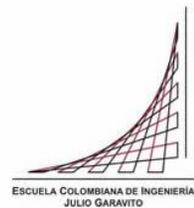


**Maestría en Ingeniería Civil**

**APLICACIÓN DEL MODELO SWAT PARA LA SIMULACIÓN DEL  
CICLO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA ALTA DEL RIO SAN JUAN  
BAJO LA INFLUENCIA DE LA ACTIVIDAD MINERA.**

**Marilin Angélica Urrutia Rivas**

**Bogotá, D.C., 03 febrero del 2016**



**APLICACIÓN DEL MODELO SWAT PARA LA SIMULACIÓN DEL  
CICLO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA ALTA DEL RIO SAN JUAN  
BAJO LA INFLUENCIA DE LA ACTIVIDAD MINERA.**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en  
recursos hidráulicos y medio ambiente**

**GERMAN SANTOS GRANADOS**

**Director**

**Bogotá, D.C., 03 febrero del 2016**



La tesis de maestría titulada “**Aplicación del modelo hidrológico SWAT para la simulación del ciclo hidrológico de la cuenca alta del río San Juan bajo la influencia de la actividad minera**”, presentada por **Marilin Angélica Urrutia Rivas**, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en recursos hidráulicos y medio ambiente

Director de la tesis

German Santos Granados

Jurado

Alfonzo Rodríguez

Jurado

Héctor Matamoros

Bogotá, D.C., 03 de febrero del 2016

### Dedicatoria

Dedico el éxito y satisfacción de esta investigación a Dios quien me regala los dones de la sabiduría y el entendimiento, a mis padres y hermanos por su apoyo incondicional, el amor, la alegría y el ánimo, que no me dejaron desfallecer para poder culminar satisfactoriamente este proyecto.

## Agradecimientos

Deseo expresar de todo corazón mis más sinceros agradecimientos a todas aquellas personas que me brindaron su colaboración, sus conocimientos, su ayuda incondicional y por sobre todo su dedicación y tiempo durante la realización de esta investigación.

**A Dios**, esa fuerza superior en la que creo, que nos ayuda a seguir adelante, sin importar los obstáculos ni las pruebas que nos imponga la vida, quien me regaló a mi familia, amigos y todas las personas que me rodean y que contribuyen en mi realización integral, quien me regala cada amanecer y por sobre todo quien me da el entendimiento para poder enfrentar cada reto, meta y propósito en mi caminar.

**A mi madre**, Graciela Rivas Girón, cuando no tengo a quien acudir, sé que puedo contar contigo, cuando muchas puertas se me cierran, tu puerta siempre está abierta, cuando todo se me pone difícil ahí estas tu a mi lado diciéndome que todo saldrá bien, gracias mamá por todo lo que has hecho por mí, por encomendarme en tus oraciones y pedirle siempre a Dios que me ayude cada día a ser mejor como persona, por estar aquí aun en la distancia dándome tu apoyo incondicional para poder superarme, a ella a quien amo tanto de nuevo gracias.

**A mis hermanos**, Mairon Abilio Urrutia Rivas, Maira Yanira Urrutia Rivas, Magda Elcira Urrutia Rivas, Mauricio Andrés Urrutia Rivas, aunque a veces nos equivoquemos y causemos dolor a las personas que están cerca de nosotros, hay un vínculo que jamás se podrá romper por más grande que sea la herida y equivocación y es el vínculo de la sangre que une a los hermanos, por eso aunque estemos unos al lado de otros y otros a kilómetros de distancia, les agradezco no solo por estar presentes aportando buenas cosas a mi vida, sino por los grandes momentos de felicidad, unidad y de diversas emociones que siempre me han dado, los amo con mi corazón.

**German Santos Granados**, director de mi trabajo, por brindarme esta oportunidad, por sus valiosos aportes, dedicación, confianza depositada en mí. Muchas veces el tiempo transcurre muy rápidamente, pero descubres que no solo hay conocimiento, sino también hay personas con gran calidad humana. Gracias por brindarme todo lo necesario para culminar mi trabajo de grado.

A todos de nuevo, gracias.

## **Resumen**

La planeación del recurso hídrico, asociada al uso y cambio de uso del suelo en las cuencas hidrográficas, hoy en día representa un tema de gran importancia para los administradores de los recursos naturales.

En el caso del presente estudio, se empleó el modelo hidrológico ArcSWAT para la modelación del ciclo hidrológico de la cuenca alta del río San Juan ubicada en el departamento del Chocó.

La implementación de este modelo permitió tener de manera rápida una idea del comportamiento del ciclo hidrológico en la cuenca, bajo diferentes escenarios de deforestación, los cuales son producto de la actividad minera (extracción principalmente de oro, plata y platino).

El modelo utiliza un número de variables espaciales (en forma de mapas raster como el DEM de la cuenca, mapa de uso de suelos, mapa tipo de suelos) y temporales (en forma de serie de datos de precipitación y de temperaturas máximas y mínimas diarias), para reproducir los diversos fenómenos hídricos que se presentan al interior de una cuenca.

Cabe resaltar que el modelo no fue calibrado previamente, por ende los resultados que aquí se presentan no corresponden a la realidad, simplemente obedecen a un ejercicio con fines académicos, para entender el funcionamiento del modelo SWAT.

## Índice general

1.	INTRODUCCIÓN .....	15
1.1.	ANTECEDENTES .....	15
1.2.	JUSTIFICACIÓN .....	16
1.3.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	17
1.4.	OBJETIVOS.....	18
1.4.1.	Objetivo general.....	18
1.4.2.	Objetivos específicos .....	18
2.	ESTADO DEL ARTE.....	19
2.1.	CONCEPTOS GENERALES DE CUENCAS .....	19
2.1.1.	Características de la cuenca .....	19
2.1.2.	Definición de cuencas hidrológicas.....	19
2.2.	CICLO HIDROLÓGICO .....	20
2.3.	INFORMACIÓN CLIMATOLÓGICA .....	22
2.3.1.	Temperatura.....	¡Error! Marcador no definido.22
2.3.1.1.	Temperatura media diaria, $T_{medijk}$ .....	¡Error! Marcador no definido.22
2.3.1.2.	Temperatura media mensual del año k, $T_{medjk}$ .....	23
2.3.1.3.	Temperatura media mensual, $T_{medj}$ .....	23
2.3.1.4.	Temperatura media anual del año k, $T_{medk}$ .....	23
2.3.2.	Precipitación.....	23
2.3.2.1.	Precipitación diaria, $P_{rijk}$ .....	23
2.3.2.2.	Precipitación mensual en el año de k, $P_{rijk}$ .....	24
2.3.2.3.	Precipitación media mensual, $P_{rj}$ .....	24
2.3.2.4.	Precipitación anual, $P_{rk}$ .....	24
2.3.2.5.	Precipitación media anual, $P_{rannual}$ .....	24
2.3.3	Evaporación.....	25
2.3.1.1.	Evaporación mensual.....	25
2.3.4.	Evapotranspiración.....	25
2.3.4.1.	Demanda evapotranspirativa.....	25
2.4.	MODELOS HIDROLÓGICOS .....	26
2.4.1.	Definición de modelo hidrológico .....	26

2.4.2.	Importancia de los modelos.....	26
2.4.3.	Objetivos de un modelo hidrológico .....	27
2.4.4.	Clasificación de los modelos hidrológicos .....	27
2.4.4.1.	Modelos Estocásticos .....	28
2.4.4.2.	Modelos Determinísticos .....	28
2.4.4.3.	Modelos de sistemas .....	31
2.5.	APLICACIÓN DE MODELOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS .....	31
2.6.	SOFTWARE .....	33
2.6.1.	ArcGis 10.1 .....	33
2.6.2.	Modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) .....	33
2.6.2.1.	Aspectos generales del modelo SWAT .....	33
2.6.2.2.	Objetivos del modelo SWAT .....	34
2.6.2.3.	Componentes del modelo SWAT. ....	35
2.6.2.3.1.	Hidrología .....	35
2.6.2.3.1.1.	Escurrimiento superficial.....	36
2.6.2.3.1.1.1.	Volumen de escorrentía método del número de curva CN .....	36
2.6.2.3.1.1.1.1.	Ajuste de la pendiente.....	37
2.6.2.3.1.2.	Percolación.....	37
2.6.2.3.1.5.	Flujo de agua subterráneo.....	38
2.6.2.3.1.5.	Evapotranspiración.....	38
2.6.2.3.1.5.1.	Evapotranspiración método de Penman- Monteith.....	38
2.6.2.3.1.6.	Pérdidas por transmisión .....	39
2.6.2.3.1.67.	Cuerpos de agua.....	39
2.6.2.3.2.	Clima .....	39
2.6.2.3.2.1.	Precipitación.....	39
2.6.2.3.2.2.	Temperatura del aire y radiación solar .....	39
2.6.2.3.2.3.	Velocidad del viento y humedad relativa .....	39
2.6.2.3.3.	Sedimentación .....	41
2.6.2.3.3.1.	Producción de sedimentos .....	41
2.6.2.3.3.2.	Temperatura del suelo.....	41
2.6.2.3.3.3.	Modelo de crecimiento del cultivo .....	41
2.6.2.3.3.4.	Nutrientes.....	41
2.6.2.3.3.5.	Nitrógeno .....	41

2.6.2.3.3.6.	Fosforo .....	42
2.6.2.3.4.	Pesticidas.....	43
2.6.2.3.5.	Manejo de cultivo.....	43
2.6.2.3.5.1	Labranza y residuos.....	44
2.6.2.3.5.2	Riego.....	44
2.6.2.3.6.	Componentes de transporte .....	44
2.6.2.3.6.1.	Transporte de agua en los cauces .....	44
2.6.2.3.6.2.	Transporte de sedimentos en cauces. ....	44
2.6.2.3.7.	Tránsito de agua y sedimentos en almacenamientos .....	44
2.6.2.3.7.1.	Balance y transporte de agua en almacenamientos .....	44
2.6.2.3.7.2.	Transporte de sedimentos en almacenamientos .....	45
2.7.	FUENTES DE INFORMACIÓN.....	45
2.7.1.	Información geográfica .....	45
2.7.2.	Modelo Digital de altimetría. ....	45
2.7.3.	Información climatológica.....	45
2.8.	INTERFASE CON SISTEMAS DE INFORMACIÓN GROGRÁFICA .....	45
3.	MARCO METODOLÓGICO .....	46
3.1.	TIPO DE INVESTIGACIÓN .....	46
3.2.	INFORMACIÓN BASE.....	46
3.2.1.	Zona de estudio .....	46
3.2.2.	Información metereologica .....	47
3.2.2.1.	Características climáticas de la zona.....	47
3.2.2.1.1.	Precipitación.....	48
3.2.3.	Características edáficas de la cuenca.....	59
3.2.4.	Vegetación y uso de suelo en la cuenca .....	54
3.3.	SECUENCIA METODOLÓGICA DE LA INVESTIGACIÓN.....	55
3.3.1.	Delimitación digital de la cuenca .....	56
3.3.2.	Evaluación de patrones de deforestacion en la cuenca.....	57
3.3.2.1.	Escenarios de cambio.....	57
3.3.2.2.	Escenarios hipotético .....	58
3.3.3.	Alimentación de modelo SWAT .....	59
3.3.4.	Modelación hidrólógica .....	63

<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>65</b>
<b>4.1. SIMULACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO .....</b>	<b>65</b>
<b>4.1.1. Análisis de sencibilidad del modelo .....</b>	<b>66</b>
<b>4.1.2. Análisis de escenarios de cambio propuestos .....</b>	<b>68</b>
<b>4.1.3. Análisis de escenario de expansión minera.....</b>	<b>71</b>
<b>4.1.4. Análisis general de los resultados .....</b>	<b>73</b>
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>76</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>78</b>

## Índice de tablas

<b>Tabla 1. Ventajas y desventajas de modelos hidrológicos.....</b>	<b>29</b>
<b>Tabla 2. Información de las estaciones .....</b>	<b>49</b>
<b>Tabla 3. Tipos de suelo y superficie ocupada .....</b>	<b>50</b>
<b>Tabla 4. Tipos de usos y coberturas del suelo .....</b>	<b>55</b>
<b>Tabla 5. Parámetros variados en la prueba se sensibilidad .....</b>	<b>66</b>
<b>Tabla 6. Valor de CN2 para análisis de sensibilidad.....</b>	<b>67</b>
<b>Tabla 7. Valor de caudal simulados para diferentes CN2.....</b>	<b>67</b>
<b>Tabla 8 Distribución de la cobertura en la cuenca 1990 - 2000 .....</b>	<b>68</b>
<b>Tabla 9. Distribución de la cobertura en la cuenca 2000 - 2010 .....</b>	<b>69</b>
<b>Tabla 10. Valores anuales de variables hidrológicas el escenario de cambio 1990 -2000 .....</b>	<b>69</b>
<b>Tabla 11. Valores anuales de variables hidrológicas el escenario de cambio 2000 -2010 .....</b>	<b>71</b>
<b>Tabla 12. Distribución de la cobertura en la cuenca, expansión minera .....</b>	<b>72</b>
<b>Tabla 13. Valores anuales de variables hidrológicas para el escenario de expansión minera. ..</b>	<b>72</b>

