>. Acessado em 01 de abril 2015.

_____. MMA – Ministerio do Meio Ambiente. **Programa de revitalização da bacia hidrográfica do rio São Francisco**. Disponível em: http://www.mma.gov.br/estruturas/PRSF/_arquivos/diag.pdf. Acessado em 04 de novembro 2014

_____. CODEVASF – Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e Parnaíba. Disponível em: http://www.codevasf.gov.br/principal/publicacoes/publicacoesatuais/pdf/baixo_sao_francisco.pdf/view. Acessado em 10 de junho 2014.

_____. SEMARH - Secretaria Do Estado Do Meio Ambiente E Recursos Hídricos. Disponível em www.semarh.se.gov.br/srh. Acessado em 06 de janeiro 2015.

BERTOLDO, F.; RIGHES, A. A. Curva-chave do Arroio da Bacia-Escola Urbana, em Santa Maria, RS. **Disc. Scientia**, v. 5, n. 1, p. 11-29, 2004.

BRITTO, F. B. et al. Avaliação do risco de contaminação hídrica por agrotóxicos no perímetro irrigado Betume no Baixo Rio São Francisco. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**. v. 9, n. 3, p. 158-170, 2015.

BOSKIDIS, I. et al. Hydrologic and water quality modeling of lower Nestos river basin. **Water Resource Management**, v. 26, p. 3023-3051, 2012.

CARVALHO NETO, J. G; SRINIVASAN, V. S.; RUFINO, I. A. A. Aplicação do modelo SWAT para estudo de cenários hipotéticos na bacia hidrográfica do riacho dos namorados no Cariri Paraibano. **Revista Geográfica Acadêmica**, Samambaia, v. 5, n.1, p. 48-58, 2011.

CARVALHO, T. M. Técnicas de medição de vazão por meios convencionais e não convencionais. **Revista Brasileira de Geografia Física**. Vol. 01 n. 01 mai/ago. p73-85. 2008.

CHOW, V. T. **Hidráulica de canales abiertos**. Santafe de Bogotá: Mc Graw-Hill Interamericana S.A., 667p. 1994.

CHU, T. W. Evaluation of the SWAT model's sediment and nutrient components in the piedmont physiographic region of Maryland, **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 47, n. 5, p. 1523-1538, 2004.

CIBIN R.; SUDHEER, K.P. & CHAUBEY, I. **Sensitivity and identifiability of stream flow generation parameters of the SWAT model Hydrology Process**. Published online in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com) DOI: 10.1002/hyp.7568. p.1133-1148. 2010.

COLEMAN, D. J.; SCATENA, F. N. **Identification and evaluation of sediments sources. In: HADLEY, R.F. (Ed). Drainage basin sediment delivery**. Wallingford: IAHS (International Association of Hydrological Sciences. Publication n. 159) p. 3 – 18. 1986.

COLLISCHONN, W. & TUCCI, C. E. M. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. v6, n1 jan/mar. p.95-118. 2001.

CÔRREA, I.C.S. **Metodologia para o cálculo de vazão de uma seção transversal a um canal fluvial**. Ponte Alegre: UFRGS, 2008.

COSTA, L. F, VIEIRA, I; Maria PINOTTI, S. M. **Projeto Cadastro da Infraestrutura Hídrica do Nordeste**. Aracaju: CPRM, 2002.

CHRISTOFOLETTI. **A Modelagem de Sistemas Ambientais**. Ed. Edgard Blucher Ltda. 1ª Ed. 1999.

CRUZ, M. A. S. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento: Regionalização de precipitações médias e prováveis mensais e anuais no estado de Sergipe**. Aracaju, SE: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 26 p. 2009.

DANISH HYDRAULIC INSTITUTE. **MIKE 11 - a modeling system for rivers and channels**. Horsholm: Danish Hydraulic Institute, 454p, 2005.

DURÃES,M.F; DE MELLO, C.R; NAGHETTINI, M. Applicability of the SWAT model for hydrologic simulation in paraopeba river basin, MG. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 4, p. 481-488, out./dez. 2011.

ECKHARDT, K.; ARNOLD, J. G. Automatic calibration of a distributed catchment model. **Journal of Hydrology**, v. 251, p. 103-109, 2001.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos e análise de solo.** Rio de Janeiro. 212p. (EMBRAPA-CNPS. Documento, 1). 1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 306p, 2006.

