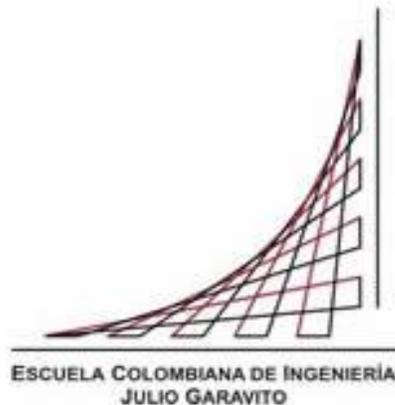


Análisis Multitemporal del Cambio en la Cobertura y Usos del Suelo para Evaluar el Impacto de la Minería y su Influencia en la Producción de Sedimentos por Medio de la Herramienta ArcSwat en la Cuenca del Río San Juan.

LIGIA MONGUA LUCERO



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA "JULIO GARAVITO"
INGENIERÍA CIVIL, RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIO
AMBIENTE, PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN
BOGOTÁ
2017

Análisis Multitemporal del Cambio en la Cobertura y Usos del Suelo para Evaluar el Impacto de la Minería y su Influencia en la Producción de Sedimentos por Medio de la Herramienta ArcSwat en la Cuenca del Río San Juan.

TRABAJO DE GRADO

DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO
INGENIERO. M.Sc. Ph.D GERMÁN SANTOS GRANADOS



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA "JULIO GARAVITO"
INGENIERÍA CIVIL, RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIO
AMBIENTE, PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN
BOGOTÁ
2017

Nota de Aceptación:

Firma del Director de Trabajo de Grado
Ingeniero: German Santos Granados

Dedicatoria:

A Dios, quien me regala los dones de la sabiduría y el entendimiento, por darme la fortaleza de culminar este trabajo de investigación. Y a aquellas otras personas que lo hicieron posible.

A mis padres David y Julia por darme el apoyo y consejo incondicional de familia, mamá gracias por tus inquebrantables esfuerzos, por mantenernos en el camino de la educación.

A Wilfredo gracias por tu paciencia, amor y comprensión. Y recordarme que este esfuerzo es por la nueva vida que está por venir. Tú has sido pilar y apoyo para culminación de la misma una pequeña muestra de cuanto te quiero, Gracias.

Al ingeniero German Ricardo Santos Granados director de mi trabajo de grado por brindarme esta oportunidad, y tiempo por sus valiosos aportes, dedicación, confianza depositada en mí.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|-----------|
| 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 9 |
| 2. OBJETIVO GENERAL | 10 |
| 2.1. OBJETIVOS ESPECIFICOS | 10 |
| 3. REFERENCIA TEÓRICA | 11 |
| 3.1. Descripción de la Cuenca del Río San Juan | 11 |
| 3.1.1. Explotación Minera (Aurífera) de la Cuenca Alta y Media del Río San Juan y sus Efectos en el Recurso Hídrico. | 13 |
| 4. BASE TEORICA PARA LA MODELACION EN ARCSWAT | 16 |
| 5. METODOLOGIA | 25 |
| 5.1. Ingreso de Datos | 25 |
| 5.1.1. Levantamiento del Modelo Digital de Elevaciones (DEM), (Topografía.) | 26 |
| 5.1.2. Área de Estudio y Afluentes Afectados por la Minería | 27 |
| 5.2. Caracterización de la Información pluviométrica y de temperatura, (Datos Diarios) del Área de Estudio | 29 |
| 5.2.1. Selección de las Estaciones del Área de Estudio | 29 |
| 5.2.2. Tratamiento de los Datos | 29 |
| 5.2.3. Diligenciamiento de datos faltantes | 29 |
| 5.2.4. Completitud | 30 |
| 5.2.5. Consistencia de los datos de lluvia de las Cinco Estaciones del Área de Estudio | 31 |
| 5.2.6. Análisis de doble masas | 31 |
| 5.2.7. Precipitación Media Anual y Precipitación Media Mensual Multianual PCPMM (mon) | 34 |
| 5.2.8. Probabilidad de un día Húmedo o Seco PR_W (mon) | 37 |
| 5.2.9. Temperatura Máxima y Mínimas del Área de Estudio. | 38 |
| 5.2.10. Radiación Solar Promedio Diaria Por Mes SOLARAV (mon) | 40 |
| 5.2.11. Promedio de Velocidad de Viento en el Mes WNDV (mon) | 41 |
| 5.2.12. Adaptación de Datos de Entrada para la Modelación en Swat en la Simulación Del Balance Hídrico. | 42 |
| 5.2.13. Variables Climáticas de Entrada para el Modelamiento. | 42 |
| 5.3. Determinación de la Información de Cobertura y Usos del Suelo del Área de estudio. | 43 |
| 5.3.1. Cambio Multitemporal de Coberturas y Usos del Suelo. | 43 |
| 5.3.2. Identificación de Coberturas y usos del suelo | 46 |
| 5.3.3. Territorios Artificiales | 47 |
| 5.3.4. Bosques y Áreas Seminaturales | 48 |

| | |
|--|-----------|
| 5.3.5. Adaptación de Datos de Entrada para la Modelación en Swat en Usos y Cobertura del suelo _____ | 50 |
| 5.4. Determinación de la Información de Suelos Requerida para el Modelo __ | 50 |
| 5.4.1. Análisis de Suelos Elaborados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC __ | 50 |
| 5.4.2. Adaptación de Datos de Tipos de Suelos en Swat en la Simulación del Balance Hídrico _____ | 61 |
| 5.4.3. Datos de Entrada de Suelos para el Modelo _____ | 61 |
| 6. RESULTADOS _____ | 63 |
| 6.1. Generación de Unidades de Respuesta Hidrológica HRU _____ | 63 |
| 7 ANÁLISIS DE RESULTADOS _____ | 65 |
| 7.1. Evaluación del caudal y la Precipitación para el año 2013. _____ | 65 |
| 7.1.1. Análisis Multitemporal de Sedimentación para los Años 2013-2005-1990. _____ | 67 |
| 7.1.2. Sedimentación por Coberturas para los Escenarios 2013-2005-1990 _____ | 68 |
| 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES _____ | 70 |
| 9. BIBLIOGRAFÍA _____ | 74 |
| 10. ANEXOS _____ | 76 |

LISTADO DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Explotación minería en el municipio de Condoto cuenca Alta del Río San Juan | 14 |
| Figura 2. Intervención minera con maquinaria. | 15 |
| Figura 3. Estrangulamiento de la sección del río por los sobrantes de explotación. | 15 |
| Figura 4. Fragmentación del bosque ocasionada por la adecuación de las áreas de explotación. | 16 |
| Figura 5. Desertificación y pérdida total de la cobertura vegetal dejando pozos de aguas con metales pesados | 16 |
| Figura 6. Ciclo hidrológico del Modelo SWAT. | 17 |
| Figura 7: Sección transversal de prueba de jet sumergido,..... | 23 |
| Figura 8. Metodología general de aplicación del modelo hidrológico ARC SWAT aplicada en la cuenca del río San Juan. | 26 |
| Figura 9. Construcción de las subcuencas del Río San Juan con sus respectivas áreas. | 27 |
| Figura 10. Área de estudio, y ríos afectados por la explotación minera. | 28 |
| Figura 11. Curva de doble masas | 32 |
| Figura 12 Curva de doble masas CDM | 33 |
| Figura 13. Precipitación promedio anual por estación..... | 35 |
| Figura 14. Promedio mensual multianual de 24 años para la modelación..... | 36 |
| Figura 15. Desviación estándar de la promedio mensual multianual..... | 36 |
| Figura 16. Coeficiente de correlación diaria al mes..... | 37 |
| Figura 17. Probabilidad de un día húmedo seguido de un día húmedo en el mes | 38 |
| Figura 18. Probabilidad de un día húmedo seguido de un día seco en el mes..... | 38 |
| Figura 19. Temperaturas máximas y mínimas anuales | 39 |
| Figura 20. Temperatura máxima mensual multianual | 39 |
| Figura 21. Temperatura mínima mensual multianual | 40 |
| Figura 22. Desviación estándar mensual multianual. | 40 |
| Figura 23. Radiación solar promedios diaria por mes. | 41 |
| Figura 24. Promedio velocidad del viento en el mes | 41 |
| Figura 25. Imagen satelital Landsat 7 y 8 áreas de extracción minera de color verdoso oscuro, RBD 562..... | 44 |
| Figura 26. Áreas de extracción minera cuenca del medio San Juan RBD 562..... | 45 |
| Figura 27. Cobertura y usos del suelo para el año 2013..... | 47 |
| Figura 28. Cobertura y uso del suelo para el año 2005..... | 48 |
| Figura 29. Coberturas y usos del suelo para el año 1990 | 49 |
| Figura 30. Serranías del Baudo con suelos formados a partir de areniscas..... | 53 |
| Figura 31. Acantilados con material de diabasas (serranías del Baudo) | 54 |
| Figura 32. Paisaje de Montaña con suelos derivados de cenizas volcánicas en Mediaciones de San José del Palmar | 55 |

| | |
|--|----|
| Figura 33. Paisaje de montaña de clima cálido húmedo con suelos derivados de rocas ígneas municipio de Acadi | 59 |
| Figura 34 Taxonomía de suelos cuenca del río San Juan..... | 63 |
| Figura 35. Subcuencas del río San Juan. | 64 |
| Figura 36. HRU (unidades de respuesta hidrológica)..... | 65 |
| Figura 37. Calculo de la Precipitación..... | 66 |
| Figura 38. Calculo del caudal..... | 67 |
| Figura 39. Sedimentación total | 68 |
| Figura 40. Sedimentación por coberturas para el año 2013..... | 69 |
| Figura 41. Sedimentación por coberturas para el año 2005..... | 69 |
| Figura 42. Sedimentación por coberturas para el año 1990..... | 70 |

LISTADO DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Subcuentas del río San Juan | 11 |
| Tabla 2. Afluentes afectados por la Minería. | 28 |
| Tabla 3. Datos a completar | 30 |
| Tabla 4. Construcción de la curva de doble masa..... | 32 |
| Tabla 5. Completitud de datos de la serie hidrológica..... | 33 |
| Tabla 6. Códigos de ingreso Swat | 42 |
| Tabla 7. Tabla de datos climáticos para el modelamiento..... | 43 |
| Tabla 8. Áreas de cobertura y usos del suelo | 45 |
| Tabla 9. Tabla de datos cobertura y uso para el modelamiento | 50 |
| Tabla 10. Tabla de datos de taxonomía de suelos para el modelamiento..... | 61 |
| Tabla 11. Tabla de datos de entrada de suelos para el modelamiento. | 63 |
| Tabla 12. Comparación de Precipitación | 66 |
| Tabla 13. Comparación de Caudal | 67 |
| Tabla 14. Cuadro de aporte de sedimentos y erosión actual (CIDIAT)..... | 71 |

INTRODUCCIÓN

A partir de la tesis de Maestría (Urrutia Rivas, 2016), se continuó con la aplicación de un modelo ambiental para la gestión integrada del recurso hídrico en la Cuenca del Río San Juan, situada en el departamento del Choco. Las actividades principales de la cuenca son el aprovechamiento maderero, la agricultura y la minería trayendo consigo grandes problemas de sedimentación en la cuenca.

La herramienta SWAT 2012 con interface ArcGIS 10.1, permitirá modelar la cuenca con el objetivo de conocer las zonas de mayor producción de sedimentos y el grado de aporte de los diferentes usos de suelo. El área de estudio, de 910.106,67 hectáreas, establecida para el presente trabajo de grado, incluye los municipios con mayor explotación minera, Istmina, Tado y Condoto los cuales interceptan las fuentes hídricas afectadas más exactamente en un área ha.

El análisis de temporalidad se realizará según el cambio de coberturas, las cuales se digitalizan a partir de imágenes satelitales del sensor LANDSAT, descargadas del Servicio Geológico de Estados Unidos para los años de 1990, 2005 y 2013, correlacionado la producción de sedimentos para esos años. Esto permitirá focalizar acciones y recursos para identificar zonas críticas de intervención que faciliten el desarrollo de estrategias y toma de decisiones integrales en el manejo de la cuenca y así evitar su degradación.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La tesis, *Aplicación Del Modelo Swat Para La Simulación Del Ciclo Hidrológico De La Cuenca Alta Del Río San Juan, Bajo La Influencia De La Actividad Minera* (Urrutia Rivas, 2016) y otros varios estudios evidencian que la eliminación de la vegetación es la principal causa de degradación del suelo y de la pérdida de su capacidad de tolerar la erosión. La erosión hídrica del suelo como consecuencia natural de las lluvias y potenciada, por malas prácticas y el inadecuado uso del suelo es uno de los principales factores que contribuyen a la desertificación de los recursos naturales, afectando en gran medida el capital natural que alberga esta cuenca.

Es importante conocer cuales actividades, la minera, agrícola, forestal o ganadera, son los que aportan más o que influyen en el proceso erosivo en esta parte de la cuenca y donde están ubicados espacialmente. (Cortes, et al. 2009).¹

2. OBJETIVO GENERAL

Emplear el modelo de simulación hídrica ArcSWAT en la cuenca alta y media del río San Juan para analizar los efectos de los cambios de cobertura y usos del suelo, y así evaluar el impacto de la minería y su influencia en la producción de sedimentos.

2.1. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Identificar los efectos del cambio de la cobertura y usos del suelo para evaluar la producción de sedimentos, en el área de estudio de la cuenca.
- Identificar las diferentes coberturas y usos del suelo a través de la digitalización de las mismas según la metodología Corine Land Cover.
- Procesar estadística y gráficamente los diferentes datos históricos pluviométricos y de temperatura, para el modelamiento Hidrológico de la cuenca.
- Establecer y analizar los escenarios pasados y actuales, de la situación de la cuenca en términos de cobertura y uso del suelo para su posterior correlación en los elementos del clima y su influencia en la degradación hídrica del área de estudio
- Analizar las consecuencias de la producción de sedimentos, según los escenarios establecidos, y su afectación a causa de la explotación minera y de otros usos del suelo. Por medio de la herramienta Arcswat.

¹ (Cortes, et al.) Comparación de erosión hídrica en plantaciones forestales y bosque nativo, en suelos graníticos. 2009 N.º 337, p. 18-23.

3. REFERENCIA TEÓRICA

3.1. Descripción de la Cuenca del Río San Juan

La cuenca del río San Juan tiene un área aproximadamente de 1'585.816,38 ha y el cauce principal una longitud de 15.800 Km², en cuyo recorrido recibe más de 130 afluentes, y es uno de los más caudalosos del área de la macrocuenca del pacífico, nace en zona alta del municipio de Mistrató en el departamento de Risaralda en el cerro de Caramanta, en la cordillera occidental de los andes colombianos. Sus aguas corren en la dirección sur occidente atravesando el departamento del Chocó y desembocando en el Pacífico en el municipio del litoral del San Juan a través de un delta de unos 300 km² denominado «Siete Bocas», y que está situado a unos 60 km al noroeste del puerto de Buenaventura, e incluye numerosas islas rodeadas de manglares. A continuación, en la Tabla 1, se muestran las subcuencas que conforman la cuenca del río San Juan con su correspondiente área en hectáreas, así como los departamentos y municipios involucrados en esta cuenca. Una vista panorámica de uno de los municipios rivereños se puede observar en la Figura 1.

Tabla 1. Subcuencas del Río San Juan

| SUBCUENCA | DEPARTAMENTO | MUNICIPIO | AREA SUB (HA) | % |
|--------------|-----------------|---------------------------|---------------|------|
| Río Calima | Choco | El Litoral del San Juan | 147918.77 | 9.43 |
| | Valle del Cauca | Buenaventura | | |
| | Valle del Cauca | Calima (El Darien) | | |
| | Valle del Cauca | Restrepo | | |
| | Valle del Cauca | Río Frío | | |
| | Valle del Cauca | Vijes | | |
| | Valle del Cauca | Yotoco | | |
| Río Condoto | Choco | Condoto | 63285.51 | 3.79 |
| | Choco | Istmina | | |
| | Choco | Medio San Juan (Andagoya) | | |
| | Choco | Río Iro (Santa Rita) | | |
| Río Copoma | Choco | El litoral del San Juan | 100352.05 | 5.73 |
| | Valle del Cauca | Calima (El Darien) | | |
| | Valle del Cauca | Río Frío | | |
| | Valle del Cauca | Trujillo | | |
| Río Cucurupí | Chocó | El litoral del San Juan | 88190.66 | 5.62 |
| | Chocó | Istmina | | |
| Río Docordo | Choco | Istmina | 338443.78 | 1.83 |
| | Choco | Medio San Juan (Andagoya) | | |
| Río Fugiado | Choco | Istmina | 58861.53 | 2.85 |

| SUBCUENCA | DEPARTAMENTO | MUNICIPIO | AREA SUB (HA) | % |
|--------------|-----------------|---------------------------|---------------|-------|
| | Choco | Medio San Juan (Andagoya) | | |
| Río San Juan | Antioquia | Andes | 116269.16 | 25.45 |
| | Antioquia | Jardín | | |
| | Chocó | Bagado | | |
| | Chocó | Cértegui | | |
| | Chocó | El litoral del San Juan | | |
| | Chocó | Istmina | | |
| | Chocó | Medio San Juan (Andagoya) | | |
| | Chocó | Río Iro (Santa Rita) | | |
| | Chocó | San José del palmar | | |
| | Chocó | Tado | | |
| | Chocó | Unión Panamericana | | |
| | Risaralda | Apia | | |
| | Risaralda | Mistrato | | |
| | Risaralda | Pueblo Rico | | |
| | Valle del Cauca | Buenaventura | | |
| Río Munguido | Valle del Cauca | Buenaventura | 92956.47 | 7 |
| | Valle del Cauca | Calima (El Darien) | | |
| | Choco | El litoral del San Juan | | |
| Río Sipi | Choco | El litoral del San Juan | 395475.55 | 24.68 |
| | Choco | Calima (El Darien) | | |
| | Choco | El litoral del San Juan | | |
| | Choco | Medio San Juan (Andagoya) | | |
| | Choco | Nóvita | | |
| | Choco | San José del Plamar | | |
| | Choco | Sipi | | |
| | Valle del Cauca | Ansermanuevo | | |
| | Valle del Cauca | Argelia | | |
| | Valle del Cauca | Bolívar | | |
| | Valle del Cauca | El Águila | | |
| | Valle del Cauca | El Cairo | | |
| | Valle del Cauca | El Dovia | | |
| | Valle del Cauca | La unión | | |
| | Valle del Cauca | Roldanillo | | |
| | Valle del Cauca | Toro | | |
| | Valle del Cauca | Trujillo | | |
| | Valle del Cauca | Versalles | | |
| Río Tamaná | Chocó | Condoto | 205629.24 | 13.62 |
| | Chocó | Istmina | | |
| | Chocó | Medio San Juan (Andagoya) | | |

| SUBCUENCA | DEPARTAMENTO | MUNICIPIO | AREA SUB (HA) | % |
|-----------|-----------------|---------------------|---------------|---|
| | Chocó | Novita | | |
| | Chocó | San José del Palmar | | |
| | Chocó | Tado | | |
| | Risaralda | Apía | | |
| | Risaralda | La Celia | | |
| | Valle del Cauca | Pueblo Rico | | |
| | Valle del Cauca | Santuario | | |
| | Valle del Cauca | Ansermanuevo | | |
| | Vale del cauca | El Aguila | | |
| | Vale del cauca | El Cairo | | |

Fuente: Plan Estratégico de la Macrocuenca del Pacífico, 2013.

3.1.1. Explotación Minera (Aurífera) de la Cuenca Alta y Media del Río San Juan y sus Efectos en el Recurso Hídrico.

Es necesario mencionar que los ríos más afectados son los ríos Tamaná, Río Sipi, Río San Juan, y Río Condoto de la cuenca Alta y Media, estos se interceptan con los municipios de mayor explotación minera, los cuales son Condoto, Istmina y Tadó y que están subrayados en azul en la Tabla 1. Para la práctica minera se requiere una gran cantidad de agua, tanto para la minería artesanal como la tecnificada y varía de acuerdo con la técnica utilizada. La minería artesanal se hace en pequeñas quebradas, o en partes secas, a donde se lleva agua desde pilas o pozos superficiales conformados para acumular agua mediante canalones a sitios donde se deposita la tierra de la mina para ser lavada y de la cual se extrae el oro. Para esta modalidad, no es fácil hacer el cálculo de demanda de agua. En efecto no existe cálculo alguno en los estudios revisados.

Figura 1. Explotación minería en el municipio de Condoto cuenca Alta del Río San Juan



Fuente: CGR, Julio de 2012.

La demanda de agua en minería tecnificada de dragas, draguetas o retroexcavadoras, ha sido calculada 4.500 m³/día por mina. Las minas están en actividad alrededor de 18 días al mes para un total de 81.000 m³/mes y 972.000 m³/año por mina. (IIAP 2010)².

² Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico - IIAP. Diagnóstico de la calidad del Aire y el agua en centros de mayor poblamiento humano de la región del Chocó Biogeográfico Colombiano. Quibdó – Chocó. 2010 N.º 487, p. 104.

Figura 2. Intervención minera con maquinaria.



Fuente: Contraloría General de la República
CGR, Julio de 2012.

Figura 3. Estrangulamiento de la sección del río por los sobrantes de explotación.



Fuente: CGR, Julio de 2012.

En la minería ilegal se realiza un inadecuado manejo, disposición y almacenamiento tanto de insumos (combustibles y lubricantes) utilizados en la operación y mantenimiento de la maquinaria (Ver Figura 2 al 6), como de químicos (cianuro y mercurio) utilizados en el procesamiento del material, como de residuos líquidos generados por el asentamiento. Esto incrementa los niveles de Demanda Bioquímica de Oxígeno - DBO y Demanda Química de Oxígeno - DQO, disminuyendo así el oxígeno disuelto. Se tiene por tanto, un cuadro complejo de contaminación de aguas superficiales que afecta la existencia de vida orgánica y restringe la posibilidad de aprovechamiento para otras actividades antrópicas, como las de potabilización para el consumo humano, cuyos costos se ven incrementados, con lo que se afecta y al restringe el derecho fundamental al agua potable de las personas ubicadas alrededor de estos ríos.

Figura 4. Fragmentación del bosque ocasionada por la adecuación de las áreas de explotación.



Fuente: CGR. Julio de 2012.

Figura 5. Desertificación y pérdida total de la cobertura vegetal dejando pozos de aguas con metales pesados



Fuente: CGR. Julio de 2012

Los datos que se tienen no son muy alentadores como lo demuestran los emanados del “Estudio de impacto ambiental en zonas mineras del Departamento del Chocó” adelantado por CODECHOCO en el año de 1998: La devastación de cobertura vegetal alcanza las 1.200 ha/año; las minas una carga de 4.400 toneladas de sedimentos y 285 toneladas de Demanda Química de Oxígeno (DQO), que equivalen a los vertimientos de 5.000.000 de habitantes. Los niveles de mercurio observados en los peces de algunos ríos superan en más de 100 veces los niveles máximos permitidos para el consumo humano.

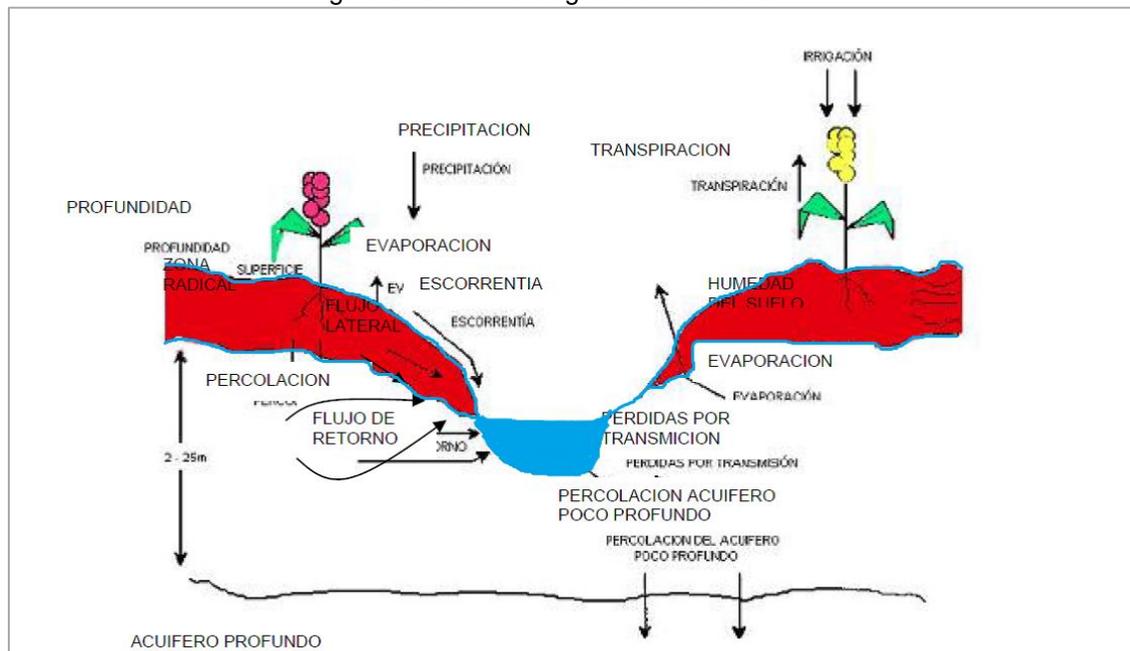
4. BASE TEORICA PARA LA MODELACION EN ARCSWAT

En la actualidad, las herramientas existentes permiten conocer de manera más detallada los procesos hidrológicos en la naturaleza. Procesos físicos considerados en el ciclo hidrológico de una cuenca, pueden ser visualizados y analizados a través de modelos matemáticos que los representan adecuadamente. El trabajar con un modelo para simulación hidrológica y la posibilidad de reproducir todos los componentes del ciclo hidrológico con la ayuda de los sistemas de información geográfica, permite a los investigadores crear escenarios tanto para condiciones presentes y futuras, determinando cómo afectará el cambio de una u otra variable en la producción de caudales y sedimentos en determinada cuenca.