## Índice de Figuras

Figura 1. Deforestación por minería en la cuenca media del rio San Juan. ....	17
Figura 2. Esquema de una cuenca. ....	20
Figura 3. Ciclo hidrológico. ....	21
Figura 4. Clasificación de los modelos hidrológicos. ....	27
Figura 5. Representación del ciclo hidrológico en SWAT. ....	35
Figura 6. Componentes hidrológicos del modelo SWAT. ....	36
Figura 7. Simulación del movimiento de agua por SWAT. ....	40
Figura 8. División del nitrógeno en SWAT. ....	42
Figura 9. División del fosforo en SWAT. ....	42
Figura 10. Transporte del pesticida en SWAT. ....	43
Figura 11. Localización de la cuenca. ....	47
Figura 12. Valores promedias de precipitación de las estaciones. ....	48
Figura 13. Valores promedias de temperatura de las estaciones. ....	49
Figura 14. Distribución de los suelos en la cuenca. ....	51
Figura 15. Distribución de suelos en la cuenca media del Rio San Juan. ....	521
Figura 16. Distribución de los usos y coberturas del suelo. ....	555
Figura 17. Modelo digital de Elevación de la cuenca media del rio San Juan. ....	566
Figura 18. Escenario de cobertura de la cuenca para el periodo 1999 – 2000. ....	577
Figura 19. Escenario de cobertura de la cuenca para el periodo 2000 – 20010. ....	58
Figura 20. Escenario Expansión minera. ....	59
Figura 21. Tabla de entrada de datos para cada estación. ....	60
Figura 22. Información de precipitación diaria, formato txt. ....	61
Figura 23. Tabla de localización de la estación, formato txt. ....	61
Figura 24. Tabla de entrada de datos de suelo. ....	692
Figura 25. Tabla de entrada de datos de coberturas vegetales. ....	63
Figura 26. Barra de menú de la interface ArcGis. ....	63
Figura 27. Proceso y despliegue de salida de la interface ArcSWAT. ....	64
Figura 28. Subcuencas generadas por ArcSWAT. ....	65
Figura 29. Reporte de subcuencas. ....	66

<b>Figura 30. Representación gráfica de caudales de escorrentías simulados para diferentes variaciones de CN2. ....</b>	<b>68</b>
<b>Figura 31. Representación gráfica de los valores de las variables del ciclo hidrológico generado por SWAT para el escenario de 1990 – 2000.....</b>	<b>69</b>
<b>Figura 32. Variables hidrológicas medias mensuales para escenario 1990 – 2000 ..... </b>	<b>70</b>
<b>Figura 33. Representación gráfica de los valores de las variables del ciclo hidrológico generado por SWAT para el escenario de 2000 – 2010.....</b>	<b>70</b>
<b>Figura 34. Variables hidrológicas medias mensuales para escenario 2000 - 2010..... </b>	<b>71</b>
<b>Figura 35. Representación gráfica de los valores de las variables del ciclo hidrológico generado por SWAT para el escenario de expansión minera.....</b>	<b>72</b>
<b>Figura 36. Variables hidrológicas medias mensuales para escenario de expansión minera ....</b>	<b>73</b>
<b>Figura 37. Representación gráfica de caudales de escorrentía simulados para los dos escenarios .....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 38. Caudales simulados para los tres escenarios .....</b>	<b>74</b>

## Índice de anexos

<b>Anexo 1. Localización de la cuenca alta del Rio San Juan.....</b>	<b>81</b>
<b>Anexo 2. Mapa de suelos generado por SWAT de cuenca alta del Rio San Juan.....</b>	<b>82</b>
<b>Anexo 3. Mapa cobertura vegetal 1990 – 2000 de cuenca alta del Rio San Juan.....</b>	<b>83</b>
<b>Anexo 4. Mapa cobertura vegetal 2000 – 2010 de cuenca alta del Rio San Juan.....</b>	<b>84</b>
<b>Anexo 5. Mapa de escenario hipotético generadas por SWAT.....</b>	<b>85</b>
<b>Anexo 6. Mapa pendientes generado por SWAT de cuenca alta del Rio San Juan.....</b>	<b>86</b>
<b>Anexo 7. DEM de cuenca alta del Rio San Juan. ....</b>	<b>87</b>
<b>Anexo 8. Estadística climática de la estación NOANAMA. ....</b>	<b>858</b>
<b>Anexo 9. Estadística climática de la estación BEBEDO .....</b>	<b>889</b>
<b>Anexo 10. Estadística climática de la estación ISTMINA .....</b>	<b>90</b>
<b>Anexo 11. Factor fisiotécnico de las coberturas de la cuenca alta del rio San Junan.....</b>	<b>91</b>
<b>Anexo 12. Factor fisiotécnico de las coberturas de la cuenca alta del rio San Junan.....</b>	<b>92</b>
<b>Anexo 13. Factor edáfico de la cuenca media del rio San Juan.....</b>	<b>93</b>
<b>Anexo 14. Factor edáfico de la cuenca media del rio San Juan.....</b>	<b>94</b>
<b>Anexo 15. Salida general del proceso de simulación en la cuenca alta del rio San juan escenario 1990 - 2000.....</b>	<b>95</b>
<b>Anexo 16. Salida general del proceso de simulación en la cuenca alta del rio San juan escenario 2000 - 2010.....</b>	<b>96</b>
<b>Anexo 17. Salida general del proceso de simulación en la cuenca alta del rio San juan escenario expansión minera. ....</b>	<b>97</b>

## 1. INTRODUCCIÓN

En Colombia, como en el mundo entero, el deterioro de cuencas, además de problemas asociados, con inundaciones y sequías pueden deberse a diferentes factores y uno de ellos tiene que ver con la cobertura vegetal. Esta influye de alguna manera en la respuesta hidrológica de cuencas y este efecto ha sido motivo de estudio durante mucho tiempo (Duque, 1993).

La cuenca del río San Juan está ubicada en el departamento del Chocó y es la más importante de la vertiente del pacífico colombiano, cuenta con una superficie de 15.000 kilómetros cuadrados, ubicados entre la cordillera occidental y las colinas del Litoral Pacífico.

En el presente trabajo se muestra los resultados de la aplicación del software SWAT (Soil and Water Assessment Tool), el cual es un modelo dinámico en espacio y tiempo, para analizar los efectos potenciales de las alteraciones del ciclo hidrológico en la cuenca media del río San Juan bajo diferentes escenarios de deforestación derivados de la actividad minera que se viene realizando incontroladamente.

Cabe resaltar que el modelo no fue calibrado previamente y muchas de las variables utilizadas fueron supuestas, por ende los resultados que aquí se presentan no corresponden a la realidad, simplemente obedecen a un ejercicio con fines académicos, para entender el funcionamiento del modelo SWAT e inferir en el comportamiento de algunas variables del ciclo hidrológico, ante el aumento de áreas deforestadas.

### 1.1. ANTECEDENTES

La modelación hidrológica comienza a partir del siglo XIX, utilizándose en ese entonces para el diseño de canales, redes de drenaje, presas, puentes y sistemas de distribución de aguas. Hasta mediados del siglo XX, la modelación hidrológica se limitó a tratar de explicar mediante expresiones matemáticas simples, los factores involucrados en los procesos del ciclo hidrológico. En la década de los 60, con la revolución digital se realizó el primer modelo para representar el ciclo hidrológico Stanford Watershed Model SWM de Crawford y Linsley en 1966. A partir de entonces, debido a la aparición de nuevas herramientas informáticas en hidrología, fue posible modelar la cuenca hidrológica a lo largo de extensos periodos de tiempo (Singh, 1995).

El desarrollo de los sistemas de información geográfica en los últimos tiempos, ha permitido el avance de la hidrología, con la aparición de varios modelos hidrológicos, entre ellos los físicos, en los cuales se representa a escala real la cuenca y matemáticos que dependen de ecuaciones empíricas o conceptuales para representar la respuesta hidrológica de la cuenca, con ventajas y desventajas unos sobre otros y también por su alto costo económico.

El modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool), es un modelo matemático para el estudio de cauces, ríos y cuencas hidrográficas, desarrollado por el Sr. Jeff Arnold para el USDA Agricultural Research Service (ARS); con la finalidad de evaluar el impacto que tienen las diferentes prácticas de manejo de suelos sobre la producción de agua y sedimentos, así como los rendimientos agrícolas y el uso de químicos, en grandes y complejas cuencas hidrológicas con diferentes usos y tipos de suelos, así como diversos manejos durante largos periodos de tiempo.

L. A., & Hernández-Saucedo (2012) emplearon el modelo SWAT en la cuenca alta del río Catamayo, ubicada en la zona fronteriza entre Ecuador y Perú, para la estimación de caudales y sedimentos en una zona explotada en forma tradicional ineficiente con un uso de los recursos naturales caracterizado por una fuerte presión sobre ellos, que provoca una degradación, especialmente en la cubierta vegetal

que se traduce en la erosión de los suelos, la disminución de su fertilidad y el arrastre de sólidos hacia los cursos de agua.

Hurtado, P et al. (2014) modelaron con SWAT dos cuencas correspondientes al río Nazas – Rodeo y Rroyo Naitcha, ubicadas en la parte media de la región hidrológica 36 (México). Fue utilizado para analizar el impacto del cambio en la superficie de vegetación sobre el escurrimiento y obtuvieron escurrimientos muy similares en los 5 años de estudio. Sin embargo, en general se registraron incrementos en el volumen escurrido después de realizar cambios en cuanto al aumento de superficie de matorral y disminución en pastizales, principalmente.

Villablanca (2014) usó el modelo SWAT para estudiar los efectos de cambios de uso del suelo en la hidrología, transporte de sedimento fino y en las fuentes de aporte de sedimentos en cuencas experimentales del sur de Chile. Los resultados mostraron que el modelo SWAT simuló, para Los Ulmos Control, “bien” ( $R^2 = 0,79$ ; NSE = 0,56) a “muy bien” ( $R^2 = 0,7$ ; NSE = 0,66) para los períodos de calibración y validación respectivamente mientras que en Los Ulmos Tratamiento los resultados fueron “aceptables” ( $R^2 = 0,86$ ; NSE = 0,41) en la validación y “buenos” ( $R^2 = 0,78$ ; NSE = 0,75), en la calibración para el nuevo uso de suelo. Los coeficientes  $R^2$  y el coeficiente Nash-Sutcliffe, son indicadores que permiten medir el ajuste entre los datos observados y simulados. La carga de sedimento fino simulado en Los Ulmos Control (2,092 T/ha) resultó mayor al medido (1,183 T/ha), mientras que en Los Ulmos Tratamiento los valores simulados en el período de pre-cosecha (0,848 T/ha) y post-cosecha (1,505 T/ha) fueron mayores (0,309 T/ha) y menores (2,196 T/ha) que los medidos respectivamente. SWAT permitió identificar solo la red hídrica como zona de aporte de sedimentos.

En general, SWAT ha sido utilizado para simular procesos hidrológicos en cuencas de todo el mundo estimando la producción de agua y sedimentos en diversos escenarios.

## 1.2. JUSTIFICACIÓN

El conocimiento de los procesos hidrológicos y sus componentes precipitación, intercepción, escurrimiento, evaporación, transpiración y otros procesos subsuperficiales, al igual que los cambios que ocurren sobre las cuencas hidrográficas, permiten establecer su grado de afectación, su comportamiento y predecir las tendencias de cambio; conocer esta información resulta muy útil en los procesos de planificación y toma de decisiones en el corto, mediano y largo plazo en las cuencas hidrográficas.

Cada uno de estos componentes presenta una gran variación espacial y temporal, y juegan un papel crítico en diversos procesos físicos, químicos y biológicos que regulan el sistema terrestre, donde la actividad humana es inseparable de los eventos naturales (Gayaso et al., 2000).

En las últimas décadas el impacto de las actividades humanas, se ha convertido en uno de los principales agentes transformadores de los ecosistemas existentes en las cuencas (Lambin et al., 2001).

Actualmente se reconoce que el hombre altera el ciclo hidrológico a escala local y global. El cambio de la cobertura vegetal y del uso del suelo asociado a las actividades productivas y del desarrollo socio económico de las regiones, como la expansión de la agricultura, la urbanización, la contaminación entre otras, tienen una profunda influencia en los procesos hidrológicos, que es necesario investigar tanto en cuencas pequeñas como a nivel regional (Sahagian, 2000; Sharma et al., 2000).

A través del uso del suelo se produce lo necesario para la supervivencia de la humanidad; sin embargo, el impacto derivado de este proceso ordinariamente se relaciona con la deforestación y fragmentación de los ecosistemas, la desertización, la alteración de los ciclos hidrológicos, la pérdida de la diversidad biológica y el incremento de la vulnerabilidad de los grupos humanos (Lambin et al., 2001).

Autores como Geist y Lambin, 2002, sugieren que la creación de infraestructura, la presión demográfica, la tenencia de la tierra, la intensificación del uso del suelo, el acceso a los mercados y las actividades de desarrollo económicas y productivas de los pueblos, son algunas de las causas que evidencian la transformación de la superficie terrestre por parte de la acción humana a través del tiempo.

En el caso del presente trabajo, se pretende simular el ciclo hidrológico mediante la utilización del modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool), en la cuenca alta del río San Juan, ubicada en el departamento del Chocó, donde los últimos años el acelerado crecimiento de la extracción de minerales del suelo como, oro, plata, platino, han generado varios cambios importantes y deterioro de la cobertura vegetal de la cuenca.

### 1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Chocó es un departamento rico en minerales como el oro, platino y plata, por tanto la minería es una de las industrias claves para el desarrollo de la economía de sus pobladores. Sin embargo, esta actividad se ha convertido en una de las principales causantes del deterioro ambiental de sus cuencas hidrográficas ya que todas las operaciones mineras, que implican la extracción de minerales de la corteza terrestre, tienden a tener impactos notables sobre el medio ambiente, el paisaje y el ciclo del agua (Bell et al., 2001).

“Esta degradación ambiental (**figura 1**) en la cuenca media del río San Juan se ve reflejada en la tala indiscriminada de bosques y destrucción de suelos a una tasa promedio de 4 hectáreas/año por entable minero, destrucción de fuentes hídricas y cambio de cauce de ríos y quebradas, por el aporte promedio de 3.100 toneladas/ año de sedimentos por entable” CODECHOCO, 2012.