ENOMOTO, C. F. **Método para elaboração de mapas de inundação estudo de caso na bacia do rio Palmital, Paraná.** Dissertação (Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 132p, 2004.

GALVÁN, L. et al. Application of the SWAT model to an AMD – affected river (Meca River, SW Spain). Estimation of transported pollutant load. **Journal of Hydrology**, v 377, p. 445 – 454, 2009.

GASSMAN, P. W.; REYES, M.; GREEN, CH. E. ARNOLD, J. G. **The Soil and Water Assessment Tool: Historical development applications, and future directions.** Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers (Invited Papers Series) 50(4): 1211-1250. 2007.

GEO-BRASIL2002. Disponível em:

http://www.uff.br/cienciaambiental/biblioteca/geobrasil/rec_hidricos.pdf. Acessado em 06 de janeiro 2015.

GLOBAL WATER. **FP111 – FP112 – FP113 Global Flow Prove, user’s manual.** Global Water Instrumentation, Inc. 18p. 2009.

GOMES, J. & SANTOS, I. **Análise comparativa de campanhas de medição de descarga líquida pelos métodos convencional e acústico.** In: XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 32-36p. 2003.

GREEN, C. H.; van GRIENSVEN, A. Autocalibration in hydrologic modeling: Using SWAT2005 in small-scale watersheds. **Environmental Modelling & Software**, v. 23, p. 422-434, 2008.

HERRINGTON, L., PELLEGRINI, G. **An advanced shape of country classifier: extraction of surface features from DEMs.** In Proceedings of the 4th International Conference on GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4), Problems, Prospects and Research Needs, 2–8 September 2000, Banff, Alta. Disponível em: <http://www.colorado.edu/research/cires/banff/pubpapers/205/>. Acesso em abril 2015.

INFOESCOLA. Disponível em: <http://www.infoescola.com/geografia/zona-da-mata/>. Acesso em 06 de janeiro 2015.

JAYAKRISHNAN, R; SRINIVASAN, R; SANTHI, C e ARNOLD, J. G. Advances in the application of the SWAT model water resources management. **Hydrological Processes**. 19, 749-762. DOI: 10.1002/hyp.5624. 2005.

JEONG, J.; KANNAN, N.; ARNOLD, J.; GLICK, R.; GOSSELINK, L. & SRINIVASAN, R. **Development and integration of sub-hourly rainfall–runoff modeling capability within a watershed model**. Water Res Manage. DOI 10.1007/s11269-010-9670-4. 2010.

JHA, M. **Hydrologic Simulations of the Maquoketa River Watershed Using SWAT**. Center for Agricultural and Rural Development (CARD). Ames, Iowa State University, (Publications 09-wp492).2009.

JHA, M. K. Evaluating hydrologic response of an agricultural watershed for watershed analysis. **Water**, v. 3, p. 604-617, 2011.

KRAUSE, P.; BOYLE, D. P.; BASE, F. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. **Advances in Geosciences**, Göttingen, v. 5, p. 89- 97, 2005.

KUWAJIMA, J. I. **Análise do modelo SWAT como ferramenta de prevenção e estimativa de assoreamento no reservatório do Lobo (Itirapina/Brotas/SP)**. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) . Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 158p. 2012.

LELIS, T.A. & CALIJURI, M.L. Modelagem hidrossedimentológica de bacia hidrográfica na região sudeste do Brasil, utilizando o SWAT. **Revista Ambiente e Água**, v. 5. p. 158-174, 2010.

LELIS, T. A. **Modelagem do escoamento superficial e perda de solo na bacia do Ribeirão São Bartolomeu, zona da mata de Minas Gerais, utilizando o simulador SWAT**. 2011. 164 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.

LELIS, et al. Análise de sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em bacia hidrográfica da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** (Impresso), v. 36, p. 623-634, 2012.

LIMA COP20: **Un climate change conference 2014**. Disponível em: <http://www.cop20.pe/18389/5-imagenes-del-antes-y-despues-del-cambio-climatico-en-el-agua/>. Acessado em 06 de Janeiro 2015.

