

MODELACIÓN DEL RECURSO HIDRICO EN LA MICROCUENCA PEÑAS
BLANCAS,
MUNICIPIO DE TANGUA, DEPARTAMENTO DE NARIÑO

JOSE LUIS OBANDO MORA
JUAN CARLOS MORAN MORILLO

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRICOLAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA AGROFORESTAL
SAN JUAN DE PASTO
2013

MODELACIÓN DEL RECURSO HIDRICO EN LA MICROCUENCA PEÑAS
BLANCAS,
MUNICIPIO DE TANGUA, DEPARTAMENTO DE NARIÑO

JOSE LUIS OBANDO MORA
JUAN CARLOS MORAN MORILLO

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de INGENIERO
AGROFORESTAL

Presidente

GEOVANNY SOLARTE C Msc.

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRICOLAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA AGROFORESTAL
SAN JUAN DE PASTO
2013

NOTA DE RESPONSABILIDAD

Las ideas y conclusiones aportadas en el siguiente trabajo son responsabilidad exclusiva del autor.

Artículo 1ro del Acurdo No. del Acurdo No. 324 de octubre 11 de 1966 emanado del Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

Nota de aceptación:

Firma de presidente de tesis

Firma de jurado

Firma de jurado

SAN JUAN DE PASTO, NOVIEMBRE DE 2013

AGRADECIMIENTOS

J. Geovanny Solarte Guerrero M.Sc, Docente Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Nariño

J. Fernando Navia Estrada Ph.D, Docente Facultad de Ciencias Agrícolas Universidad de Nariño

R. Srinivasan Ph.D, Coautor del modelo, Soil and Water Assessment Tool (SWAT).

MODELACIÓN DEL RECURSO HIDRICO EN LA MICROCUENCA PEÑAS
BLANCAS,
TANGUA, NARIÑO¹

MODELATION OF HYDRIC RESOURCES IN THE WATERSHED PEÑAS BLANCAS,
TANGUA, NARIÑO

José Luis Obando M.²
Juan Carlos Morán M.³
Jesús Geovanny Solarte G.⁴

RESUMEN

Se realizó la modelación del recurso hídrico en la microcuenca Peñas Blancas, localizada en las coordenadas geográficas 1.034639 Latitud Norte y -77.312611 Longitud oeste. Posee una temperatura promedio de 13.2 °C, humedad relativa promedio de 81%, una precipitación promedio de 1041.5 mm año y una altura de 3623 msnm. Para la modelación hidrológica se utilizó el modelo SWAT, el cual aún no ha tenido fuerte aplicación para las cuencas del trópico de altura, por lo que esta investigación plantea una línea base metodológica y de datos para futuras investigaciones en la región. Para la consecución de los datos de entrada del modelo se tomaron muestras de suelo a las que se les realizó un análisis físico-químico en laboratorio, se generó cartografía temática para la zona, se realizaron procesos de fotointerpretación y clasificación para determinar coberturas y se obtuvieron datos meteorológicos de 2 estaciones cercanas (Sindagua y Botana) a la microcuenca en estudio. En primera instancia el modelo tuvo un desempeño regular $R^2=0.52$, $NSE=0.24$ y $PBias=-14.6\%$, por lo que fue necesario realizar una calibración a los parámetros más sensibles, logrando obtener valores ajustados de $R^2=0.74$, $PBias=-9.13\%$ y $NSE=0.65$. De igual forma para el periodo de validación del modelo, se obtuvo un desempeño muy bueno por parte del modelo SWAT de $R^2=0.80$, $NSE=0.70$ y $PBias=-10.3\%$. Finalmente se propone la ampliación de la cobertura boscosa y la implementación de especies arbóreas en los sistemas productivos para proteger la calidad y cantidad del recurso hídrico superficial.

¹ Artículo científico presentado como requisito para optar al título de Ingeniería Agroforestal a la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad de Nariño

² Técnico en Comercio Internacional, Centro Andino Bogotá y Estudiante de Ingeniería Agroforestal, Facultad de Ciencias Agrícolas. Universidad de Nariño. E-mail: joseluissig@hotmail.com

³ Estudiante de Ingeniería Agroforestal, Facultad de Ciencias Agrícolas. Universidad de Nariño. E-mail: jkmorants@gmail.com

⁴ I. AF. cM Sc. Docente Facultad Ciencias Agrícolas. Universidad de Nariño. 2013.

PALABRAS CLAVE: SWAT, Hidrología, Modelo, Balance Hídrico, SIG

ABSTRACT

The modelling of water resources was performed in the watershed Peñas Blancas, located at the geographical coordinates -77.312611 1.034639 North Latitude and West Longitude. It has an average temperature of 13.2 ° C, average relative humidity 81 %, average rainfall year 1041.5 mm and located at 3623 meters above sea level. For hydrological modeling was used the SWAT model, which had not a high application for high-andean tropic bassins, so this research gives a methodological baseline for future research in the region. To get the input data, were taken soil samples which were evaluated by a physical-chemical analysis laboratory, generated thematic cartography for the area, were performed fotointerpretation and classification process to determine coverage and obtained meteorological data from two nearby stations (Sindagua and Botana) to the watershed under study. The model had a regular performance $R^2 = 0.52$, $NSE = 0.24$ and $PBIAS = -14.6 \%$, so it was necessary to calibrate the most sensitive parameters, obtaining fitted values of $R^2 = 0.74$, $PBIAS = -9.13 \%$ and $NSE = 0.65$. Same as for model validation period, we obtained a very good performance by the SWAT model $R^2 = 0.80$, $NSE = 0.70$ and $PBIAS = -10.3 \%$. Finally we propose the expansion of forest cover and the implementation of tree species into the production systems to protect the quality and quantity of surface water resources.

KEYWORDS: SWAT, Hydrology, Water balance, GIS, Model

CONTENIDO

Resumen	7
Abstract	7
Introducción	8
Materiales y Métodos	9
Resultados y Discusión	18
Conclusiones	25
Bibliografía	25

INTRODUCCIÓN

Los Modelos hidrológicos, son herramientas ideales para el estudio y la evaluación del comportamiento de una Cuenca, esto hace posible el análisis de los cambios en la cantidad y calidad del agua, de una cuenca debida a diversos factores, como variaciones en el régimen de precipitación de una región, modificaciones en el uso de suelo y causas de origen antrópico (Brandizi y Labraga, 2012). Asimismo, el cambio de uso del suelo es un proceso dinámico, originado por acción antrópica que cada vez es más evidente en las cuencas hidrográficas. Estos procesos de cambio, son cada vez mayores y ocurren con rapidez, alterando la cantidad del recurso hídrico disponible para la población. Este cambio de uso del suelo, causado por la continua intervención humana ha modificado de una manera permanente la vegetación original que con el tiempo ha afectado el régimen hídrico de gran parte de las cuencas (Coral, 2007).