**Figura 1.** Deforestación por minería en la cuenca media del río San Juan.



Fuente: <http://www.eltiempo.com/noticias/mineria-Colombia>. Fotografía MAVDT, 2009.

Los municipios de Tado, Istmina, Condoto y Medio San Juan, hacen parte de esta cuenca y concentran las actividades agrícolas y mineras de mayor impacto regional y en general, los principales proyectos de desarrollo del departamento. Por consiguiente, esta propuesta de investigación, que pretende analizar los efectos ocasionados por el cambio de uso del suelo, derivados de la actividad minera y ver su incidencia en los regímenes hidrológico de la cuenca es de gran importancia y relevancia

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. Objetivo general**

El objetivo del estudio se centra en la implementación del modelo hidrológico SWAT para reproducir el ciclo hidrológico de la cuenca alta del río San Juan, ante diferentes escenarios de cambio de uso de suelo producto de la actividad minera.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Entender el funcionamiento de las herramientas de simulación del modelo hidrológico SWAT.
- Analizar el proceso de deforestación de la actividad minera en la zona de estudio durante 1990 – 2010.
- Evaluar los efectos de los cambios en el uso del suelo producidos por la minería en la zona de estudio.
- Evaluar los regímenes hídricos ante un escenario hipotético de expansión minera.

## 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1. CONCEPTOS GENERALES DE CUENCAS

Algunas de las características que influyen en los escurrimientos superficiales se pueden agrupar en: **a)** factores geométricos de la cuenca como son sus tamaños, forma y pendiente, **b)** factores físicos de la superficie del terreno como son las características del suelo, la capacidad de almacenamiento superficial, la cubierta vegetal, el uso de la tierra, y otros. Ambos grupos de factores deben ser abordados en los diversos estudios sobre cuencas hidrológicas.

Una cuenca es un espacio geográfico cuyos aportes son alimentados exclusivamente por la precipitación y cuyos excesos de agua o de sedimentos, son transportados hasta un punto espacial único que puede ser: una desembocadura, una estación de aforo, o un punto arbitrario (Llamas, 1993).

Una cuenca se delimita por una línea divisoria imaginaria que generalmente corresponde a la cresta que separa dos vertientes, teniendo en cuenta el drenaje superficial, pero en algunos casos se debe considerar la línea definida por las elevaciones más altas de la capa freática (almacenamiento de agua gravitacional en el suelo – agua libre en el suelo).

Sin embargo, dado que dicho límite generalmente no difiere mucho del que está determinado por el drenaje superficial y cuando difiere un poco es difícil de detectar, se suele considerar como cuenca la determinada por el límite de aguas superficiales.

Dos cuencas sometidas a condiciones climáticas similares, pueden tener regímenes de flujo totalmente distintos. Esta diferencia se debe principalmente a las diversas características físicas de ambas. Aunque resulta evidente que factores como el tipo de suelo y el espesor de la capa permeable ejercen un gran efecto sobre el régimen de flujo, la fisiografía puede ser importante en la respuesta de la cuenca a las precipitaciones.

#### 2.1.1. Características de la cuenca

La unidad fundamental para la gestión de los recursos hídricos, es la cuenca hidrológica.

La cuenca hidrológica está integrada por subcuenca y estas últimas están integradas por microcuencas, sin embargo, aunque es considerada la unidad fundamental en ocasiones es preciso dividirla en subcuencas o microcuencas para facilitar su estudio o aumentar el grado de precisión en los resultados.

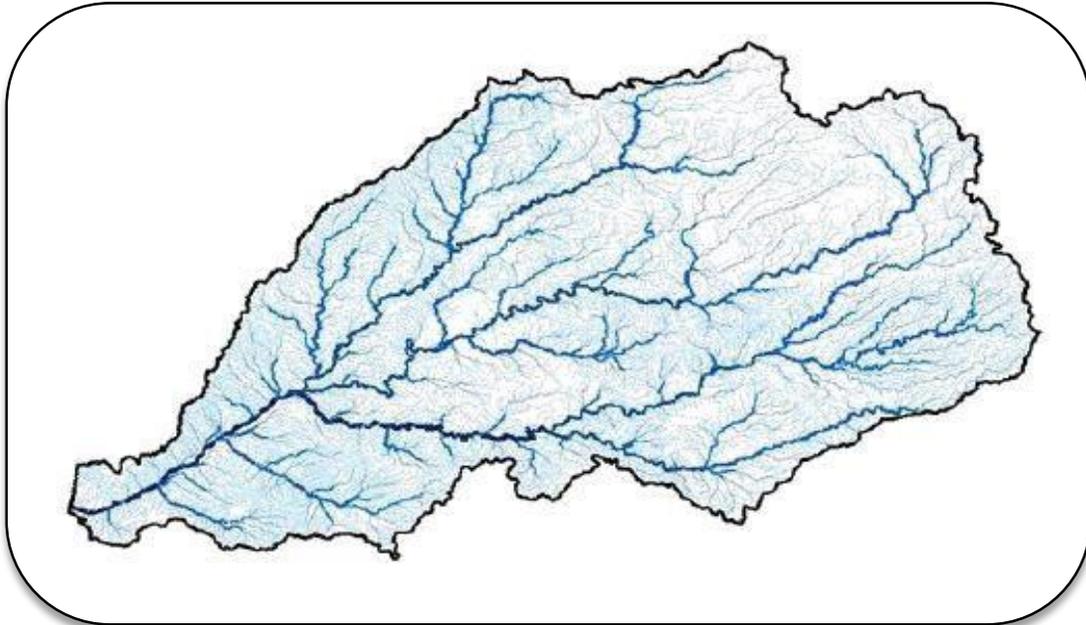
#### 2.1.2. Definición de cuencas hidrológicas

CONAGUA (2006), señala la cuenca hidrológica es la unidad del terreno, diferenciada de otras unidades, normalmente delimitadas por una parte aguas o divisorias de las aguas “aquella línea poligonal formada por los puntos de mayor elevación en dicha unidad” en donde ocurre en distintas formas, y esta se almacena o fluye hasta un punto de salida que puede ser el mar u otro cuerpo receptor interior a través de una red hidrográfica de cauces que convergen en uno principal, o bien el territorio donde las aguas forman una unidad autónoma o diferenciada de otras, aun sin que desemboquen en el mar.

La cuenca hidrológica es el área geográfica de donde el agua fluye hacia un sitio y está determinada por la forma de la tierra (topografía) puede ser delimitada en base a las curvas de nivel en los mapas topográficos.

Ven Te Chow et al (1994) señala que la cuenca hidrográfica es una superficie de tierra que drena hacia una corriente en un lugar dado y se compone de líneas divisorias que separa la superficie de la tierra cuyo drenaje fluye hacia un río de las demás superficies de la tierra.

**Figura 2.** Esquema de una cuenca



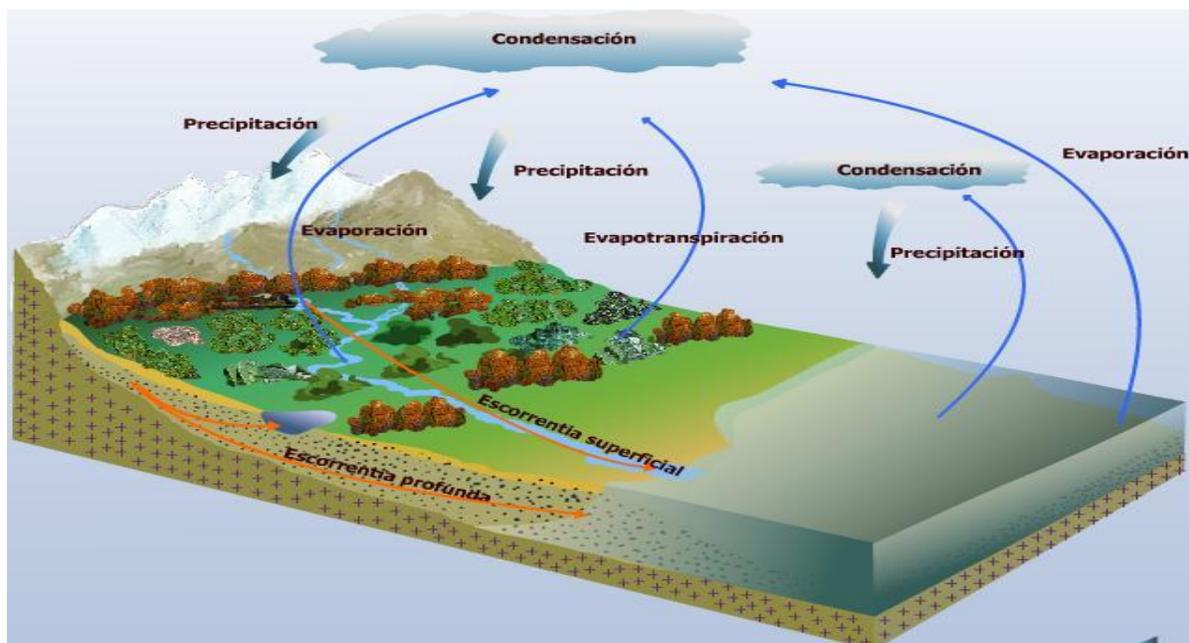
Fuente: [http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/topografia/regiones\\_hidrograficas.aspx](http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/topografia/regiones_hidrograficas.aspx)

## **2.2. CICLO HIDROLÓGICO.**

El ciclo del agua o ciclo hidrológico es la circulación general del agua en la tierra, el cual se define como: “sucesión de etapas que atraviesa el agua al pasar de la atmosfera a la tierra y volver a la atmosfera”, Aranda. (1984).

El ciclo hidrológico representado en la **figura 3**, describe al movimiento general del agua a través de la atmosfera, la biosfera y la litosfera en forma de gas, líquido o sólido, ascendente por evaporación y descendente primero por las precipitaciones y después en forma de escorrentía superficial y subterránea. El ciclo hidrológico no tiene principio ni fin y sus diversos procesos ocurren en forma continua a través de la energía proveniente del sol y de la gravedad (Chow *et al.*, 1993).

**Figura 3. Ciclo hidrológico**



Fuente: [http://pendientedemigracion.ucm.es/info/diciex/proyectos/agua/el\\_ciclo\\_del\\_agua.html](http://pendientedemigracion.ucm.es/info/diciex/proyectos/agua/el_ciclo_del_agua.html)

La evapotranspiración es una combinación de intercepción, transpiración de las plantas y evaporación del suelo. La precipitación puede ocurrir en forma de lluvia, granizo, nieve o neblina. La vegetación detiene la caída de parte de la precipitación directamente al suelo; a esto se denomina intercepción. La precipitación que es interceptada puede luego transformarse en escorrentía o evaporarse.

La intercepción es controlada por el clima y factores de la vegetación. Los factores climáticos que incluyen son la intensidad, duración, frecuencia y el tipo de precipitación; los factores de vegetación incluyen la morfología de la vegetación, su densidad, fisiología y su crecimiento. Estos factores conducen a diferenciar el balance hídrico en función del tipo de vegetación (Llamas, 1993).

El agua se evapora desde ríos, lagos y del suelo. Las plantas transpiran agua durante el proceso de fotosíntesis y respiración. Al conjunto constituido por la evaporación directa desde el suelo, cuerpos de agua, y la transpiración de las plantas se llama evapotranspiración. El volumen total de evapotranspiración en superficies cubiertas con vegetación depende del tipo de vegetación, factores climáticos y de factores del suelo (Llamas, 1993). La tasa de transpiración varía con el tipo de vegetación debido a las diferencias en el área foliar, además de la profundidad y densidad del sistema de raíces.

Cuando la precipitación alcanza la tierra y su intensidad es baja y/o el suelo no está saturado, una significativa proporción entra al suelo como infiltración. A cierto nivel de humedad del suelo, la gravedad forzarán a una porción del agua a descender a través del suelo. Dependiendo del suelo y las características de la precipitación, el agua en la zona no saturada puede permanecer disponible para el uso de las plantas o escurrir en forma subterránea. Esta puede finalmente llegar a la descarga como parte del flujo base. Alternativamente, el agua puede continuar escurriendo verticalmente precolándose hasta la zona saturada.

La descarga de la zona saturada ocurre donde el nivel freático interseca con la superficie del suelo. Este es el principal componente del flujo base.

La escorrentía superficial se origina si la precipitación es mayor que la infiltración del suelo. Esto puede ocurrir porque la lluvia es intensa o el suelo está saturado. El flujo de escorrentía finalmente llega al océano (Keenan et al., 2004).

El balance hídrico en cualquier sistema considera las entradas, las salidas y la variación del almacenamiento, y se puede representar según la siguiente ecuación:

$$P = Q + EVT + \Delta S$$

$P$ : Representa la forma de ingreso de agua al sistema cuenca

$Q$ : Representa las salidas del sistema

$EVT$ : Representa la evapotranspiración en la cuenca

$\Delta S$ : Representa las variaciones en el almacenamiento de agua

Esta ecuación es la expresión básica de la hidrología y cada una de sus variables es obtenida a través de instrumentos en terreno o derivadas a través de algún método cuya exactitud está ligada a su complejidad y a los demás datos utilizados para su deducción.

## 2.3. INFORMACIÓN CLIMATOLÓGICA

Es el conjunto de las observaciones de temperatura, precipitación, evaporación, etc., obtenidas durante años en una estación meteorológica, forma una vasta serie de datos por lo que es indispensable resumir y coordinar esta similitud de cifras con algunos elementos lo más pequeño posible, pero sin embargo, suficiente para caracterizar la estación.