De entre los modelos hidrológicos de simulación que existen, se escogió el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool)³, de obtención gratuita y disponible en internet: <http://www.brc.tamus.edu/swat/index.html>. **SWAT** es una herramienta desarrollada por el Dr. Jeff Arnold en el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos con la Universidad de Texas. Uno de sus propósitos es el predecir el impacto que originan las prácticas del manejo del suelo en el recurso agua y en la generación de sedimentos en una cuenca hidrográfica.

El modelo SWAT, divide al espacio geográfico de estudio seleccionado en pequeñas subcuencas, de manera que los cálculos que se realicen se obtengan con la mayor exactitud posible. Este modelo trabaja con el cruce de 2 coberturas temáticas: Cobertura y uso del suelo y el tipo de suelo dando como resultado las denominadas UNIDADES DE RESPUESTA HIDROLÓGICA-HRU. El comportamiento del agua en el suelo depende de estos dos factores.

Figura 6. Ciclo hidrológico del Modelo SWAT.



Fuente: SWAT User's manual, 2005.

³ Traducción "Herramienta de Evaluación para el Suelo y Agua"

El modelo SWAT tiene sus bases en los conceptos del **Balance Hídrico** que permite determinar la entrada, salida y almacenamiento de agua en una cuenca hidrográfica. El movimiento del agua en la cuenca se ilustra en la Figura 7; a través de la precipitación el agua entra en la cuenca, la cual al llegar al suelo forma los flujos de infiltración y escorrentía. La escorrentía es el agua que fluye más rápido hasta los drenajes de la cuenca, mientras que la infiltración es la vía por la cual se recargan los acuíferos, aunque también existen flujos subterráneos que son más lentos y descargan en los canales.

Balance hídrico.

El modelo se fundamenta en el concepto del balance de agua, el cual considera el agua que entra, que se almacena y sale de la cuenca como lo describe la siguiente ecuación, tomada del manual SWAT 2005.

$$SW_t = SW + \sum (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i)$$

Donde:

SW_t es el contenido de agua en el suelo en el día *t*

SW es el agua aprovechable por las plantas o el contenido de agua en el suelo menos el contenido de agua a 15-bar

t: es el tiempo en días

R es la precipitación diaria

Q la cantidad de escorrentía diaria

ET la evapotranspiración diaria

P la percolación diaria

QR el flujo de retorno o flujo base

Escorrentía o escurrimiento superficial: El escurrimiento superficial o escorrentía es la porción de la lluvia que fluye sobre el suelo en zonas de ladera o de pendiente. La escorrentía se origina de dos formas: por las lluvias de baja intensidad y larga duración que saturan el suelo y en consecuencia, el agua al no poder penetrar en el suelo (infiltrarse) fluye por la superficie pendiente abajo por el camino de menor resistencia; o por las lluvias

de alta intensidad que sobrepasan la capacidad de infiltración del suelo y por ende se desliza superficialmente el agua de exceso (McCarthy, G. T. 1938)⁴. Estos flujos superficiales transportan hasta los canales de drenaje, naturales o no, los sedimentos que han sido desprendidos por el impacto directo de las gotas de lluvia sobre el suelo y los que este flujo puede desprender de la capa superficial del suelo.

Infiltración: El agua que penetra en el suelo o infiltración puede tomar varios caminos: incrementar la humedad del suelo en la zona radical, moverse subsuperficialmente como flujo lateral hacia los canales de drenaje, recargar acuíferos poco profundos, donde ésta agua también llegará hasta los canales de drenaje (flujos de retorno) y recargar acuíferos profundos. En todo caso es importante recordar que el agua se mantiene en un continuo ciclo y aunque el agua se encuentre en acuíferos profundos, esta puede hacer parte nuevamente de la precipitación.

Flujo lateral: El flujo lateral es el agua que se mueve por debajo de la superficie del suelo y sobre el nivel de los acuíferos, la cual fluye subsuperficialmente y alimenta las canales de drenaje, quebradas y ríos. El flujo subsuperficial lateral es calculado simultáneamente con la percolación para el perfil del suelo entre (0-2m) mediante un modelo de almacenamiento cinético, que usa la ecuación de conservación de la masa con el perfil entero del suelo como el volumen de control.

Percolación: El agua de percolación es la fracción del agua infiltrada que logra atravesar la zona radical, la cual SWAT considera entre 0 y 2m. Esta agua de percolación puede llegar hasta los canales de drenaje (flujo de retorno) o percolarse hasta los acuíferos profundos a más de 25m. El componente percolación del **SWAT** usa una técnica de almacenamiento combinado para predecir el flujo medio de cada capa de suelo. Una vez el agua es percolada al acuífero profundo, ésta no puede alimentar el escurrimiento.

Flujo de retorno: Es el agua que llega hasta el cauce de los canales naturales desde las aguas subterráneas, este flujo es el que mantiene agua en los ríos y quebradas en las épocas de baja precipitación.

⁴ (McCarthy, G. T.) The unit hydrograph and flood routing. Conference of the North Atlantic Division U. S. Army Corp of Engineers. 1938 N.º 232, p. 227

Evapotranspiración: La evapotranspiración es el agua que sale del suelo hacia la atmósfera por transpiración de las plantas y por evaporación del agua del suelo. El modelo **SWAT** ofrece tres métodos para estimación de la Evapotranspiración potencial Penman-Monteith (Monteith, 1965), Hargreaves and Sammani (1985) y Priestley –Taylor (1972).

Variables climáticas: Las variables climáticas para el **SWAT** son precipitación, temperatura del aire, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. Si la precipitación y la temperatura diaria están disponibles, pueden entonces ser ingresadas directamente al modelo. Si no, el generador de variables climáticas puede simular la temperatura y la precipitación diaria. Un juego de variables climáticas puede ser simulado para la cuenca entera o cada una de las subcuenca y/o unidades de Respuesta hidrológica.

Sedimentación: Los sólidos perdidos o sedimentos es el suelo que se pierde por acción de la erosión hídrica, el suelo es desprendido por el golpe directo de las gotas de agua lluvia y por la fricción del agua de escorrentía. El suelo desprendido es transportado por los flujos superficiales hasta los canales de drenaje, por los cuales es sacado de la cuenca o depositados en el cauce de estos canales.

Ecuaciones para el cálculo de la sedimentación (Ruteo del sedimento):

Para estimar la producción de caudales y sedimentos fruto del impacto de las prácticas de manejo de aguas y suelos se realiza un análisis de cada una de las microcuencas que forman parte de nuestra área de estudio. De esta manera, se considera a cada microcuenca (HRU) con sus diferentes tipos de suelos, cobertura vegetal y usos de la tierra, así como las condiciones de manejo a lo largo del tiempo.

El transporte del sedimento en la red del canal es una función de dos procesos: La deposición y la degradación, las cuales operan simultáneamente en el alcance. Por defecto, Swat computa la deposición y degradación utilizando las mismas dimensiones del canal para la simulación entera. Alternativamente Swat, puede simular la reducción y ensanchado del canal y actualizar las dimensiones del mismo durante la simulación.

Asignación de ruta del sedimento: Swat utiliza las ecuaciones de Arnold (1995), Williams y Bagnold (1977); desarrollando un método para determinar *la degradación como una función de la inclinación y la velocidad del canal*. En esta versión, las ecuaciones han sido simplificadas y la cantidad máxima de sedimento que puede ser transportada en un segmento es función de la velocidad máxima del canal. La velocidad máxima del canal $V_{ch,pk}$, se calcula de la siguiente forma:

$$V_{ch,pk} = q_{ch,pk}/A_{ch}$$

Donde $q_{ch,pk}$ es la proporción de flujo máximo (m^3/s) A_{ch} es el área de superficie transversal de flujo en el canal (m^2). La proporción de flujo máximo se define como:

$$Q_{ch,pk} = prf * q_{ch}$$

Dónde: prf es el factor de ajuste de proporción máximo, y el q_{ch} es la proporción del factor de flujo (m^3/s) y A_{ch} , el área de superficie transversal. La cantidad máxima de sedimento que puede transportarse de un segmento de alcance se calcula de la siguiente manera:

$$Conc_{sed, ch, mx} = C_{sp} * V_{ch,pk}^{spexp}$$

Donde $Conc_{sed, ch, mx}$ es la concentración máxima de sedimento que puede ser transportada por el agua (Ton/m^3 o Kg/L), C_{sp} es un coeficiente definido por el usuario $V_{ch,pk}$ es la velocidad máxima del canal (m/s), y $spexp$ es un exponente que varía entre 1.0 y 2.0. Para la modelación, se fijó en 1.5, siguiendo la recomendación de la ecuación original de Bagnold (1977) y Arnold (1995). La concentración máxima de sedimento calculada con esta ecuación se compara con la concentración de sedimento en el tramo inicial $conc_{sed, ch, i}$. Si $conc_{sed, ch, i} > Conc_{sed, ch, mx}$, la deposición es el proceso dominante en el tramo y la cantidad neta de sedimento depositada se calcula:

$$Sed_{dep} = (conc_{sed, ch, i} - Conc_{sed, ch, mx}) * V_{CH}$$

Donde, Sed_{dep} es la cantidad de sedimento depositada en el tramo (Toneladas métricas), $conc_{sed, ch, i}$ es la concentración del sedimento inicial en el tramo (Kg/L o Ton/m^3), $Conc$

$Sed_{ch,mx}$ es la concentración máxima de sedimento que puede ser transportada por agua (Kg/L o Ton /m³) y V_{ch} es el volumen de agua en el tramo (m³ H₂O).

Si $Conc_{sed,ch,i} < Conc_{sed,ch,mx}$ la degradación es el proceso dominante en el tramo de y la cantidad neta de sedimento retenido se calcula:

$$Sed_{deg} = (Conc_{sed,ch,mx} - conc_{sed,ch,i}) * V_{ch} * K_{ch} * C_{CH}$$

Donde Sed_{deg} es la cantidad de sedimento degradado en el tramo (Toneladas métricas), $Conc_{sed,ch,mx}$ es la concentración máxima de sedimento que puede ser transportada por el agua (Kg/L o Ton/m³), $conc_{sed,ch,i}$ es la concentración inicial del sedimento en el tramo (Kg/L o Ton /m³) V_{ch} es el volumen de agua en el tramo (m³H₂O) K_{CH} es el factor de erosión del canal (cm/hr/Pa) y C_{CH} es el factor de erosión del canal (Cm(hr/Pa), y C_{ch} es el factor de cubierta del canal.

Una vez que la cantidad de deposición y degradación ha sido calculada, la cantidad final de sedimento en el alcance es determinada:

$$Sed_{ch} = Sed_{CH,i} - Sed_{dep} + Sed_{deg}$$

Donde el Sed_{deg} es la cantidad de sedimento suspendido en el tramo (Toneladas métricas) $Sed_{CH,i}$ es inicialmente la cantidad de sedimento suspendido en el tramo al inicio del procedimiento (toneladas métricas) Sed_{dep} es la cantidad de sedimento depositada en el tramo (Toneladas métricas), Y Sed_{deg} es la cantidad de sedimento degradado en el tramo (Toneladas métricas).

La cantidad de sedimento trasportado fuera del tramo se calcula:

$$Sed_{out} = Sed_{ch} = V_{out}/V_{ch}$$

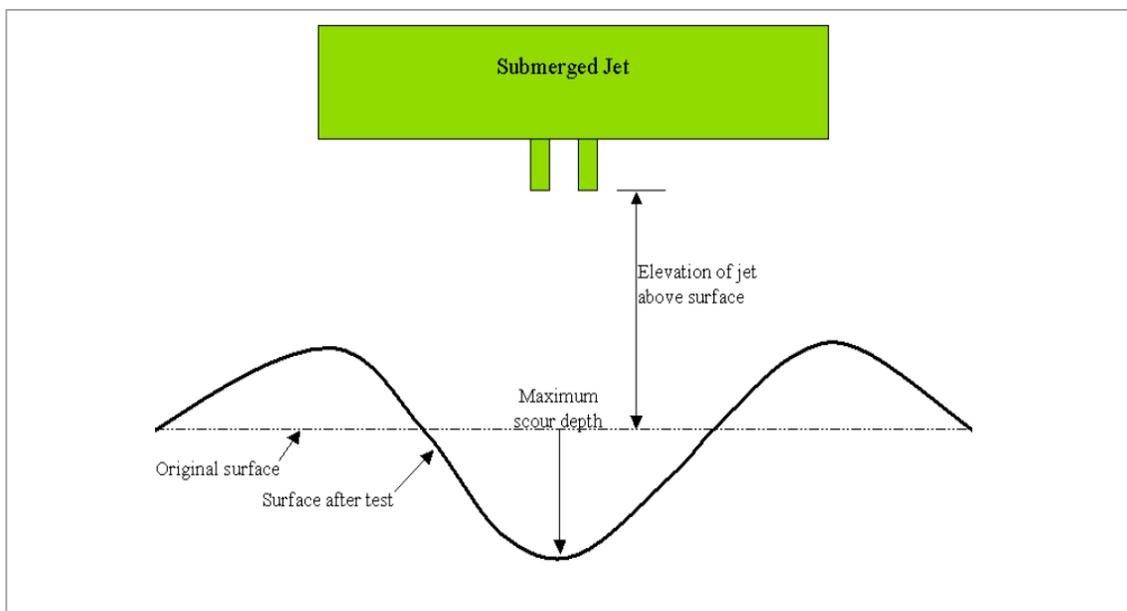
Donde Sed_{out} es la cantidad de sedimento trasportado fuera del tramo (toneladas métricas) Sed_{ch} es la cantidad de sedimento suspendido en el tramo (Toneladas métricas) V_{out} es el volumen de salida durante el transcurso del procedimiento (m³ (H₂O) y V_{ch} es el volumen de agua en el tramo (m³H₂O).

Factor de erosión del canal: El factor de erosión del canal es conceptualmente similar al factor de erosión de USLE. La erosión gira en función de las propiedades y materiales de estabilidad y control de inundación. La erosión de un canal puede ser medida con un dispositivo de reacción vertical sumergido. La premisa básica de esta prueba es que la erosión de un canal al descubierto y el daño local del dispositivo de reacción son el resultado de tensiones hidráulicas, límites geométricos y las propiedades del material corroyéndose. Hanson (1990) desarrollo un método para determinar el coeficiente de erosión de canales IN SITU con el dispositivo vertical sumergido. Allen (1999) utilizó este método para determinar los factores de erosión de canales para treinta sitios en Texas.

Un dispositivo sumergido verticalmente en agua direccionando perpendicularmente al canal causa erosión en los materiales adjuntos al área de impacto del dispositivo de reacción. Como lo representa la figura 8.

Las variables importantes en el proceso de corrosión son: El volumen del material removido durante el proceso de elevación del dispositivo de reacción sobre la superficie, el diámetro de la boquilla del dispositivo de reacción velocidad del dispositivo, tiempo, la densidad de masa del líquido y el coeficiente de erosión.

Figura 7: Sección transversal de prueba de jet sumergido,



Fuentes: After Allen, 1999. SWAT User's manual, 2005.

Hanson (1991) definió un índice de dispositivos de reacción **Ji**, para relacionar la erosión creada por el dispositivo sumergido. El Índice del dispositivo de reacción es una función de la profundidad de la recolocación del dispositivo por unidad de tiempo y velocidad. El índice del dispositivo de reacción es determinado utilizando el proceso perfilado en ASTM standart D5852-95.

Una vez el índice del dispositivo es determinado, el coeficiente de erosión del canal es calculado:

$$K_{ch} = 0.03 * \exp (385 * J_i)$$

Donde **Kch** es el coeficiente de erosión del canal (el cm/h/Pa) y **Ji** es el índice del dispositivo de reacción. En general los valores para la erosión de los canales son un orden de magnitud menor a los valores de erosión del suelo.

Factor de la cubierta del canal: El factor de cubierta del canal **Cch** se define como la proporción de degradación de un canal con una cubierta vegetativa con respecto a la degradación correspondiente de un canal sin cubierta vegetativa. La Vegetación afecta la degradación reduciendo la velocidad del canal y por consiguiente su poder erosivo, cerca de la superficie.

Reducción y ensanchamiento del canal: Tradicionalmente los cálculos de transporte de sedimento se efectúan con las mismas dimensiones del canal durante la simulación. Sin embargo el modelo SWAT permite reducir o ensanchar el canal durante el periodo de simulación.

SWAT permite la variación de las tres dimensiones del canal en simulaciones con reducción y ensanchando: la profundidad del canal **depth_{bnkfull}**, la anchura del canal **W_{bnkfull}**, y la pendiente **slp_{ch}**. Las dimensiones del canal se actualizan utilizando las siguientes ecuaciones cuando el volumen de agua en el tramo excede $1.4 * 10^6 m^3$.

La cantidad de reducción se calcula como: (Allen, 1999).

$$Depth = 358.6 \text{ depth} * slp_{ch} * K_{ch}$$

Donde $depth_{dcut}$ es la reducción (m) $depth$ es la profundidad de agua en el canal (m) SIP_{ch} es la pendiente del cauce (m/m), Y K_{ch} es el coeficiente de erosión del canal (cm/h/Pa).
La nueva profundidad se calcula:

$$Depth_{bnkfull} = depth_{bnkfull,i} + depth_{dcut}$$

Donde $Depth_{bnkfull}$ es la nueva profundidad (m) $depth$ es la profundidad (m) $depth_{bnkfull,i}$ es la profundidad anterior y $depth_{dcut}$ es la reducción (m).

La nueva anchura del canal se calcula:

$$W_{bnkfull} = ratio_{wd} * depth_{bnkfull}$$

Donde $W_{bnkfull}$ es la nueva anchura del canal (m) $ratio_{wd}$ es la anchura del canal a la proporción de profundidad y $depth_{bnkfull}$ es la nueva profundidad (m)

La nueva pendiente del canal es calculada:

$$slp_{ch} = SIP_{ch,i} - depth_{dcut} / 1000 * Lch$$

Donde slp_{ch} es la nueva pendiente del canal (m/m) $slp_{ch,i}$ es la pendiente anterior del canal (m/m), $depth_{bnkfull}$ es la nueva profundidad (m), y Lch es la longitud del canal (km).

5. METODOLOGIA

5.1. Ingreso de Datos

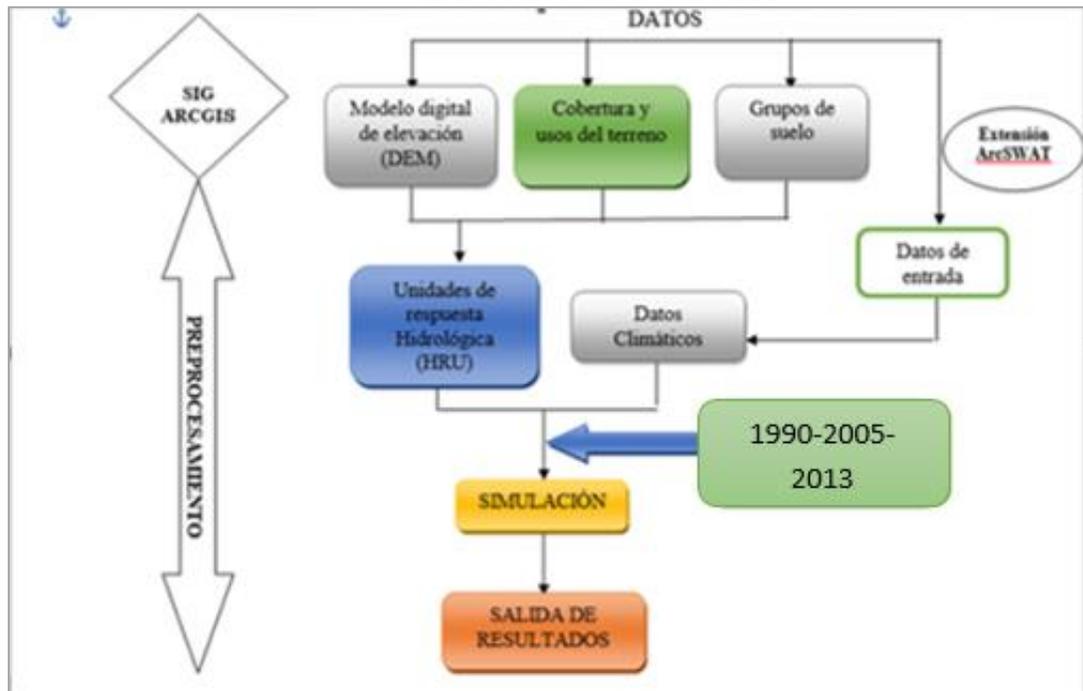
El presente estudio tiene como objetivo identificar las características de la cuenca y los diferentes comportamientos que se puedan presentar por los cambios en la cobertura vegetal y su producción de sedimentos. A continuación se observa detalladamente una síntesis metodológica requerida para la modelación en Swat. Ver Figura 8.

La información necesaria para la Modelación se caracteriza a continuación:

- Topografía (curvas de nivel, ríos, entre otros).

- Información Pluviométrica y Temperatura máxima y Mínima.(Datos Diarios).
- Análisis de Suelos elaborado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC.
- Uso del suelo y cobertura vegetal.

Figura 8. Metodología general de aplicación del modelo hidrológico ARC SWAT aplicada en la cuenca del río San Juan.

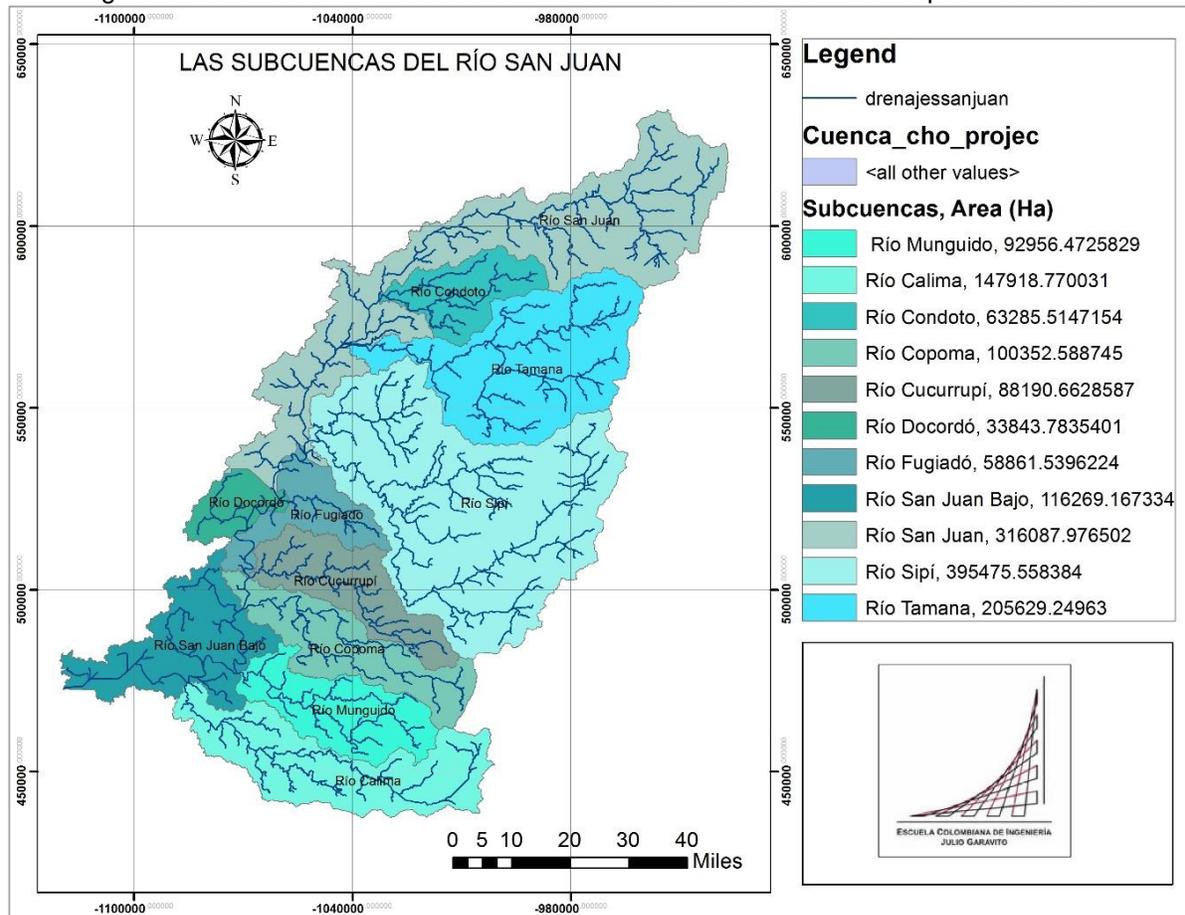


Fuente: Autor.