En Colombia el recurso agua constituye un elemento vital y articulador de la naturaleza, por lo tanto su manejo y conservación se ha convertido en un tema de gran vigencia e importancia. Dentro de la cultura de consumo del agua, este recurso siempre ha sido considerado como abundante, sin embargo en los últimos años se ha comenzado a evidenciar un relativo descenso en su disponibilidad en algunas cuencas pequeñas y medianas (Gaitán, 1996). En la zona alto andina, los bosques nativos han sido sobreexplotados, donde se ha cambiado la vocación del uso del suelo por otras no aconsejables ambientalmente, causando alteraciones en los cuerpos de agua existentes (Corporación Autónoma Regional de Nariño- CORPONARIÑO, 2005).

Por otra parte, en Nariño, la tala de bosques y el cambio de coberturas, han ocasionado la disminución de los caudales hídricos de la mayoría de las cuencas existentes; esto se debe a factores, como la falta de alternativas económicas productivas para comunidades de escasos recursos. (CORPONARIÑO, 2004).

De igual manera, en la microcuenca Peñas Blancas, el estado de conservación y de protección de las corrientes, es preocupante, porque en su mayoría se encuentran desprovistas de cobertura vegetal natural, que han contribuido a la disminución del caudal. Esta condición, ha generado graves problemas de oferta hídrica para las comunidades que viven en la parte baja de la microcuenca. (Guapucal, 2008)

Por esta razón, a través del tiempo han sido diferentes las modalidades de intervención en cuencas hidrográficas, para evaluar el comportamiento hidrológico. Una de ellas se basa en el uso de modelos de simulación hidrológica, que tiene la posibilidad de reproducir todos los componentes del ciclo hidrológico con la ayuda de un computador, el cual se convierte en un banco de pruebas que permite al investigador simular condiciones futuras, que afectan uno o varios de los procesos físicos que intervienen en dicho ciclo. (Oñate Y Aguilar, 2003)

Este trabajo tuvo como objetivo general modelar el recurso hídrico en la microcuenca Peñas Blancas, Municipios Tangua, departamento de Nariño, y como objetivos específicos la aplicación del modelo SWAT, para determinar el comportamiento hidrológico de la microcuenca y proponer alternativas de manejo que contribuyan a la conservación del recurso hídrico de la microcuenca Peñas Blancas.

MATERIALES Y METODOS

Zona de estudio.

La microcuenca quebrada Peñas Blancas hace parte de la cuenca del río Bobo, tiene una extensión de 1934 has. Según el sistema cartográfico del IGAC, se ubica al sur oriente del municipio de Tangua, en las coordenadas geográficas 1.034639 Latitud Norte y -77.312611 Longitud oeste (Fig. 1). Posee una temperatura promedio de 13.2 °C, humedad relativa promedio de 81%, una precipitación promedio de 1041.5 mm año y una altura de 3623 msnm. Se ubica en la zona de vida de Bosque húmedo Montano Bajo (bh-MB). (Holdrige, 1967)

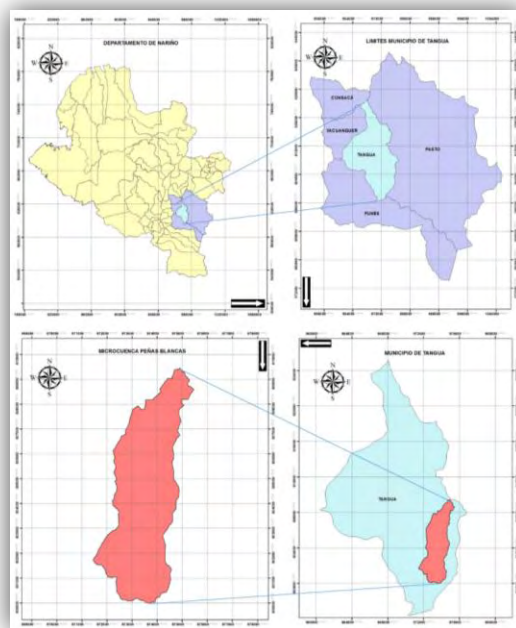


Figura No. 1 Mapa de localización Microcuenca Peñas Blancas
Fuente: Este estudio (2013)

Obtención de software y hardware.

Para la modelación hidrológica de la microcuenca Peñas Blancas se utilizó el software SWAT (Soil and Water Assessment Tool), con la extensión ArcSWAT 2012.10.7, para el programa ArcGIS 10.1 con un Service Pack 1.

Datos de entrada del modelo.

El modelo hidrológico SWAT, necesita una serie de datos de entrada para su correcto funcionamiento; estos son: Modelo de elevación Digital (MDE), mascara, la cual señala el área donde se delimitara la cuenca, cartografía de los tipos de suelo, datos de suelos correspondiente a cada cobertura, uso actual del suelo en la zona, datos de precipitaciones, temperaturas, humedad relativa, brillo solar y viento del periodo a modelar.

Modelo Digital de Elevación (MDE).

El MDE de la microcuenca se obtuvo del servidor de la NASA, ASTER Global Digital Elevation Model /ASTER GDEM. Los modelos de elevación digital, son estructuras numéricas de datos que representan la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno. (Pusineri *et al*, 2005)

El MDE obtenido para la microcuenca Peñas Blancas, posee una resolución de 30 m y un gradiente altitudinal que van desde los 2160 hasta los 3934 msnm. (Figura 2).

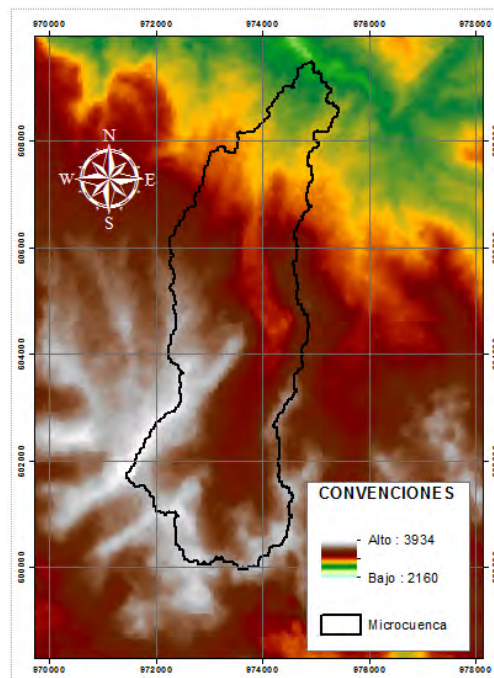


Figura No. 2 Modelo de elevación Digital, Microcuenca Peñas Blancas
Fuente: Este estudio (2013)

Mapa cartográfico de los tipos de suelos.

Con base en la clasificación de suelos del IGAC 2004 para Colombia, se generó en ArcGIS 10.1 el mapa de suelos, donde se obtuvo siete (7) clasificaciones. (Figura 3). (Cuadro 1).