### 2.3.1. Temperatura

#### 2.3.1.1. Temperatura media diaria, $T_{med_{ijk}}$

Se refiere a la temperatura media presentada durante el transcurso de un día en específico.

$$T_{med_{ijk}}$$

Donde:

$T_{med}$  → Temperatura media,  $^{\circ}C$

$i$  → Índice del día ( $i = 1, 2, 3, \dots, NDM_j$ ),

$j$  → Número de meses ( $j = 1, 2, 3, \dots, 12$ ),

$k$  → Número de años ( $k = 1, 2, 3, \dots, n$ ),

$NDM_j$  → Número de días del mes  $j$ ,

$n$  → Número de años de registro.

### 2.3.1.2. Temperatura media mensual del año k, $T_{med_{jk}}$

Esta variable se obtiene a partir del promedio de los registros diarios de temperatura mediante un mes y un año en específico matemáticamente se expresa de la siguiente manera.

$$T_{med_{jk}} = \frac{\sum_{i=1}^{NDM_j} T_{med_{jk}}}{NDM_j}$$

### 2.3.1.3. Temperatura media mensual, $T_{med_j}$

Esta se obtiene de una serie de registros históricos de temperatura medias mensuales.

$$T_{med_j} = \frac{\sum_{k=1}^n T_{med_k}}{n}$$

### 2.3.1.4. Temperatura media anual del año k, $T_{med_k}$

Se obtiene a partir de una serie de registros históricos de la temperatura media anual del año k mediante la siguiente ecuación.

$$T_{med_{anual}} = \frac{\sum_{k=1}^n T_{med_k}}{n}$$

## 2.3.2. Precipitación

Kazmann (1975) menciona que la precipitación representa el producto de circunstancias naturales y puede considerarse entre la clase de datos que son de los más “limpios” usados por los hidrólogos, además una variedad de métodos y análisis estadísticos pueden aplicarse en seguridad y se necesitan pocas o unas cuantas correcciones arbitrarias.

La precipitación se mide en altura o lámina de agua expresada en milímetros. La información se presenta en diversas formas dependiendo de la dependencia que las elabora.

### 2.3.2.1. Precipitación diaria, $Pr_{ijk}$

Se refiere a la cantidad total de lluvia precipitada en un periodo de 24 horas.

$$Pr_{ijk}$$

Donde:

- Pr → Precipitación, mm  
i → Índice del día ( $i = 1, 2, 3, \dots, NDM_j$ ),  
j → Número de meses ( $j = 1, 2, 3, \dots, 12$ ),  
k → Número de años ( $k = 1, 2, 3, \dots, n$ ),  
NDM<sub>j</sub> → Número de días del mes j,  
n → Número de años de registro.

### 2.3.2.2. Precipitación mensual en el año de k, Pr<sub>ijk</sub>

Es la cantidad de lluvia acumulada en un periodo de un mes, es decir, la suma de los registros diarios de precipitación durante un mes de un año en específico.

$$Pr_{jk} = \sum_{i=1}^{NDM_j} Pr_{ijk}$$

### 2.3.2.3. Precipitación media mensual, Pr<sub>j</sub>

Esta se obtiene a partir de una serie de registros de precipitación mensual y es la suma de estos para un año específico, k.

$$Pr_j = \frac{\sum_{k=1}^n Pr_{jk}}{n}$$

### 2.3.2.4. Precipitación anual, Pr<sub>k</sub>

Se obtiene a partir de los registros de precipitación mensual y es la suma de estos en específico, k.

$$Pr_k = \sum_{j=1}^{12} Pr_{jk}$$

### 2.3.2.5. Precipitación media anual, Pr<sub>anual</sub>

$$Pr_{anual} = \frac{\sum_{k=1}^n Pr_k}{n}$$

## 2.3.3. Evaporación

Es un fenómeno físico que se manifiesta como un cambio en el estado físico del agua; de líquido a vapor a la temperatura ambiente. La evaporación es el agua perdida en forma de vapor por el terreno adyacente a las plantas, por la superficie del agua o por la superficie de las hojas de las plantas.

### 2.3.3.1. Evaporación mensual.

Es la cantidad de evaporación acumulada en un periodo mensual, es decir, la suma de los registros diarios de evaporación durante un mes en un año en específico.

Matemáticamente se expresaría de la siguiente forma.

$$Ev_{jk} = \sum_{i=1}^{NDM_j} Evd_{ijk}$$

Donde:

$Ev$  → Evaporación mensual, mm,

$Evd$  → Evaporación diaria, mm,

$i$  → Índice del día ( $i = 1, 2, 3, \dots \dots NDM_j$ ),

$j$  → Número de meses ( $j = 1, 2, 3, \dots \dots 12$ ),

$k$  → Número de años ( $k = 1, 2, 3, \dots \dots n$ ),

$NDM_j$  → Número de días del mes  $j$ ,

Las otras variables de la evaporación son calculadas de manera analógica a los de la precipitación.

### 2.3.4. Evapotranspiración

La evapotranspiración, es la cantidad de agua utilizada por las plantas para realizar sus funciones de transpiración, más el agua que se evapora de la superficie del suelo en el cual se desarrolla, Martínez 1990.

Un indicador importante en la agricultura es la demanda de evapotranspiración, lo que proporciona un indicador de la demanda de riego para una región.

#### 2.3.4.1. Demanda evapotranspirativa

Se define al déficit evapotranspirativa como la diferencia relativa entre la precipitación pluvial y la evapotranspiración potencial, el cual se expresa como:

$$DET = \frac{PR - ETP}{ETP}$$

Donde:

$DET$  → Deficit evapotranspirativo, adimensional,

$PR$  → Precipitación pluvial,  $\frac{mm}{mes}$

$ETP$  → Evapotranspiración potencial,  $\frac{mm}{mes}$

En caso de que se disponga del valor de la ETP puede estimarse en forma aproximada, considerando que vale  $ETP = 0.80 Ev$ , donde  $Ev$  es la evaporación mensual media, Palacios 2005.

## **2.4. MODELOS HIDROLÓGICOS**

### **2.4.1. Definición de modelo hidrológico**

Un modelo se define como la representación de una parte de un sistema que conceptualiza las interrelaciones y respuestas de las condiciones reales, y que es capaz de hacer pronósticos bajo un conjunto de condiciones propuestas. En el ámbito de la modelación hidrológica, los modelos son representaciones de los fenómenos hidrológicos que se presentan en el ciclo del agua, éstos son aproximaciones de la realidad y en consecuencia la salida de un sistema real puede predeterminarse con cierto grado de confianza (Salgado Rabadán, J. H., & Güitrón de los Reyes).

Oropeza (1999) define modelos hidrológicos como representaciones simples de los sistemas hidrológicos reales, a partir de los cuales se estudia la relación causa – efecto de una cuenca, a través de datos de entrada y salida. A demás permite simular y predecir el comportamiento hidrológico de los procesos físicos de la cuenca.

Un modelo, es cualquier sustituto material o inmaterial de un ente, fenómeno o cosa de cuyo estudio es posible inferir, al menos bajo ciertas restricciones, el comportamiento del ente natural. El uso de modelos en lugar de los entes naturales se explica porque casi siempre el manejo del modelo resulta más económico, más cómodo y más rápido (Palacios, 1984).

### **2.4.2. Importancia de los modelos**

Los modelos empleados en simulación hidrológica pueden ser: físicos, analógicos y digitales Oropeza (1999).

Los modelos físicos utilizan iconos para la simulación, es decir, son modelos de la misma naturaleza que el ente modelado.

Los modelos analógicos utilizan materiales que cumplan leyes similares a las del sistema que se estudia.

Los modelos digitales se usan para el análisis de sistemas grandes y complejos y tiene la ventaja de su alta velocidad de operación, gracias al uso de computadoras, y no requiere el equipamiento extenso, lo cual a menudo es necesario en los modelos físicos y analógicos.

Según Benavides (1998), la importancia de los modelos reside, entre otros aspectos en la predicción de fenómenos a largo plazo en un tiempo relativamente corto, también permite obtener relaciones de causa efecto, sin haber realizado cambios en los sistemas reales.

### **2.4.3. Objetivos de un modelo hidrológico**

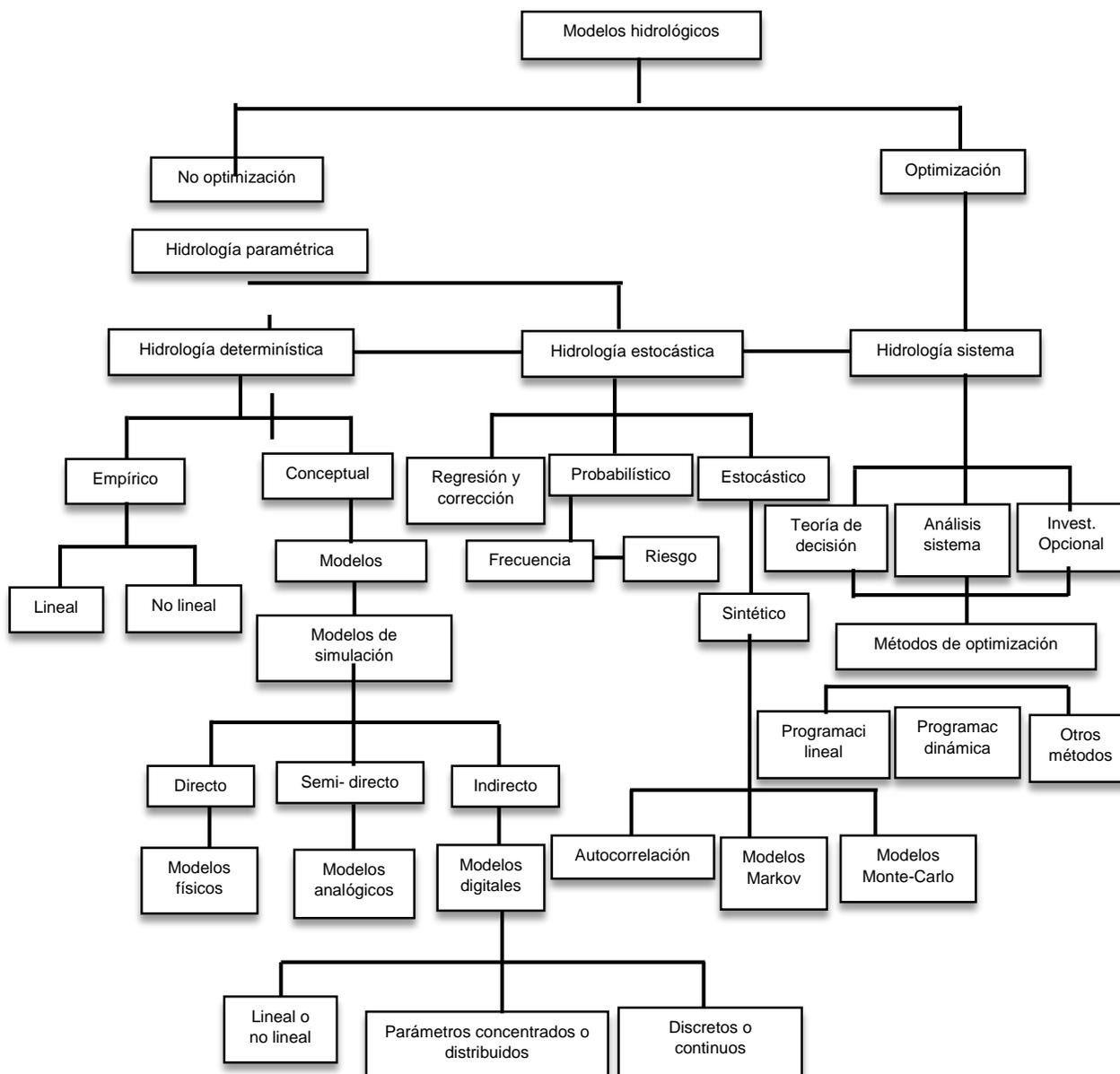
El objetivo de un modelo hidrológico es determinar con eficiencia y precisión los componentes del ciclo hidrológico en una cuenca y estimar el comportamiento y magnitud (abundancia y carencia) del agua en los fenómenos de referencia rara. El uso de los modelos hidrológicos es primordialmente para apreciar, simular y predecir los daños causados por las inundaciones, para resolver problemas prácticos de inventarios y de administración de los recursos en una cuenca, región o país, Oropeza 1999.

### **2.4.4. Clasificación de los modelos hidrológicos**

Existen múltiples modelos hidrológicos que han sido desarrollados para analizar opciones para una mejor gestión del agua. Estos se clasifican en **a)** estocásticos, **b)** sistemas y **c)** determinísticos.

En la clasificación que se presenta, en el concepto de no optimización y optimización se refiere a la toma de decisiones más que a la evaluación de parámetros. Los métodos de optimización más utilizados en hidrología son: programación lineal y la programación dinámica **figura 4**.

**Figura 4.** Clasificación de los modelos hidrológicos.



Fuente: Ortiz et al., 2010

#### 2.4.4.1. Modelos Estocásticos

Los modelos estocásticos, se basan en los métodos y las técnicas estadísticas para hacer notar sus relaciones de entradas y salidas. El uso de estos modelos permite la exportación racional de la información disponible a corto y mediano plazo. Su uso es posible cuando se dispone de series suficientemente grandes de información.

Los modelos estadísticos propiamente dichos se clasifican en modelos de regresión y corrección, en modelos probabilísticos y en modelos estocásticos.

Los modelos probabilísticos utilizan la noción de análisis de frecuencia para analizar el comportamiento de un fenómeno hidrológico. La información utilizada para la calibración debe ser independiente del tiempo. Dado que la muestra disponible para caracterizar la población y/o el proceso físico hidrológico es generalmente limitada, en la extrapolación de resultados debe contemplarse un riesgo o error probable que el modelo debe cuantificar y considerar.

En los modelos estocásticos, la información utilizada se trata como una serie de datos históricos y aleatorios en función del tiempo. Este tipo de modelos se utilizan frecuentemente para la predicción a corto y largo plazo de series hidrológicas, (Oropeza, 1999).