5.1.1. Levantamiento del Modelo Digital de Elevaciones (DEM), (Topografía.)

A partir de las coordenadas geográficas máximas y mínimas del área de estudio se genera el DEM (Modelo Digital De Elevaciones), con un tamaño de celda de 30 m, a partir de curvas de nivel del mapa vectorial de topografía digital. Por medio de esta herramienta 3d Analyst se generan los contornos de las cotas altitudinales y se construye la cuenca del Río San Juan considerando al área de mayor de explotación minera. Como se mencionó, tiene una área aproximada de 910.106,67 Ha e incluye los ríos Tamana, Sipi, San Juan y Condoto. Como. Se puede observar en la Figura 9 y Figura 10.

Figura 9. Construcción de las subcuencas del Río San Juan con sus respectivas áreas.



Fuente: Tesis de maestría, Urrutia Rivas 2016.

5.1.2. Área de Estudio y Afluentes Afectados por la Minería

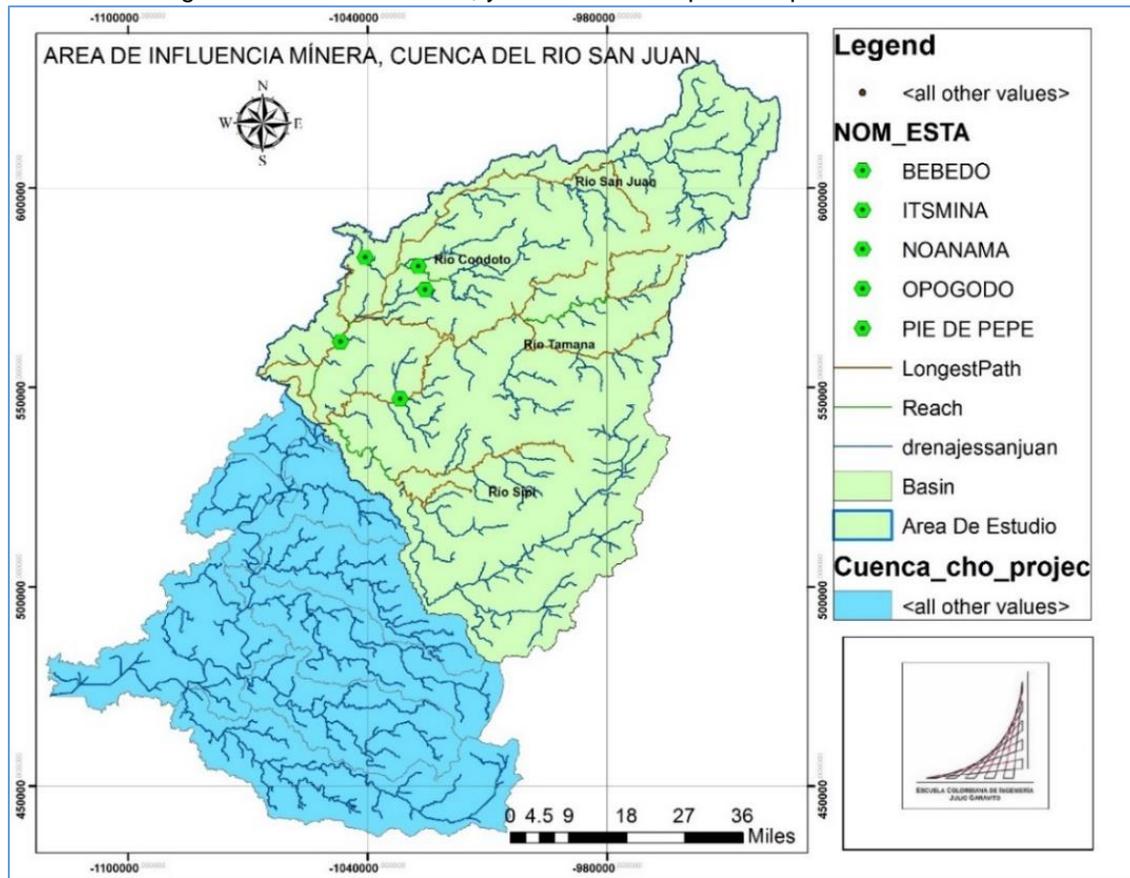
La Tabla 2 muestra los principales afluentes, quebradas y ríos, afectados por la minería. Por estar en áreas de sedimentos terciarios y cuaternarios dan lugar a varios tipos de morfología, llanuras muy planas cubiertas por materiales cuaternarios de origen volcánico clástico y zonas cenagosas, en sectores con substrato aluvial arcilloso y muy reciente, donde se encuentran minerales como el oro, compuestas más que todo por gravas polimícticas y rocas piroclásticas”.

Tabla 2. Afluentes afectados por la minería.

| RIOS | AFLUENTES | | AFLUENTES | | AFLUENTES |
|---------------|-------------|----------------|-----------|------------------------------|-----------|
| SIPI | Garrapatas | CONDOTO | Iró | SAN JUAN ALTO Y MEDIO | Tamana |
| | Ordo | | Apotó | | Condoto |
| | Cajón | | Andrápera | | Sipí |
| | Taparl | | Opogodó | | |
| | Negro | | La Honda | | |
| TAMANA | Opogodó, | | Pacurundó | | |
| | Aguas Clara | | Curubú | | |
| | Sesego | | El Rancho | | |
| | Bebedó | | Aguacate | | |
| | Igará, | | Oró | | |
| | Urábará | | Viricha | | |
| | | | Cuacuco, | | |
| | | | Mungu | | |
| | | | Guineíto | | |

Fuente: Autor

Figura 10. Área de estudio, y ríos afectados por la explotación minera.



Fuente: Tesis de maestría, Urrutia Rivas 2016.

5.2. Caracterización de la Información pluviométrica y de Temperatura, (Datos Diarios) del Área de Estudio

Para el modelamiento se requirieron datos precipitación diaria, así como temperatura máxima y mínima de 5 estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca y que se muestran en la Figura 10 a partir de 1974 hasta el 2014. Se realizó un tratamiento estadístico de consistencia y completitud de los datos, ya que Swat requiere series completas para correr la Modelación.

5.2.1. Selección de las Estaciones del Área de Estudio

Inicialmente se consideró toda la información existente en el IDEAM generando una base de datos para revisar el tipo de estación y su localización espacial dentro el área de estudio, para así generar una mejor comprensión del régimen de lluvias.

5.2.2. Tratamiento de los Datos

Se seleccionaron todos los valores totales diarios de precipitación de las estaciones anteriormente descritas, con datos desde 1974 hasta 2014 y se organizaron mediante una *macro ordenadora y una tabla dinámica, por día, por mes y por año para su posterior llenado de datos faltantes.*

5.2.3. Diligenciamiento de datos faltantes

Para el diligenciamiento de datos faltantes se relacionan las estaciones y el porcentaje de datos faltantes año a año del registro diario de precipitación. En rojo se marcaron aquellos años en los cuales hubo carencia menor e igual el 35% de los datos y por lo tanto se realizó el llenado de datos faltantes. En azul se marcaron aquellos que faltaban más del 35% los cuales se excluyeron del análisis. El proceso empleó la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de Datos faltantes} = (\text{N}^\circ \text{ de días sin datos}) / (\text{sobre número de días del año}) * 100$$

En la Tabla 3 se muestra un ejemplo de la aplicación de la fórmula.

Tabla 3. Datos a completar

| | |
|------|------|
| 100% | 1% |
| 100% | 1% |
| 100% | 100% |
| 92% | 100% |
| 2% | 100% |
| 0% | 81% |
| 9% | 100% |
| 5% | 100% |
| 29% | 33% |
| 0% | 0% |
| 0% | 0% |
| 2% | 0% |
| 0% | 0% |
| 1% | 0% |
| 0% | 0% |
| 0% | 0% |
| 0% | 0% |
| 0% | 8% |
| 0% | 8% |

5.2.4. Completitud

Para realizar la completitud de datos, se seleccionaron el total de las 5 estaciones de la cuenca del río San Juan. Algunas estaciones tenían datos desde 1967 hasta 2014. Después de realizar el cálculo de los porcentajes de faltantes se produjo una serie continua de 41 años comprendido entre los periodos 1974 hasta 2014. Para la completitud de la serie se empleó el método de la Proporción Normal (Joseph L.H. Paulhus y Max Adam Kohler 1952)⁵ en el cual se relaciona la precipitación diaria con la precipitación media anual multianual. Para la recuperación del registro de la estación de interés, la formula se describe a continuación.

$$P_x = \frac{N_x}{n} \left[\frac{P_A}{N_A} + \frac{P_B}{N_B} + \dots + \frac{P_N}{N_N} \right]$$

Donde:

P_x : Registro de precipitación diaria carente de la estación x.

N_x : Precipitación media anual multianual de estación x.

⁵ Joseph L.H. Paulhus y Max Adam Kohler 1952, citado por Hidrología en la Ingeniería, German Monsalve 2014. 382pg, 82p.

n : Número de estaciones pluviométricas con datos de registros cercanas a la estación x .

$P_{A\ aN}$: Precipitación diaria correspondiente a la misma fecha de la estación x .

$N_{A\ aN}$: Precipitación media anual multianual de la estación considerada.

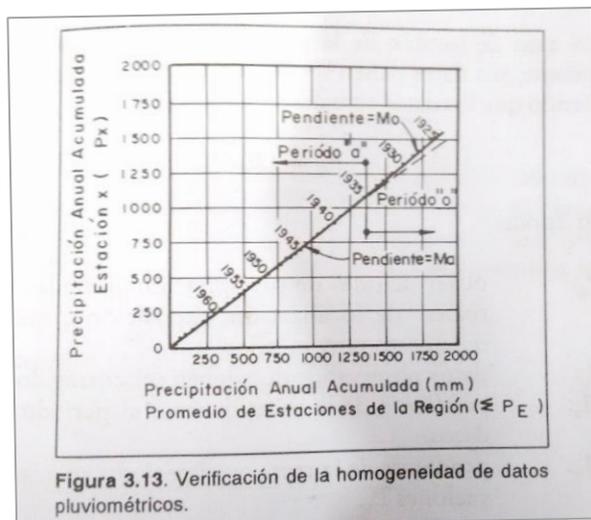
5.2.5. Consistencia de los datos de lluvia de las Cinco Estaciones del Área de Estudio

El análisis de la consistencia de los datos de una serie pluviométrica de una estación, permite estudiar y corregir los efectos de un cambio de exposición o ubicación del pluviómetro, los cambios en las técnicas de observación e incluso algunos errores instrumentales o de lectura, errores sistemáticos, aleatorios e incongruentes que puedan dañar dicha serie. El detectar estos cambios o errores en una serie resulta muy importante, ya que en la solución de problemas hidrológicos interesa *asegurarse que estos datos sean los más confiables*.

5.2.6. Análisis de doble masas

Es un método utilizado para verificar la *homogeneidad* de los datos en donde se quiere comprobar con esto si hay alguna anomalía en cada una de las estaciones pluviométricas durante algún periodo; como se puede observar en la siguiente figura, se relaciona la precipitación total anual acumulada de la estación X contra la precipitación acumulada de todas las estaciones de la región. Para dibujar la curva de doble masas se construyó una tabla como se muestra en la Tabla 4.

Figura 11. Curva de doble masas



Fuente: Hidrología en la Ingeniería, de German Monsalve, 2014.

Y mediante la siguiente formula se calculó la curva de doble masas:

$$Pe_i = (1/n \sum_{j=1}^n p_j) i \text{ donde:}$$

Pe_i = promedio de las estaciones de la Región

n = Número de estaciones de la estación considerada homogénea

P_j : precipitación anual de cada estación

m = número total de años considerados

Tabla 4. Construcción de la curva de doble masa

| 1 (año) i | 2 P_{xi} (mm) | 3 Pe_i (mm) | 4 $\sum (pX)$ (mm) | 5 $\sum (pe)$ (mm) |
|-------------|-----------------|---------------|--|--|
| 1983 | PX_{1983} | Pe_{1983} | PX_{1983} | Pe_{1983} |
| 1984 | PX_{1984} | Pe_{1984} | $PX_{1983} + PX_{1984}$ | $Pe_{1983} + Pe_{1984}$ |
| 1985 | PX_{1985} | Pe_{1985} | $PX_{1983} + PX_{1984} + PX_{1985}$ | $Pe_{1983} + Pe_{1984} + Pe_{1985}$ |
| . | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . |
| m | | Pe_m | $PX_{1983} + PX_{1984} + \dots + PX_m$ | $Pe_{1983} + Pe_{1984} + \dots + Pe_m$ |

En el análisis de curva doble masas el coeficiente de correlación es 0.9964 y de determinación R^2 es de 0.9929. Para las cinco estaciones como se puede observar en la Figura 12 lo cual nos determina que para este parámetro estadístico en esta estación hay homogeneidad de los datos.

Figura 12 Curva de doble masas CDM

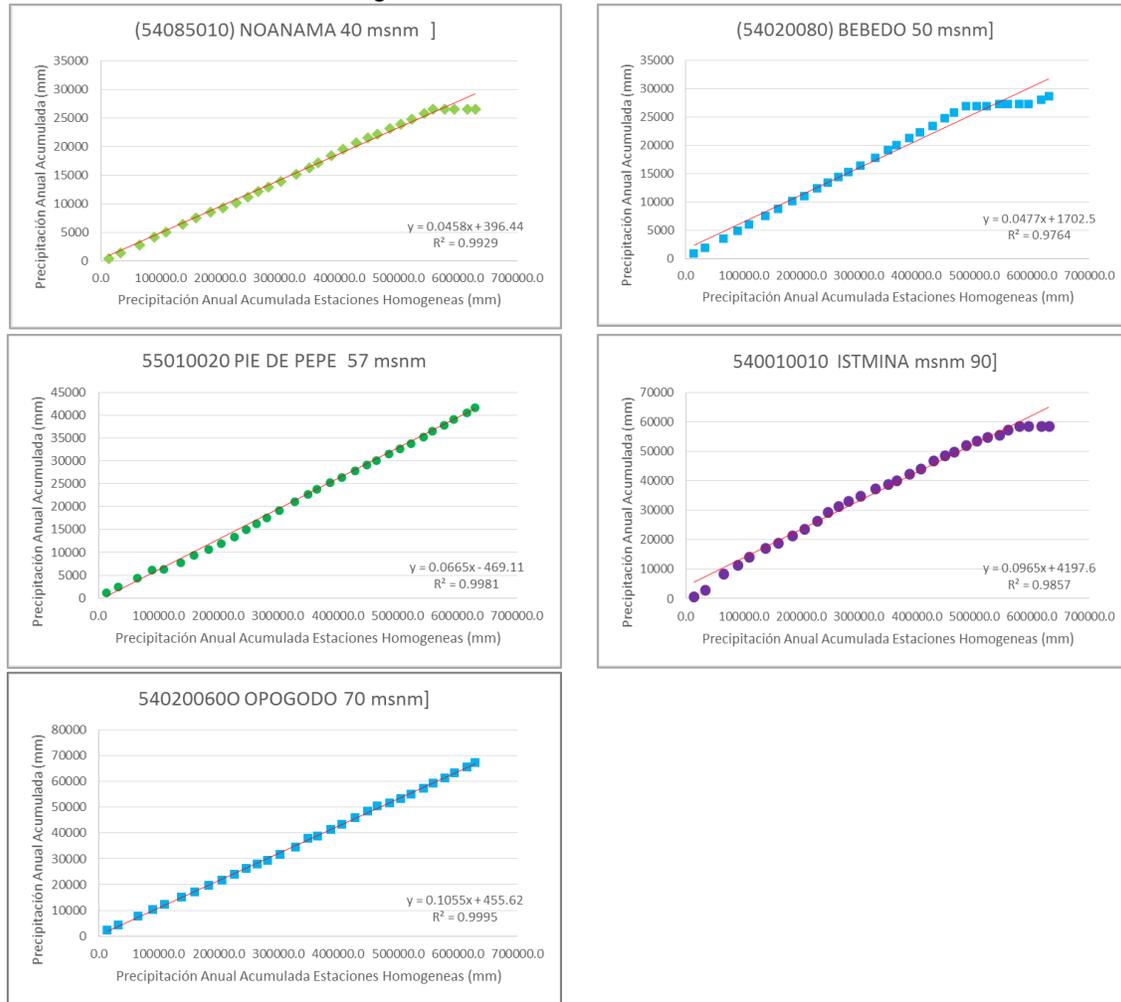


Tabla 5. Completitud de datos de la serie hidrológica

| AÑO | 54085010 NOANAMA 40 msnm | 54020080 BEBEDO 50 msnm | 55010020 PIE DE PEPE 57 msnm | 540200600 OPOGODO 70 msnm | 540010010 ISTMINA 90msnm |
|------|--------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 1974 | 6115.1 | 10560.83045 | 7387 | 7917 | 7988 |
| 1975 | 0 | 9263.890645 | 7830 | 7475 | 6905.711509 |
| 1976 | 5361.2 | 7249 | 6253 | 5231 | 6787 |
| 1977 | 6318.1 | 7065.5 | 6011 | 8406 | 7670 |
| 1978 | 6961.267873 | 0 | 6450 | 7987 | 7591 |
| 1979 | 5794.088526 | 7055.566597 | 6373 | 6532 | 9389 |
| 1980 | 12095.21715 | 7381.196971 | 6532 | 7882 | 6473.735682 |
| 1981 | 6123.9 | 7581 | 6625 | 7395 | 7477 |
| 1982 | 5183.339435 | 6470 | 5048 | 6867 | 4895 |
| 1983 | 4809.7 | 7463 | 5415 | 6273 | 3362.169207 |
| 1984 | 5894.8 | 7971 | 6755 | 9040.3 | 10169 |

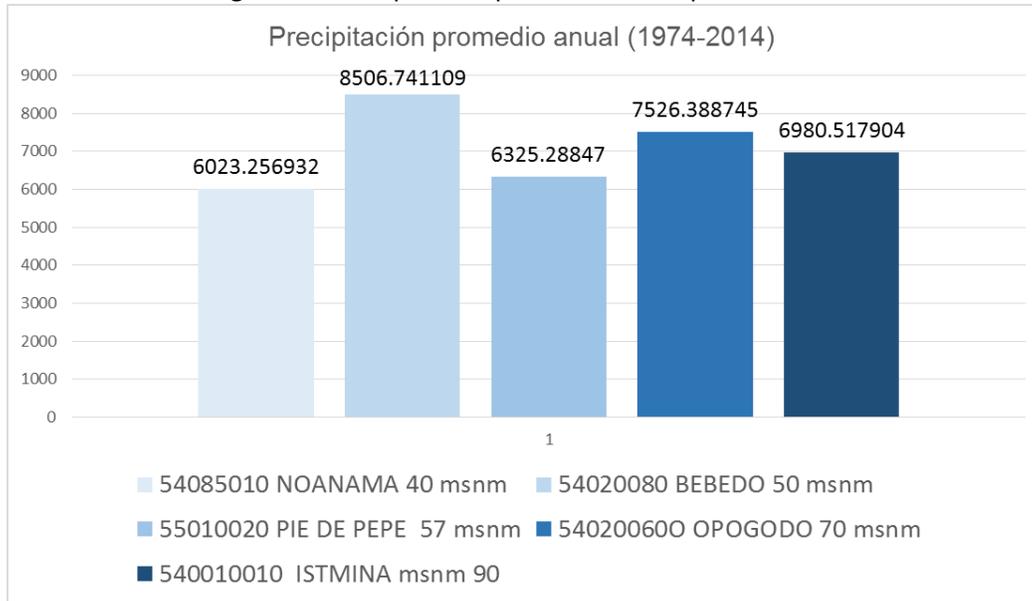
| AÑO | 54085010 NOANAMA 40 msnm | 54020080 BEBEDO 50 msnm | 55010020 PIE DE PEPE 57 msnm | 540200600 OPOGODO 70 msnm | 540010010 ISTMINA 90msnm |
|-----------------|--------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 1985 | 5484.8 | 6973 | 4792 | 5805 | 5934.160508 |
| 1986 | 6527 | 7434 | 6986.2 | 6631 | 1122 |
| 1987 | 6381.3 | 6973.070184 | 7874 | 7818 | 6781.478853 |
| 1988 | 6239 | 6737 | 6794 | 7360 | 7536 |
| 1989 | 6307.8 | 6764 | 6400.574895 | 6626 | 8101 |
| 1990 | 6847.4 | 6907.618899 | 0 | 3920 | 1982.6 |
| 1991 | 5236.5 | 5275.860998 | 7380.73797 | 6790.251606 | 7000 |
| 1992 | 2259.6 | 8156 | 8062 | 8187 | 7621 |
| 1993 | 6051.5 | 6689 | 7090 | 7563 | 7454 |
| 1994 | 6387.5 | 8143 | 8078 | 8580 | 7567 |
| 1995 | 6426.9 | 7074.1 | 3815 | 7615 | 6468.2 |
| 1996 | 6515.239871 | 8282 | 6091 | 8497.5 | 8365 |
| 1997 | 3977.1 | 6309 | 4733 | 6041 | 6513 |
| 1998 | 5813.6 | 8084 | 5861 | 10020 | 6501 |
| 1999 | 7479.3 | 9827 | 7500 | 14821 | 8465 |
| 2000 | 6584.2 | 10556 | 6789 | 11669 | 9271 |
| 2001 | 6812.7 | 9858.882699 | 7797 | 2650 | 1012 |
| 2002 | 6734.5 | 10544.6 | 3017 | 9424.901846 | 0 |
| 2003 | 1837 | 9179 | 6174 | 0 | 5805.633569 |
| 2004 | 6510.6 | 10723.21442 | 6224 | 0 | 9437 |
| 2005 | 6972.608674 | 10326 | 6967 | 8473.185099 | 7616 |
| 2006 | 7938.9 | 9177 | 6332 | 7615.8 | 8239 |
| 2007 | 6200.2 | 9439 | 5743.9 | 8821 | 7385.044735 |
| 2008 | 6073.722982 | 9290.053626 | 5649 | 16769.2 | 7186.9 |
| 2009 | 7376 | 15711 | 5886 | 8413.8 | 8062 |
| 2010 | 6545.973349 | 13242 | 8053.71141 | 9233 | 9888 |
| 2011 | 6620.976355 | 12339 | 7638 | 8061 | 9225.6 |
| 2012 | 5717.3 | 11658 | 7597 | 8757 | 11408 |
| 2013 | 6288.4 | 10590 | 7025 | 8054 | 7656 |
| 2014 | 6149.2 | 8453 | 6307.702984 | 3360 | 7890 |
| Promedio | 6023.256932 | 8506.741109 | 6325.28847 | 7526.388745 | 6980.517904 |

5.2.7. Precipitación Media Anual y Precipitación Media Mensual Multianual PCPMM (mon)

Finalmente se caracteriza la precipitación promedio anual del área de estudio de cada estación con una precipitación aproximada de 7.370.68 p (mm) de régimen bimodal. Influenciada por los desplazamientos de la zona de confluencia intertropical y los factores

climáticos de cada zona. La distribución Bimodal se caracteriza por la alteración de dos temporadas lluviosas y dos relativamente secas como se puede observar en la Figura 13.

Figura 13. Precipitación promedio anual por estación.



Es importante mencionar que para la modelación Swat se escogieron 24 años desde 1990 a 2014 se calculó la media mensual multianual de días con lluvias en donde la primera temporada de lluvias se inicia en el mes de abril y se prolonga hasta finales de Agosto. La segunda temporada lluviosa (la más intensa) abarca el periodo de septiembre a noviembre, con máximas intensidades en agosto, septiembre y octubre. Y la temporada menos lluviosa, tiene lugar en el lapso comprendido entre los meses de diciembre a marzo, como se puede corroborar en la Figura 14.