Tabla 1. Clasificaciones del suelo para la zona de estudio.
Fuente. Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC, 2004

	Clasificación Tipo de Suelo	Descripción
1	MLAg	Consociación Acrudoxic Melanudands, Fase fuertemente escarpada
2	MLEd	Consociación Acrudoxic Fulvudands. Fase, ligeramente escarpada
3	MLAc	Consociación Acrudoxic Melanudands, Fase moderadamente inclinada
4	MHAD	Consociación Acrudoxic Melanudands. Fase, fuertemente inclinada
5	MHEg	Grupo Indiferenciado Typic Placudands, Lithic Melanudands y Misceláneo Rocoso, escarpados. Fase, fuertemente escarpada
6	MEEg	Grupo Indiferenciado Lithic Melanocryands y Misceláneo Rocoso, extremadamente fríos, escarpados. Fase, Fuertemente escarpada
7	MHDay	Grupo Indiferenciado Histic Endoaquands e Hydric Haplofibrists, encharcable. Fase, plana, encharcable

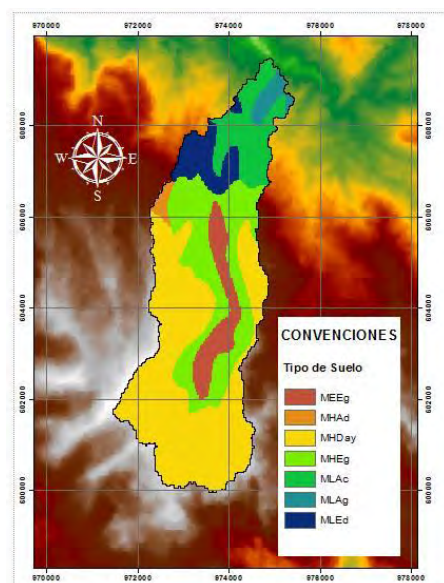


Figura No. 3 Mapa de tipos de Suelo, Microcuenca Peñas Blancas
Fuente: Este estudio (2013)

Mapa de uso actual del suelo.

Se obtuvo una imagen ASTER con resolución de 20m e información espectral de 7 bandas a través de la página Global Landcover Facility de la NASA, con la cual y mediante procesos de clasificación en el software ERDAS Imagine, se logró obtener un raster con la clasificación de las coberturas actuales, las cuales se corroboraron en

campo y se ajustaron de manera digital. Los usos del suelo resultantes fueron cinco (5), correspondientes a bosque, páramo, subpáramo, pastos y cultivos (Figura 4).

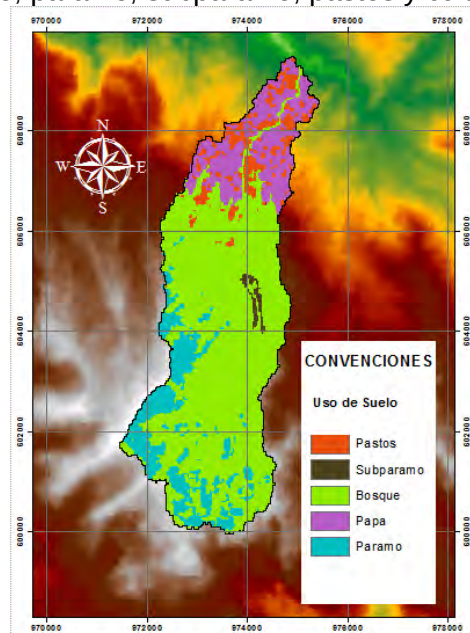


Figura No. 4. Uso actual del Suelo
Fuente: Este estudio (2013)

Datos climatológicos e hidrológicos.

Se obtuvo información climatológica de precipitación diaria, temperatura máxima y mínima, humedad relativa, velocidad del viento y brillo solar de dos (2) estaciones cercanas a la zona de influencia que fueron Sindagua con código 52055090 y Botana con código 52055040. Igualmente, se adquirió datos de caudal de la estación Las Piedras (52057080), la cual se encuentra localizada dentro de la zona de estudio. Dicha información fue comprada al Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM).

La información obtenida para ser utilizada en el modelo fue correspondiente a un periodo referencial de 5 años (2008-2012).

Parámetros de suelo (Soil data).

Para la obtención de los datos de suelos, se hizo una toma de muestras en 4 horizontes del suelo, correspondiente a los cinco (5) usos del suelo encontrados en la microcuenca. Para este muestreo se realizaron calicatas y se tomó en cada horizonte una muestra de suelo sin disturbar con Cilindros Uhland, los cuales son cilindros de acero inoxidable de 7 cm de alto, 7 cm de diámetro y un volumen de 270 cm³, estos son colocados dentro de una estructura metálica la cual recibe el impacto de un peso de 4,5 kg desde una altura de 50 cm, para ser introducidos en el suelo (Uhland, 1949), siguiendo la metodología propuesta por Legarda *et al*, 2002. Luego, se llevaron a los laboratorios especializados de la universidad de Nariño para su análisis físico-químico y obtener los datos de conductividad

hidráulica, textura, cantidad de arcillas, limos, arenas y materia orgánica necesarios para la modelación en SWAT.

Los requerimientos de SWAT, se describen en la Tabla No. 2; sin embargo, fue necesario extraer datos adicionales del estudio de suelos del departamento de Nariño del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) para obtener información complementaria para los 7 horizontes.

Tabla No. 2 Input Data Soil, Input/Output Documentation version 2012

Parámetro	Descripción
HYDGRP	Grupo hidrológico del suelo, puede ser A, B, C o D. Se define a un grupo hidrológico como un grupo de suelos que tienen una escorrentía potencial similar bajo condiciones de tormenta y condiciones de cobertura.
SOL_ZMX_	Profundidad máxima de raíz en el perfil del suelo, si la profundidad no es especificada, el modelo asume que la raíz se puede desarrollar en todo el perfil del suelo.
ANION_EXCL	Fracción de porosidad (espacio vacío) de la que se excluyen los aniones. Si el valor no se introduce, el modelo lo tomara como 0.50.
SOL_CRK	Volumen potencial o máximo ruptura, volumen de grieta máxima.
TEXTURE	Textura de la capa del suelo.
SOL_Z	Profundidad de la superficie del suelo a la capa más profunda.
SOL_BD	Densidad en húmedo del suelo, los valores generalmente son entre 1.1 y 1.9 Mg/m ³
SOL_AWC	Capacidad de agua disponible en la capa del suelo en mm de Agua sobre mm de suelo, se determina extrayendo la fracción de agua presente hasta el punto de marchitez permanente desde el suelo a capacidad de campo.
SOL_K	Conductividad hidráulica en saturación (mm/hora)
SOL_CBN	Contenido de carbono Orgánico, en % del peso del suelo. Se dice que la se toma el % de peso con la porción de suelo que pasa por el filtro o tamiz de 2 mm.
SOL_CLAY	Contenido de arcillas en % de suelo – partículas menores a 0.002 mm.
SOL_SILT	Contenido de limo en % de suelo – partículas entre 0.05 – 0.002 mm.
SOL_SAND	Contenido de Arena en % de peso del suelo – Partículas de 2 a 0.05 mm.
SOL_ROCK	Contenido de Fragmentos de roca en % de peso del suelo – partículas mayores a 2mm.
SOL_ALB	Albedo del suelo en húmedo, es la radiación solar reflejada por un cuerpo, en el suelo el albedo es reportado cuando está a capacidad de campo.
USLE_K	Ecuación USLE de la probabilidad de suelo (K) ecuación universal de perdida de suelo.
SOL_EC	Conductividad eléctrica.