LINO, J. F. L.; CORSUIL, C. W.; KOBİYAMA, M. Análise da vazão da bacia hidrográfica do rio Preto com o modelo SWAT. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18, 2009, Campo Grande. **Anais**. Porto Alegre: ABRH, 2009.

LOAGUE, K.; GREEN, R. E. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. **Journal Contaminant Hydrology**, v.7, p51-73, 1991.

LOPES, N. H. Y. **Análise da produção de água e sedimentos em microbacias experimentais com o modelo SWAT**. 2008. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

LYRA, G. B.; CECILIO, R. A.; ZANETTI, S. S.; LYRA, G. B. Coeficiente de rugosidade de Manning para o rio Paracatu. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 14, n. 4, p. 343-350, 2010.

MACHADO, C. A. **Modelagem da qualidade da água na bacia hidrográfica do rio siriri-SE**. **Dissertação** (Mestrado em desenvolvimento e meio ambiente) – Universidade Federal de Sergipe, 2013.

MACHADO, R. E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. 2002. 154 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

MACHADO, R. E., VETTORAZZI, C. A. Simulação da produção de sedimentos para a microbracia hidrográfica do Riberão dos Marins (SP). **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 27, p. 735-741, 2003.

MACHADO, R. E., VETTORAZZI, C. A.; CRUCIANI, D. E. Simulação de escoamento em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. V.8, n. 1, p. 147-155. 2003.

MACHADO, R. E., VETTORAZZI, C. A.; XAVIER, A. C. Simulação de cenários alternativos de uso da terra em uma microbacia utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. **Revista Brasileira Ciência e Solo**. v. 27, p. 727-733, 2003.

MALUTTA, S. **Aplicação do modelo SWAT na bacia do rio Negrinho – SC.** 2010. 97 f. Trabalho Técnico Científico (Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

MARCHIORO, E. **Modelagem hidrossedimentológica na bacia do córrego Santa Maria: Subsídios à Aplicação de Práticas de Conservação de Água e Solo no Noroeste Fluminense.** Tese (doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 218p, 2008.

MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H. Monitoramento de bacias hidrográficas para identificar fontes de sedimentos em suspensão. **Ciência Rural** [online]. vol.41, n.3, pp. 424-432. ISSN 0103-8478. 2011

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. Companhia de Desenvolvimento do vale do São Francisco (CODEVASF). Inventário de Projetos. 3ª Ed. **Revista Atualizada. Brasília.** Pág. 45. 1999.

MINISTERIO DA CULTURA – IPHAN. **Sistema integrado de conhecimento e gestão. Módulo 1: Contextualização geral bacia hidrográfica do rio São Francisco.** 51p. Disponível em: <http://portal.iphan.gov.br/portal/baixaFcdAnexo.do?id=1324>. Acessado 6 janeiro 2015.

MORAES, J. M. Propriedades físicas dos solos na parametrização de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.8, n.1, p.61-70, 2003.

MORIASI, D. N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

MORO, M. **A utilização da interface SWAT-SIG no estudo da produção de sedimentos e do volume de escoamento superficial com simulação de cenários alternativos.** Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. 100 p. 2005.

MOTA, J. C. A., JÚNIOR, R. N. de A., FILHO, J. A.; LIBARDI, P. L. Algumas propriedades físicas e hídricas de três solos na chapada do Apodi, RN, cultivados com melão. **Revista Brasileira De Ciência Do Solo**, 32: 49-58, 2008.

NASH J.E., SUTCLIFFE J.E. River flow forecasting through conceptual models. Part I—A discussion of principles. **Journal of Hydrology**. 290 p, 1970.

NEITSCH, S.L., ARNOLD, J.G., KINIRY, J.R., WILLIAMS, J. R.. **Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2005**. Grassland, Soil and Water Research Laboratory; Agricultural Research Service; USA. 2005.

NEITSCH, S.L., ARNOLD, J.G., KINIRY, J.R., WILLIAMS, J. R.. **Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009 (Portuguese)**. Grassland, Soil and Water Research Laboratory; Agricultural Research Service; USA. 2011

OLIVEIRA, L. C. K. **O Papel do Monitoramento e da Previsão de Vazões no Gerenciamento de Bacias Hidrográficas**. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 168 p, 2003.