Precipitación promedio anual multianual

$$\frac{\sum \text{de los valores diarios de cada año}}{N^{\circ} \text{ de años}}$$

Precipitación promedio mensual multianual

$$\frac{\sum \text{por meses de cada año}}{N^{\circ} \text{ de años}}$$

Nota: La sumatoria de los promedios se obtuvieron a partir de la tabla dinámica de las estaciones del área de estudio.

Figura 14. Promedio mensual multianual de 24 años para la modelación.

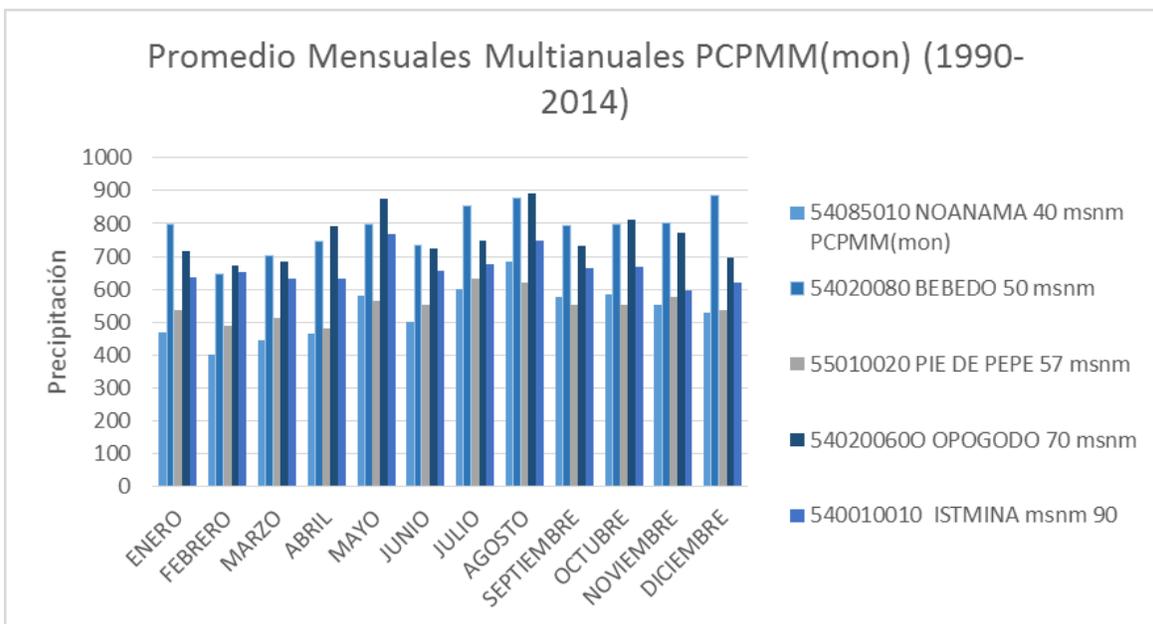
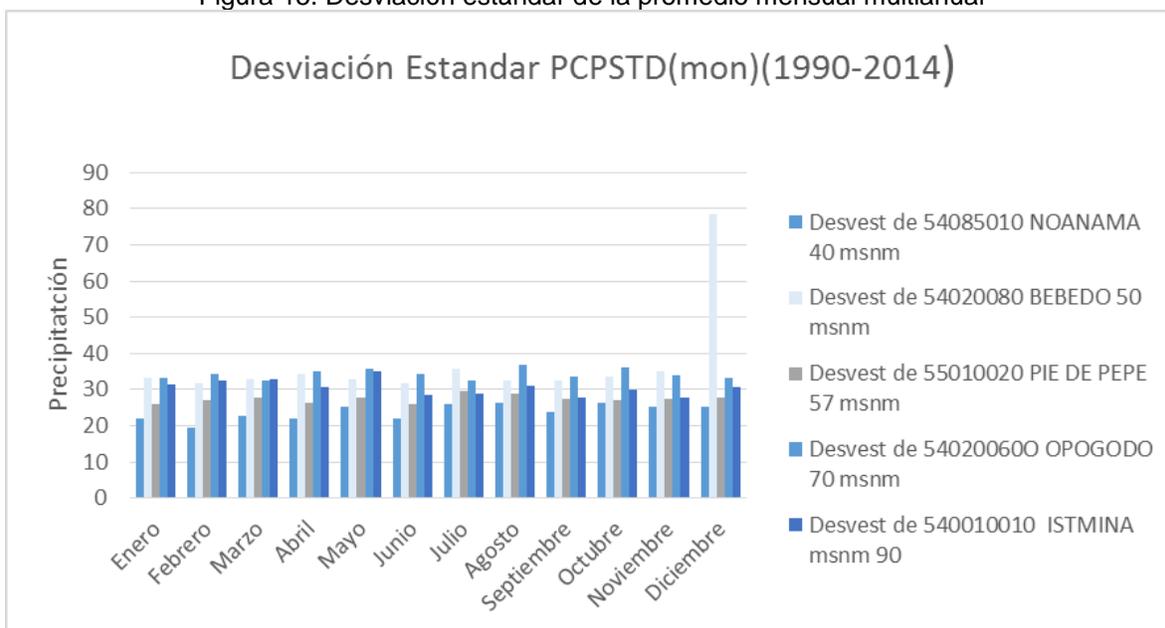
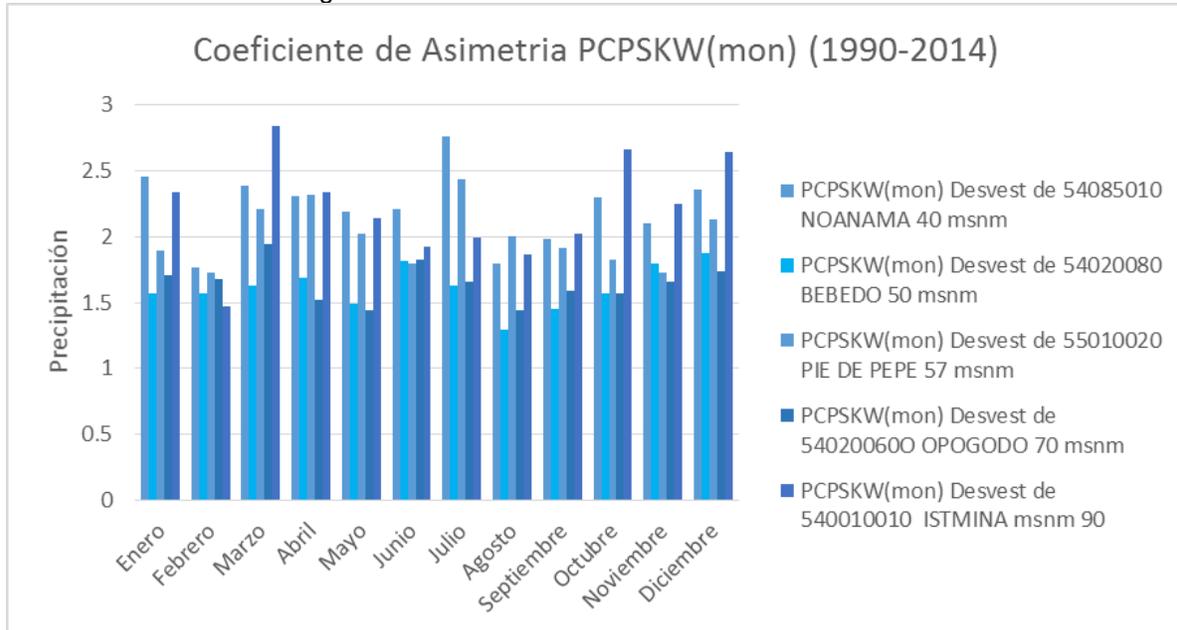


Figura 15. Desviación estándar de la promedio mensual multianual



La desviación estándar y el coeficiente de relación se calculan de los promedios mensuales multianuales por cada mes de las estaciones de estudio como se puede ver en la Figura 14 y Figura 15 para este parámetro de ingreso Swat lo define como PCPSTD (mon) y PCPSKW (mon).

Figura 16. Coeficiente de correlación diaria al mes



5.2.8. Probabilidad de un día Húmedo o Seco PR_W (mon)

La probabilidad de lluvia para un día cualquiera es condicionada del status de seco o húmedo del día previo. Se define un día Húmedo como un día con 0.1 mm de lluvia o más. Es la probabilidad de un día Húmedo en día i dado que un día Húmedo el día $i-1$ $P(W/W)$ y la probabilidad de un día Húmedo en día i dado un día seco en día $i-1$ $P(W/D)$ para cada mes del año. De estos Datos de entradas las probabilidades restantes de transición se pueden derivar:

$$P(D/W) = 1 - P_i(W/W)$$

$$P(D/D) = 1 - P_i(W/D)$$

Donde $P_i(D/W)$ es la probabilidad de un día seco i dado un día húmedo en día $i-1$ y $P(D/D)$ es la probabilidad de un día seco en día $i-1$.

Para definir un día húmedo o seco Swat genera un número al azar entre 0.0 y 1.0 este número al azar es comparado a la probabilidad apropiada seco-Húmedo $P(W/W)$ o $P(W/D)$. Si el número al azar es igual a o menor a la probabilidad Húmedo o seco el día se define como seco. Y de esta manera se calculó este parámetro requerido para el modelo Hidrológico. Ver figuras Figura 17 y Figura 18.

Figura 17. Probabilidad de un día húmedo seguido de un día húmedo en el mes

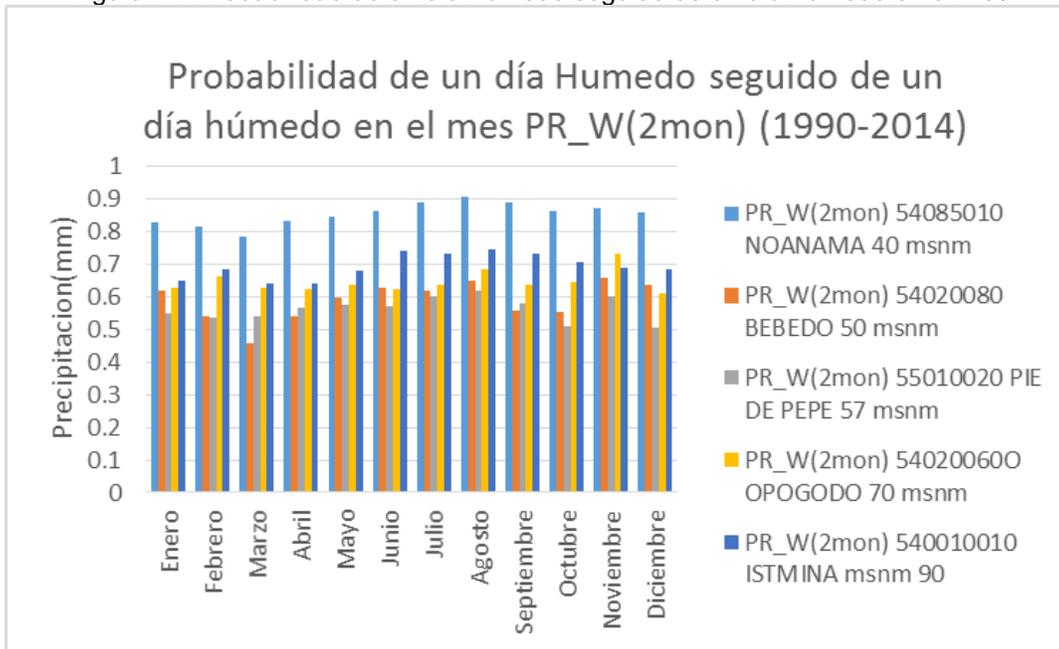
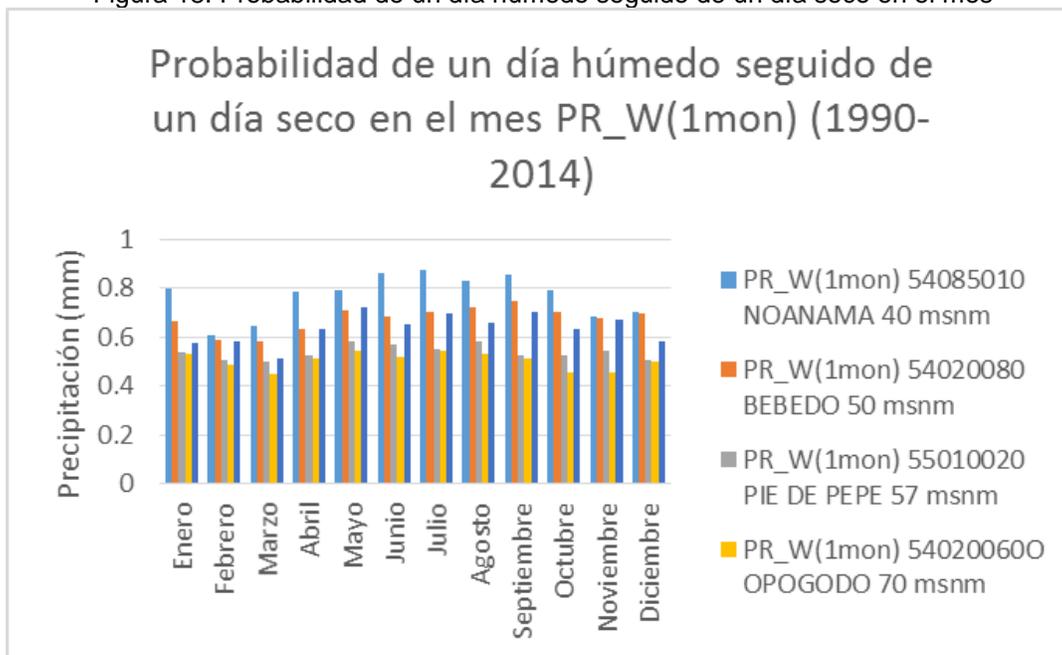


Figura 18. Probabilidad de un día húmedo seguido de un día seco en el mes



5.2.9. Temperatura Máxima y Mínimas del Área de Estudio.

La temperatura está determinada por factores como: exposición solar, nubosidad, procedencia de los vientos y circunstancias de tipo local como relieve, microclimas y altitud.

En el departamento del chocó específicamente en el área de estudio la temperatura promedio anual es de 26 y 27 grados centígrados con máximas que oscilan en 32.4 y 30 y mínimas de 20.2 y 19 grados centígrados como se puede ver en la Figura 19 como también la mensual multianual con su respectiva desviación estándar Figura 20 y Figura 21.

Figura 19. Temperaturas máximas y mínimas anuales

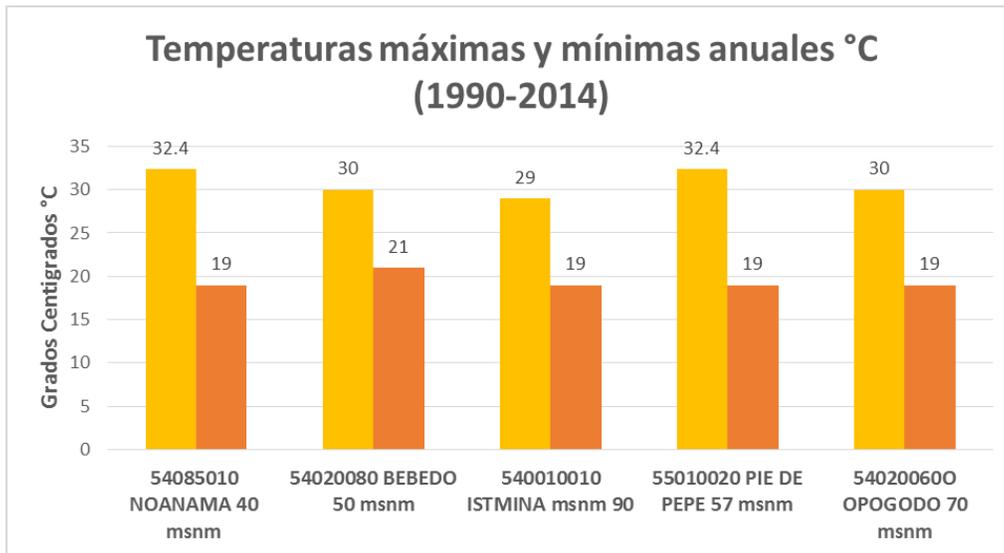


Figura 20. Temperatura máxima mensual multianual

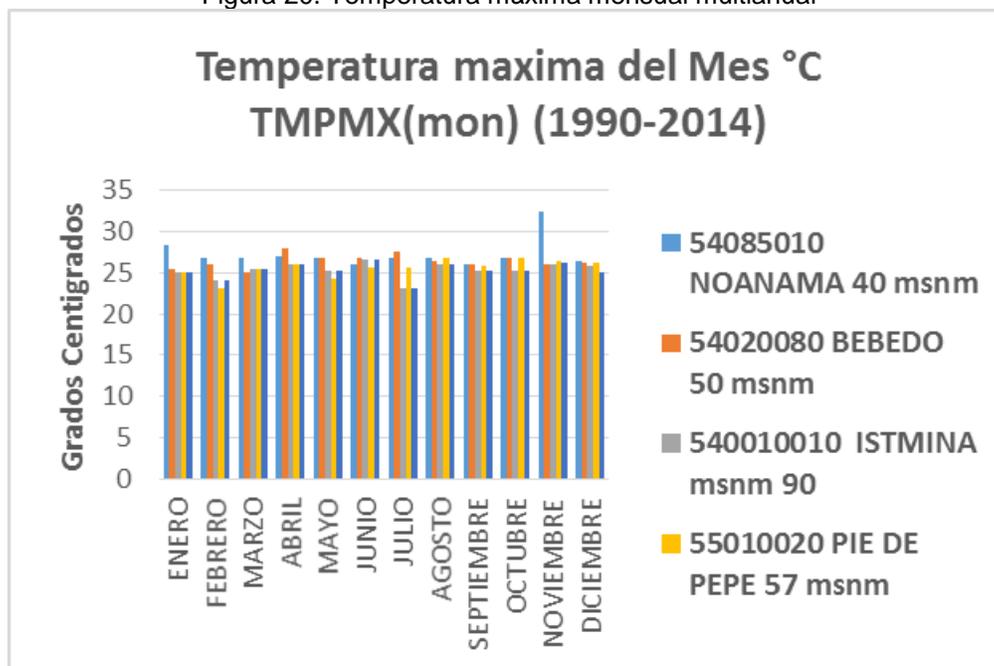


Figura 21. Temperatura mínima mensual multianual

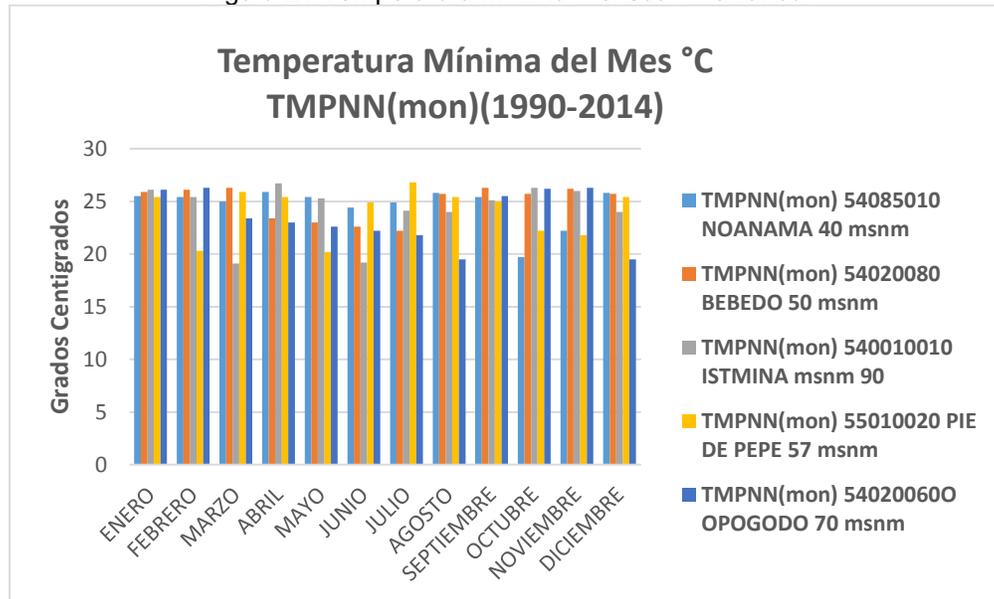
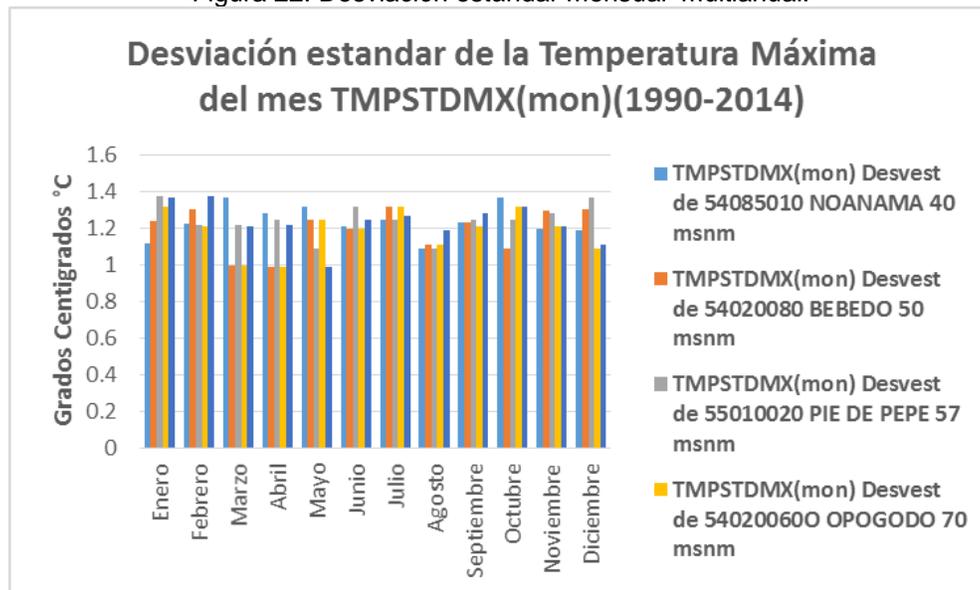


Figura 22. Desviación estándar mensual multianual.



5.2.10. Radiación Solar Promedio Diaria Por Mes SOLARAV (mon)

La radiación solar que se registra en términos generales es baja como se muestra en la tabla de las cinco estaciones de estudio. El régimen de insolación se caracteriza por un

régimen bimodal es decir con máximos relativos de insolación (Mayo y Julio) y dos mínimos relativos en marzo y abril. Figura 23.

Figura 23. Radiación solar promedios diaria por mes.