Estructuración de la información de SWAT.

El modelo SWAT requiere información de datos climáticos, hidrológicos, de uso y tipo suelos; por lo tanto, se crearon tablas en formato *Text Document* (.txt) para generar una base de datos para dicha información.

Organización de las tablas climáticas.

La información climatológica de precipitación diaria, temperatura máxima y mínima, humedad relativa, velocidad del viento y brillo solar se ordenaron de forma descendente, empezando desde el día uno (1), del mes uno (1) del 2008, hasta el 31 de diciembre del 2012. El período comprendido para la modelación hidrológica fue de 5 años.

Los datos de temperatura y precipitación se articularon a SWAT mediante dos tablas de localización denominadas pcpfork.txt y tempfork.txt, para precipitaciones y temperaturas, respectivamente, las cuales se ingresan a SWAT para que desde ellas la información de los datos de las estaciones climáticas sean tenidos en cuenta en el proceso de modelación.

Datos por cobertura o uso del suelo (Landuse data).

SWAT utiliza un modelo de crecimiento vegetal para simular el desarrollo de los cultivos y valorar la eliminación de agua de la zona de la raíz, transpiración y producción de biomasa; por lo tanto, requiere gran cantidad de información fisiológica de estas coberturas.

SWAT es un software realizado para modelar cuencas en zonas diferentes al trópico, por lo que la adaptación que debe hacerse en cuanto a parámetros climáticos, hidrológicos, geológicos y fisiológicos es muy importante si se desea tener resultados válidos. La zona de estudio tuvo coincidencia con la base de datos de SWAT en los siguientes usos de suelo: Bosques, pastos, y cultivos de papa, y discrepancia para los usos de paramo y subparamo, coberturas no establecidas en la base de datos de SWAT para las cuales se realizó una adaptación:

Los parámetros ajustados en la base de datos SWAT 2012 para las coberturas de paramo RYEG - *Ryegrass Italian* (Annual) y subparamo RYES – *Ryegrass* fueron (tabla 3):

Tabla No 3. Parámetros ajustados para las coberturas paramo y subparamo

CHTMX:	Altura máxima del dosel
RDMX:	Máxima profundidad de la raíz
T_OPT:	Temperatura óptima para el desarrollo de la planta oC
T_BASE:	Temperatura mínima para el desarrollo de una planta oC
RSR2:	Crecimiento inicial de la raíz al inicio de la temporada de crecimiento.
BIO_E:	Eficiencia del uso de la radiación o porción de biomasa-energía (Kg/ha)(MJ/m2)
BLAI:	Índice del máximo potencial del área de la hoja

La elección de los parámetros de ajuste se basó en los análisis de sensibilidad para las coberturas o cultivos (CROP) descritos en la base de datos SWAT 2012, seleccionando los de mayor relevancia en cuanto a la diferencia de que podrían tener estas coberturas con las adaptadas.

La relación de las coberturas con la base de datos de SWAT (Tabla No. 4) se determinó mediante análisis de semejanzas, toma de información primaria y la búsqueda de información secundaria.

Tabla No. 4 Relación de coberturas con la base de datos de SWAT

Cobertura (Zona de estudio)	Landuse (SWAT)
Bosque	FRSE
Papa	POTA
Pastos	FESC
Paramo	RYEG
Subparamo	FESS

Tabla de datos estadísticos de clima en SWAT (WGENuser data).

SWAT necesita como requerimiento la tabla de datos WGENuser, la cual presenta una serie de parámetros estadísticos de los datos de clima a utilizar en el modelo (Tabla 5). El manual de SWAT recomienda tres (3) software para la generación de estos parámetros: Microsoft Excel (tablas dinámicas/*Pivot Tables*), el programa Pcpstat.exe o a través del ejecutable WGN Excel Macro. Para este estudio se empleó WGN Excel Macro, con el cual se generaron estadísticos para las dos (2) estaciones climatológicas, Sindagua y Botana. Los archivos necesarios para correr la Macro fueron: Humedad relativa, temperatura, precipitación, velocidad del viento, radiación solar y máxima intensidad de lluvia en media hora.

Tabla No. 5 Parámetros estadísticos de clima

Parámetros	Descripción
TMPMX	Promedio mensual de la temperatura máxima diaria (°C)
TMPMN	Promedio mensual de la temperatura mínima diaria (°C)
TMPSTDMX	Desviación estándar mensual de la temperatura máxima diaria (°C)
TMPSTDMN	Desviación estándar mensual de la temperatura mínima diaria (°C)
PCPMM	Promedio mensual de la precipitación diaria (mm H ₂ O)
PCPSTD	Desviación estándar mensual de la precipitación diaria (mm H ₂ O/día)
PCPSKW	Coeficiente de asimetría mensual de la precipitación diaria
PR_W1	Probabilidad mensual de ocurrencia de un día húmedo luego de un día seco
PR_W2	Probabilidad mensual de ocurrencia de un día húmedo luego de un día húmedo
PCPD	Promedio mensual del número de días de lluvia
RAINHHMX	Máxima lluvia de media hora por mes (mm H ₂ O)
SOLARAV	Promedio mensual de la radiación solar diaria (MJ/m ² / día)
DEWPT	Promedio mensual de la temperatura del punto de rocío (MJ/m ² / día)
WNAV	Promedio mensual de la velocidad de viento diaria (m/s)

Ingreso de datos a SWAT para la modelación de la microcuenca (Input data).

Una vez estructurada la información necesaria se procedió a ingresar los datos de entrada al modelo SWAT para llevar a cabo la modelación de la microcuenca de estudio.

Generación de la red hídrica

SWAT a partir del modelo digital de elevación (MDE) y procesos algorítmicos de dirección y acumulación de flujo, genera la red hídrica dentro de la cual se elige un punto de desfogue de aguas. Este proceso se basa en la información que posee el modelo digital de elevación, el cual proporciona las cotas de las partes de agua que delimitara la cuenca a partir de un punto de desfogue escogido automática o manualmente.

Generación de Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU's)

Para la generación de las HRU's, se utilizó información espacial de uso del suelo (Landuse), tipo de suelos y pendientes. Teniendo en cuenta el sistema de clasificación de pendientes del Instituto Geográfico Agustín Codazzi se determinaron cinco (5) rangos de

pendiente (0-7%, 7-12%, 12-25%, 25-50% y >50%), para los cuales el software creó una mapa de clasificación.

Con el cruce de esta información se generaron las unidades de respuesta hidrológica (HRU), definidas como zonas que por sus características de coberturas, suelos y pendientes, presentan un comportamiento hidrológico similar.