#### **2.4.4.2. Modelos Determinísticos**

Los modelos determinísticos son formulados siguiendo formulas de la física y/o procesos químicos descriptivos por ecuaciones diferenciales. Un modelo determinístico es formulado en términos de un grupo de variables y parámetros y ecuaciones relacionadas a ellos. Implica una relación causa-efecto entre los valores de parámetros elegidos y los parámetros obtenidos de la aplicación de la ecuación. Idealmente un modelo determinístico debería proveer el mejor detalle en la simulación de los procesos físicos o químicos. En la práctica sin embargo, la aplicación está asociada frecuentemente a la incapacidad del modelo de modelar, de resolver la variabilidad temporal y espacial del fenómeno natural en incrementos suficiente mente pequeños.

Un modelo determinístico no considera aleatoriedad, una entrada produce siempre una misma salida.

Este tipo de modelo se utiliza cuando se dispone de poca información; caso frecuente de las obras de ingeniería rural e hidráulica, en los cuales se tiende a reconstruir indirectamente la evolución de los escurrimientos y flujos superficiales a partir del conocimiento de los eventos de lluvia diaria, de los cuales se dispone a menudo de grandes series de datos, (Oropeza, 1999).

Los modelos determinísticos a su vez, se clasifican en modelos empíricos también llamados de caja negra, modelos conceptuales agregados y modelos distributivos de base física.

- Los modelos de caja negra o caja gris se basan en una función de transferencia que realizan procesos hidrológicos sin considerar las leyes que rigen los fenómenos físicos implicados.
- Los modelos hidrológicos agregados (MHA) son modelos conceptuales, es un esfuerzo de reproducir los procesos hidrológicos implicados en la transformación lluvia- escurrimiento, también se conocen como modelos que consideran la humedad del suelo. Constan, en general, de una parte de balance de agua, que calcula en el tiempo el balance entre lluvia, evaporación, escorrentía y almacenamiento; y una segunda parte de tránsito de los diferentes tipos de escorrentía. Por tanto, pueden modelar en continuo la respuesta de una cuenca a los eventos de precipitación.
- Los modelos hidrológicos distribuidos (MHD) también llamados de base física, son modelos que dividen el área de captación en sub-áreas a las cuales se le asignan características particulares. Presentan el mayor grado de aproximación a las leyes físicas que rigen los principales procesos en la respuesta hidrológica de una cuenca, así como la

variabilidad espacial de los principales factores que intervienen. Se basan exclusivamente en parámetros físicos, por tanto medibles, con lo cual son directamente aplicables a cuencas no aforadas.

La aplicación de uno u otro modelo va a depender de los objetivos de la simulación, no necesariamente los modelos hidrológicos distribuidos son la mejor opción, sobre todo cuando se trata de proyectos de gran visión. Sin embargo, cuando se trata de representar la física de fenómenos hidrológicos en la cuenca, y ante la evidencia de la variabilidad espacial de la precipitación, la temperatura, la cobertura vegetal, entre otros parámetros; es una ventaja el empleo de los modelos hidrológicos distribuidos respecto a los modelos agregados. Sin pasar por alto que los primeros llegan a un notable incremento de complejidad en su aplicación, asociada principalmente, a la cantidad de información requerida para su modelación que se basa en la aplicación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), en los cuales se procesa gran parte de los datos para representar la fisiografía de la cuenca, aunque esta complejidad es atenuada por el uso de equipo de cómputo que cada vez tiene mayor velocidad y capacidad de almacenamiento.

Salgado (2012), como conclusión de lo analizado en su estudio de aplicabilidad de los modelos hidrológicos distribuidos presentan una tabla donde se ubican en orden de importancia de mayor a menor los modelos distribuidos que resultaron mejores con base en la información encontrada en la literatura.

**Tabla 1.** Ventajas y desventajas de modelos hidrológicos

Modelo	Institución	Ventajas	Desventajas
<b>MIKE- BASIN</b> <b>/MIKE SHE</b>	Danish Hydraulic Institute	Esta herramienta cuenta con un sistema modular en el que es posible sólo aplicar el módulo donde se aplica el modelo lluvia escurrimiento (MIKE11), es posible agregarle más módulos de acuerdo a los requerimientos	La principal desventaja es el costo que asciende a varios miles de dólares dependiendo del módulo. Es también un sistema cerrado en donde no se tiene opciones para desarrollar nuevos algoritmos.
<b>HYDROTEL</b>	Institute National de la Recherche Scientifique (INRS ETE)	Es un modelo abierto que permite integrar algoritmos desarrollados de manera externa. Tiene una capacidad alta de definición de micro-cuencas y no de malla como la mayoría de los MHD. El área de las microcuencas puede precisarse hasta 3 km <sup>2</sup> . Su costo es reducido.	No tiene algoritmos suficientemente desarrollados para el funcionamiento de vasos. Se requiere de la preparación de una gran cantidad de archivos para la preparación de datos.

<b>VIC</b>	Washington Univertsty	Es un modelo de uso libre, tiene archivos de datos simplificados disponibles para la mayor parte de la República Mexicana. Está ligado a un modelo de pronóstico de lluvia tiempo real. Cuenta con un algoritmo de autocalibración.	La definición de la malla no tiene una precisión suficiente hasta 1/8 de grado (182.25 km <sup>2</sup> )
<b>SWAT</b>	Soil and Water Assessment Tool de USDA Agricultural Research Service y Soil and Water Research Laboratory, Tx. EUA	El modelo está constituido por una serie de submodelos o módulos, los cuales se emplean para simular distintos procesos hidrológicos. Tiene la capacidad para agregarle otro tipo de modelos como el MODFLOW. Es de uso libre.	Representa con mayor precisión el proceso físico, del flujo de agua, en cuencas pequeñas, no así el cuencas de varios miles de kilómetros.
<b>HEC-HMS</b>	Hydrologic Modeling System de Hydrologic Engineering Center, US Army Corps of Engineers	El grado de discretización de la malla depende de la capacidad de cómputo que se tenga.	No se tiene suficiente precisión en los resultados en cuencas grandes, de varios miles de Km <sup>2</sup> . Poca capacidad de acoplamiento con otros modelos.
<b>WATFLOOD</b>	Universidad of Waterloo Ontario (UWO)	Es un modelo capaz de acoplarse fácilmente con otros modelos como los modelos atmosféricos el MOD FLOW. Es de uso libre.	Esta herramienta fue desarrollada principalmente para acoplarla a un modelo atmosférico y los principales problemas se dan en la comunicación de datos de estos dos modelos. Cuenta con una precisión en la definición de la malla de 15 km <sup>2</sup> .
		El modelo requiere de pocos parámetros en la cuenca. El código del modelo está abierto para posibles modificaciones. Se ha aplicado en cuencas	Presenta dificultades cuando se aplica en zonas con clima semi-árido o seco, con largos periodos de sequía. No es aplicable en cuencas

<b>TOPMODEL</b>	Lancaster University	grandes de varios cientos de miles de kilómetros El modelo es de uso libre para fines académicos y de investigación	excesivamente largas con pendiente moderada, la localización de zonas inundadas ocasiona muchas dificultades en la modelación.
-----------------	----------------------	---	--

**Fuente:** Salgado, R, 2012 revisión del estado de arte de la modelación hidrológica.

#### 2.4.4.3. Modelos de sistemas

Se define como la habilidad de seccionar un número de alternativas posibles a partir de un conjunto particular de acciones y posibilidades para alcanzar ciertos objetivos, bajo condiciones y restricciones legales, éticas, económicas, políticas y sociales, así como las leyes que rigen el ambiente. Los tres componentes de los modelos de sistemas son: la teoría de la decisión, el análisis de sistemas y la investigación operacional Oropeza (1990).

### 2.5. APLICACIÓN DE MODELOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS

**Aparicio, et al. (2010)** en su trabajo plantean alternativas de manejo para la cuenca del río Itzapa, ubicada en el departamento de Chimaltenango, Guatemala. Para el efectos, se calibró, validó y aplicó el modelo de simulación hidrológica SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins). La cuenca tiene un extensión de 2,671 ha. La metodología empleada consistió básicamente en: a) Calibración del modelo, para lograr un ajuste satisfactorio entre los caudales calculados y observados, mediante el cambio de parámetro con mayor sensibilidad. Los datos empleados en esta fase fueron tomados de 1993 a 1995; b) Validación del modelo, para medir la capacidad de reproductividad del modelo mediante las comparaciones de los caudales calculados y observados en un periodo diferente (1996 y 1997) del utilizado en la calibración; c) Generación y evaluación de diferentes escenarios de desarrollo de la cuenca, los que se hicieron con una proyección a 20 años, teniendo como propósito fundamental ser la base para el planteamiento de alternativa de su manejo. De los resultados obtenidos, después de efectuar la comparación estadística de los productos de agua, a través del análisis de regresión, se encontró que la pendiente de la línea de regresión y coeficientes de determinación ( $R^2$ ) entre escurrimientos simulados y medidos a nivel mensual para la calibración, fueron 0.956 y 0.989, respectivamente, mientras que para la validación estos fueron igual a 0.886 y 0.932. Se concluye que el modelo SWRRB es una valiosa herramienta que puede utilizarse para predecir las proyecciones de agua y de sedimentos en una cuenca, siempre y cuando se tenga datos observados de escurrimiento que permitan realizar la validación y calibración del modelo.

**Benavides (2008)** con la finalidad de aportar elementos para determinar la factibilidad de crear un mercado de servicios hidrológicos, estimó el balance hidrológico en la cuenca forestal de Tapalpa, Jalisco, México, aplicando el modelo hidrológico SWAT. Este presentó un buen ajuste ( $R^2=0.85$ ) con la producción de agua, al ser calibrado en una de las cinco subcuencas que integran el área de estudio. Las subcuencas con mayor superficie agrícola o pecuaria presentan mayor escurrimiento superficial y mayor producción de sedimentos; la evapotranspiración en las subcuencas forestales es también más elevada. La oferta total dl recurso hídrico, para un año promedio, asciende a 42,963.900 m<sup>3</sup>/año.

**Hernandez, et al. (2006)** estudiaron la respuesta hidrológica simulada en el acuífero del Valle de Acambay del Estado de México. La integración del modelo SWAT y el hidrodinámico MODFLOW

es una alternativa a esta necesidad, que para el acuífero Valle de Acambay presentó errores entre 8% en la etapa de calibración y 11% en la de validación. En este acuífero se evaluaron cinco escenarios, puesto que el objetivo de este trabajo no fue generar un plan integral de manejo, los escenarios son teóricos, con objeto de resaltar el potencial de respuesta hidrológica – hidrodinámica de la integración SWATMODFLOW:

**Fernández (1996)** aplicó el modelo de simulación hidrológica SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins), en la cuenca “El Tejocote” (17,656 ha), que se localiza en Atlacomulco Estado de México. Con la finalidad de comparar los valores simulados y observados de la producción de agua, sedimentos, gastos máximos y biomasa durante cinco años (1980 – 1984). Así mismo analizar la posible aplicación del modelo en cuencas no instrumentadas.

Para operar el modelo, la cuenca se fraccionó en diez subáreas, tomando como base el uso del suelo. Así, al agrupar áreas con condiciones similares de manejo, se pudo identificar el comportamiento de cada área con relación a los procesos hidrológicos simulados por SWRRB. Además, en la dirección vertical, el uso de cada subáreas se dividió en ocho capas.

Del proceso de simulación resultó que el 75% de los sedimentos provenientes de las áreas agrícolas en pendientes (laderas) y el 80% de este material, se produce en los meses de julio y agosto.

Al comparar los rendimientos de maíz para las áreas de siembra en temporal, el modelo calculó en promedio 113 Kg/ha de más con respecto a los observados.

Se observó que el gasto máximo y gasto medio predichos, excedieron un 17 y 28% respectivamente a los aforados. Además, la semejanza entre la media y desviación estándar de ambos caudales, hace suponer que la distribución de sus frecuencias es similar.

De la comprobación estadística de la producción de agua y sedimentos, a través del análisis de regresión, se tiene que el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de la producción de agua anual, mensual y diario fue de 0.799, 0.875 y 0.605 respectivamente. Así mismo el sedimento a nivel anual, mensual y diario tuvo una  $R^2$  de 0.789, 0.736 y 0.411 respectivamente. De lo anterior, se observa que el modelo predice mejor en forma mensual, anual y diaria respectivamente y en general las correlaciones para la producción de agua, son superiores a las del sedimento.

En virtud de que el modelo SWRRB, predijo satisfactoriamente las producciones de agua, sedimentos, gastos máximos y biomasa se concluyó que el modelo es recomendable para cuencas hidrográficas que no cuentan con estaciones de aforo.

**García e Hinojosa (2001)** hicieron una caracterización de la hidrología superficial en la franja costera comprendida entre las localidades de Puertecitos y San Luis Gonzales, en la costa oriental de Baja California, aplicando tres métodos implementados en diferentes Sistemas de Información Geográfica (SIG). El primer método utiliza el SIG ARC/info; el segundo fue desarrollado para SIG GRASS. Ambos extraen parámetros hidrológicos a partir del análisis de un MTD, como son los delineados de parteaguas entre cuencas, dirección y acumulación de flujo. El tercer método es un programa de aplicación conocido como Rivertools, que extrae diversos índices hidrológicos, así como patrones de la red hídrica con mayor definición. Con el método ARC/info se logró identificar 9 cuencas, definiendo claramente la red hídrica. El método de GRASS fragmentó la misma área en 22 cuencas. El programa Rivertools además de calcular parámetros hidrológicos importantes, generó una clasificación hidrológica con el modelo de Horton – Strahler, creando órdenes jerárquicos para las 22 cuencas generadas por el segundo método.

## 2.6. SOFTWARE

Para el manejo de la información hidrológica muchas veces es necesario la utilización de diversos programas de cómputo que ayudan a procesarla y por ende disminuye el tiempo de ejecución de un trabajo. A continuación se da una breve descripción de los utilizados en el presente trabajo.