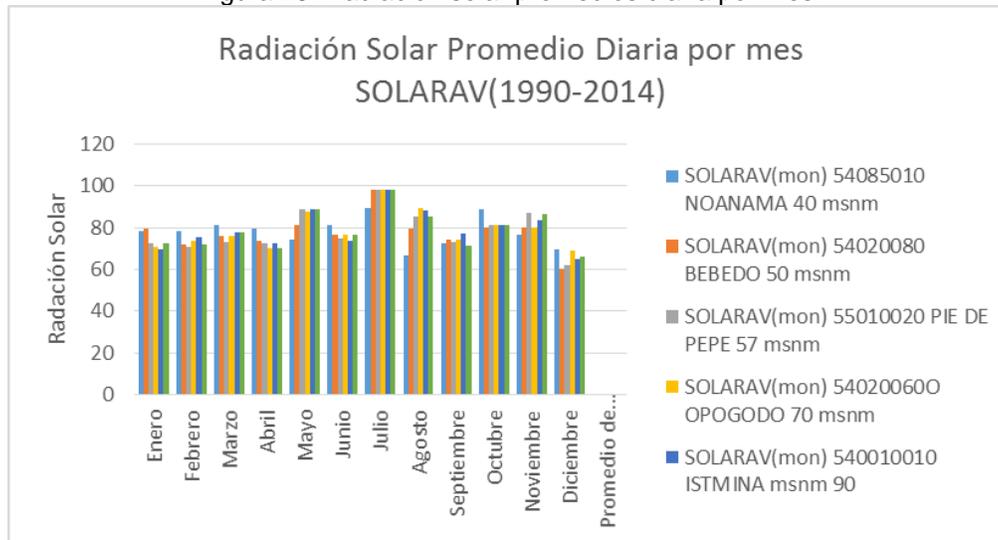
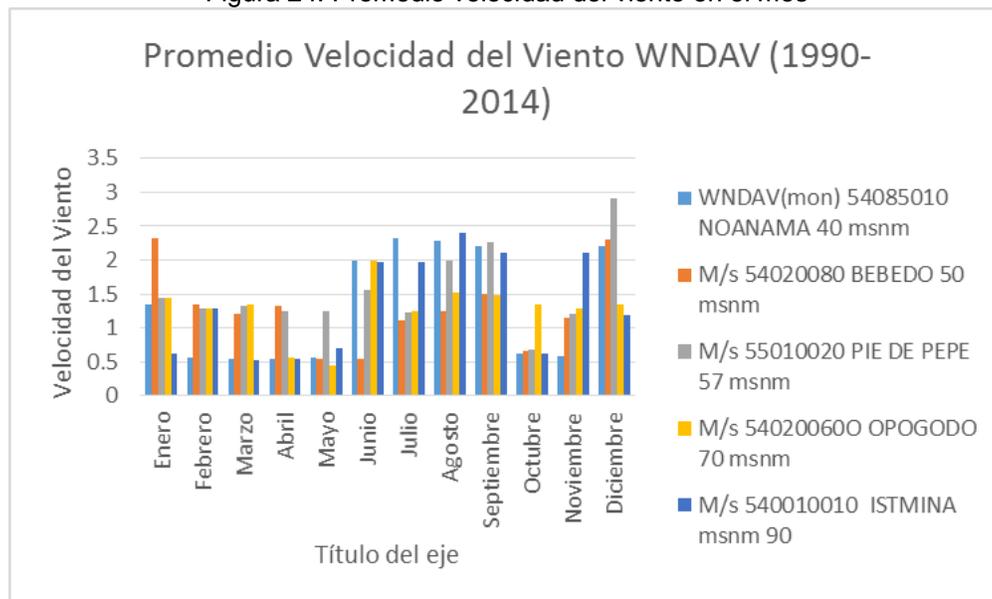


Figura 24. Promedio velocidad del viento en el mes



5.2.11. Promedio de Velocidad de Viento en el Mes WNDVAV (mon)

Los valores medios de la velocidad del viento son relativamente bajos promedios cercanos a 1.3 metros por segundo y presentan su distribución bimodal teniendo máximos valores en los meses de julio, agosto y septiembre seguido de otro pico de máximos en diciembre y

enero, Figura 24. La velocidad del viento coincide en términos generales con la que normalmente ocurre en la región tropical las velocidades altas se dan en las horas del mediodía las intermedias en las primeras de la noche. Y las más bajas en las madrugadas. En términos generales predomina en superficie la presencia de vientos locales (brisas del mar de valle de montaña y de montaña) de día el viento predominante proviene del (NW) y en las horas de la noche del sureste (SE).

5.2.12. Adaptación de Datos de Entrada para la Modelación en Swat en la Simulación Del Balance Hídrico.

Para la simulación del modelo en la cuenca alta y media del río San Juan fue necesario recolectar y estructurar la siguiente información básica necesaria para aplicar el modelo hidrológico.

5.2.13. Variables Climáticas de Entrada para el Modelamiento.

Para la entrada de datos de precipitación y temperatura como de las variables climáticas, como son radiación solar, velocidad del viento, humedad relativa entre otras se pueden observar en la Tabla 6. Se construyen en formato Ascii (.txt) bloc de notas para que el programa las pueda asimilar.

Tabla 6. Códigos de ingreso Swat

| DEFINICIÓN | CODIGO DE INGRESO SWAT | UNIDADES |
|--|------------------------|---------------------------|
| Latitud de las estaciones del área de estudio | WTATITUDE | Grados minutos y segundos |
| Longitud de las estaciones del área de estudio | WLONGITUDE | Grados minutos y segundos |
| Años a simular | RAIN YRS | No de años |
| Temperatura Máxima del mes | TMPMX(mon) | °C |
| Temperatura Mínima del mes | TMPNN(mon) | °C |
| Desviación estándar de la temperatura máxima mes | TMPSTDMX(mon) | °C |
| Desviación estándar de la temperatura máxima del mes | TMPSTDMN(mon) | °C |
| Cantidad promedio de precipitación en el mes | PCPMM(mon) | mm |
| Desviación estándar para precipitación diría en el mes | PCPSTD(mon) | mm |
| Coeficiente de correlación diaria al mes | PCPSKW(mon) | mm |

| DEFINICIÓN | CODIGO DE INGRESO SWAT | UNIDADES |
|--|------------------------|-----------|
| Probabilidad de un día húmedo seguido de un día seco en el mes | PR_W(1mon) | - |
| Probabilidad de un día Húmedo seguido de un día húmedo en el mes | PR_W(2mon) | - |
| Cantidad de días promedio de precipitación en el mes | PCPD(mon) | mm |
| Radiación Solar promedio diaria por mes | SOLARAV(mon) | Horas/día |
| Promedio de velocidad de viento en el mes | WNDV(mon) | M/s |

Tabla 7. Tabla de datos climáticos para el modelamiento.

| OBJE CTID | STATION | WLATIT UDE | WLONGIT UDE | WELEV | RAIN_YR S | TMPMX1 -12 | TMPMN1 | TMPSTD MX1 | TMPSTDM N1 |
|-----------|-------------|------------|-------------|----------|-----------|------------|-----------|------------|------------|
| 1 | NOANAMA | 441 | 7656 | 40 | 24 | 28.3 | 23 | 1.11 | 1.12 |
| 2 | BEBEDO | 507 | 7646 | 57 | 24 | 26.9 | 19 | 1.33 | 1.23 |
| 3 | ISTMINA | 503 | 7638 | 70 | 24 | 26.8 | 25 | 1.27 | 1.37 |
| 4 | OPOGODO | 455 | 7644 | 50 | 24 | 27 | 22.9 | 1.18 | 1.28 |
| 5 | PIE DE PEPE | 509 | 7641 | 90 | 24 | 26.9 | 25.4 | 1.02 | 1.32 |
| OBJE CTID | STATION | PCPMM 1 | PCPSTD1 | PCPSK W1 | PR_W1_ 1 | PCPD1 | SOLARA V1 | DEWPT1 | WNDV1 |
| 1 | NOANAMA | 470.80 | 21.87 | 2.46 | 0.80 | 0.83 | 21.63 | 78.40 | 1.35 |
| 2 | BEBEDO | 796.50 | 33.27 | 1.57 | 0.66 | 0.62 | 15.88 | 79.60 | 2.33 |
| 3 | ISTMINA | 535.87 | 25.96 | 1.90 | 0.54 | 0.55 | 14.75 | 72.60 | 1.44 |
| 4 | OPOGODO | 715.23 | 33.12 | 1.71 | 0.53 | 0.63 | 16.70 | 70.60 | 1.45 |
| 5 | PIE DE PEPE | 635.19 | 31.36 | 2.33 | 0.58 | 0.65 | 18.08 | 69.60 | 0.62 |

5.3. Determinación de la Información de Cobertura y Usos del Suelo del Área de estudio.

Para la determinación de las coberturas y usos del suelo del modelo se tomaron imágenes raster adquiridas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia IDEAM como de imágenes satelitales del sensor LANDSAT.

5.3.1. Cambio Multitemporal de Coberturas y Usos del Suelo.

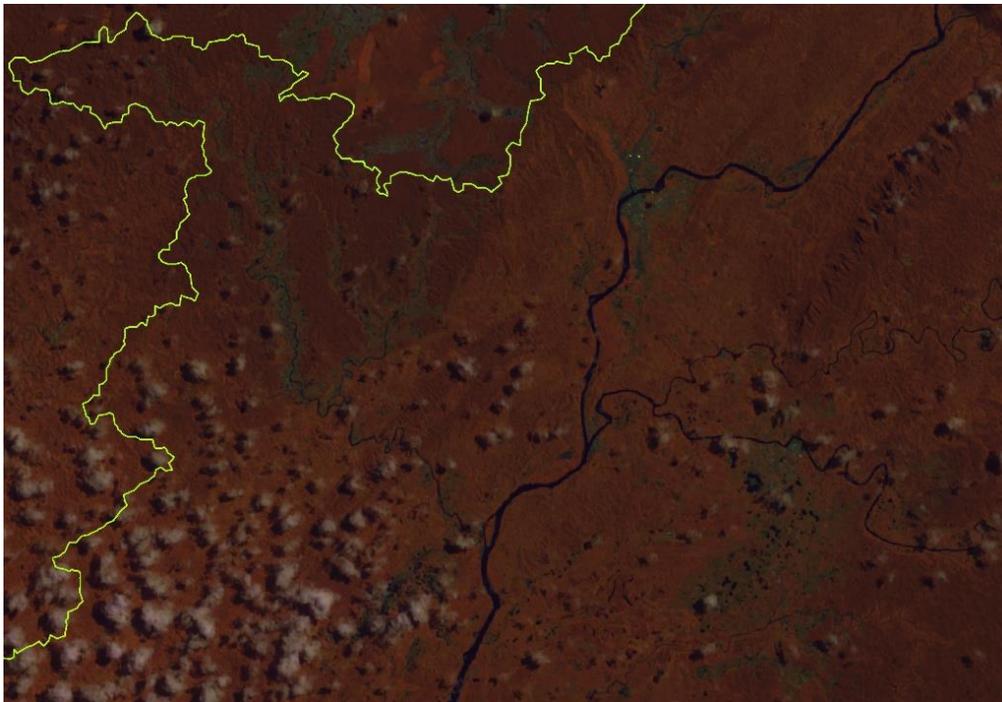
Para el análisis de coberturas y usos de suelos tanto pasados como actuales de la cuenca se recolectó y estructuró la siguiente información básica necesaria para aplicar el modelo hidrológico:

El cambio Multitemporal permitió establecer tres situaciones temporales, para los años de 1990 2005 y 2013, representadas por la información espacial de la situación relacionada con la cobertura terrestre y el uso, donde aparecen las principales áreas de extracción

minera continua e indiscriminada a través de estos años, la cual se manifiesta en la contaminación de los afluentes del Río San Juan.

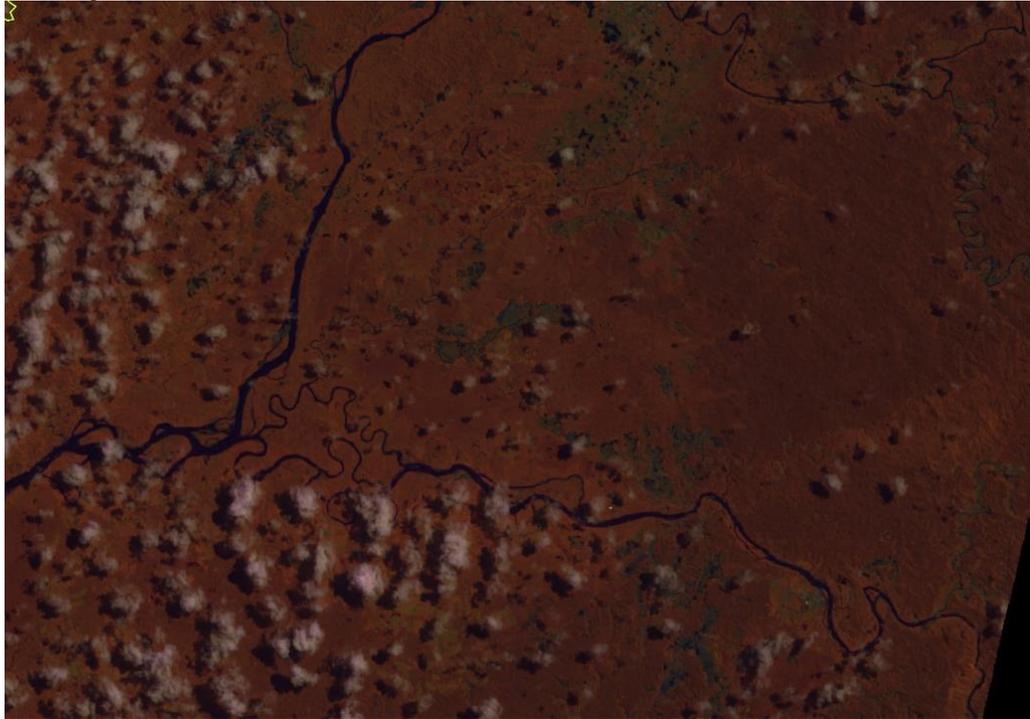
La información espacial utilizada para esta descripción se obtuvo mediante la interpretación visual de imágenes de satélite sensor LANSAT descargadas del SERVICIO GEOLOGICO DE ESTADOS UNIDOS en cada uno de estos períodos anteriormente mencionados, interpolando varias imágenes de los meses con relativa baja precipitación como enero y febrero para que estas áreas fueran observables. Posteriormente, directamente sobre la pantalla del computador con el apoyo de un software SIG, la delimitación de las diferentes unidades de cobertura específicamente minería se realiza con base en composiciones de color previamente elaboradas mediante la combinación de falso color RGB 5, 6,2, dado que esta combinación de bandas realza las áreas degradadas por la extracción minera en donde esta se observa de color verdoso oscuro, como se puede ver en la Figura 25.

Figura 25. Imagen satelital Landsat 7 y 8 áreas de extracción minera de color verdoso oscuro, RBD 562.



Fuente: Servicio Geologico De Estados Unidos, 2013.

Figura 26. Áreas de extracción minera cuenca del medio San Juan RBD 562.



Fuente: Servicio Geológico De Estados Unidos, 2013.

Las demás Coberturas del área de estudio diferentes a minería se trabajaron con imágenes tipo Raster aportadas por el IDEAM para los años 1990, 2005 y 2013. Para la clasificación de coberturas se utilizó la metodología Corine Land Cover (CLC). En donde se calcularon sus áreas respectivas Ver Tabla 8.

Tabla 8. Áreas de cobertura y usos del suelo

| Coberturas 1990 | | | | |
|-------------------------------|--|------------------------------------|------------|--------|
| GRUPO | USO | TIPOS_DE_C CORINE LAND COVER (CLC) | AREA_HA | %AREA |
| Bosques y áreas Seminaturales | Bosques | Bosque Denso | 775,843.85 | 84.93 |
| | Áreas Abiertas sin o con poca Vegetación | Tierras Desnudas y Degradadas | 10,817.97 | 1.18 |
| | Áreas con Vegetación herbácea y/ o Arbustiva | Vegetación en Transición | 2,983.63 | 0.33 |
| | Bosques | Bosque Fragmentado | 120,440.11 | 13.19 |
| Territorios Artificializados | Zonas de extracción Minera y Escombreras | Explotaciones Mineras | 3,374.08 | 0.37 |
| Total Coberturas | | | 913,459.64 | 100.00 |

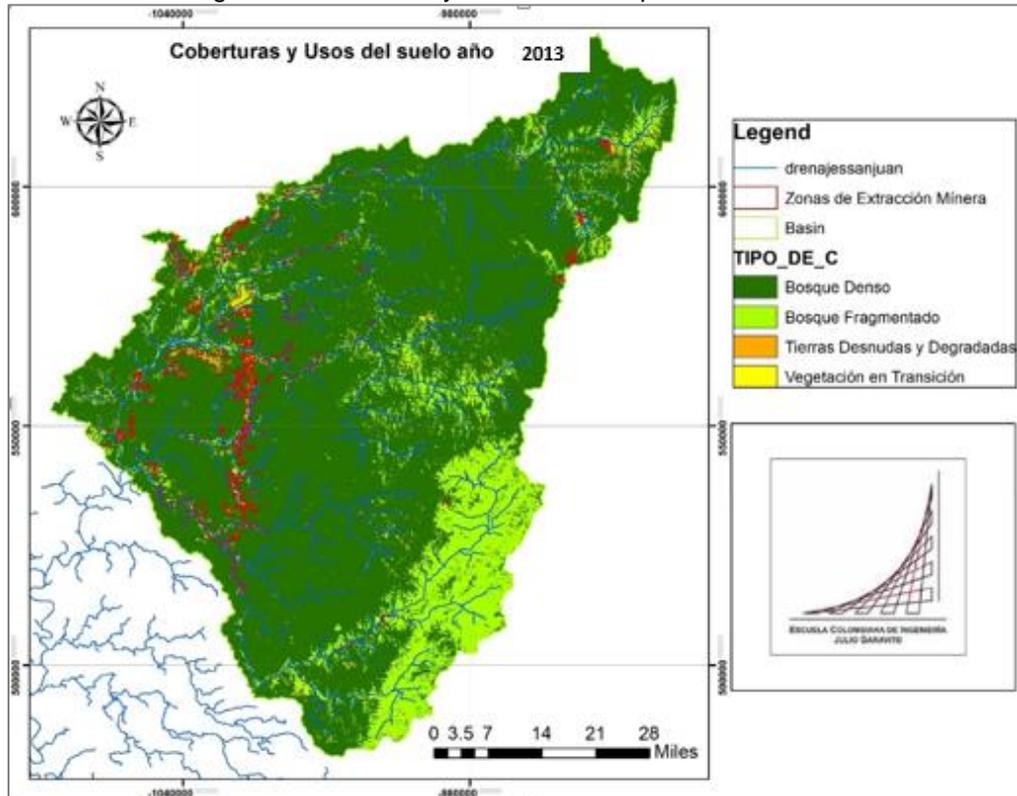
| Coberturas 2005 | | | | |
|-------------------------------|--|------------------------------------|------------|--------|
| GRUPO | USO | TIPOS_DE_C CORINE LAND COVER (CLC) | AREA_HA | %AREA |
| Bosques y áreas Seminaturales | Bosques | Bosque Denso | 764,341.76 | 83.41 |
| | Áreas Abiertas sin o con poca Vegetación | Tierras Desnudas y Degradadas | 18,478.22 | 2.02 |
| | Áreas con Vegetación herbácea y/ o Arbustiva | Vegetación en Transición | 8,770.39 | 0.96 |
| | Bosques | Bosque Fragmentado | 118,495.20 | 12.93 |
| Territorios Artificializados | Zonas de extracción Minera y Escombreras | Explotaciones Mineras | 6,311.30 | 0.69 |
| Total Coberturas | | | 916,396.87 | 100.00 |
| Coberturas 2013 | | | | |
| GRUPO | USO | TIPOS_DE_C CORINE LAND COVER (CLC) | AREA_HA | %AREA |
| Bosques y áreas seminaturales | Bosques | Bosque Denso | 747,913.14 | 80.79 |
| | Áreas Abiertas sin o con poca Vegetación | Tierras Desnudas y Degradadas | 19,465.83 | 2.10 |
| | Áreas con Vegetación herbácea y/ o Arbustiva | Vegetación en Transición | 8,607.75 | 0.93 |
| | Bosques | Bosque Fragmentado | 134,098.85 | 14.48 |
| Territorios Artificializados | Zonas de extracción Minera y Escombreras | Explotaciones Mineras | 15,703.63 | 1.70 |
| Total Coberturas | | | 925,789.20 | 100.00 |

5.3.2. Identificación de Coberturas y usos del suelo

Como podemos Observar en la Figura 27 y Figura 28, así como en la Tabla 8, las áreas de explotación minera se han quintuplicado desde el año 1990 al 2013 en un 0.37% a un 1.70% respectivamente, pasando de 3.374.08 Ha a 15.703.63 Ha. De manera similar, las áreas desnudas y degradadas pasaron de 10.817.97 en 1990 a 19.465.83 en 2013. En general la cuenca media y alta del río San Juan presenta una alta degradación de los suelos por el constante efecto de los sistemas de explotación tanto forestal como minero que alteran los ecosistemas naturales de bosques, rastrojos, matorrales, páramos y cuerpos de agua. Las coberturas más sensibles son los bosques densos o primarios. (POMCA Plan estratégico de la Macro cuenca del pacifico año 2013)⁶.

⁶ Instituto de investigaciones del Pacífico (IIAP) POMCA Plan estratégico de la Macro cuenca del pacifico Quibdó – Chocó. 2010 N.º 584, p. 86

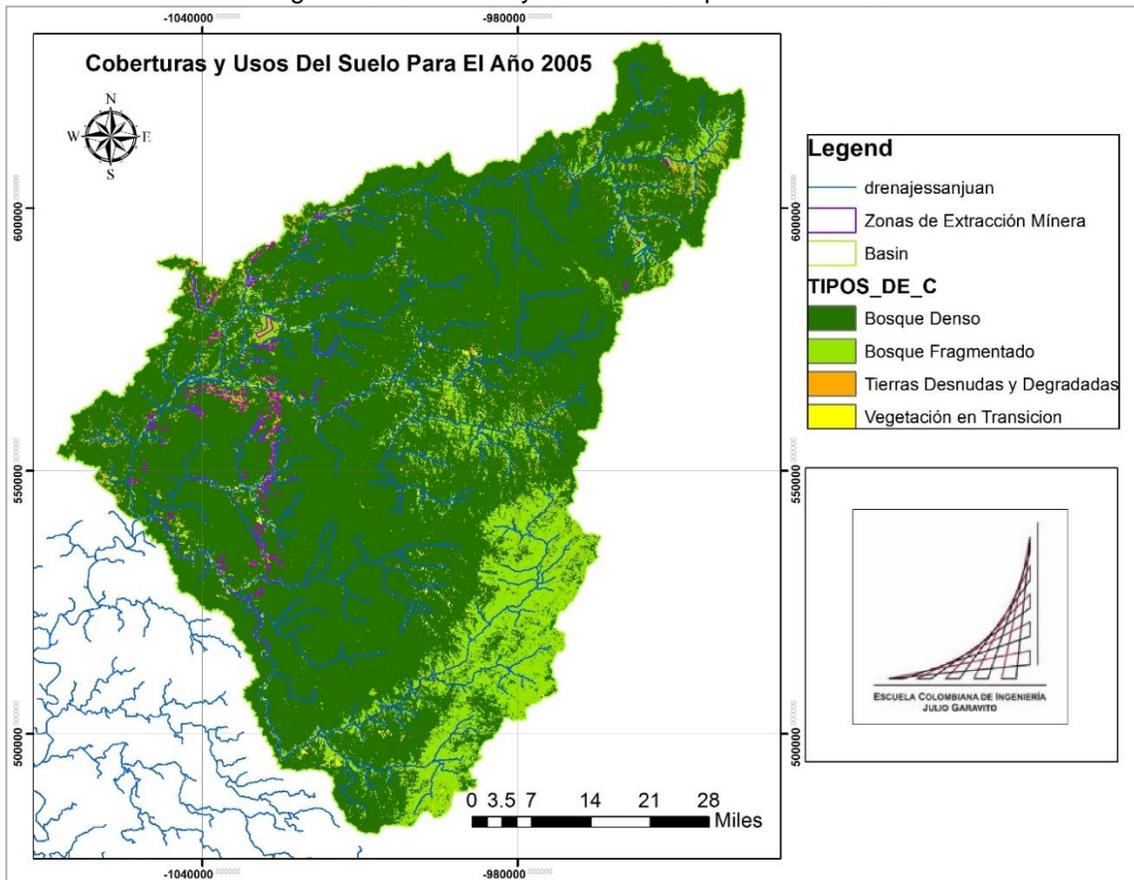
Figura 27. Cobertura y usos del suelo para el año 2013.



5.3.3. Territorios Artificiales

Explotación Minera: Es una de las áreas mayormente alteradas. Esta cobertura corresponde a zonas de extracción minera, explotación de oro y platino en los municipios del Chocó. Especialmente en la cuenca del medio San Juan, con la ampliación de proyectos y de los títulos mineros concesionadas a multinacionales por parte del estado.

Figura 28. Cobertura y uso del suelo para el año 2005.