Aplicación del modelo

Con base en los Unidades de Respuesta Hidrológica, los datos climáticos e hidrológicos se corrió el modelo en SWAT, el cual determinó, la cantidad superficial del recurso hídrico, producción de agua por subcuencas, unidades de respuesta hidrológica y caudales.

El modelo corre bajo datos diarios y sus resultados pueden ser, mensuales, anuales y diarios; sin embargo, se optó por reportar los resultados de caudales diarios para periodos mensuales, debido a la facilidad de manipulación de los datos. Estos valores se compararon con los datos de caudal observados en la estación de aforo las Piedras.

Análisis de Sensibilidad, Calibración y Validación

Para que la simulación y el modelo tengan una correlación válida respecto al funcionamiento real del sistema, se realizó un análisis de sensibilidad. Para SWAT 2012, se utilizó la herramienta SWAT CUP4. Este análisis de sensibilidad identifica los parámetros que tienen una influencia significativa en los resultados del modelo con respecto a las observaciones reales.

La calibración del modelo SWAT consiste en realizar un test de los parámetros de salida (caudal, sedimentos, escorrentía, etc.) entre los simulados y los observados o tomados en campo, con la finalidad de poder determinar cuáles parámetros de entrada deben ser ajustados en el modelo, y así este pueda asemejarse más a la realidad. Uribe (2010)

El proceso de calibración y validación se realizó en forma diaria para un periodo de simulación de 5 años (2008 – 2012); sin embargo, se contaron con datos aforados de caudales para un periodo de 4 años (2008 – 2011). Por lo tanto, el periodo de calibración se realizó desde el año 2008 – 2009 y el periodo de validación desde el año 2010 – 2011.

Por la falta de datos aforados de caudales para el año 2012, se excluyó para este año el proceso de calibrado y validado.

La metodología del estudio respecto a la aplicación del modelo en la microcuenca Peñas Blancas se resume en Flujo grama metodológico de la figura 5.

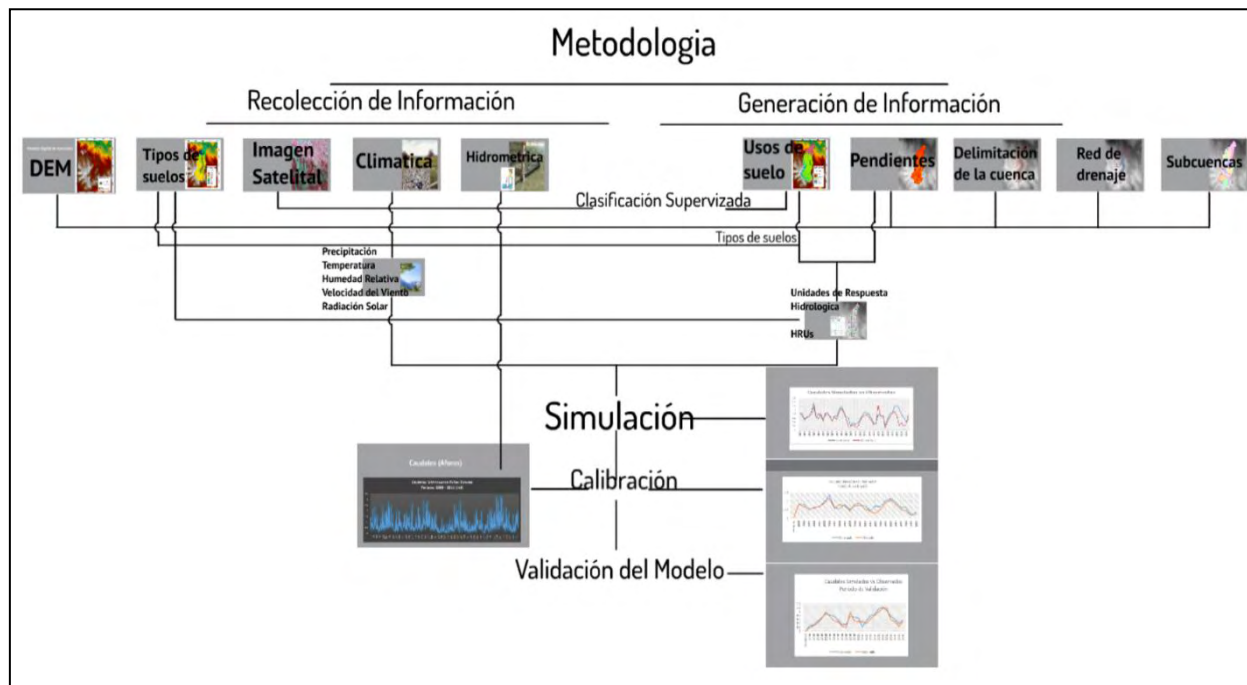


Figura 5. Diagrama de flujo metodológico
Fuente: Este Estudio, (2013)

Evaluación del Modelo

Para evaluar el desempeño del modelo SWAT se utilizó el coeficiente de determinación (R^2) que mide el porcentaje de la variación de la respuesta que es explicable por la curva ajustada (Mancera, 2003). Además se calcularon dos estadísticos, basados en medidas dimensionales del error, el coeficiente de Eficiencia de *Nash-Sutcliffe* (*NSE*), el cual mide la relación entre la varianza de los residuales y la varianza de los valores observados, su valor optimo es 1 y El Sesgo porcentual (*PBIAS*, *Percent Bias*), mide la tendencia promedio de que los valores sean mayores o menores que los observados. Un valor positivo indica una sobreestimación y un valor negativo, una subestimación. Moriasi et al. (2007); Chavez, (2010) (Tabla No.6).

Tabla No.6. Esquema de valoración de estadísticos, que comparan datos observados y modelados.
Fuente: Moriasi et al. (2007)

Desempeño	NSE	PBIAS	R^2
Muy Bueno	0,75 -1	< ± 10	0.8 – 1
Bueno	0,65 – 0,75	$\pm 10 – \pm 15$	0.6 – 0.7
Satisfactorio	0,50 – 0,65	$\pm 15 – \pm 25$	0.5 – 0.6

Insatisfactorio	< 0,5	> ±25	> 0,5
-----------------	-------	-------	-------

Modelación del recurso hídrico vs escenarios de uso de suelo.

Como escenario de uso del suelo, se utilizó el correspondiente al año 1989. La obtención de este uso se hizo con base en una imagen Landsat con resolución de 20m e información espectral de 7 bandas para el año 1989, donde se realizaron procesos clasificación en el software ERDAS Imagine con los que se logró obtener un raster las coberturas para dicho año.

Proposición de alternativas de manejo y conservación.

Con base en los resultados obtenidos se propuso alternativas de manejo del uso del suelo y conservación del recurso hídrico.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caudales simulados vs caudales observados

La modelación hidrológica arrojó resultados variables, donde los caudales simulados se ajustan regularmente en algunos meses del primer año con respecto a los caudales observados; sin embargo, se observaron diferencias significativas en el segundo año.