OLIVERA, F et al. ArcGIS-SWAT: A Geodata Model and GIS interface for SWAT. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 42, n. 2, p. 295-309. 2006.

OLIVEIRA, L.T. **Aplicação do modelo SWAT para simular vazões em uma bacia hidrográfica em Aracruz, ES**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal do Espírito Santo. 162p, 2014.

PAPPAGALLO, G.; LO PORTO, A.; LEONE, A. **Use of the SWAT model for evaluation of anthropic impacts on water resources quality and availability in the Celone Creek basin (Apulia 7 Italy)**. 2nd International SWAT Conference. TWRI Technical Report. 266. Baria/Italy. 2003.

PERAZZOLI, M; PINHEIRO, A; KAUFMANN, V. Efeitos de cenários de uso do solo sobre o regime hídrico e produção de sedimentos na bacia do Ribeirão Concórdia - SC. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 37, n. 5, p. 859-869, out. 2013.

PEREIRA, B. S; PRUSKI, F. F; SILVA, D. D; RAMOS, M. M. Estudo do comportamento hidrológico do rio São Francisco e seus principais afluentes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 11, n.6, p. 615-622. 2007.

PEREIRA, D de. R. et al. Hydrological simulation using SWAT model in headwater basin in Southeast Brazil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.34, n.4, p.789-799. 2014.

PETERSON, J. R.; HAMLET, J. M. Hydrologic Calibration of the SWAT Model in a Watershed Containing Fragipan Soils. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 34, n.3, p. 531 – 544, 1998.

PINTO, D. B. F. Aplicação do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação hidrossedimentológica em bacia hidrográfica da Serra da Mantiqueira, MG. Tesse (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 225 p. 2011.

PORTO, L.L.R; SILVA, M.R; ZAHED, F.K. **Medição de vazão e curva-chave**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Eng. Hidráulica e Sanitária. São Paulo, 34p. 2001.

PRUSKI, F. F.; BRANDAO, V. S.; SILVA, D. D. **Escoamento superficial**. Viçosa UFV, 2004.

RAO, N. H. Field test of a simple soil – water balance model of irrigated areas. **Journal of hydrology**, v – 9, n. 1- 2. 1987. p. 179 – 186.

REBOUÇAS, A. C. **Água doce no mundo e no Brasil**. In: REBOUÇAS, A. C., BRAGA, B. & TUNDISI, J. G. (Orgs.). **Águas Doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. 2 ed. São Paulo: Escrituras Editora, 2002. Cap. 1, p 01-37

RIGHETTO, A. M. **Hidrologia e Recursos Hídricos**. São Carlos EESC/USP, 840 p, 1998.

ROCHA, E. O. de. **Estudo ambiental integrado de processos hidrossedimentológicos e nutrientes na bacia hidrográfica do rio Piranga utilizando o SWAT**. 2013. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2013.

RODRIGUES, S. A; BATISTELA, G. C. Uma Revisão Sobre A Disponibilidade Hídrica Brasileira Para Geração De Energia Elétrica. **Geoambiente On-Line. Jataí - GO**. n.21. 20p. 2013.

ROUHOLAHNEJAD, E.; ABBASPOUR, K. C.; VEJDANI, M.; SRINIVASAN, R.; SCHULIN, R.; LEHMANN, A. A parallelization framework for calibration of hydrological models. **Environmental Modelling e Software**, Trier, v. 31, p. 28-36, 2012.

SANTANA, L. L. Efeitos da variabilidade de cenários de uso do solo sobre a dinâmica da vazão e de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Jacaré – SE, 2015. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos). Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, SE, 2015.

SANTOS, I. et al. **Desenvolvimento de modelo de avaliação da qualidade de água e transporte de sedimentos para pequenas e médias centrais elétricas: modelagem da erosão e transporte**

de sedimentos. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC). Curitiba – PR, 91 p, 2005.

SANTOS, R. C. **Classificação textural aplicada à cobertura do solo de uma bacia hidrográfica usando sensoriamento remoto.** 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 153 p, 2002.

SANTOS, R. F. **Planejamento ambiental: teoria e prática.** São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

SANTOS, I.; KOBAYAMA, M. Aplicação do TOPMODEL para determinação de áreas saturadas da bacia do Rio Pequeno, São José dos Pinhais, PR, Brasil. **Revista Ambi-Água**, v. 3, n. 2, p. 77-89, 2008.

SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M. Aplicação do modelo hidrológico AÇUMOD baseado em SIG para gestão de recursos hídricos do rio Pirapama, Pernambuco, Brasil. **Revista Ambi-Agua, Taubaté**, v. 2, n. 2, p. 7-20, 2007.

SANTOS, H. B., BARRETO, M. C., FACCIOLI, G. G. Qualidade da água de drenagem em reuso direto no perímetro irrigado Betume-SE. In: AGUIAR NETTO, A. O; SANTANA, N. R. **Contexto socioambiental das águas do rio São Francisco.** São Cristóvão: Editora UFS, 342P. 2015.

SARETTA, E. **Desenvolvimento de um sistema para ensaios de molinetes.** Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba, 77 p. 2013.

SERGIPE. SECRETARIA DE ESTADO DO PLANEJAMENTO E DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA – SEPLANTEC. SUPERINTENDENCIA DE ESTUDOS E PESQUISAS - SUPES. Perfis Municipais: Aracaju, 75v. 1997

_____. SUPES – Superintendência de Estudos e Pesquisas. Informes Municipais: Aracaju, 75v. 2000.

_____. SEPLANTEC - Secretaria de Estado do Planejamento e da Ciência e Tecnologia- **Projeto Cadastro da Infra-Estrutura Hídrica do Nordeste** – Sergipe, Aracaju, Maio, 2004.

_____. SEPLANTEC - Secretaria de Estado do Planejamento, da Ciência e da Tecnologia. **Unidades de Planejamento Sergipe.** SRH/ SEPLANTEC/ Governo do Estado de Sergipe. 2004.

_____. SEMARH – Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos. **Atlas digital sobre recursos hídricos de Sergipe.** SRH/SIRHSE. Sergipe, 2014.

SETTI, A. A. et al. **Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos**. 2 ed. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas, 207 p. 2001.

SHIKLOMANOV, I. A; **World Water Resources A New Appraisal and Assessment for The 21st Century**. UNESCO. 37p. 1998

SILVA, D; NHAMPOSSA, J.A; NEVES, M. A; SALAZAR, R.C. Caracterização macroscópica do estado de impacto ambiental de nascentes do rio Betume. In: AGUIAR NETTO, A. O; SANTANA, N. R. **Contexto socioambiental das águas do rio São Francisco**. São Cristóvão: Editora UFS, 342P. 2015.

SILVA, M. G. DA. **Modelagem ambiental na bacia hidrográfica do rio Poxim-Açu/SE e sus relações antrópicas**. Tese (Doutorado em desenvolvimento e meio ambiente) – Universidade Federal de Sergipe, 224 p. 2013.

SILVA, R.C.V. et al. **Hidráulica fluvial. Rio de Janeiro: COPPE / UFRJ**. V.1, 428p, 2003

SOUZA, R. M.; SANTOS, I. DOS. Estimativa da variabilidade espacial de vazões mínimas na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro, região sul-brasileira, com aplicação do modelo SWAT. **RAEGA-O espaço geográfico em análise**. v. 28, p. 134-153, 2013.

SRINIVASAN, V.S., et al. **Bacia Experimental de São João do Cariri-PB**. In: **Righetto, A.M. (Org.), Implantação de Bacias Experimentais no Semi-árido**, Cap. 4, FINEP/FUNPEC/CNPq/CTBRASIL. 93-126. 2004

SRINIVASAN, R. and ARNOLD, J.G. Integration of the basin-scale water quality model With GIS. **Water Resources Bulletin**, v.30, n.03, p. 453-462, 1994.

STRAUCH, M.; BERNHOFER, C.; KOIDE, S.; VOLK, M.; LORZ, C. & MAKESCHIN, F. Using precipitation data ensemble for uncertainty analysis in SWAT stream flow simulation. **Journal of Hydrology**., 414-415:413-424, 2012.

TIBEBE, D. & BEWKET , W. Surface Runoff and soil erosion estimation using the SWAT model in the Keleta watershed, Ethiopia. **Journal Land Degradation and Development**. 22: 551-564. 2010.