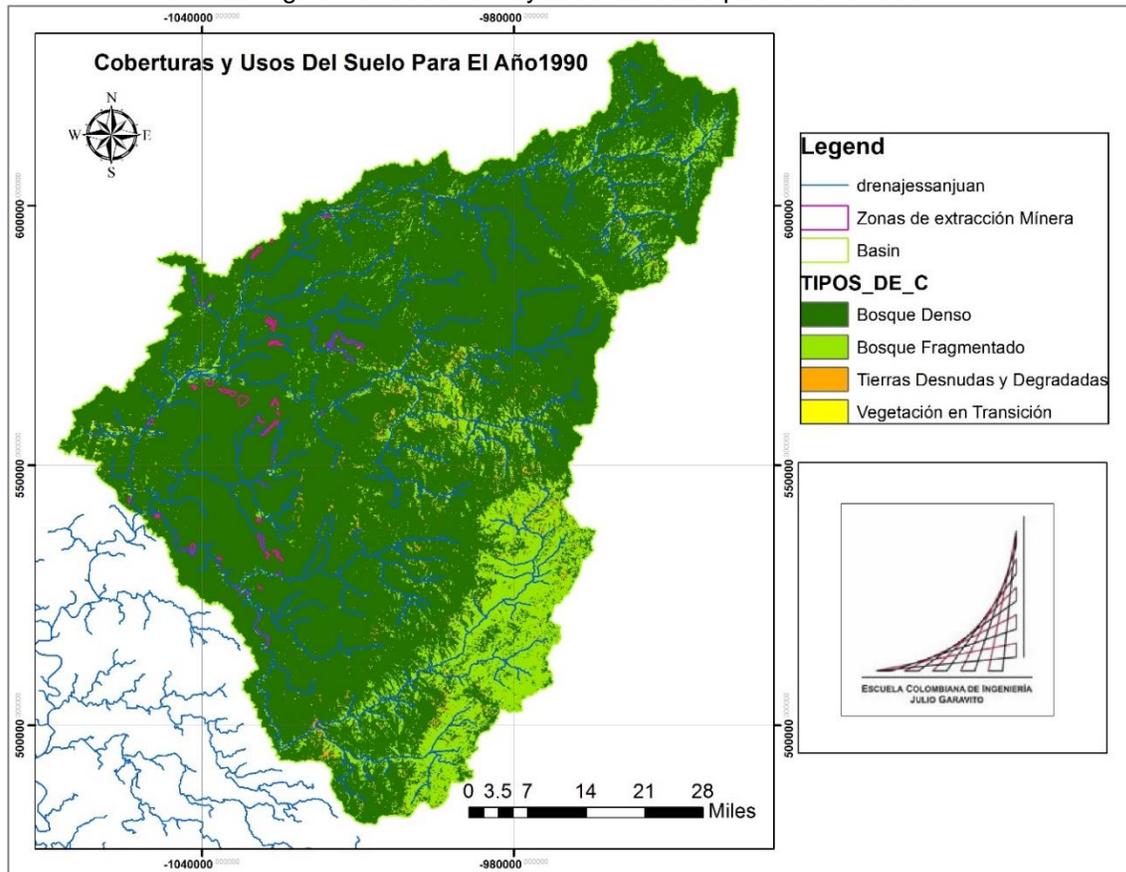


5.3.4. Bosques y Áreas Seminaturales

Bosques Densos: Comunidades vegetales dominadas por árboles de altura promedio superior a 5 m y con densidad de copas superior al 70%. Es la mayor cobertura de bosques naturales, con un 80.90% del total del área para el año de 2013.

Bosque Fragmentado. Vegetación de baja altura que generalmente es producto del proceso de sucesión de pastos o cultivos, hacia coberturas arbóreas. Se encuentran rastrojos y cobertura vegetal en estado de sucesión temprano. Típico de bosques con un nivel de intervención baja y que por la gran capacidad de resiliencia se encuentra tipificado como bosque natural. Representa el 14.48% del área

Figura 29. Coberturas y usos del suelo para el año 1990



Vegetación en Transición En este tipo de vegetación posee elementos leñosos predominantes los cuales corresponden a arbustos, que por lo general van de los 0,5 metros de altura hasta los 5 metros. Vegetación dominada por hierbas y gramíneas. Los herbazales pueden presentar árboles y arbustos asociados. Constituye el 0.93% de cobertura para el año 2013

Tierras Desnudas y Degradadas. Esta cobertura corresponde a las superficies de terreno desprovistas de vegetación o con escasa cobertura vegetal, debido a procesos antrópicos o naturales de erosión y degradación extrema. Esta área corresponde al 2.10% de área para el año 2013.

5.3.5. Adaptación de Datos de Entrada para la Modelación en Swat en Usos y Cobertura del suelo

Las coberturas del uso del suelo presentes en la cuenca se relacionaron con el código asignado a la base de datos de Swat y se asignaron los valores del número de curva para cada una de las coberturas de acuerdo con su comportamiento en la región en específica del área de estudio, para cada grupo hidrológico, como se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Tabla de datos cobertura y uso para el modelamiento

| COBERTURA Y USO | CODIGO DE INGRESO SWAT | CROBAME | CN |
|-------------------------------|------------------------|----------------------|-------------|
| Bosque Denso | FRSE | Bosque siempre Verde | 30-55-70-77 |
| Bosque Fragmentado | FRST | Bosque Mixto | 36-60-73-79 |
| Tierras Desnudas y Degradados | BARR | Estéril | 63-77-85-88 |
| Vegetación en transición | RUBR | Rango de Gramíneas | 43-65-76-82 |
| Extracción Minera | BARR | Estéril | 63-77-85-88 |

5.4. Determinación de la Información de Suelos Requerida para el Modelo

Para la determinación de la información de suelos requerida para el modelo se recurrió al Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras a escala 1: 100.000., Choco, Colombia IGAC 2011. donde se detalla cada una de las características requerida por el modelo.

5.4.1. Análisis de Suelos Elaborados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC

A continuación se caracterizan 20 tipos de suelos dentro de los cuales 16 se utilizaron para el modelamiento estos tipos de suelo existen en 6 asociaciones cada una de estas unidades se presentan en la zona de estudio como podemos ver a continuación:

Acrudoxic_Hapludands

Se localizan en laderas de montaña en relieves modernamente escarpados con pendientes de 50-75 %. Se originan a partir de mantos espesos de cenizas volcánicas depositados

sobre rocas metamórficas El perfil es de Tipo ABC, con buen desarrollo pedogénico el horizonte superficial es delgado y de color negro; el horizonte C1 y C2 son pardo amarillento, Las texturas al tacto son francas y franco arcillosas son muy profundos y bien drenados desde el punto de vista químico son de contenidos moderado de carbón orgánico, la saturación de asumió es alta y de fertilidad baja.

Oxic_Dystrudepts

Se localizan en paisajes aluviales. El complejo de cambio es dominado por la dinámica del aluminio con saturaciones por encima de 60%, El P y el CO presentan valores muy variables a lo largo del área de estudio; el carbono orgánico (CO), por ejemplo, varía entre 0,49 y 3,73%. La familia textural que da el nombre a la consolidación es Francosa fina; sin embargo el rango de variación del horizonte superficial es amplio, se encuentran áreas de textura franco arenosa, franca, franco arcillo arenosa e incluso franco arcillosa. El dominio textural lo ejerce la fracción arena con un porcentaje promedio de 60,84%, un mínimo de 44,43% y un máximo de 77,97%; las otras dos fracciones tienen un promedio de 21,36% (L) y 17,80% (Ar). Se trata entonces de un suelo calificado localmente como liviano, La densidad aparente oscila entre 1,16 y 1,66 g cm⁻³

Fluventic Dystrudepts

Tienen una pendiente de menos de 25 por ciento; y también A una profundidad de 125 cm abajo de la superficie del suelo mineral, un contenido de carbono orgánico (edad Holoceno) de 0.2 por ciento o más y nada dénsico, lítico o paralítico dentro de esa profundidad; Una disminución irregular en el contenido de carbono orgánico (edad Holoceno), entre una profundidad de 25 cm y una profundidad de 125 cm abajo de la superficie del suelo mineral o un contacto dénsico, lítico o paralítico, cualquiera que sea más somero.

En lo que respecta a la Descripción de los subgrupos suelos están en las llanuras de inundación a lo largo de los ríos regiones con suelos ácidos de drenaje. Se formaron en el

Holoceno o reciente aluvión. Están sujetas a inundaciones ocasionales, pero reciben poco aluvión fresco.⁷

Oxyaquic_Hapludults

Estos suelos son como Typic Hapludults, pero que están saturados con agua dentro de los 100 cm de la superficie del suelo mineral para 20 o más días consecutivos o 30 o más días acumulados en años normales. Además, se les permite tener un horizonte de color oscuro después de los 18 cm superiores se ha mezclado. Estos suelos son de pendientes son suaves al empinada. La vegetación natural consistía en plantas forestales. La mayor parte de estos suelos se utilizan como bosque. Algunos se han limpiado y se utilizan como tierras de cultivo o pastos.

Fluventic_Dystrudepts

Se localizan en los orillales de la planicies. El relieve es ligeramente plano con pendientes 1-3%. Se originan a partir de sedimentos aluviales medianos del Rio Atrato son superficiales. El Horizonte superficial es delgado de color oliva claro, con frecuentes manchas grises parduzcas claras el segundo horizonte es de color verde oliva con manchas pardo amarillentas Claras; las texturas desde el horizonte superficial hasta el más profundo son Franco arenosa, Franco arenosa y franca El contenido de carbón orgánico es alto en la superficie y mediano en la profundidad; la reacción es moderadamente acida los contenidos de calcio y magnesio son altos el de potasio es muy alto las bases totales de saturación son muy altas el fosforo disponible es de mediana a fertilidad es alta.

Asociación (Oxic_Dystrudepts -Typic_Dystrudepts)

Esta unidad cartográfica se encuentra al sur del departamento del choco y se extiende al departamento del valle en la cuenca del Rio Dagua; Ocupa una posición de Colinas dentro del paisaje de lomerío en áreas aledañas a la cordillera Occidental con alturas que no superan 300 msnm, el clima es cálido muy húmedo y pluvial con precipitaciones entre 4.000 y 6.000 mm anuales y una temperatura promedio de 24 °C El relieve fuertemente quebrado con pendientes 25-50% y fuertemente ondulado con pendientes 12- 25%. El relieve

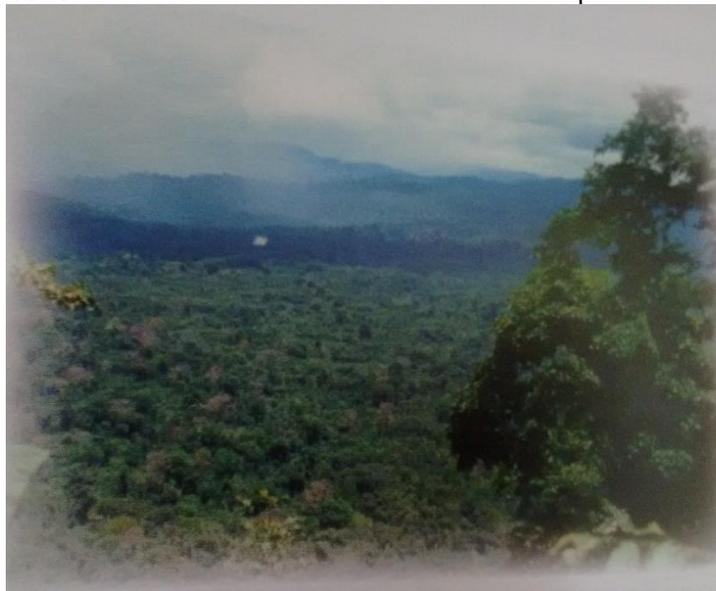
⁷ Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras a escala 1: 100.000 departamentos del Choco, (IGAC 2011) No pg, 330, p 191.

presenta un patrón de drenaje dendrítico denso con incisiones profundas ocasionadas por efecto del escurrimiento concentrado. Los suelos se han desarrollados a partir de rocas sedimentarias clásticas arcillo limosas y Conglomeraticas son bien drenados y profundos. Actualmente se encuentran con cobertura de bosque secundario y rastrojos en algunos casos han sido reemplazados por cultivos. La unidad se encuentra conformada en un 50% por suelos Oxic_Dystrudepts y un 37 % de Humic_Dystrudep Y un 13% de Typic Udorthents. Contienen altos contenidos de materia orgánica.

Asociacion (Acrudoxic_Hapludands -Andic_Dystrudepts)

Esta unidad de suelos se ubica en el flanco occidental de la cordillera Occidental, en inmediaciones del municipio de San José del Palmar El Clima es Medio y Pluvial en alturas entre 1000 y 2000 msnm la precipitación es mayor de 4000 mm y temperatura que fluctúa entre 18 y 24°C El relieve predominante es moderadamente escarpado con pendientes de 50 al 75% metamórficos de bajo grado. La unidad está integrada en un 50% por suelos derivados de cenizas volcánicas Acrudoxic Hapludants y en un 40% por un buen contenido de materia orgánica e influenciada de cenizas volcánicas (Andic Dystrudepts. Se presentan abundantes cantos rodados dentro del perfil.

Figura 30. Serranías del Baudo con suelos formados a partir de areniscas.



Fuente: J Guevara 2011.

Asociación (Oxic_Dystrudepts -Typic_Dystrudepts)

Esta asociación se localiza en inmediaciones de los municipios de Quibdo, Tado Bagado y Sipí en áreas ubicadas al pie de la cordillera Occidental El clima es cálido muy húmedo y Pluvial en alturas menores de 1000 msnm con precipitaciones de 4000 a 8000 la temperatura promedio anual es mayor de 24°C el relieve es ligeramente plano ligeramente inclinado con pendientes 1-3% 3-7% y 7-12% . El material parental que da origen a los suelos se deriva de sedimentos clásticos hidrogravigenicos constituidos principalmente de limos y arcillas La asociación está integrada Oxic_Dystrudepts en un 35% y Typic_Dystrudepts en un 65%.

Figura 31. Acantilados con material de diabasas (serranías del Baudo)



Fuente: J Guevara 2011.

Asociación (Alic_Hapludands -Andic_Dystrudepts)

Los suelos que corresponden a esta unidad se localizan en inmediaciones de los cerros de Tatamana y San Nicolás y en el alto de la concordia. La altitud sobre el nivel del mar sobrepasa los 3000 m y en algunos casos llega a 4000 m el clima es muy frío pluvial montano su relieve predominante es moderadamente escarpado es frecuente encontrar afloramientos rocosos.

La mayor parte de la superficie de esta unidad tiene vegetación natural constituida por frailejones rodales y arbustos y pajas naturales. La unidad está integrada en un 65% por suelos profundos derivados de cenizas volcánicas (Alic Hapludands) rico en materia orgánica Andic Dystrudepts en un 35% en esta se presentan afloramientos rocosos en un 15%.

Asociación (Typic_Dystrudepts_Typic_Udorthents)

Esta unidad se localiza en las partes altas de la serranía del Darién en límites con Panamá. El clima es pluvial en alturas entre 1000 y 2000 msnm la precipitación moderada entre 2000 y 4000 y la temperatura fluctúa entre 18°C y 24°C es moderadamente escarpado con pendientes del 50 al 75%. El material parental corresponde a diabasas y basaltos. La unidad está integrada en un 45% de Typic Dystrudepts y un 55% de Typic Udorthents.

Figura 32. Paisaje de Montaña con suelos derivados de cenizas volcánicas en inmediaciones de San José del Palmar



Fuente: J Guevara 2011.

Asociación (Typic_Dystrudepts-Typic_Udorthents-Humic_Dystrudep)

Esta asociación se extiende en las áreas del cerro del Torra en inmediaciones del municipio del Carmen de Atrato, También en las cabeceras de los ríos Guarato, Munbrado y Guaduas. El clima es frío pluvial con alturas entre 2000 y 3000 msnm y temperaturas entre 12 y 18°C. El relieve es moderadamente escarpado a fuertemente escarpado con pendientes largas rectilíneas de 50 a 75% y mayores al 75%. El material parental del que se derivan los suelos

se originan de material ígneo muchas de estas áreas conservan sus vegetación natural. La unidad está integrada en un 60% por suelos de poco desarrollo pedogenético de Typic_Udorthents -y Humic_Dystrudep y un 40% de Typic Dystrudepts.

Aeric Epiaquepts:

Se localizan en las napas (transición entre el dique y la cubierta) del valle del río San Juan; el relieve es ligeramente plano con pendientes 1 – 3%. Son superficiales de drenaje natural pobre y se han originados a partir de sedimentos aluviales medianos. El horizonte A es delgado, de color pardo oscuro. El horizonte B es pardo oscuro, con manchas pardo rojizas. El horizonte C es pardo oscuro gris azulado oscuro; las texturas en todo el perfil son francas. El contenido de carbón orgánico es alto en la superficie y moderado en profundidad; el calcio es moderado a bajo, el potasio es alto a medio y las bases totales son bajas a muy bajas; la saturación de base es moderada; el fósforo disponible es bajo; la fertilidad media.

Andic Dystrudepts:

Se ubican en el pie de la ladera o falda de montañas; los relieves son fuertemente quebrados, con pendientes 25 – 50%. Se originan a partir de cenizas volcánicas y materiales metamórficos; son profundos y bien drenados. El perfil representativo es de tipo ABC, con buen desarrollo pedogenético. El horizonte A es pardo muy oscuro y tiene más de 50 cm de espesor; el horizonte cámbico es pardo oscuro y el horizonte C color pardo amarillento; las texturas al tacto son franco limosas en superficie y franco arcillosas en profundidad. El carbón orgánico en general es alto, los contenidos de calcio y magnesio son bajos; el potasio, las bases totales, la saturación de la misma y el fósforo son muy bajas; la fertilidad es baja.

Aquic Dystrudepts:

Se localizan en la base de los abanicos en relieves ligeramente planos, con pendientes 1 – 3%. Se originan a partir de sedimentos coluvio aluviales; son moderadamente profundos y moderadamente bien drenados. El color del horizonte superficial es gris verdoso, con manchas pardas fuertes. El horizonte subyacente es pardo amarillento y los horizontes

inferiores son pardo fuerte, el contenido de carbón orgánico es moderado en superficie y bajo en profundidad; la reacción en todo el perfil es fuertemente acida; la capacidad de intercambio catiónico es alta, contenidos de calcio moderados a bajos; los contenidos de magnesio y potasio son moderados en superficie y bajos en profundidad; las bases totales son bajas a muy bajas; la saturación de bases es muy baja; el fósforo es bajo en el horizonte superficial y alto en los últimos horizontes; la saturación de aluminio es muy alta y la fertilidad muy baja.

Humic Dystrudeps:

Se localizan en las cimas de las montañas; el relieve es fuertemente inclinado, con pendientes 12 – 25%; se originan a partir de diabasas y basaltos, que presentan un grado de intemperismo alto, debido a la agresividad del clima; son profundos y bien drenados. El horizonte superficial es pardo grisáceo oscuro, el horizonte B es pardo oscuro y rojo amarillento y el horizonte C es de color rojo. Las texturas son franco arcillosas en superficie y franco arcillo limosa en profundidad. El contenido de carbón orgánico es muy alto en superficie y baja en profundidad; la reacción es muy fuertemente acida; los contenidos de calcio y magnesio son bajos y el de potasio, muy bajo; las bases totales y la saturación de las mismas y el contenido de fósforo disponible son muy bajos; el aluminio de cambio es muy alto y la fertilidad baja.

Pachic Fulvudands:

Se localizan en las cimas de la montaña, con relieve moderadamente inclinado y pendiente 7 – 12%; se originan a partir de cenizas volcánicas depositadas sobre rocas metamórficas; son muy profundos y bien drenados. Los horizontes superficiales tienen más de 50 cm de espesor, son de color negro y consistencia muy friable; los horizontes más profundos son pardos muy oscuros, las texturas al tacto son franco limosas, franco arcillo limosas y francas. El carbón orgánico en general es mediano, la reacción es extremadamente a muy fuertemente ácida, los contenidos de calcio y magnesio son bajos, el potasio es moderado en superficie y en muy bajos en profundidad, las bases totales, la saturación de aluminio es muy alta y la fertilidad baja.

Typic Dystrudepts:

Estos suelos ocupan las lomas y colinas, con relieve fuertemente quebrado y pendientes 25 – 50%; se originan a partir de rocas sedimentarias clásticas limo – arcillosas; son moderadamente profundos y bien drenados. Su perfil representativo es ABC; el horizonte A es de poco espesor, de color pardo grisáceo muy oscuro y textura franco arcillo arenosa; el horizonte B es pardo fuerte y textura franco arcillosa; el horizonte C es de color rojo y oliva y textura arcillosa. Extremadamente ácido, contenido de carbón orgánico es alto en el primer horizonte y decrece abruptamente con la profundidad; la capacidad de intercambio catiónica varía de alta a baja; los contenidos de calcio, magnesio, potasio y fósforo son bajos y muy bajos; los contenidos de aluminio son muy altos; la fertilidad es baja.

Typic Eutrudepts:

Se localizan en el pie de la ladera de las montañas, en relieve fuertemente quebrado y pendientes del 25 – 50%; se originan a partir de diabasas y basaltos; son profundos y bien drenados. El perfil de suelo es de tipo ABC; el horizonte A es delgado y de color pardo oscuro; el horizonte B es pardo rojizo y rojo amarillento; el horizonte C es de color rojo amarillento, con manchas pardo amarillentas; la textura de los tres horizontes superiores es franco arcillosa y la del horizonte más profundo es franca. El contenido de carbón orgánico es alto en superficie y bajo en profundidad; los contenidos de calcio y magnesio son altos, el de potasio es moderado en superficie y muy bajo en profundidad; las bases totales y su saturación son muy altas a altas; el fósforo disponible es muy bajo y la fertilidad moderada.

Figura 33. Paisaje de montaña de clima cálido húmedo con suelos derivados de rocas ígneas municipio de Acadi



Typic Fluvaquents:

Se ubican en las cubetas de los valles y generalmente ocupan las zonas planas más distantes del río, el relieve es plano cóncavo con pendientes 0 -1%; son muy superficiales, limitados por nivel freático floculante; presentan drenaje natural pobre, y se originan a partir de sedimentos aluviales medianos. El perfil modal es de tipo AC, el horizonte A es muy delgado, de color pardo oscuro. El horizonte C es gris y verdoso y verde grisáceo, como consecuencia del mal drenaje. Las texturas de los horizontes superiores son franco arenosas y la de los más profundos son francas El contenido de carbón orgánico es muy alto en superficie y mediano en profundidad; fuertemente ácidos; el contenido de calcio es mediano, el magnesio alto y el potasio muy alto en superficie y bajo en profundidad; la saturación de sus bases es mediana, el fósforo disponible es muy bajo y la fertilidad mediana.

Typic Hapludults:

Se ubican en la zona inferior de las laderas de las lomas y colinas del paisaje de lomerío y presentan un relieve fuertemente ondulado con pendientes 12 – 25%. Se originan a partir de arcillonitas y limolitas; son moderadamente profundos y bien drenados. El perfil

representativo es de tipo A/Bt/C. el horizonte A es de color pardo amarillento oscuro, el horizonte Bt es amarillo rojizo y amarillo parduzco, el horizonte C es blanco rosado con manchas negras; la textura, de la superficie hacia abajo, son franco arenosas, franco arcillosas y franco arcillo arenosas. El contenido de carbón orgánico es muy alto en superficie y mediano en profundidad; fuertemente ácidos; los contenidos de calcio y magnesio son bajos, las bases totales, la saturación y el fósforo disponible son bajos; el porcentaje de aluminio intercambiable es muy alto y fertilidad es muy baja.

Typic Udifluvensts:

Se localizan en las áreas más cercas a los cauces de los ríos y constituyen albardones incipientes; se originan a partir de sedimentos coluvio – aluviales de carácter heterométrico; son superficiales, limitados por pedregosidad abundante dentro del perfil; el drenaje es moderado y ocupan un relieve ligeramente inclinado con pendiente 3 – 7 %. El perfil modal es de tipo AC; el horizonte A es de color pardo oscuro, los horizontes subyacentes son pardo amarillento oscuro; las texturas son franco arenosa y franco arcillosa. El contenido de carbón orgánico es muy alto en superficie y mediano en profundidad; fuertemente ácidos; los contenidos de calcio y magnesio son bajos, el de potasio es bajo a muy bajo; las bases totales y su saturación son muy bajas; el fósforo disponible es bajo y la fertilidad baja.

Vitrandic Udorthents:

Se localizan en el pie de las laderas de las montañas; el relieve es fuertemente quebrado con pendientes 25 – 50%. Se originan a partir de rocas metamórficas, constituidas por esquistos, con influencias de cenizas volcánicas; gran parte de estos materiales proviene de las áreas superiores de las laderas. Los suelos son superficiales, limitados por rocas fragmentadas; presentan buen drenaje. Los suelos tienen muy poco desarrollo pedogenético; el horizonte superficial es de color pardo grisáceo muy oscuro, los horizontes C son pardo amarillento oscuro y pardo oscuro. Las texturas en todos los horizontes son pardo arcillosas. El contenido de carbón orgánico es alto en superficie y bajo en profundidad, la reacción es fuertemente ácida; los contenidos de calcio, magnesio y potasio son bajos; las bases totales y su saturación son bajas a muy bajas; la fertilidad es mediana.

5.4.2. Adaptación de Datos de Tipos de Suelos en Swat en la Simulación del Balance Hídrico

Para la modelación Swat, se utilizó un formato de entrada de datos de suelos, como se observa en la donde se caracteriza las propiedades fisicoquímicas como la taxonomía de los tipos de suelos característicos de la cuenca.