Grafica No. 1. Caudales simulados vs Observados.
Fuente: Este estudio (2013)

La gráfica 1 presenta los resultados de caudales cada dos (2) meses para los cuatro (4) años. Durante los meses de julio y agosto del año 2008, se observa una subestimación por parte del modelo en los meses de Julio-Agosto, donde el caudal observado fue cercano a $1,4 \text{ m}^3$ y el modelo arrojó un caudal de $1,2 \text{ m}^3$. Por otra parte, en los últimos meses del año 2009 se presenta diferencias de caudal de $0,2 \text{ m}^3$ entre lo observado y simulado. A finales del año

2010, el modelo presenta diferencias significativas de 0.4 m^3 con respecto al valor real de caudal. Finalmente, en el último año se presenta variaciones marcadas de 0.3 m^3 de caudal.

El coeficiente de determinación (R^2) obtuvo un valor de 0.5 (Tabla No 7), el cual indica que la ejecución del modelo no fue satisfactoria para el periodo modelado. De acuerdo a los criterios propuestos por Moriasi et al, 2007 (tabla 6), los estadísticos calculados para el modelo indican valores poco favorables, donde la eficiencia de *Nash-Sutcliffe* (NSE) fue igual a 0.24 y el Sesgo porcentual (PBIAS, *Percent Bias*) adquirió un valor de -14.6 calificándolo como un valor bueno; sin embargo los otros valores no son favorables por lo que se hizo necesario realizar la calibración del modelo para su posterior validación.

Tabla No.7. Estadísticos generados para la modelación de caudales de la microcuenca Peñas Blancas.
Fuente: Este estudio, (2013)

Fase del Modelo	Estadísticos del desempeño del modelo		
	R^2	NSE	PBias
Modelación Inicial	0.5	0.24	-14.6%
Calibración	0.74	0.65	-9.13%
Validación	0.8	0.70	-10.3%

Las diferencias entre los caudales observados y los simulados probablemente, obedecen en primera instancia, a que el modelo se desarrolló para actuar en las condiciones de la zona templada, mas no en la zona de trópico, por lo que las condiciones biofísicas, cambian significativamente, Rojas (2009), señala que en las zonas templadas, no existen formas específicas que conformen un modelado geográfico característico; es decir, no existe un sistema montañoso muy desarrollado. Por otra parte, con respecto a las condiciones climáticas, se presentan cuatro (4) estaciones marcadas a diferencia de la zona tropical, donde se presentan periodos de sequía y de lluvia; específicamente en la zona de la microcuenca donde se encuentra un régimen de lluvias bimodal.

Torres *et al*, 2005, obtuvieron valores de R^2 iguales a 0.5 para su investigación realizada en la cuenca del rio Laja en Guanajuato, México, donde el modelo subestimaba aproximadamente un 200% la producción de caudales, sin embargo después de la calibración se lograron valores de 0.99 para R^2 , logrando un mejor ajuste del modelo. Behrends *et al*. 2011 consiguieron un buen desempeño del modelo SWAT ($R^2= 0.74$ y NSE 0.64), en una microcuenca de la Pampa Ondulada de Argentina, confirmando la aplicabilidad del modelo tanto en grandes cuencas, para lo cual fue diseñado, como para microcuencas. El poder predictivo del modelo, será bueno siempre y cuando la calidad de los datos de entrada sea de alta, de lo contrario el modelo SWAT, tiende a subestimar o sobreestimar las variables estudiadas.

Con respecto a las coberturas encontradas en la microcuenca, se presentaron dos (2) casos especiales las cuales fueron: paramo y subparamo, que presuntamente tuvieron dificultad en el momento de la modelación, debido a que estas coberturas no existen en la base de datos de SWAT, para realizar la modelación; por lo tanto, se adaptaron algunos parámetros representativos. Díaz-granados, (2005) afirman que la vegetación presente en el páramo ha desarrollado características fisiológicas especiales para adaptarse y sobrevivir a las extremas condiciones de clima, topografía y suelos presentes en el ecosistema de paramo.

El clima frío, húmedo, y la baja presión atmosférica favorecen la acumulación de la materia orgánica en el suelo, como un resultado de la baja densidad aparente y de la estructura abierta y porosa, los suelos del páramo tienen una capacidad de retención de agua muy alta (80-90 % en saturación) Iñiguez, 2003. Uribe, 2013 afirma que los suelos con altos contenidos de materia orgánica, no presentan una buena respuesta al momento de modelar caudales. Las condiciones especiales en los suelos y clima de la zona, deben ser introducidas en la base de datos de uso de suelo y tipos de suelo en SWAT, sin embargo los datos preliminares de esta investigación sirven como línea base para el desarrollo de futuros trabajos con el modelo SWAT en la región.

Por otra parte, Behrends *et al.* 2011, determinaron que uno de los factores determinantes en la precisión predictiva de modelo SWAT es la cercanía de las estaciones meteorológicas al límite de la microcuenca, así como la calidad de datos que estas estaciones brinden. En la microcuenca Peñas Blancas, no existen estaciones meteorológicas, por lo que se tomaron dos (2) de las estaciones más cercanas a la microcuenca, probablemente el uso de estos datos afectaron de manera negativa el desempeño final del modelo.

De igual forma, la microcuenca Peñas blancas presenta pendientes muy pronunciadas mayores al 50%, estudios realizados por Rivera, *et al.* 2012 señalan que el modelo SWAT tiende a subestimar el factor topográfico, sobretodo en pendientes mayores a 25%, ya que realiza una mala estimación de la longitud de la pendiente, asignando valores constantes de 0.05 metros. La subestimación que realiza el modelo está relacionada directamente al bajo desarrollo orográfico de la región donde fue desarrollado, por lo que no presenta una buena adaptación en zonas que presentan topografías quebradas. Esta posiblemente puede ser otra razón por la cual el modelo arroja valores bajos en las pruebas estadísticas en cuanto a la producción de caudales.

Balance Hídrico.

Con respecto a los valores anuales promedios producidos por SWAT, relacionados con el balance hídrico, los cuales se consideran apropiados a las condiciones climáticas, hidrológicas y de uso de la cuenca, válidas para el periodo 2008 – 2012. Se observa que del total de lluvia precipitada sobre la microcuenca, el 51.25% vuelve a la atmosfera vía

evapotranspiración (ET) y 47.95% sale en forma de escorrentía por los causes tipo superficial y en forma sub superficial y subterránea; 0.8% pasa a formar parte de la recarga a los acuíferos profundos y sale del sistema.

El número de curva (CN) ponderado para la microcuenca estudiada fue de 58.4, que indica un funcionamiento esperado para tipos de suelo con grupo hidrológico A y B, como para coberturas boscosas y condiciones óptimas. (Chow *et al*, 1994).

El CN para las áreas boscosas oscila entre 66 y 55, siendo 55 el que más se ajusta a las condiciones simuladas por SWAT, si se promedian los CN de cultivos, pastizales, bosques para el grupo hidrológico B, se tiene un CN de 62.3, comparado con el número de curva simulado de 58.4, indica que el comportamiento hidrológico de la microcuenca se ajusta a parámetros de CN establecidos en la literatura.