TUCCI, C. E. M. et al. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 2a edição. Porto Alegre. Editora da UFRGS/ABRH, 1997. 943 p.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH: Editora UFRGS, 2005.

TUNDISI, J. G. Ciclo hidrológico e gerenciamento integrado. **Ciencia e Cultura**, v. 55, n.4, p.31-33, 2003.

USDI. **Water measurement manual**: A water resources technical publication. 3. ed. Washignton, DC: U. S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 317p. 2001.

USGS. **Meassurement and computation of streamflow**: Measurement of stage and dischargue. V. 1. Washington, DC: U. S. Governmment Printing Office, 284p. 1982.

UZEIKA, T. Use of the SWAT model for hydro-sedimentologic simulation in a small rural watershed. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 557-565, 2012.

UZEIKA, T. **Aplicabilidade do Modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) nasimulação da produção de sedimentos em pequena bacia hidrográfica rural**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 144p. 2009.

Van GRIENSVEN, A. et al. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. **Journal of Hydrology**, v. 324, p. 10-23, 2006.

VALERIANO, M. M. **TOPODATA: Guia para utilização de dados geomorfológicos locais**. INPE, São José dos Campos. 2008.

WHITE, K. L.; CHAUBEY, I. Sensitivity Analysis, Calibration and Validation for a Multisite and Multivariable SWAT Model. **Journal of the American Water Resources Association**. October, p. 1077– 1089. 2005.

WISCHEMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Soil loss estimation as a tool in the soil and water management planning**. International Association of Science, Hidrology Pub, pp. 148-159. 1965

WISCHMEIER, W.H. & SMITH, D.D. **Predictinq rainfall erosion losses: a ouide to conservation planning**. Washington, United States Departament of Agriculture, 1978.

YOUNG, R. A.; ONSTAD, C. A.; BOSH, D. D. and ANDERSON, W. P. AGNPS: A nonpoint - sources pollution model for evaluating agricultural watershed. **Journal of Soil and Water Conservation**, vol. 44, n. 2, p. 168 – 173. 1989.

ZHANG, J.; et al. The SWAT model applied in the water resources management for Guishui River Basin, Beijin. In: Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering (RSETE), 2012. **Anais:**2nd International Conference on Nanjing. p. 1-4. DOI: 10.1109/RSETE.2012.6260790. 2012.

ANEXOS

ANEXO A – Dados de solos obtidos em campo e analisados em el ITPS para el modelamiento de la cuenca hidrográfica do rio Betume

VARIABLES	SUELOS						
	Argissolo Vermelho Amarelo		Espodosolos	Neossolos	Planossolos	Neossolo Quartzarrênico	
NLAYERS-Número de Camadas	2		1	1	1	2	
HYDGRP-Grupo Hidrológico	B		B	A	B	B	
SOL_ZMX-Profundidade	500.00		200.00	200.00	200.00	300.00	
ANION_EXCL-Porosidade de Anions (fração)	0.49					0.45	
Camadas	1	2	1	1	1	1	2
SOL_Z-Profundidade (mm)	235.00	500.00	200.00	200.00	200.00	150.00	300.00
SOL_BD-Densidade do solo (g/cm ³)	1.54	1.66	1.10	1.02	1.08	1.52	1.70
SOL_AWC-Água disponível (mm/mm)	0.30	0.42				0.30	0.12
SOL_CBN-Carbono orgânico (%)	0.63	0.50	1.21	1.35	1.23	1.02	1.11
SOL_K-Conductividade hidráulica (mm/h)	24.03	39.21				50.17	55.75
CLAY-Argila (%)	11.82	13.78	28.81	26.29	28.21	4.03	4.23
SILT-Silte (%)	22.17	18.21	25.40	40.91	27.40	13.34	13.26
SAND-Areia (%)	66.01	68.01	45.79	32.80	44.39	82.64	82.52
SOL_ALB-Albedo (fração)	0.20	0.20	0.00	0.00	0.00	0.20	0.20
Valor M USLE	1952.43	1542.71				1283.05	1267.65
SOL_EC-Conductividade elétrica (dS/m)	0.43	0.44	0.59	0.21	0.70	0.66	0.51
Matéria orgânica	1.09	0.85	22.30	21.90	22.20	1.76	1.92
Estrutura do solo	3.00	3.00				3.00	3.00
Classe de permeabilidade do perfil	3.00	3.00				1.00	1.00
Fator USLE_K	0.16	0.13				0.06	0.06

ANEXO B - Parámetros para la Estación del Generador Climático de SWAT para el modelamiento de la cuenca hidrográfica do rio Betume.