### 2.6.1. ArcGis 10.1.

ArcGis es un sistema de información geográfica, que fue diseñado y desarrollado para proporcionar la posición e integración de los datos espaciales por la empresa ESRI. ArcGis es un GIS, con un lenguaje de programación orientado a objetos (Avenue – Basado en C++), Longley 1999.

Los archivos básicos de GIS ArcGis son Shapes files y son archivos vectoriales con una estructura no topológica que utiliza ArcGis para almacenar tanto el componente geométrico de sus archivos como la información sobre atributos de los elementos geométricos. Un archivo en ArcGis está constituido por un mínimo de tres archivos:

- Shp: este archivo almacena el componente geométrico
- Shx: este archivo almacena el índice de los elementos que conforman la geometría del tema.
- txt: este es un archivo en formato dBASE que almacena los atributos de los elementos geométricos que conforman el tema.

### 2.6.2. Modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool)

#### 2.6.2.1. Aspectos generales del modelo SWAT

SWAT es una herramienta desarrollada por el Dr. Jeff Arnold en el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos con la Universidad de Texas; su propósito es 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.

Para modelar la respuesta hídrica de una cuenca SWAT parte de la ecuación básica de la hidrología:

$$SW_t = SW_0 + \sum R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}$$

Donde **SW<sub>t</sub>** es el contenido final de agua en el suelo (mm); **SW<sub>0</sub>** es el contenido de humedad en un día *i*(mm); **t** es el tiempo (días); **R<sub>day</sub>** es la precipitación diaria del día *i*(mm); **Q<sub>surf</sub>** es el producido de escorrentía superficial del día *i*(mm); **E<sub>a</sub>** es la evaporación del día *i*(mm); **w<sub>seep</sub>** es el contenido entrante en la zona vadosa del suelo en el día *i*(mm); **Q<sub>gw</sub>** es el caudal producido o retornado del día *i* (mm).

Los beneficios del modelo:

1. Se pueden simular las cuencas sin datos de control (escurrimientos máximos).

2. El impacto relativo de los datos de entrada alternativos (variaciones en prácticas del manejo, clima, vegetación, etc.), u otras variables de interés se pueden cuantificar.
3. Computacionalmente es eficiente. La simulación de cuencas muy grandes o una variedad de estrategias de manejo, se pueden realizar sin invertir demasiado tiempo o dinero.
4. Permite el estudio de impactos a largo plazo. Generalmente muchos de los problemas examinados por el usuario incluyen la incorporación gradual de contaminantes y el impacto en cuerpos de agua río abajo.

El SWAT es un modelo de tiempo continuo esto es, de rendimiento a largo plazo, por lo que no hace simulaciones detalladas de rutas de inundación eventual y única. SWAT incorpora características de varios modelos como ARS y es el resultado directo del modelo SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins) (Williams et al., 1985).

El modelo SWAT, es un modelo matemático, el cual consiste en la representación de una situación idealizada que tiene propiedades estructurales importantes de un sistema real, a través de las ecuaciones que expresan relaciones entre variables y parámetros.

#### **2.6.2.2. Objetivos del modelo SWAT**

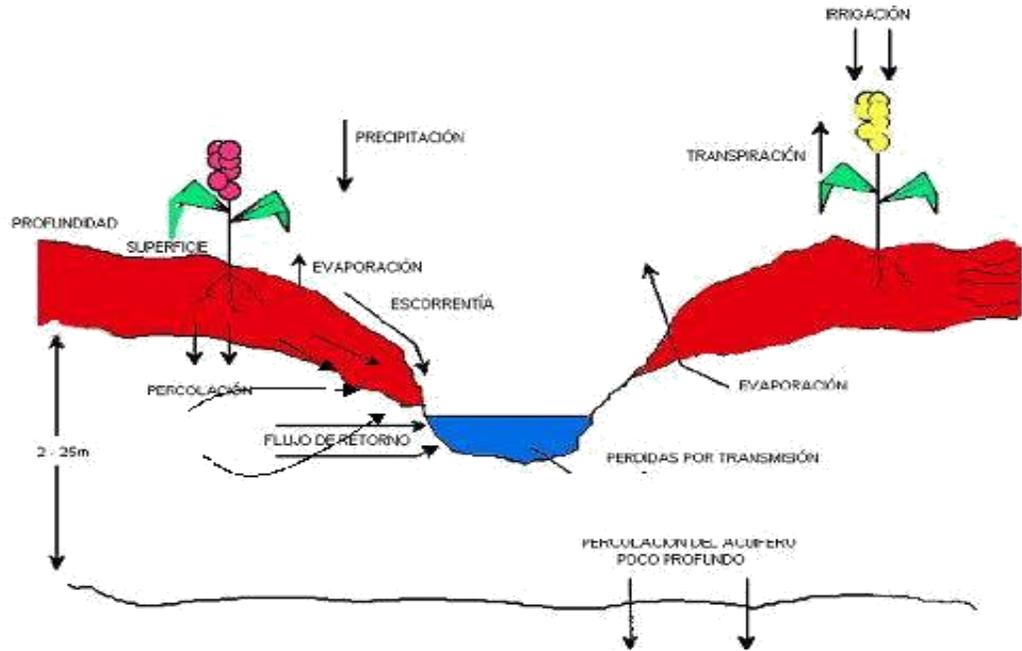
El objetivo del modelo es predecir el impacto del manejo del agua, sedimentos y carga de químicos agrícolas en grandes cuencas sin estaciones de monitoreo, para satisfacer este objetivo el modelo presenta las siguientes características:

- Se basa en procesos físicos (su calibración no es posible en microcuencas sin estaciones de monitoreo).
- Es eficiente desde el punto de vista computacional para operar grandes cuencas en un tiempo razonable.
- Es continuo y capaz de simular largos periodos para evaluar los efectos de cambio en el manejo del agua, sedimentos y cargas químicas agrícolas.

Para propósitos de la simulación, SWAT divide la cuenca en un número de subcuencas. El uso de subcuencas en la simulación es muy útil, particularmente, cuando hay diversas áreas de la misma cuenca que se ven afectadas por el uso de suelos o suelos bastante desiguales de tal forma que impactan grandemente la hidrología del sector. La información de entrada para cada subcuenca es agrupada en las categorías siguientes: clima, unidad de respuesta hidrológica o HRU, humedales, agua subterránea, canal principal y drenado de la subcuenca. Las unidades de respuesta hidrológica son áreas de tierras dentro de la subcuenca que corresponden a todas las únicas posibles combinaciones de cobertura de tierra, suelo y pendiente en la cuenca.

La simulación hidrológica de la cuenca tiene en cuenta la fase terrestre del ciclo hidrológico (**figura 5**), esta fase controla la cantidad de sedimentos, agua, las cargas de alimento nutritivo y pesticida al canal principal en la subcuenca y la fase de transporte, la cual define el movimiento del agua, sedimentos etc. a través de la red de canales de la cuenca hacia el vertedero.

**Figura 5.** Representación del ciclo hidrológico en SWAT



Fuente: SWAT User's Manual, 2000.

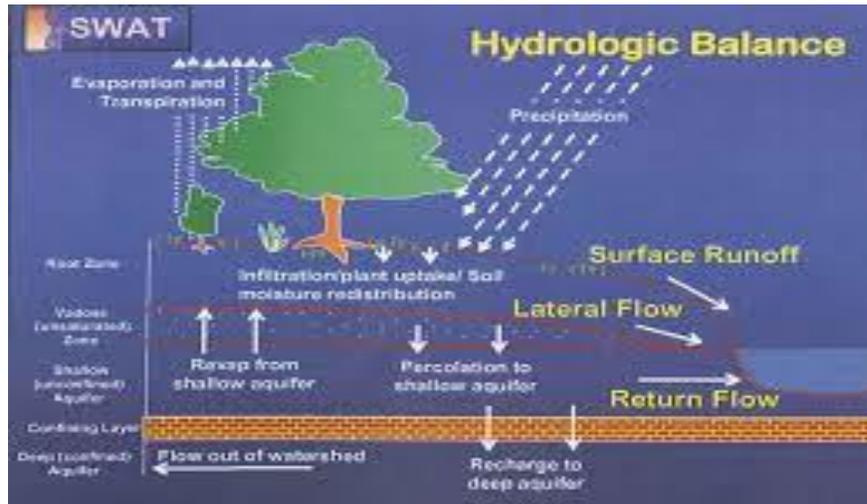
### 2.6.2.3. Componentes del modelo SWAT.

Los componentes del modelo se agrupan en ocho divisiones: hidrología, clima, sedimentación, temperatura del suelo, crecimiento de cultivos, nutrientes, pesticidas y manejo de cultivos así como se muestra en la figura.

#### 2.6.2.3.1. Hidrología

Cuando la precipitación desciende, puede ser interceptada y puede ser contenida en el dosel de la vegetación o cae a la superficie del suelo. El agua en la superficie del suelo se infiltra en el perfil de la tierra o fluirá sobre el terreno como escorrentía. La escorrentía se mueve relativamente rápido hacia un canal de corriente y contribuye en un corto plazo en la corriente. El agua infiltrada puede ser contenida en el suelo y evapotranspirada posteriormente o puede avanzar lentamente al sistema de agua- superficie a través de pasos subterráneos. Las conductas potenciales de movimiento de agua simuladas por SWAT en las HRU don ilustradas en la figura 6.

**Figura 6.** Componentes hidrológicos del modelo SWAT.



Fuente: SWAT User's Manual, 2000.

### 2.6.2.3.1.1. Escurrimiento superficial

El modelo simula los escurrimientos y los caudales máximos, que se producen por la lluvia diaria. El volumen de escurrimiento se estima con la técnica modificada método del número de curva CN, propuestas por el servicio de conservación del suelo (SCS) (USDA SCS, 1972) o el método de infiltración de Green & Ampt (Green y Ampt, 1911). En el método de número curva, la curva varía no linealmente con el contenido de humedad del suelo. La curva numérica baja si la tierra se acerca al punto de marchitez permanente y aumenta hasta cerca de 100 al acercarse el suelo a la saturación.

El método de Green & Ampt requiere los datos subsidiarios de precipitación y calcula la infiltración como una función del frente potencial mátrico húmedo anterior y conductividad hidráulica efectiva. El agua que no se infiltra se convierte en escorrentía de la superficie.

#### 2.6.2.3.1.1.1. Volumen de escorrentía método del número de curva CN

La ecuación de distribución del número de curva SCS es:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)}$$

Donde  $Q_{surf}$  es la escorrentía acumulada o el exceso de lluvia (mm H<sub>2</sub>O).  $R_{day}$  es la profundidad de la lluvia por día (mm H<sub>2</sub>O),  $I_a$  es la abstracción inicial que incluye almacenaje de la superficie, intercepción e infiltración antes de la escorrentía (mm H<sub>2</sub>O) y  $S$  es el parámetro de retención (mm H<sub>2</sub>O). El parámetro de retención varía espacialmente debido a los cambios en el suelo, uso de la tierra, manejo e inclinación y temperatura debido a cambios en el contenido del agua del suelo. Se define el parámetro de retención como:

$$S = 25.4 \left( \frac{100}{CN} - 10 \right)$$

Donde  $CN$  es el número de distribución para el día. Las abstracciones iniciales,  $I_a$ , es común mente aproximado como  $0.2 S$ .

El número de curva SCS es una función de la permeabilidad del suelo, uso de la tierra y condiciones antecedentes del agua del suelo.

El SCS define tres condiciones de antecedente de humedad: I- seco (punto de marchitez permanente), II - humedad promedio, y III – humedad (capacidad de campo). Las curvas numéricas para condiciones húmedas I y III se calculan con las ecuaciones:

$$CN_1 = CN_2 - \frac{20(100 - CN_2)}{(100 - CN_2 + \exp(2.533 - 0.0636(100 - CN_2)))}$$

$$CN_3 = CN_2 \exp(0.0673(100 - CN_2))$$

Donde  $CN_1$  es la curva numérica de la condición húmeda I,  $CN_2$  es la curva numérica de la condición húmeda II, y  $CN_3$  es la curva número de la condición húmeda III. Los números de la curva para condición húmeda II se obtienen a partir de tablas para varias cubiertas de la tierra y tipos de suelo.

SWAT varía el parámetro de retención en el perfil del suelo del contenido de agua. Una alternativa adicional de SWAT es variar el parámetro de retención de humedad con la evapotranspiración de las plantas. El cálculo de valor  $CN$  diario como función de la evapotranspiración de las plantas fue añadido debido a que el método de humedad pronostica demasiada escorrentía en suelos pocos profundos. Al calcular  $CN$  diario como función de la evapotranspiración de las plantas el valor se vuelve menos dependiente en el almacenaje del suelo y más dependiente en el clima antecedente.

#### 2.6.2.3.1.1.1. Ajuste de la pendiente

La curva numérica de la condición de humedad II proveídos por las tablas se asume apropiados para pendientes del 15%. Williams (1995) desarrollo una ecuación para ajustar el número de curva a una pendiente diferente.

$$CN_{2S} = \frac{(CN_3 - CN_2)}{3} * (1 - 2 \exp(-13.86 * slp)) + CN_2$$

Donde  $CN_2$  es número de curva de la condición húmeda II ajustada por la pendiente.  $CN_3$  es la curva numérica de la condición húmeda III para la pendiente por defecto del 5%, y  $slp$  es la fracción de la pendiente promedio de la subcuenca.