Calibración y Validación

Los parámetros que tuvieron mayor sensibilidad en el modelo hidrológico según el análisis de sensibilidad obtenido por SWAT CUP fueron: conductividad hidráulica (SOL_K), capacidad de agua disponible (SOL_AWC) y factor de compensación de la evaporación del suelo (ESCO).

Ajuste de parámetros de suelos conductividad hidráulica (SOL_K) en páramo y subparamo

La infiltración en los páramos es generalmente alta debido a la presencia de suelos típicamente porosos relacionados con altos valores de conductividad hidráulica. La retención de agua es especialmente significativa, dado que en los primeros 30 cm de profundidad el agua ocupa el 61.7% del volumen total del suelo (CAR, 1988).

Los valores de conductividad hidráulica descritos por el Instituto Agustín Codazzi en su estudio de suelos del 2004 contienen valores que subestiman el potencial de permeabilidad que poseen los suelos de la microcuenca estudiada, razón por la cual se hicieron ajustes de los parámetros de conductividad priorizando aquellos que se obtuvieron en campo y analizados en los laboratorios especializados de la Universidad de Nariño, estos se describen en la tabla No.8.

Tabla 8. Conductividad Hidráulica ajustada para los tipos de suelo presentes en la microcuenca Peñas Blancas

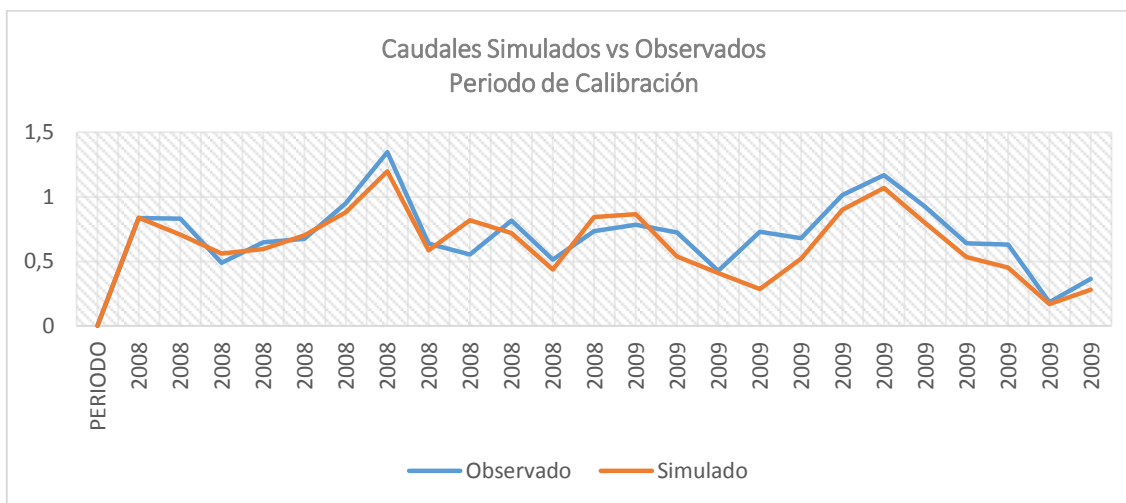
Fuente: Este Estudio (2013)

Clasificación tipo de Suelos	Conductividad Hidráulica Campo						
	SOL_K1	SOL_K2	SOL_K3	SOL_K4	SOL_K5	SOL_K6	SOL_K7
MLAg	112.88	150.68	98.68	0	0	0	0

MLEd	112.18	112.75	112.58	145.99	0	0	0
MLAc	112.08	104.55	50.19	31.89	0	0	0
MHAd	127.18	79.73	99.06	147.54	0	0	0
MHEg	97.38	69.79	80.48	60.01	0	0	0
MEEg	147.58	91.65	62.93	0	0	0	0
MHDay	101.38	101.35	113.88	113.7	125.62	119.44	124.18

Al ajustar los valores de conductividad hidráulica el modelo respondió de manera satisfactoria, ajustándose a los estadísticos descritos en la tabla 7, en cuanto a la salida de caudales, los cuales estaban subestimando los datos del estudio de suelos del instituto Agustín Codazzi. Con los datos ajustados a las pruebas hechas en laboratorio de muestras tomadas en campo, no se subestiman caudales y la producción de agua es acorde a lo esperado por una microcuenca de este tamaño y de estas características.

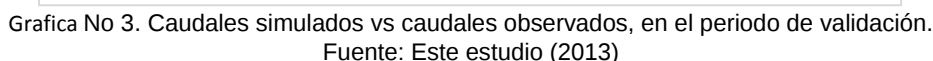
Tras el proceso de calibración, la gráfica de caudales modelados, se ajustó a los caudales observados; por lo tanto, los picos observados en la gráfica No 1 para finales del año 2009, desaparecen.



Grafica No 2: Caudales Simulados vs Observados, en periodo de calibración
Fuente: Este estudio (2013)

Las pequeñas subestimaciones pueden ser consecuencia de la alta porosidad y las altas conductividades hidráulicas presentes en los suelos de la microcuenca, lo que favorece que SWAT interprete la existencia de una mayor infiltración de agua hacia el subsuelo y que esta no sea redirigida a los caudales principales.

Como se observa en la Grafica No 2 y No 3 de caudales simulados vs caudales observados, en los periodos de calibración y validación, los 2 caudales modelados y observados, poseen una tendencia similar, explicando el correcto proceso de calibración y un comportamiento acorde a la realidad. Según el criterio propuesto por Moriasi et al, 2007 en la tabla No 7, el modelo tuvo una respuesta exitosa en la microcuenca Peñas blancas.



Escenario de Uso de Suelo Propuesto para la Microcuenca Peñas Blancas

Tabla No. 9: Cambios de Cobertura microcuenca Peñas Blancas, años 1989 y 2013
Fuente: Este estudio, 2013

24

Total	1935.0	758.05	100	1935.0	100	685.75
--------------	---------------	---------------	------------	---------------	------------	---------------

SW_END: Contenido de agua del suelo (mm H₂O). Cantidad de agua en el perfil del suelo al final del período de tiempo (producción de agua).

El estudio actual muestra un promedio de caudales diarios para un año de 0.62 mm. Aplicando el escenario propuesto a partir de la imagen Landsat de 1989, el incremento del caudal diario para un año fue del 12 % (0.0744mm) debido al incremento de área de cobertura de 10% en paramos, 0.6% subparamo y una notable disminución del 10.5% en los cultivos, estos cambios hacen que el escenario de uso de suelo propuesto pueda ajustarse a una estrategia de conservación que incrementara la producción del recurso hídrico, contribuyendo a mantener el balance hídrico de la microcuenca, minimizándose el impacto de los periodos de sequía y manteniendo una oferta continua de caudales.