Parámetro	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
TMP_MX	29.69	29.93	29.51	28.07	27.13	25.65	25.02	25.22	26.54	27.82	28.97	27.59
TMP_MM	21.52	22.41	22.73	22.38	21.99	20.74	19.35	19.85	20.06	20.63	21.11	22.65
DV_TMX	1.34	1.35	1.08	1.14	1.11	1.15	1.23	0.98	1.24	1.09	0.96	1.18
DV_TMIN	1.12	1.34	0.96	1.01	0.99	0.98	1.98	1.32	1.21	1.22	1.55	1.24
PCP	81.67	68.73	84.32	117.49	219.98	231.32	172.18	125.58	75.43	59.83	30.02	71.27
DV_PCP	6.24	6.54	7.53	8.94	12.81	12.42	7.75	6.03	4.98	3.94	4.12	6.12
SKW_PCP	20.00	20.00	19.31	9.65	6.23	2.92	2.81	3.08	6.15	14.82	20.00	20.00
PR_W1	0.70	0.94	0.66	0.93	0.47	0.26	0.29	0.33	0.63	0.94	0.94	0.94
PR_W2	0.46	0.27	0.34	0.87	0.94	0.94	0.94	0.94	0.47	0.30	0.14	0.25
PCP_DAYS	7.67	8.83	10.33	15.67	18.50	24.00	24.33	23.00	12.33	8.33	10.17	7.17
SOLAVG	24.80	24.92	22.77	20.24	16.77	15.55	16.45	18.78	21.76	24.83	25.30	24.92
DEWPT	16.62	21.46	21.55	20.90	20.83	19.84	18.08	19.11	19.24	19.47	20.25	21.76
WNDVAV	1.95	1.48	1.10	1.23	1.28	1.11	1.21	1.51	1.79	1.99	1.88	1.76

TMP_MX – Média da Temperatura máxima diária(°C); TMP_MN – Média da Temperatura mínima diária(°C); DV_TMX – Desvio padrão da temperatura máxima; DV_TMN – Desvio padrão da temperatura mínima; PCP – Média diária da precipitação (mm); SKW_PCP – Coeficiente skew para a precipitação diária; PR_W(1) – Probabilidade de dia com chuva seguido de um dia seco; PR_W(2) – Probabilidade de um dia de chuva seguido de outro dia de chuva; RAINHHR – Chuva máxima em meia hora; PCP_DAYS – N° médio de dias chuvosos; SOLAVG – Radiação solar média diária no mês (MJ.m².dia⁻¹); DEWPT – Temperatura média diária do ponto de orvalho (°C); WNDVAV – Velocidade do vento médio diário no mês (m.s⁻¹).

ANEXO C – Valores de cota (m) y respectivos caudales ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) para el río Betume

Cota	Caudal	Cota	Caudal	Cota	Caudal	Cota	Caudal
1.38	0.77	1.46	0.91	1.65	2.46	1.87	6.41
1.39	0.78	1.46	0.99	1.66	2.59	1.88	6.65
1.40	0.78	1.47	0.95	1.67	2.72	1.89	6.89
1.40	0.78	1.48	0.99	1.68	2.86	1.9	7.13
1.40	0.79	1.48	1.09	1.69	3.00	1.92	7.64
1.40	0.80	1.50	1.21	1.7	3.15	1.93	7.90
1.41	0.77	1.52	1.21	1.71	3.31	1.95	8.43
1.41	0.78	1.52	1.35	1.72	3.46	1.96	8.70
1.41	0.80	1.53	1.28	1.73	3.63	1.97	8.98
1.42	0.78	1.54	1.35	1.74	3.79	1.99	9.55
1.42	0.79	1.54	1.51	1.75	3.97	2.02	10.44
1.42	0.80	1.55	1.43	1.76	4.15	2.03	10.75
1.42	0.82	1.56	1.51	1.77	4.33	2.04	11.06
1.42	0.85	1.56	1.68	1.78	4.51	2.05	11.38
1.43	0.80	1.57	1.59	1.8	4.90	2.06	11.70
1.43	0.82	1.58	1.68	1.81	5.10	2.07	12.03
1.43	0.85	1.59	1.78	1.82	5.31	2.18	15.93
1.44	0.80	1.61	1.99	1.83	5.52	2.24	18.31
1.44	0.85	1.62	2.10	1.84	5.74	2.28	19.99
1.44	0.91	1.63	2.21	1.85	5.96	2.3	20.86
1.45	0.87	1.64	2.33	1.86	6.18		