#### 2.6.2.3.1.2. Percolación

El componente de percolación del SWAT usa una técnica de almacenamiento que predice el flujo a través de cada capa de suelo en la zona de raíces. El flujo hacia abajo ocurre cuando se excede la capacidad de campo (CC) de una capa de suelo y si la capa inferior no está saturada. La tasa de flujo hacia abajo está gobernada por la conductividad de saturación en la capa del suelo. El flujo hacia arriba puede ocurrir cuando una capa inferior excede la CC. El movimiento de agua de una capa inferior hacia una capa superior adyacente se regula por el coeficiente de agua del suelo a CC de las dos capas. La percolación también es afectada por la temperatura del suelo.

### 2.6.2.3.1.3. Flujo lateral subsuperficial

El flujo lateral su superficial en el perfil de suelo (0-2 m) se calcula simultáneamente con la percolación. Se usa un modelo cinemático de almacenamiento para poder predecir el flujo lateral en cada capa de suelo. El modelo considera la variación en la conductividad, la pendiente y el contenido en el suelo.

### 2.6.2.3.1.4. Flujo de agua subterráneo

La contribución del flujo subterráneo al flujo total se simula creando un acuífero de almacenamiento poco profundo, la percolación a partir de la parte baja de la zona de raíces es una recarga para ese acuífero delgado. Un constante de recesión derivada a partir de datos diarios de flujo se usa para retornar el flujo del acuífero a la corriente de agua. Otros componentes incluyen evaporación, bombeo, filtraciones hacia la profundidad del acuífero.

### 2.6.2.3.1.5. Evapotranspiración

El modelo ofrece tres opciones para su estimación Hargreaves, Priestley Taylor, and Penman – Monteith. El método de Penman requiere de la radiación solar, temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento. Si los valores diarios de las variables anteriormente mencionadas no están disponibles pueden ser generados a partir de valores mensuales. Los métodos de Hargreaves y de Priestley Taylor dan resultados realistas en la mayoría de los casos. Los métodos calculan la evapotranspiración de suelos y de las plantas separadamente. La evapotranspiración potencial del agua en el suelo se estima en función de la evapotranspiración y el índice de área foliar (el área de las hojas de una planta en relación al área del suelo  $m^2/m^2$ ). La evapotranspiración del suelo real se estima usando ecuaciones exponenciales de la profundidad del suelo. La evapotranspiración del agua en la planta se simula como una función lineal de la evapotranspiración potencial y el índice de área foliar.

#### 2.6.2.3.1.5.1. Evapotranspiración método de Penman- Monteith

El método de Penman- Monteith, requiere información de radiación solar, temperatura aérea, velocidad de viento y humedad relativa.

La ecuación es la siguiente:

$$\lambda E = \frac{\Delta(H_{net} - G) + P_{air} * C_p * \frac{(e_0 - e_z)}{r_a}}{\Delta + \gamma * (1 + \frac{r_c}{r_a})}$$

Donde  $\lambda E$  es la densidad latente del flujo de calor ( $MJ/ M^2/día$ ),  $E$  es la evaporación de la tasa de profundidad ( $mm d^{-1}$ ),  $\Delta$  es la pendiente de la curva de saturación de presión de vapor – temperatura,  $de/dT$  ( $Kpa/ ^\circ C$ ),  $H_{net}$  es la radiación neta ( $MJ/ M^2/día$ ),  $G$  es la densidad de flujo de calor del suelo ( $MJ/ M^2/día$ ),  $P_{air}$  es la densidad aérea ( $kg/ M^3$ ),  $C_p$  es el calor específico en presión constante  $MJ/kg/c$ ,  $e_0$  es la saturación de presión de vapor del aire en una altura  $Z$  ( $Kpa$ ),  $e_z$  es la presión del vapor del agua del aire en una altura  $Z$  ( $Kpa$ ),  $\gamma$  es la constante Psicométrica ( $kPa/ ^\circ C$ ),  $r_c$  es la resistencia de dosel forestal ( $s/m$ ),  $r_a$  son las resistencias de difusión de la capa aérea (resistencia aerodinámica) ( $s/m$ )

#### **2.6.2.3.1.6. Pérdidas por transmisión**

Muchas cuencas semiáridas tienen canales aluviales que sustraen grandes volúmenes de agua de la corriente (Lane, 1982). Las pérdidas por transmisión reducen los volúmenes de escurrimiento a medida que el agua viaja corriente abajo. El modelo SWAT utiliza el modelo de Lane descrito en el manual de hidrología del SCS (USDA, 1986) para estimar las pérdidas por transmisión. Las pérdidas en los canales son función del ancho del canal, de la longitud y duración del flujo, tanto del volumen de escurrimiento y la tasa pico se ajusta cuando ocurren pérdidas de transmisión.

#### **2.6.2.3.1.7. Cuerpos de agua**

Los cuerpos de agua son pequeñas estructuras que se presentan dentro de una subcuenca. El almacenamiento en los cuerpos de agua se simula en función de la capacidad del cuerpo de agua, entradas y salidas diarias de agua, transmisión y evaporación. Se supone que en los almacenamientos se tienen solamente vertederos de emergencia. Los datos requeridos son las funciones de la capacidad y área de la superficie del almacenamiento con respecto a la elevación.

#### **2.6.2.3.2. Clima**

Las variables climáticas empleadas en el modelo SWAT son: precipitación, temperatura del aire, radiación solar, velocidad del viento humedad relativa. Si la precipitación diaria y las temperaturas máximas y mínimas no están disponibles, el generador climático puede simular las temperaturas y la lluvia diarias. La radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa son siempre simuladas. Un conjunto de variables climáticas pueden ser simuladas para toda la cuenca o diferente clima puede ser también simulado para cada subcuenca.

##### **2.6.2.3.2.1. Precipitación**

El modelo de precipitación SWAT desarrollado por Nicks (1974) es un modelo de cadena de primer orden, por lo tanto las entradas al modelo deben incluir las probabilidades mensuales de recibir precipitación si el día anterior fue seco o húmedo. Dada la relación húmedo – seco el modelo determina estocásticamente si ocurre o no precipitación. Cuando un evento de precipitación ocurre, la lámina se calcula a partir de la generación de una distribución de la precipitación diaria. La cantidad de la precipitación diaria se reparte entre la lluvia y la nieve usando la temperatura diaria promedio del aire.

##### **2.6.2.3.2.2. Temperatura del aire y radiación solar**

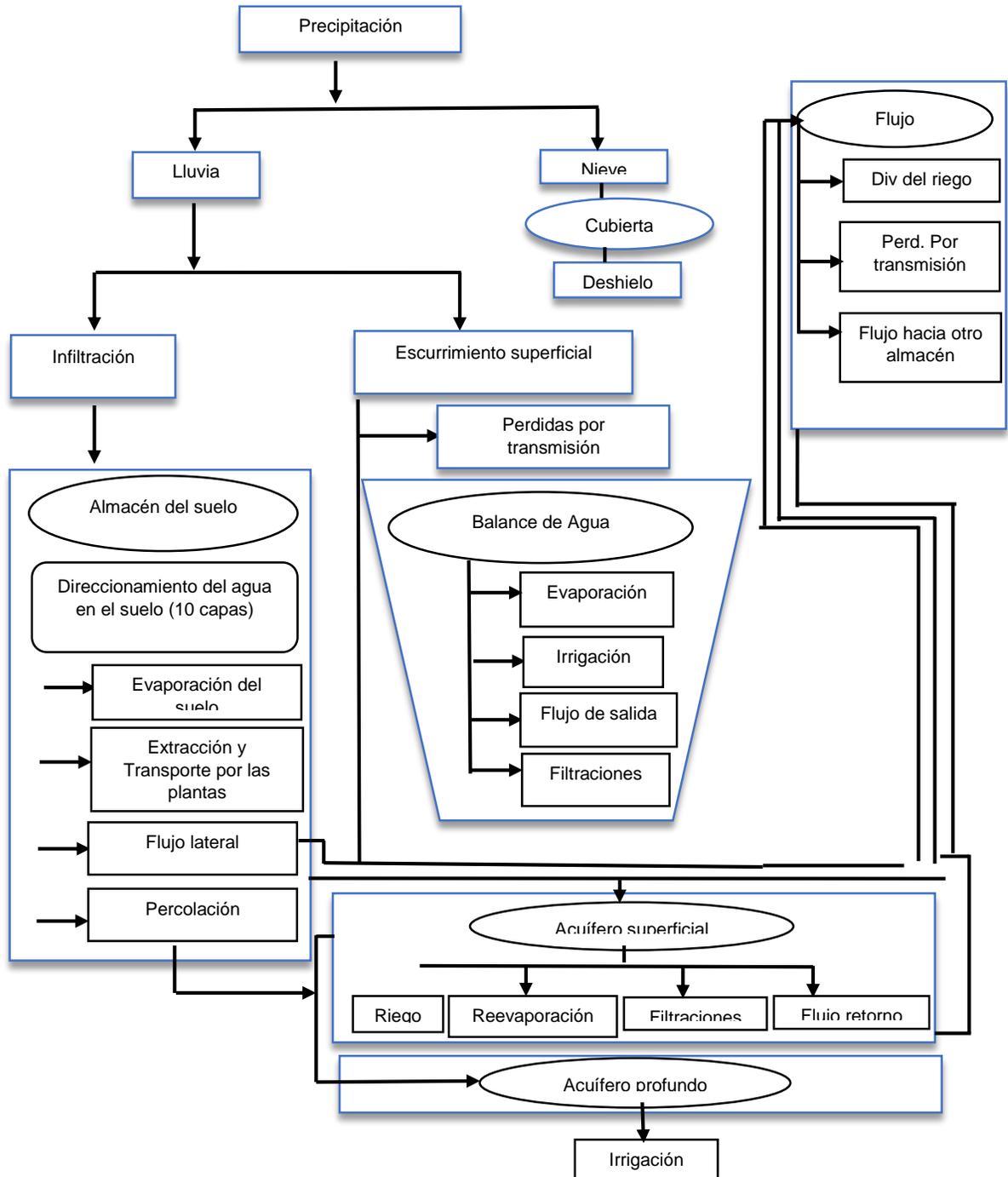
La temperatura de aire máxima y mínima, así como la radiación solar se genera a partir de una distribución normal corregida por las probabilidades húmedo – seco. El factor de corrección se usa para dar mayor desviación a la temperatura y radiación cuando el clima cambia y para días lluviosos. De esta manera las desviaciones son menores en días secos. Los factores de corrección se calculan para asegurar que las desviaciones estándar a lo largo de variables diarias se mantengan.

##### **2.6.2.3.2.3. Velocidad del viento y humedad relativa**

La velocidad del viento diaria se simula usando una ecuación especial, ya que la velocidad mensual media del viento es un factor de entrada. El modelo de humedad relativa simula promedios diarios a partir de promedios mensuales, esto lo hace utilizando una distribución triangular igual que con la

temperatura y la radiación, la humedad relativa media diaria se ajusta para tomar en cuenta los efectos de días húmedos y secos.

**Figura 7.** Simulación del movimiento de agua por SWAT



Fuente: SWAT User's Manual, 2000

### **2.6.2.3.3. Sedimentación**

#### **2.6.2.3.3.1. Producción de sedimentos**

La producción de sedimentos se estima para cada subcuenca con la ecuación universal de pérdida de suelo modificada. El modelo hidrológico provee la estimación del volumen de escurrimiento y la tasa de escurrimiento pico. El factor de manejo de los cultivos se evalúa como la biomasa aérea, el residuo de cosecha en la superficie y el valor mínimo del factor C para el cultivo.

#### **2.6.2.3.3.2. Temperatura del suelo**

Los promedios diarios de la temperatura del suelo se simulan para el centro de cada capa de suelo para usarse en la hidrología y la degradación del residuo. La temperatura de la superficie del suelo se estima usando la temperatura diaria del aire máximo y mínimo y la cantidad de nieve, planta y cobertura de residuos para el día de interés más los cuatro días inmediatos anteriores. La temperatura del suelo se simula para cada capa usando una función de la profundidad, temperatura superficial y la temperatura media anual del aire. La profundidad depende de la densidad aparente del suelo.

#### **2.6.2.3.3.3. Modelo de crecimiento del cultivo**

SWAT utiliza un solo modelo de crecimientos de plantas para simular toda clase de coberturas de tierra. El modelo puede diferenciar entre plantas anuales y perennes. La intercepción de la energía se estima como función de la radiación y el índice de área foliar del cultivo. El incremento potencial en la biomasa para un día dado se estima como el producto de la energía interceptada y un parámetro de cultivo para convertir energía a biomasa. El índice de área foliar se simula con ecuaciones que dependen de la unidad de calor, el rendimiento de incremento como una función no lineal de las unidades calor a partir de cero a la fecha de siembra hasta un valor óptimo de madurez. El índice de cosecha puede ser reducido por el estrés por agua durante periodos críticos de cultivo (generalmente 30 y 90 % de la madurez).