5.4.3. Datos de Entrada de Suelos para el Modelo

Las características físicas y químicas del suelo son de importancia para determinar el movimiento del agua dentro del perfil del suelo, Las variables requeridas por el modelo se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Tabla de datos de taxonomía de suelos para el modelamiento

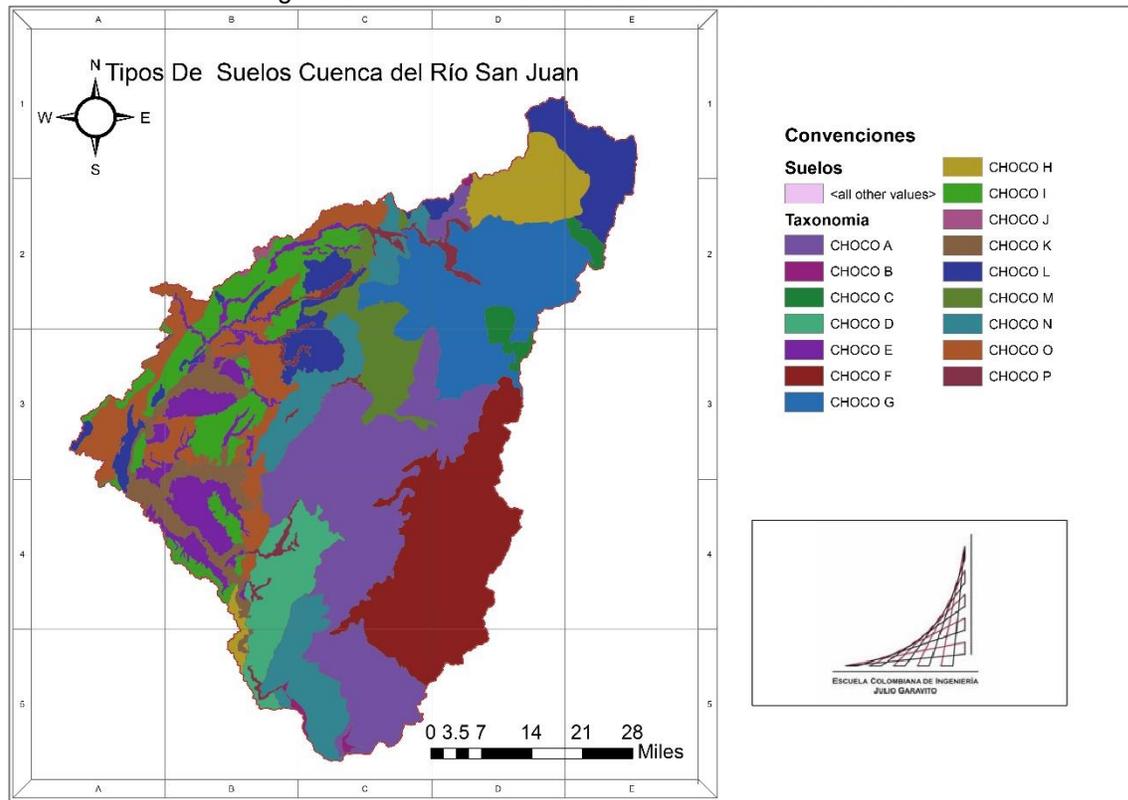
| DEFINICIÓN | CODIGO DE INGRESO | UNIDADES |
|------------------------------|-------------------|------------------|
| Espesor del fondo de la capa | Z | Mm |
| Numero de Capaz | Numlayers | No |
| Grupo Hidrológico | HYDGRP | - |
| Albedo | ALB | - |
| Densidad Aparente | BD | g/C ³ |
| Conductividad Hidráulica | J | mm/h |
| Carbón Orgánico | CBN | Mm |
| Arcilla | CALY | Mm |
| Arena | SAND | Mm |
| Limo | SLT | Mm |
| USLEK | K | - |

La Información y cálculos de Suelos: anteriormente requerida se basó en el *Estudio General De Suelos y Zonificación de tierras a escala 1: 100.000 Del Departamento Del Chocó*. estudios realizados por el IGAC, con las cuales se incorporó un proceso de correlación complementado a través del estudio y ajuste sistemático de los suelos en campo, mediante la descripción de sus características internas y externas apoyados por el análisis de muestras de laboratorio tomadas en las unidades de suelos más representativos de la población edáfica. Generando un producto final a escala. Ver .

Tabla 11. Tabla de datos de entrada de suelos para el modelamiento.

| OBJECTID | MUID | SEQN | SNAM | SOL_Z1 | SOL_BD1 | SOL_K1 | SOL_CBN1 | CLAY1 | SILT1 | SAND1 | USLE_K1 | HYDGRP |
|----------|-------|---------|---|--------|---------|--------|----------|-------|-------|-------|---------|--------|
| 1 | VT028 | CHOCO A | Acruoxic Hapludands | 203.2 | 1.11 | 237.68 | 2.02 | 25 | 45 | 30 | 0.1 | C |
| 2 | VT028 | CHOCO B | Acruoxic Hapludands –Andic Dystrudepts | 177.8 | 1.13 | 239.3 | 4.71 | 60 | 30 | 10 | 0.24 | D |
| 3 | VT029 | CHOCO C | Alic Hapludands – Andic Dystrudepts | 279.4 | 1.35 | 285.39 | 2.44 | 36 | 24 | 40 | 0.49 | A |
| 4 | VT027 | CHOCO D | Andic Dystrudepts | 127 | 1.3 | 161.45 | 2.46 | 70 | 16 | 14 | 0.49 | A |
| 5 | VT027 | CHOCO E | Fluventic Dystrudepts | 101.6 | 1.25 | 161.7 | 14.62 | 50 | 44 | 6 | 0.17 | D |
| 6 | VT028 | CHOCO F | Humic Dystrudepts | 177.8 | 1.25 | 162.7 | 14.62 | 50 | 44 | 6 | 0.17 | C |
| 7 | VT030 | CHOCO G | Humic Dystrudepts Typic Eutrudepts | 127 | 1.1 | 161.7 | 14.62 | 50 | 44 | 6 | 0.17 | C |
| 8 | VT030 | CHOCO H | Oxic Dystrudepts | 152.4 | 1.1 | 231.68 | 2.02 | 25 | 45 | 30 | 0.1 | D |
| 9 | VT030 | CHOCO I | Oxic Dystrudepts - Typic Dystrudepts | 152.4 | 1.33 | 239.3 | 4.71 | 60 | 30 | 10 | 0.24 | D |
| 10 | VT023 | CHOCO J | Oxyaquic Hapludults | 279.4 | 1.25 | 161.7 | 14.62 | 50 | 44 | 6 | 0.17 | D |
| 11 | VT023 | CHOCO K | Oxyaquic Udifluvents | 177.8 | 1.15 | 163.7 | 14.62 | 50 | 44 | 6 | 0.17 | D |
| 12 | VT023 | CHOCO L | Typic Dystrudepts | 228.6 | 1.35 | 237.68 | 13.12 | 10 | 24 | 66 | 0.24 | C |
| 13 | VT023 | CHOCO M | Typic Dystrudepts Typic Udorthents | 177.8 | 1.13 | 239.3 | 4.71 | 60 | 30 | 10 | 0.24 | D |
| 14 | VT025 | CHOCO N | Typic Udifluvents - Typic Fluvaquents | 177.8 | 1.15 | 285.39 | 8.98 | 10 | 36 | 54 | 0.17 | B |
| 15 | VT025 | CHOCO O | Typic Hapludults | 228.6 | 0.85 | 161.45 | 12.22 | 24 | 25 | 51 | 0.17 | D |
| 16 | VT025 | CHOCO P | Typic Udifluvents - Typic Fluvaquents | 60.8 | 1.1 | 161.7 | 3 | 38 | 30 | 32 | 0.17 | A |

Figura 34 Taxonomía de suelos cuenca del río San Juan.

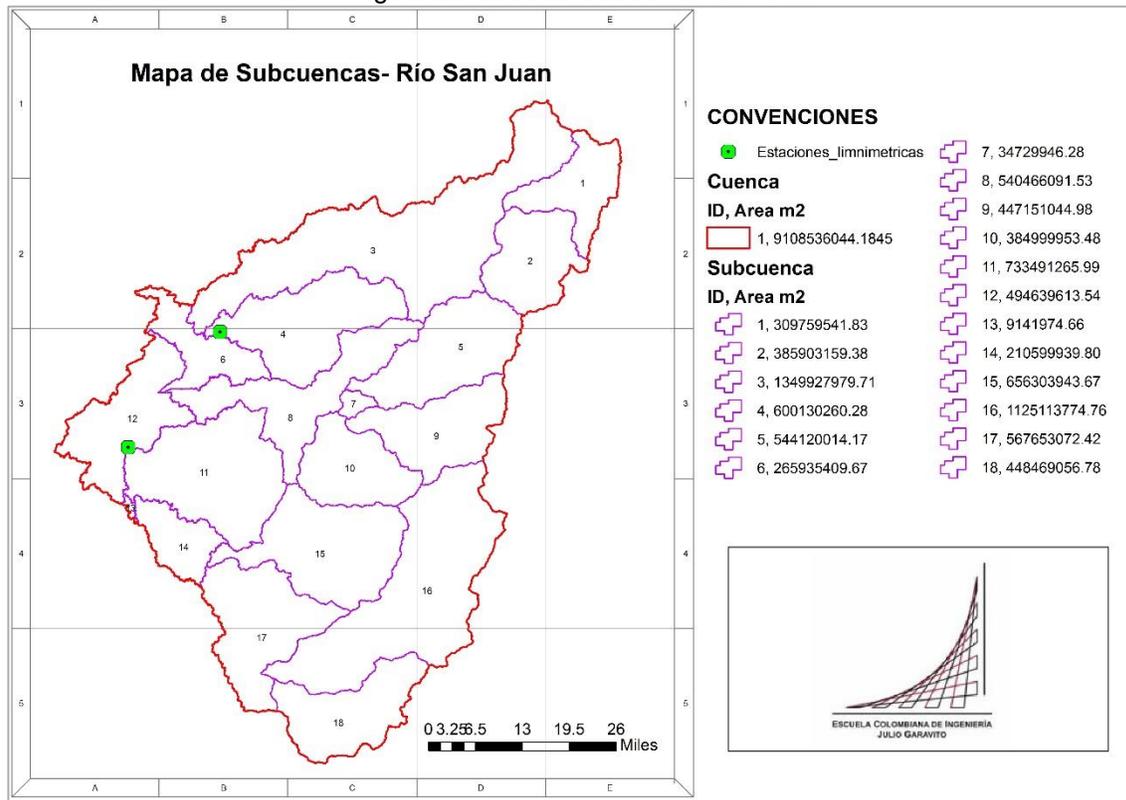


6. RESULTADOS

6.1. Generación de Unidades de Respuesta Hidrológica HRU

Una vez determinadas los límites de la cuenca media y alta del río San Juan, se ingresó la información de suelos, uso de la tierra, clima, relieve y red de drenaje al modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) versión ArcSWAT bajo la plataforma de ArcGIS (10.1). Este modelo permite analizar variables hidrológicas de la cuenca como precipitación, caudal, producción de sedimentos, evapotranspiración, contenido de agua en el suelo, flujo lateral, percolación, recarga de acuíferos, entre otras variables. Para este modelo se generaron 18 Subcuencas como se puede observar en la Figura 35, es decir, los valores de estas variables son el resultado de la interacción agua-suelo-clima-uso-relieve en la cuenca para el periodo de tiempo simulado. Este tiempo de simulación está dado por el periodo de tiempo de información climática disponible. Es decir, en este caso se realizó una modelación hidrológica para un periodo de 23 años (1990-2013).

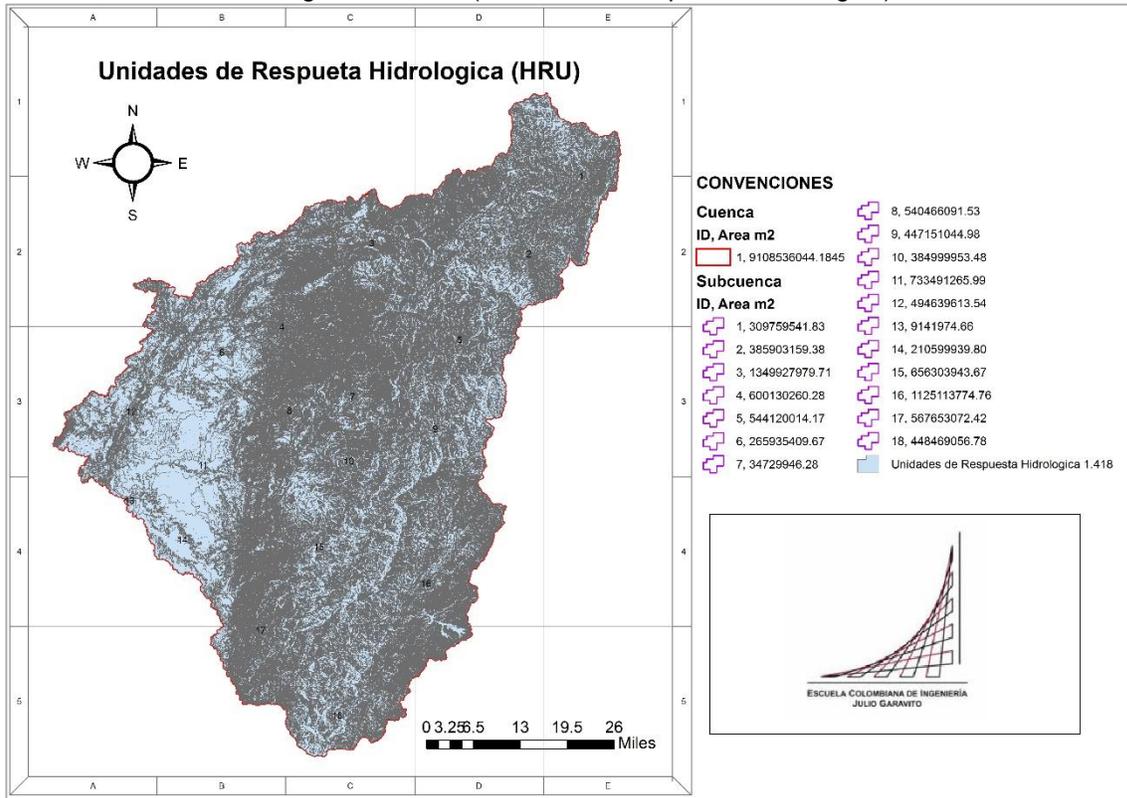
Figura 35. Subcuencas del río San Juan.



Como se puede observar en la Figura 35 se presentan dos límites de la Cuenca Hidrográfica del Río San Juan, uno es el que está definido en el POMCA y el otro es el resultante de la modelación realizada en SWAT, en ésta última se tomó como punto de cierre de la estación de calibración *Bocas de Iro*. (Estación limnimétrica).

Por medio de la integración antes mencionada se determinaron 1.418 Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU), las cuales producen un impacto particular sobre la cantidad del agua de la cuenca, Figura 36. Con la información de las HRU es posible identificar qué años son los que contribuyen más al aporte de sedimentos; dando como resultado porciones del territorio con un comportamiento hidrológico específico llamadas Unidades de Respuesta Hidrológica.

Figura 36. HRU (unidades de respuesta hidrológica).



7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

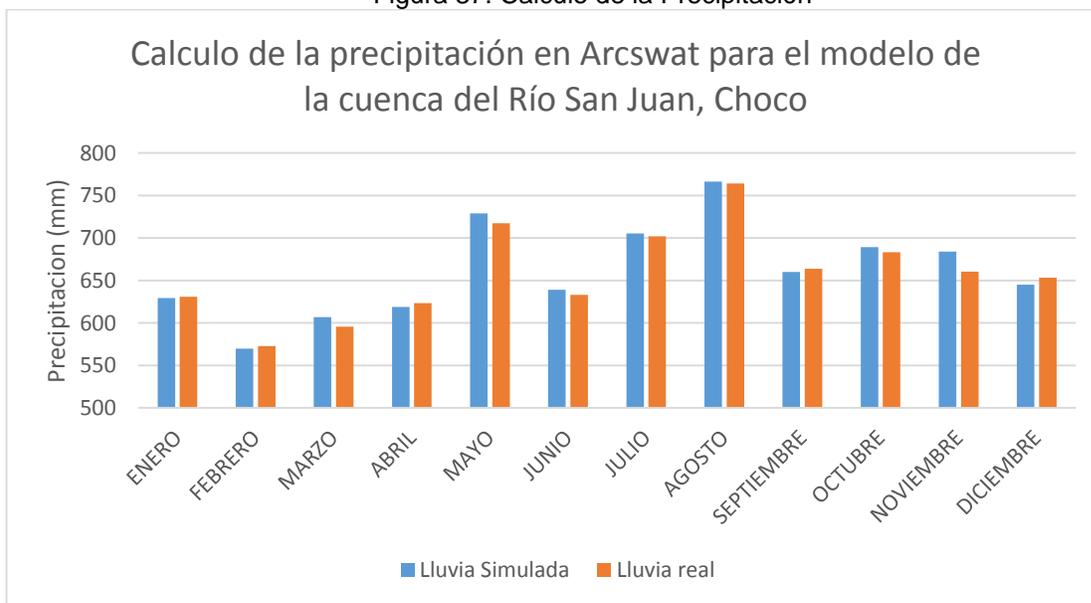
7.1. Evaluación del caudal y la Precipitación para el año 2013.

Una vez ingresados los datos del clima y determinadas las HRU se realizó una corrida preliminar del modelo para el año 2013 en ArcSWAT, arrojando resultados sobre las variables hidrológicas en la cuenca; la Tabla 12 muestra la precipitación simulada vs la real. Estos primeros resultados mostraron una precipitación promedio de 7.922 p (mm) con una distribución bimodal que se caracteriza por la alteración de dos temporadas lluviosas y dos relativamente secas.

Tabla 12. Comparación de Precipitación

| Meses | Lluvia Simulada (MM) | Lluvia real (MM) |
|---------------------------------------|----------------------|------------------|
| Enero | 629.37 | 630.719432 |
| Febrero | 569.85 | 572.8477261 |
| Marzo | 606.98 | 595.73745 |
| abril | 619.04 | 623.3861838 |
| mayo | 729.02 | 717.5231947 |
| junio | 639.26 | 633.1810188 |
| julio | 705.36 | 702.1299452 |
| agosto | 766.6 | 764.2078659 |
| septiembre | 660.07 | 663.9292424 |
| octubre | 689.3 | 683.3707316 |
| noviembre | 684.17 | 660.5519299 |
| diciembre | 645.08 | 653.1759526 |
| Total anual | 7944.1 | 7900.760673 |
| Total promedio real y simulado | 7.922 p (mm) | |

Figura 37. Calculo de la Precipitación



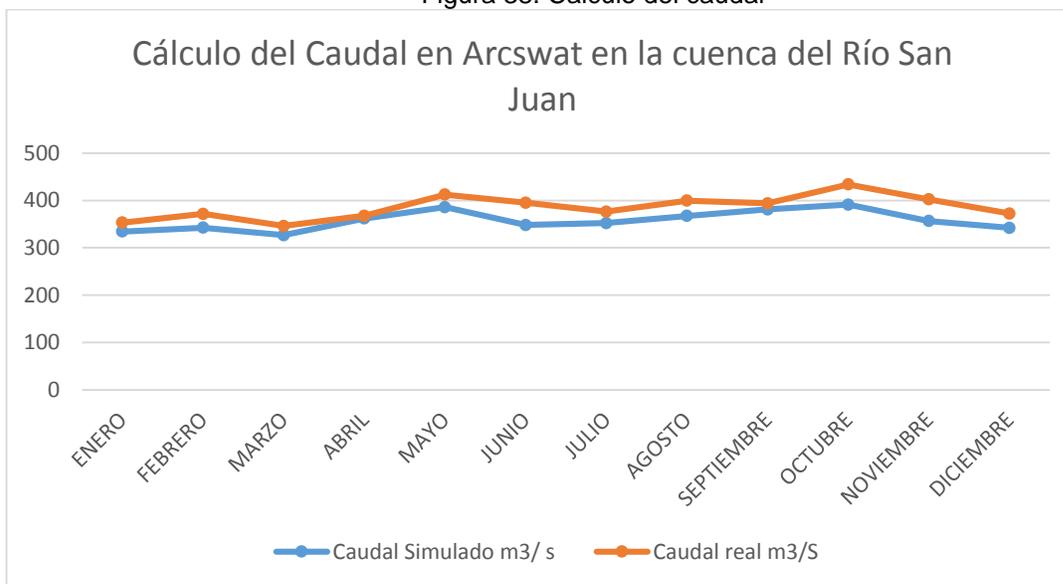
Para el cálculo del caudal se tuvo en cuenta los valores medios mensuales de caudales de la estación *Bocas de Iro* que se encuentra cerca la final del cierre de la cuenca, en dónde se extrapolaron los caudales dando como resultado un caudal real de 357.49 m³/s y un

caudal simulado de 385.34m³/s, para un promedio de 371.41 m³ /s tanto el real como el simulado. Tabla 13.

Tabla 13. Comparación de Caudal

| Meses | Caudal Real m ³ / s | Caudal Simulado m ³ / s |
|---------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| Enero | 334.4364698 | 353.292 |
| Febrero | 342.5042083 | 371.6597222 |
| Marzo | 326.5994307 | 346.0505972 |
| Abril | 361.7852781 | 367.5536551 |
| Mayo | 385.8571464 | 412.2209815 |
| Junio | 348.0611978 | 395.1301852 |
| Julio | 352.3383958 | 376.5202546 |
| Agosto | 367.2833298 | 399.5137731 |
| Septiembre | 381.142125 | 393.8152546 |
| Octubre | 391.0857684 | 433.7800231 |
| Noviembre | 356.691371 | 402.1314352 |
| Diciembre | 342.1278486 | 372.484375 |
| Total anual | 357.4927141 | 385.3460214 |
| Total promedio real y simulado | 371.41m³/s | |

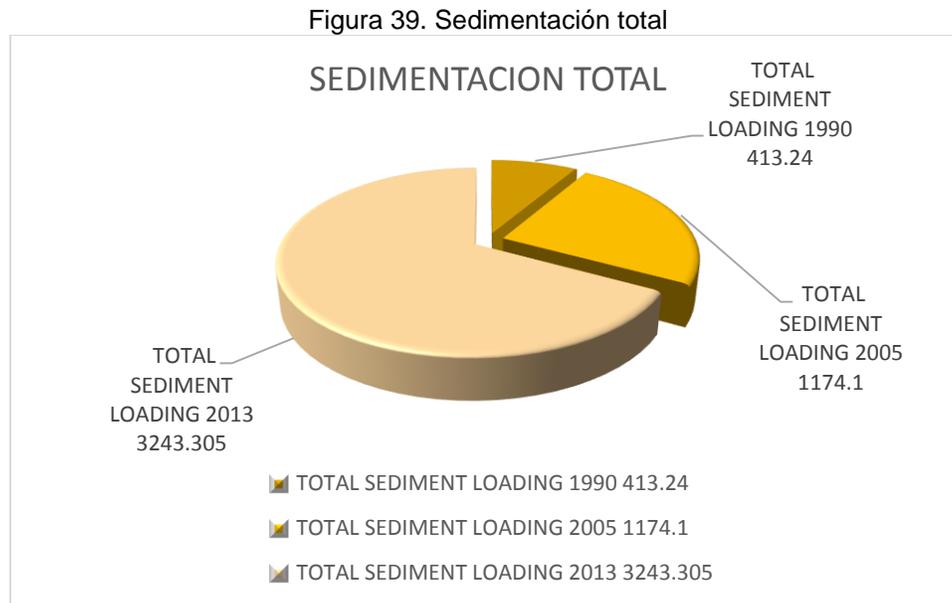
Figura 38. Calculo del caudal



7.1.1. Análisis Multitemporal de Sedimentación para los Años 2013-2005-1990.

En lo que respecta al análisis multitemporal del cambio en la cobertura y usos del suelo para evaluar el impacto de la minería y su influencia en la producción de sedimentos se

corrió el modelo tres veces ver anexos(1,2,3) para los años de 1990, 2005 y 2013 arrojando los siguientes resultados: Para el año de 1990 se generaron 413,24 Ton/ha/año de sedimentos , para el año de 2005 se generaron 1.174,1 Ton/ha/año y para el año de 2013 se determinó una sedimentación de 3.243,00 Ton/ha/año. Estos valores son la sedimentación total anual multianual para los 23 años modelados y se muestran en la Figura 39.



7.1.2. Sedimentación por Coberturas para los Escenarios 2013-2005-1990

La mayor *sedimentación* para la cobertura, “tierras desnudas y degradadas“, ocurre en el año 2013 (Figura 41) con 12.998. Ton/ha/año, más alta en comparación a los demás escenarios 9.346.42 Ton/ha/año y 3.308.04 Ton/ha/año para los años 2005 y 1990 respectivamente (Figuras 42 y 43). Esto indica que la degradación del suelo se ha ido incrementando a lo largo del tiempo como consecuencia de los sistemas productivos y extractivos que usan inadecuadamente el suelo como por ejemplo: la tala indiscriminada del bosque y la minería tanto artesanal como industrial. Consecuentemente, junto con las condiciones climáticas adversas del Chocó los sitios de nacimiento y franjas de protección de los ríos, arroyos y fuentes de aguas superficiales se han desestabilizado.