Fuente: SEMARH

ANEXO D – Caudales calculados a partir de ecuaciones polinomial y exponencial de curva-llave del río Betume

h (m)	Q_{obs} (m³.s⁻¹)	Polinomial Q_{cal}	Exponencial Q_{cal}	h (m)	Q_{obs} (m³.s⁻¹)	Polinomial Q_{cal}	Exponencial Q_{cal}
1.38	0.77	0.48	0.79	1.65	2.46	2.63	2.47
1.39	0.78	0.52	0.79	1.66	2.59	2.76	2.60
1.4	0.78	0.57	0.80	1.67	2.72	2.89	2.73
1.4	0.78	0.57	0.80	1.68	2.86	3.02	2.87
1.4	0.80	0.57	0.80	1.69	3.00	3.16	3.01
1.41	0.77	0.62	0.81	1.7	3.15	3.30	3.16
1.41	0.78	0.62	0.81	1.71	3.31	3.45	3.31
1.41	0.80	0.62	0.81	1.72	3.46	3.60	3.47
1.42	0.78	0.67	0.82	1.73	3.63	3.76	3.63
1.42	0.79	0.67	0.82	1.74	3.79	3.91	3.80
1.42	0.80	0.67	0.82	1.75	3.97	4.08	3.97
1.42	0.82	0.67	0.82	1.76	4.15	4.25	4.15
1.42	0.85	0.67	0.82	1.77	4.33	4.42	4.33
1.43	0.80	0.72	0.84	1.78	4.51	4.59	4.52
1.43	0.82	0.72	0.84	1.8	4.90	4.96	4.91
1.43	0.85	0.72	0.84	1.81	5.10	5.15	5.11
1.44	0.80	0.77	0.86	1.82	5.31	5.34	5.32
1.44	0.85	0.77	0.86	1.83	5.52	5.54	5.53
1.44	0.91	0.77	0.86	1.84	5.74	5.75	5.74
1.45	0.87	0.83	0.89	1.85	5.96	5.96	5.96
1.46	0.91	0.89	0.92	1.86	6.18	6.17	6.19
1.46	0.99	0.89	0.92	1.87	6.41	6.39	6.42
1.47	0.95	0.96	0.96	1.88	6.65	6.61	6.65
1.48	0.99	1.02	1.00	1.89	6.89	6.84	6.89
1.48	1.09	1.02	1.00	1.9	7.13	7.07	7.14
1.5	1.21	1.16	1.10	1.92	7.64	7.56	7.64
1.52	1.21	1.32	1.22	1.93	7.90	7.81	7.90
1.52	1.35	1.32	1.22	1.95	8.43	8.32	8.43
1.53	1.28	1.40	1.29	1.96	8.70	8.58	8.70
1.54	1.35	1.48	1.36	1.97	8.98	8.85	8.98
1.54	1.51	1.48	1.36	1.99	9.55	9.41	9.55
1.55	1.43	1.57	1.44	2.02	10.44	10.29	10.44
1.56	1.51	1.66	1.52	2.03	10.75	10.59	10.75
1.56	1.68	1.66	1.52	2.04	11.06	10.90	11.06
1.57	1.59	1.75	1.61	2.05	11.38	11.22	11.38
1.58	1.68	1.85	1.70	2.06	11.70	11.54	11.70
1.59	1.78	1.95	1.79	2.07	12.03	11.86	12.03
1.61	1.99	2.16	2.00	2.18	15.93	15.86	15.93
1.62	2.10	2.28	2.11	2.24	18.31	18.37	18.30
1.63	2.21	2.39	2.22	2.28	19.99	20.17	19.98
1.64	2.33	2.51	2.34	2.3	20.86	21.12	20.85