Alternativas de Uso de Suelo en la Microcuenca Peñas Blancas

Como lo indica Guapucal, (2008), la situación de la microcuenca en el tema de conservación es preocupante debido a que 385.9 hectáreas de la microcuenca esta desprovista de cobertura vegetal, lo que afecta seriamente la producción de recurso hídrico en la zona. De igual forma, la tendencia de la ampliación de la frontera agrícola es una amenaza latente en la microcuenca. Es por esto que se deben plantear alternativas de uso del suelo que disminuyan el impacto de las actividades agrícolas en la generación del recurso hídrico superficial en la microcuenca Peñas Blancas.

Se propone como alternativa para la conservación del recurso hídrico en la microcuenca, el incremento de la cobertura boscosa, la inclusión de sistemas agroforestales dentro de los sistemas productivos y el cambio de la cobertura de pasturas por sistemas en los que se incluya el componente leñoso.

Se debe tener en cuenta que los usos de suelo encontrados en la microcuenca como Bosques, Paramo y subparamo, no deben ser alterados, ya que es de estas zonas donde existe la mayor recarga hídrica de la microcuenca, sin embargo se propone realizar acciones de regeneración asistida para mitigar los impactos antrópicos que han recibido estas zonas, también es necesario proteger los causes hídricos dejando un espacio mínimo de 10 metros, entre el cauce y los lotes de producción agropecuaria, debido a que estas actividades causan impactos negativos en la cantidad y calidad de agua.

CONCLUSIONES

SWAT modeló satisfactoriamente el recurso hídrico de la microcuenca Peñas blancas, obteniendo una correlación entre datos simulados y aforados en la estación piedras $R^2=0.74$, una magnitud de varianza residual respecto a los datos medidos Nash-Sutcliffe-NSE =0.65 y una tendencia de los datos resultantes a ser menores que los observados Percent bias-PBIAS= -9.13%, indicando un buen desempeño del proceso de modelación.

El comportamiento hidrológico de la microcuenca Peñas Blancas, es coherente respecto a su estructura física y características hidroclimáticas de la zona de estudio, obteniéndose un CN de 58.4

La función reguladora hídrica del páramo se ve reflejada en la modelación del escenario de uso del suelo, donde los caudales se incrementaron en 12% al hacer un incremento de 10.4% del área Paramo en la microcuenca Peñas Blancas.

Se propone como alternativa de conservación del recurso hídrico, el incremento de la cobertura boscosa y la inclusión del componente arbóreo dentro de los cultivos.

BIBLIOGRAFIA

BEHRENDTS KRAEMER, F et al. 2011. Aplicación del modelo hidrológico -SWAT- en una microcuenca agrícola de La Pampa ondulada en: http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672011000100008&lng=es&nrm=iso 7p.; Consulta: Octubre 2013

BRANDIZI, L y LABRAGA, J. 2012. Calibración Del Modelo Hidrológico SWAT En La Cuenca Del Río Salado, Provincia De Buenos Aires. XI Congreso Argentino de Meteorología. Mendoza, Argentina.

CHAVEZ, E. 2005. Administración de Materiales. Editorial UNED, San José. Costa Rica. 170p

CHOW, V. T., MAIDMENT, D. R. y MAYS, L. W. 1988. Applied Hydrology. Editorial Mc Graw-Hill; Estados Unidos de América.

CORAL, A. Problemas Ambientales en el Municipio de Ipiales. En Revista Nariño. 2007. <http://www.ipitimes.com/problemasambientalesb.htm>. Citado: Junio de 2013

CORPONARIÑO. 2004. Actualización plan de ordenamiento cuenca alta del río Pasto. p. 36, 43

CORPONARIÑO. 2005. Formulación plan de ordenamiento y manejo ambiental de la cuenca Guachucal, municipio de Pasto. p. 16.

DIAZ-GRANADOS ORTIZ, M A.; NAVARRETE GONZALEZ, J. Y SUAREZ LOPEZ, T. 2005. Páramos: Hidrosistemas Sensibles en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-49932005000200008&lng=en&nrm=iso. 9p. Citado: Octubre de 2013

GAITAN, F. 1996 .Cálculo de la Tasa por el uso del agua. En: Revista Planeación y Desarrollo. Vol. XXVII No. 2. 32p. Bogotá.

GUAPUCAL, M. 2008. Planificación ambiental desde un enfoque de la ecología del paisaje, en la microcuenca peñas blancas, municipio de Tangua, departamento de Nariño. Tesis de Maestría en Planificación y manejo ambiental de cuencas hidrográficas. Universidad del Tolima. Facultad de Ingeniería Forestal. Ibagué. p 141.

HOLDRIGE, L. 1977. Ecología basada en zonas de vida. San José, Costa Rica, IICA. 216 p.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). 2004. Estudio General de suelos y zonificación de tierras del Departamento de Nariño. IGAC. Bogotá. Colombia 600p

IÑIGUEZ, V. 2003. Balance hídrico de microcuencas de páramo. Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería, Cuenca. 204p

LEGARDA, L. GARCIA, R y RUIZ, H. 2002. Técnicas de aplicación del riego agrícola. Universidad de Nariño. Pasto, Colombia. 140p

MANCERA, E. PEÑA, E. GIRALDO, R y SANTOS, A. 2003. Introducción a la modelación ecológica: Principios y aplicaciones. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 109 p.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. 2007. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations, Transactions of the ASABE, 50 (3), 885–900 p.

PUSINERI, G; PEDRAZA, R y LOZECO, C. 2005. Uso de modelos digitales de elevación y de sistemas de información geográfica en la modelación hidrológica. Universidad Nacional del Litoral. Santa fe, Argentina. Disponible en línea en: <http://hum.unne.edu.ar/revistas/geoweb/Geo4/archivos/pusineri.pdf>

TORRES-BENITES, E; FERNANDEZ-REYNOSO, D; OROPEZA-MOTA, J; MEJOA-SAENZ, E. 2004. Calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca “El Tejocote”, Atlacomulco, Estado de México. TERRA Latinoamericana, Vol. 22, Núm. 4 .Universidad Autónoma Chapingo. México

OÑATE, F y AGUILAR, N. 2003. Aplicación del modelo SWAT para la estimación de caudales y sedimentos en la cuenca alta del río Catamayo. 11 p. Tercer Congreso Latinoamericano del manejo de cuencas hidrográficas, Arequipa, Perú.

RIVERA-TORAL, F; PEREZ-NIETO, S; IBANEZ-CASTILLO, L; y HERNANDEZ-SAUCEDO, F. 2012. Aplicabilidad del modelo SWAT para la estimación de la erosión hídrica en las cuencas de México. Agrociencia. vol.46, n.2, pp. 101-105.

ROJAS, R. 2009. Hidrología aplicada al manejo de cuencas. Universidad de los Andes. Facultad de ciencias forestales y ambientales. Bogota, Colombia. p 23.

UHLAND, R. 1949. Physical properties of soils as modified by crops and management. Soil Science Society of America Proceedings, 14: 361-366.