Figura 40. Sedimentación por coberturas para el año 2013

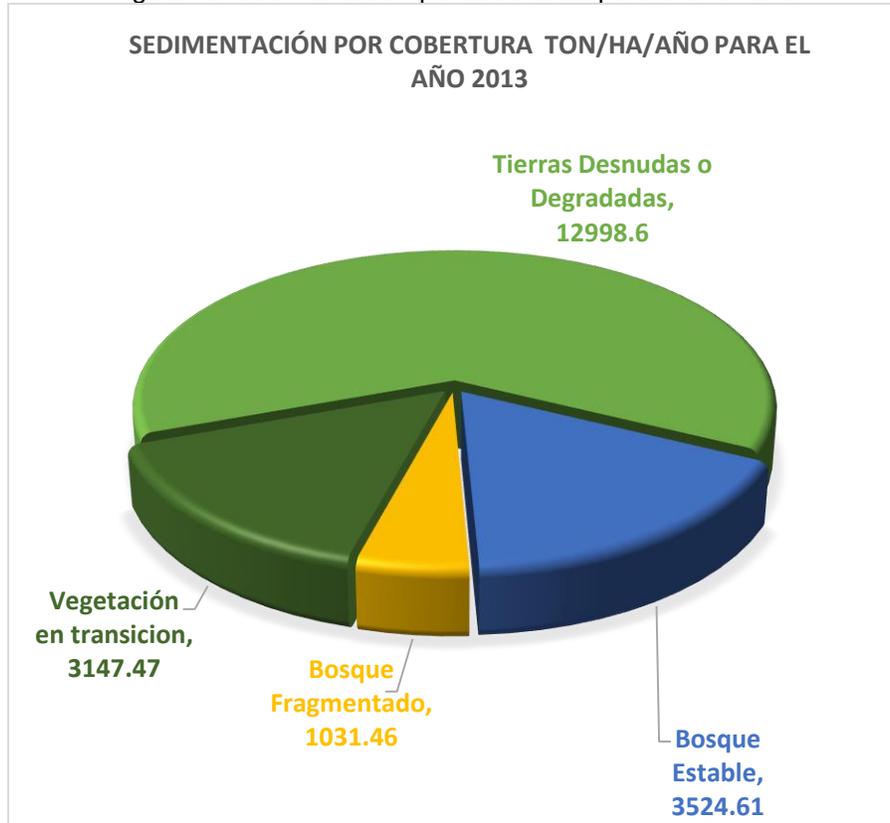
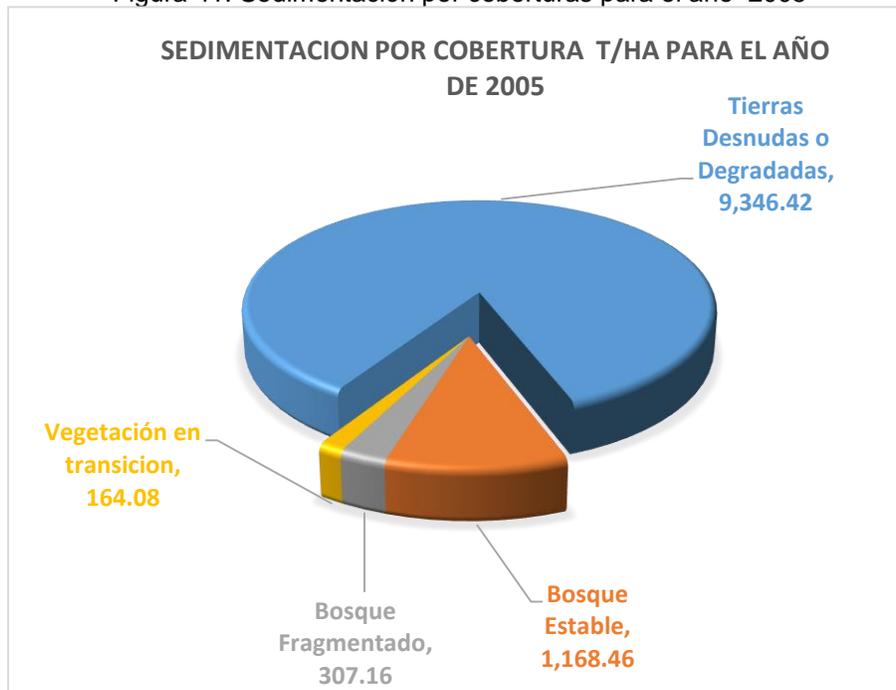
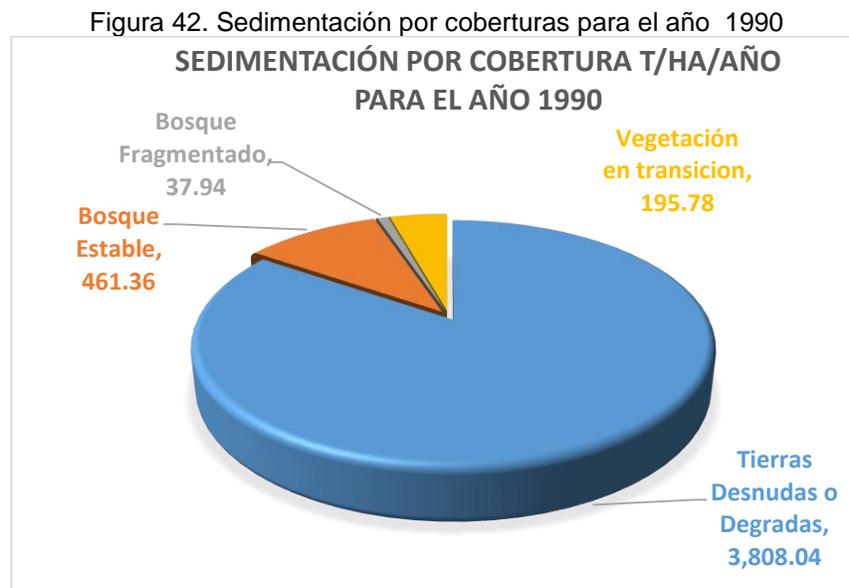


Figura 41. Sedimentación por coberturas para el año 2005



La ganadería, la agricultura extensiva y la minería son usos que contribuyen al desgaste de los suelos como consecuencia la contaminación con herbicidas agroquímicos y químicos arrastrados al cauce por acción de las lluvias. La utilización de mercurio para la producción de oro que en su mayoría proviene, de las explotaciones realizadas con métodos artesanales, e industriales. Por otra parte, la minería de aluvión con maquinaria pesada, ha dejado los suelos altamente degradados y en una pobreza absoluta a las personas que ancestralmente subsistían de la minería artesanal.

El uso de maquinaria pesada para la extracción de minerales en suelos no arables, hacen que el río San Juan, reciba grandes descargas de residuos sólidos y líquidos presentando mucha sedimentación y altos niveles de contaminación, lo que generan una baja oferta de agua potable.



8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se determinaron los cambios de cobertura y usos del suelo para los diferentes escenarios 1990, 2005 y 2013 digitalizando las diferentes coberturas especialmente las áreas de minería bajo la metodología Corine land Cover adaptada para Colombia. La explotación minera en el área de estudio han aumentado de un 0.37% a un 1.70% (cuenca alta y media del río San Juan) en los últimos 23 años; pasando de 3.374.08 ha en 1990 a 15.703.63 ha

en 2013, según las imágenes satelitales LANDSAT para esta área. Así mismo las áreas desnudas y degradadas pasaron de 10.817.97 Ha en 1990 a 19.465.83 Ha en 2013. Cabe resaltar que, los estudios de IIAP (Instituto de Investigaciones del Pacífico), pudieron establecer que en esa misma cuenca (toda la cuenca), 62.000 hectáreas (124.000 campos de fútbol) han sido afectadas por la minería y la deforestación.

Se procesó, completó y validó la información de los datos históricos para el modelamiento de la cuenca del Río San Juan como: Precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, y brillo solar, así como las coberturas y usos del suelo para correr el modelo para los tres escenarios en Arcswat.

Se ejecutaron, tres corridas para el análisis multitemporal en los diferentes años a modelar para determinar la sedimentación de la cuenca a causa de la deforestación y la explotación minera. Efectivamente la sedimentación aumentó de 413.24 Ton/ha/año a 3.243 Ton/ha/año para el año 2013.

De acuerdo con los resultados del modelo, la Subcuenca del Río San Juan presenta mucha producción de sedimentos. Se categoriza como de erosión muy alta, basados en un el aporte de sedimentación y erosión actual en cuencas, según los criterios del Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial-**CIDIAT**, como se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14. Cuadro de aporte de sedimentos y erosión actual (CIDIAT)

| Aporte de Sedimentos Tn/Ha/año | Erosión actual |
|--------------------------------|----------------|
| 0-100 | Insignificante |
| 100-200 | Muy Baja |
| 200-500 | Baja |
| 500-1000 | Mediana |
| 1000-2000 | Alta |
| >2000 | Muy Alta |

Fuente: informe técnico, aplicación del modelo Swat en la subcuenca del Río Ambato

Si bien la minería y la deforestación son los mayores uso de suelo en la cuenca del Río San Juan y responsables de la mayor producción de sedimentos, existen otros usos de suelo, como el agropecuario que en menores proporciones contribuyen significativamente a la

producción de sedimentos afectando la calidad del agua por el incremento de sólidos suspendidos y de arrastre de material a los cuerpos de agua.

Para el año de 2013 se evaluaron la precipitación y el caudal, a partir de los datos limnimétricos (1 estación *Bocas de iro*) y 5 estaciones completas pluviométricas (Noanama, Pie de Pepe, Itsmina, Bebedo y Opogodo) aportados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), arrojando un promedio mensual multianual de lluvias de 7.922 p (mm) con una distribución Bimodal, característica para la zona. La calibración del caudal arrojó un caudal real de 357.49 m³/s y un caudal simulado de 385.34m³/s, con picos en mayo y octubre y descensos en enero y diciembre, respectivamente.

Debido a la importancia que tiene la información meteorológica para el modelamiento, en Swat, es necesario contar con mejor información y más actualizada, por lo que es necesario ampliar la red y automatizar la recolección de dato, refinar el tiempo de captura y transmisión de la información y construir estaciones hidrométricas que permitan la medición y el registro diario de caudal en los principales tributarios de la parte alta y media del río San Juan. Estas estaciones permitirán la validación de las modelaciones hidrológicas en la microcuenca y proporcionarán información relevante para toma de decisiones sobre manejo del recurso hídrico.

Adicionalmente, es deseable actualizar la información de cobertura y usos del suelo de la subcuenca del Río San Juan para afinar las unidades de respuesta hidrológica del modelo (HRU), con la finalidad de capturar la mayor variabilidad ambiental del área y así lograr unas mejores respuestas de los parámetros que simula la herramienta.

Es necesario alimentar la modelación con información climática de mínimo 10 años a fin de mejorar las simulaciones y evitar el sesgo de los valores teóricos que usa por defecto el programa Swat.

La explotación minera a lo largo de las riveras del río San Juan ha ido en aumento en los últimos años. Actualmente Colombia es el país con mayor contaminación de mercurio en América. Se calcula que el país emite 180 toneladas anuales de este elemento, derivado principalmente de la extracción artesanal de oro, superada sólo por China con 444,5

toneladas, según los cálculos de Mercury Watch, el programa de monitoreo del uso de mercurio financiado por el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Esta cifra deja en evidencia la urgencia de implementar medidas para reducir el uso de un mineral tan tóxico y de formalizar a los mineros que se encuentran en la informalidad como manera de educarlos en buenas prácticas mineras.

Es imprescindible la planeación minera y la aplicación de las mejores alternativas tecnológicas e investigativas para que la minería sea una actividad industrial tendiente hacia la sostenibilidad, y una alternativa económicamente viable donde se protejan los intereses públicos: recursos naturales renovables y no renovables, medio ambiente y la sociedad.

9. BIBLIOGRAFÍA

[1] **Urrutia Rivas, (2016)**. Aplicación del Modelo Swat para la Simulación del Ciclo Hidrológico de la Cuenca Alta del Río San Juan, Bajo la Influencia de la Actividad Minera.

[2] **Chow, V. T., Maidment, D. R., and Mays, L. W.** Hidrología aplicada. Ed McGraw-Hill. Bogotá, Colombia. **1994**.

[3] **Cortes, E.; Rubilar, R. y Mardones, O. (2009)**. Comparación de erosión hídrica en plantaciones forestales y bosque nativo, en suelo granítico de la región del Bío-Bío, Chile. XIII Congreso Forestal Mundial. Buenos Aires,

[4] **Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico – (IIAP)**, Diagnóstico de la calidad del Aire y el agua en centros de mayor poblamiento humano de la región del Chocó Biogeográfico Colombiano. Traducción “Herramienta de Evaluación para el Suelo y Agua”

[5] **Instituto de investigaciones del Pacífico (IIAP)**. Plan estratégico de la Macrocuena del pacífico Quibdó – Chocó. 2010

[6] **Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras a escala 1: 100.000.**, Choco, Colombia IGAC 2011.

[7] **Monsalve S. Germán, (1995)**. Hidrología en la Ingeniería, Ed. Escuela Colombiana de Ingeniería, J. D. (2003).

[8] **Salas, C. (2010)**. “Comportamiento hidrológico y erosivo en usos de suelo prioritarios de la campiña lechera en Santa Cruz, Turrialba, Costa Rica”. Tesis, Mar. Sc. Turrialba, CR, CATIE.

[9] **Ortiz Rivera, A., Mendoza Cantú, M. E., & Bravo Espinosa, M (2010)**. Implementación del modelo hidrológico SWAT: modelación y simulación multitemporal de la variación de escorrentía en la Cuenca del lago de Cuitzeo. Instituto Nacional de Ecología: Distrito Federal, México.

[10] **Salgado Rabadán, J. H., & Güitrón de los Reyes, A (2012).** APLICABILIDAD DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS DISTRIBUIDOS APPLICABILITY OF THE DISTRIBUTED HYDROLOGICAL MODELS.

[11] **Arnold, J. G. (2007).** The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. Center for Agricultural and Rural Development, Iowa State University.

[12] **Alcaldía Mayor de Bogotá, Secretaria Distrital de Ambiente: Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (2008).** Calidad del Sistema Hídrico de Bogotá. 1a ed. Bogotá: Editorial Pontificia Universidad Javeriana.

[13] **Corporación Autónoma Regional para el Desarrollo Sostenible del Choco. (2012).** Pan de acción institucional 2012 – 2015.

[14] **Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia. (IDEAM),** Sistema de Información Ambiental, Base de datos climáticos de las estaciones.2013.

[15] Soil and Water Assessment Tool (**Swat**), User's Manual, 2005. Detallada en el sitio <http://www.brc.tamus.edu/swat/index.html>.

[16] **CONTRALORÍA GENERAL DE LA REPÚBLICA - CGR.** Dirección de Estudios sectoriales Medio Ambiente – DES Medio Ambiente. Informe de Auditoría a la ilegalidad Minera - Documento final línea medio ambiente. Bogotá, Noviembre de 2012.

10. ANEXOS

ANEXO 1. Salida general del proceso de simulación en la cuenca alta y media del Río San Juan escenario 1990

| AVE MONTHLY BASIN VALUES | | | | | | | | |
|--------------------------|--------|------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|
| MON | RAIN | FALL | SURF Q | LAT Q | YIELD | ET | YIELD | PET |
| | (MM) | (MM) | (MM) | (MM) | (MM) | (MM) | (T/HA) | (MM) |
| 1 | 386.15 | 0 | 50.44 | 156.89 | 322.73 | 85.92 | 60.04 | 99.18 |
| 2 | 419.09 | 0 | 73.09 | 174.19 | 342.45 | 72.53 | 101.58 | 87.88 |
| 3 | 520.82 | 0 | 119.83 | 208.63 | 434.25 | 81.96 | 31.17 | 94.94 |
| 4 | 602.62 | 0 | 123.04 | 256.95 | 488.44 | 82.52 | 4.5 | 85.76 |
| 5 | 699.51 | 0 | 165.52 | 285.39 | 579.11 | 87.5 | 2.93 | 91.61 |
| 6 | 545.93 | 0 | 115.18 | 210.69 | 462.27 | 86.9 | 4.83 | 102.82 |
| 7 | 475.79 | 0 | 89.18 | 176.36 | 403.28 | 94.36 | 6.82 | 118.51 |
| 8 | 509.58 | 0 | 100.8 | 188.32 | 418.77 | 92.4 | 12.09 | 120.98 |
| 9 | 610.48 | 0 | 135.19 | 234.35 | 495.9 | 89.81 | 29.66 | 107.32 |
| 10 | 625.46 | 0 | 136.39 | 257.15 | 532.78 | 79.67 | 46.61 | 89.57 |
| 11 | 509.25 | 0 | 98.26 | 216.49 | 452.06 | 69.47 | 57.54 | 76.65 |
| 12 | 458.16 | 0 | 73.49 | 193.92 | 400.98 | 77.07 | 54.63 | 86.19 |

AVE ANNUAL BASIN VALUES

PRECIP = 6366.4 MM
 SNOW FALL = 0.00 MM
 SNOW MELT = 0.00 MM
 SUBLIMATION = 0.00 MM
 SURFACE RUNOFF Q = 1281.03 MM
 LATERAL SOIL Q = 2560.81 MM
 TILE Q = 0.00 MM
 GROUNDWATER (SHAL AQ) Q = 1419.10 MM
 GROUNDWATER (DEEP AQ) Q = 75.06 MM
 REVAP (SHAL AQ => SOIL/PLANTS) = 23.14 MM
 DEEP AQ RECHARGE = 75.93 MM
 TOTAL AQ RECHARGE = 1518.68 MM
 TOTAL WATER YLD = 5335.98 MM
 PERCOLATION OUT OF SOIL = 1523.61 MM
 ET = 1000.7 MM
 PET = 1162.2MM
 TRANSMISSION LOSSES = 0.00 MM
 SEPTIC INFLOW = 0.00 MM
TOTAL SEDIMENT LOADING = 413.266 T/HA
 TILE FROM IMPOUNDED WATER = 0.000 (MM)
 EVAPORATION FROM IMPOUNDED WATER = 0.000 (MM)
 SEEPAGE INTO SOIL FROM IMPOUNDED WATER = 0.000 (MM)
 OVERFLOW FROM IMPOUNDED WATER = 0.000 (MM)

ANEXO 2. Salida general del proceso de simulación en la cuenca alta y media del río San Juan escenario 2005

| AVE MONTHLY BASIN VALUES | | | | | | | | |
|--------------------------|--------|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| MON | RAIN | FALL | SURF Q | LAT Q | YIELD | ET | YIELD | PET |
| | (MM) | (MM) | (MM) | (MM) | (MM) | (MM) | (T/HA) | (MM) |
| 1 | 629.39 | 0 | 180.59 | 202.77 | 459.03 | 167.34 | 231.59 | 379.68 |
| 2 | 569.86 | 0 | 168.52 | 182.35 | 417.83 | 150.84 | 231.08 | 356.49 |
| 3 | 607 | 0 | 170.84 | 185.09 | 425.76 | 190.6 | 44.85 | 412.7 |
| 4 | 619.05 | 0 | 151.74 | 196.02 | 409.53 | 213.31 | 17.18 | 394.38 |
| 5 | 729.03 | 0 | 184.84 | 230.71 | 475.44 | 242.48 | 20.55 | 490.57 |
| 6 | 639.27 | 0 | 167.36 | 214.54 | 445.9 | 170.17 | 25.94 | 382.93 |
| 7 | 705.37 | 0 | 194.19 | 220.17 | 484.32 | 207.65 | 43.31 | 519.09 |
| 8 | 766.61 | 0 | 223.79 | 247.43 | 547.41 | 198.91 | 61.38 | 460.84 |
| 9 | 660.07 | 0 | 182.92 | 218.59 | 480.34 | 172.36 | 80.75 | 380.97 |
| 10 | 689.31 | 0 | 202.63 | 221.03 | 505.9 | 183.39 | 104.83 | 428.06 |
| 11 | 684.18 | 0 | 200.22 | 218.52 | 496.78 | 180.23 | 151.38 | 403.94 |
| 12 | 645.09 | 0 | 188.38 | 207.98 | 476.81 | 164.67 | 159.26 | 369.68 |

AVE ANNUAL BASIN VALUES

PRECIP = 7949.3 MM
 SNOW FALL = 0.00 MM
 SNOW MELT = 0.00 MM
 SUBLIMATION = 0.00 MM
 SURFACE RUNOFF Q = 2217.50 MM
 LATERAL SOIL Q = 2546.82 MM
 TILE Q = 0.00 MM
 GROUNDWATER (SHAL AQ) Q = 817.99 MM
 GROUNDWATER (DEEP AQ) Q = 46.46 MM
 REVAP (SHAL AQ => SOIL/PLANTS) = 78.11 MM
 DEEP AQ RECHARGE = 47.01 MM
 TOTAL AQ RECHARGE = 940.14 MM
 TOTAL WATER YLD = 5628.76 MM
 PERCOLATION OUT OF SOIL = 942.28 MM
 ET = 2243.3 MM
 PET = 4982.5MM
 TRANSMISSION LOSSES = 0.00 MM
 SEPTIC INFLOW = 0.00 MM
TOTAL SEDIMENT LOADING = 1174.345 T/HA
 TILE FROM IMPOUNDED WATER = 0.000 (MM)
 EVAPORATION FROM IMPOUNDED WATER = 0.000 (MM)
 SEEPAGE INTO SOIL FROM IMPOUNDED WATER = 0.000 (MM)
 OVERFLOW FROM IMPOUNDED WATER = 0.000 (MM)

ANEXO 3. Salida general del proceso de simulación en la cuenca alta y media del Río San Juan escenario 2013

| AVE MONTHLY BASIN VALUES | | | | | | | | |
|--------------------------|---------------------|--------------|----------------|---------------|---------------|------------|-----------------|-------------|
| MON | RAIN-lluvia (MM) | FALL (MM) | SURF Q (MM) | LAT Q (MM) | YIELD (MM) | ET (MM) | YIELD (T/HA) | PET (MM) |
| 1 | 629.37 | 0 | 214.62 | 267.23 | 612.92 | 19.4 | 506.75 | 21.13 |
| 2 | 569.85 | 0 | 199.66 | 240.69 | 556.88 | 16.86 | 475.29 | 18.52 |
| 3 | 606.98 | 0 | 214.51 | 252.45 | 593.27 | 18.66 | 226 | 20.01 |
| 4 | 619.04 | 0 | 212.51 | 265.67 | 597.85 | 18.33 | 36.22 | 19.28 |
| 5 | 729.02 | 0 | 264.32 | 305 | 695.79 | 18.3 | 28.86 | 19.36 |
| 6 | 639.26 | 0 | 212.6 | 277.63 | 619.94 | 17.72 | 74.69 | 19.15 |
| 7 | 705.36 | 0 | 245.06 | 296.44 | 677.21 | 18.22 | 151.82 | 19.81 |
| 8 | 766.6 | 0 | 272.02 | 322.81 | 736.05 | 18.4 | 222.4 | 19.89 |
| 9 | 660.07 | 0 | 220.17 | 286.99 | 646.88 | 17.83 | 283.19 | 19.32 |
| 10 | 689.3 | 0 | 243.63 | 291.19 | 677.94 | 17.63 | 346.44 | 19.14 |
| 11 | 684.17 | 0 | 237.96 | 288.8 | 663.82 | 18.26 | 445.1 | 19.68 |
| 12 | 645.08 | 0 | 223.08 | 272.64 | 636.15 | 18.78 | 441.99 | 20.46 |

AVE ANNUAL BASIN VALUES

PRECIP = 7949.1 MM
 SNOW FALL = 0.00 MM
 SNOW MELT = 0.00 MM
 SUBLIMATION = 0.00 MM
 SURFACE RUNOFF Q = 2761.92 MM
 LATERAL SOIL Q = 3369.68 MM
 TILE Q = 0.00 MM
 GROUNDWATER (SHAL AQ) Q = 1509.24 MM
 GROUNDWATER (DEEP AQ) Q = 78.79 MM
 REVAP (SHAL AQ => SOIL/PLANTS) = 4.72 MM
 DEEP AQ RECHARGE = 79.73 MM
 TOTAL AQ RECHARGE = 1594.57 MM
 TOTAL WATER YLD = 7719.62 MM
 PERCOLATION OUT OF SOIL = 1598.73 MM
 ET = 218.6 MM
 PET = 235.9MM
 TRANSMISSION LOSSES = 0.00 MM
 SEPTIC INFLOW = 0.00 MM
TOTAL SEDIMENT LOADING = 3243.305 T/HA
 TILE FROM IMPOUNDED WATER = 0.000 (MM)
 EVAPORATION FROM IMPOUNDED WATER = 0.000 (MM)
 SEEPAGE INTO SOIL FROM IMPOUNDED WATER = 0.000 (MM)
 OVERFLOW FROM IMPOUNDED WATER = 0.000 (MM)