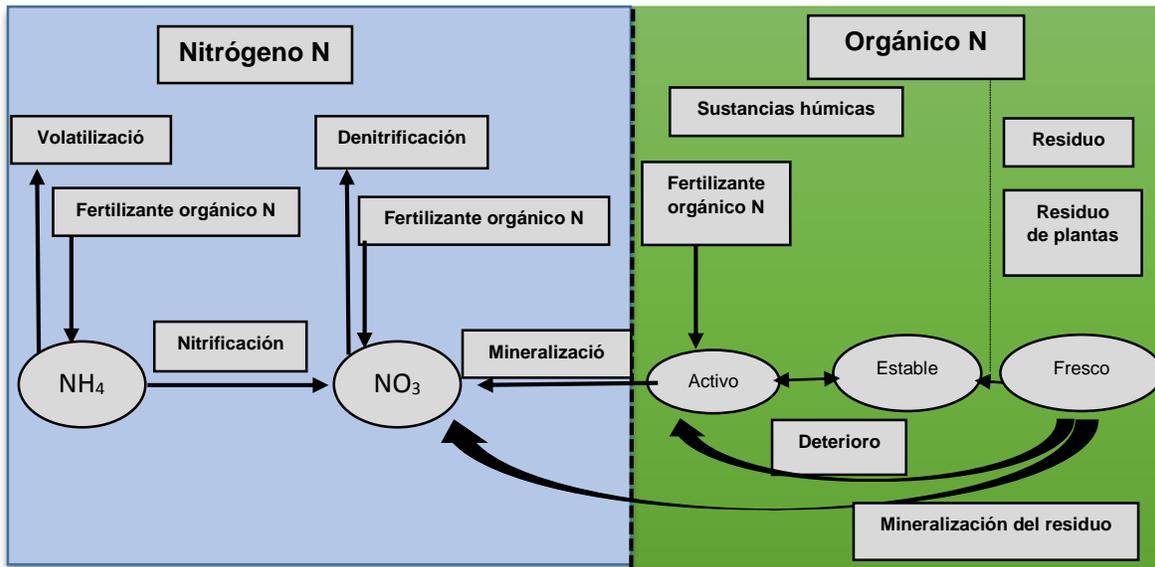
#### **2.6.2.3.3.4. Nutrientes**

SWAT rastrea el movimiento y transformación de las diversas formas de nitrógeno y fosforo en las cuencas. En el suelo la transformación de nitrógeno de una forma u otra es regida por ciclo del nitrógeno. La transformación del fosforo en el suelo es controlada por el ciclo del fosforo. Los nutrientes pueden ser introducidos a los canales principales y transportados río abajo por escorrentía y flujo superficial o subterráneo lateral.

#### **2.6.2.3.3.5. Nitrógeno**

El uso de nitrógeno por las plantas se estima utilizando el enfoque de oferta y demandas requerido en el crecimiento de plantas. Adicionalmente al uso de las plantas, el nitrato y el N orgánico pueden ser removidos de la tierra a través del flujo masivo del agua. Las cantidades de  $\text{NO}_3\text{-N}$  contenidos en las escorrentías, flujo lateral y filtración son estimadas como productos del volumen de agua y la concentración de nitrato en la capa. El transporte del N orgánico con sedimento, es calculado, con una función de la carga desarrollada por McElroy et AL. (1976) y modificado por William y Hann (1978) para la aplicación a acontecimientos individuales de escorrentías. La función de la carga estima la pérdida diaria de escorrentía del N orgánico basada en la concentración de N orgánico en la primera capa de suelo, en la producción de sedimento y en la producción de enriquecimiento. La proporción del enriquecimiento es la concentración del N orgánico en el sedimento dividido por el suelo.

**Figura 8.** División del nitrógeno en SWAT.

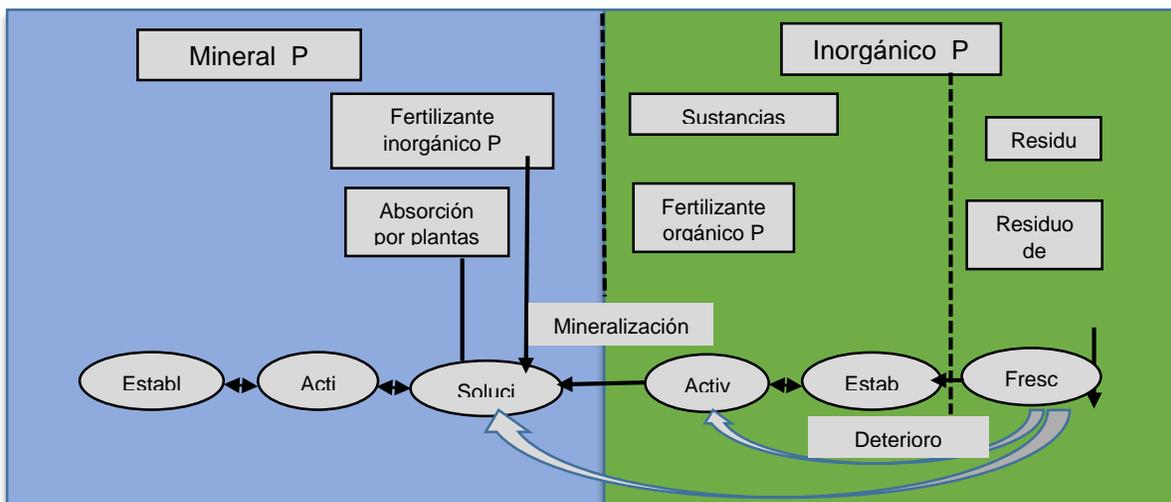


Fuente: SWAT User's Manual, 2000

### 2.6.2.3.3.6. Fósforo

El uso del fósforo por las plantas se estima utilizando el enfoque de oferta y demanda requerido en el crecimiento de plantas. Adicionalmente el uso por las plantas del fosforo soluble y P orgánico pueden ser removidos de la misma tierra a través del flujo masivo de agua. El fosforo no es un nutriente móvil y la interacción entre escorrentía de superficie con solución P en los primeros 10 mm de suelos no serán completos. La cantidad de P soluble removido en las escorrentías se predice utilizando la concentración de solución O en los primeros 10 mm de suelo, el volumen de escorrentía más un factor de división.

**Figura 9.** División del fosforo en SWAT.

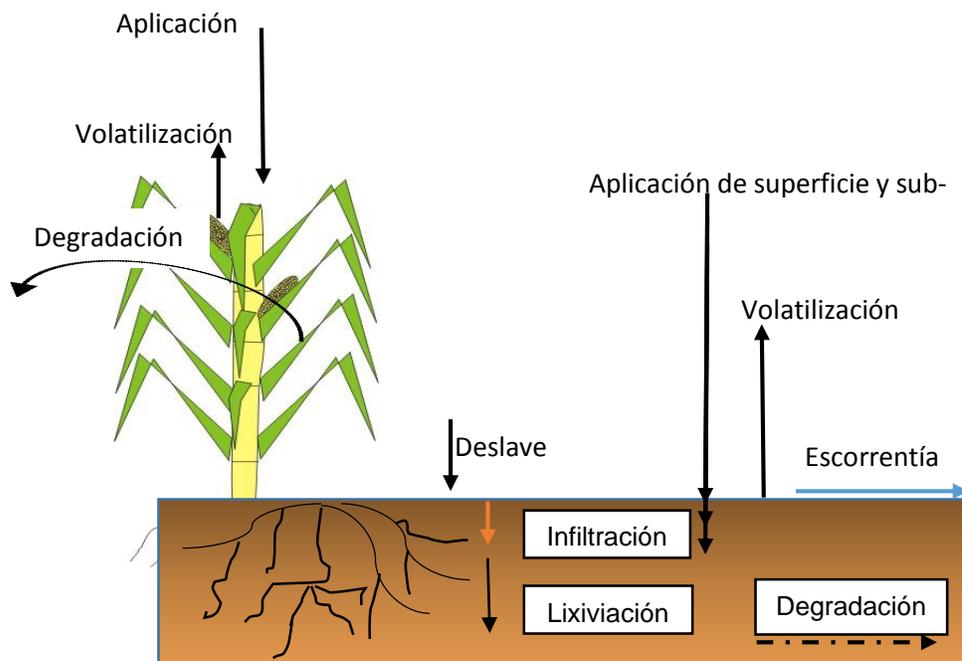


Fuente: SWAT User's Manual, 2000.

#### 2.6.2.3.4. Pesticidas

SWAT simula el movimiento del pesticidas en la red de corrientes a través de la escorrentía superficial (en solución y absorción al sedimento transportado por las escorrentías), hacia el perfil del suelo y acuíferos por filtración (en la solución). Las ecuaciones usadas para modelar el movimiento del pesticida en la fase de suelo del ciclo hidrológico fueron adaptadas de GLEAMS (Leonard et Al., 1987). El movimiento del pesticida es controlado por su solubilidad, degradación de media – vida y coeficiente de absorción de carbón orgánico en el suelo. El pesticida en el follaje de la planta y en el suelo se degrada de manera exponencial según la media – vida apropiada. El transporte del pesticida por el agua y sedimento se calcula para cada acontecimiento de escorrentía y se estima para cada capa de suelo cuando ocurre filtración.

**Figura 10.** Transporte del pesticida en SWAT



Fuente: SWAT User's Manual, 2000.

#### 2.6.2.3.5. Manejo de cultivo

SWAT permite rotación de cultivos sin límite y hasta tres cultivos por año, se puede también introducir riego, nutrientes y aplicación de pesticidas (fecha y cantidades).

#### **2.6.2.3.5.1. Labranza y residuos**

El componente de labranza fue designado para repartir la biomasa aérea al momento de la cosecha, parte de la biomasa es removida como rendimiento, otra parte incorporada al suelo y la restante se deja en la superficie como residuo.

#### **2.6.2.3.5.2. Riego**

Se tiene la opción de simular agricultura temporal o bajo riego, cuando se selecciona la irrigación se debe especificar el coeficiente de escurrimiento (volumen de agua que sale / volumen aplicado) y un nivel de estrés hídrico de la planta para accionar el riego. El factor de estrés hídrico de la planta varía entre 0 – 1 (1 significa sin estrés y 0 no hay crecimiento).

#### **2.6.2.3.6. Componentes de transporte**

##### **2.6.2.3.6.1. Transporte de agua en los cauces**

El transporte en cauces usa el método de coeficiente variable de almacenamiento, los parámetros del cauce incluyen: largo, pendiente, ancho y profundidad del banco, inclinación de taludes, pendiente del piso y rugosidad del cauce. El gasto y la velocidad media se calculan usando la ecuación de Manning y el tiempo de transporte se calcula dividiendo la longitud del canal por la velocidad. El flujo de salida del cauce se ajusta de acuerdo a las pérdidas de transmisión, evaporación, desviación y flujo de retorno.

##### **2.6.2.3.6.2. Transporte de sedimentos en cauces.**

El modo de transporte e sedimentos consiste de dos componentes que operan simultáneamente: depositación y degradación. El componente de depositación se basa en la velocidad de caída y el de degradación en el concepto del poder de la corriente. La depositación en el fondo del cauce de la cuenca, hacia la salida se basa en la velocidad de caída de las partículas de sedimentación.

#### **2.6.2.3.7. Tránsito de agua y sedimentos en almacenamientos**

##### **2.6.2.3.7.1. Balance y transporte de agua en almacenamientos**

El balance de agua en almacenamientos incluye flujos de entrada y de salida, lluvia en la superficie del almacenamiento, evaporación, transmisión en el piso del almacenamiento, desviaciones y flujo retorno. Actualmente existen tres métodos para estimar el flujo de salida. El primer método simplemente considera el flujo de salida medido y permite al modelo simular los otros componentes del balance hídrico. El segundo método es para pequeños almacenamientos incontrolados, y el flujo de salida ocurre a una tasa de salida especificada cuando el volumen excede la capacidad de almacenamiento. Y el tercer método es para grandes almacenamientos con manejo y se utiliza una estrategia de un volumen mensual especificado.

### **2.6.2.3.7.2. Transporte de sedimentos en almacenamientos**

La producción de sedimentos del flujo de entrada a los cuerpos de agua y almacenamientos, se calcula con la Ecuación Universal de Perdida de Suelo Modificada. El flujo de salida de la producción de sedimentos a los almacenamientos, se calcula como el producto del volumen de salida por la concentración de sedimentos. La concentración de la producción de sedimentos en los almacenamientos dl flujo de salida se estima usando una simple ecuación de continuidad basada en los volúmenes y concentraciones del flujo de entrada, y el flujo de salida y el almacenamiento del cuerpo de agua.

## **2.7. FUENTES DE INFORMACIÓN**

Para la consulta de información geográfica, climatológica, existente diversas fuentes tanto impresas como formato digital, a continuación se mencionan las empleadas para la elaboración del presente trabajo y el tipo de información que reporta.

### **2.7.1. Información geográfica**

- **Mapa de suelos:** se obtuvo en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), del estudio general de suelos y zonificación de tierras para las tres cuencas principales del departamento del Chocó.
- **Mapas de cobertura vegetal:** se obtuvieron en el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), del estudio de cobertura de tierras para Colombia.

#### **2.7.1.1. Modelo Digital de altimetría.**

Este tipo de archivo se encuentra en formato raster y son mallas regulares a cada 3 segundos de arco. Esta información se presenta en formato digital a escala 2:250,000. Este archivo es indispensable para el inicio de las operaciones del software SWAT.

### **2.7.2. Información climatológica**

La información climatológica se obtuvo de la base de datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

- Series históricas de registros de precipitación y temperatura máximas y mínimas diarias.

## **2.8. INTERFASE CON SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

La extensión ArcSWAT – AcrGIS es la interfaz gráfica para el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (Arnold et al, 1998), este es un paquete de análisis de datos geográficos diseñados para ayudar a generar archivos de entrada SWAT y analizar específicamente información resultante a partir de simulaciones usando las características principales de ArcGIS.

Con la interface permite:

- Crear archivos de entrada directamente desde las tablas y mapas raster de ArcGIS.
- Correr el modelo SWAT sin salir de la interface.
- Mostrar resultados de SWAT usando los diferentes documentos de ArcGis como tablas, gráficos y mapas.

La interface fue creada como una extensión más de ArcGIS, esto quiere decir que es un programa independiente, permitiendo aprovechar las características disponibles en otras extensiones de ArcGIS.

Para utilizar la interface es necesario acceder a los temas de cada mapa en ArcGIS y los archivos de base de datos, los cuales proveen información de diferentes tipos dentro de la cuenca. Los mapas y tablas requeridos en el proceso de modelado son: Modelo Digital de Elevaciones (DEM), Cobertura y uso de las tierras, suelos, tabla de localización, tabla atributos de uso del suelo (.txt), tabla de atributos de suelos (.txt), tabla de datos de precipitación (.txt), tabla de datos de temperatura (.txt).

### **3. MARCO METODOLÓGICO**

La metodología utilizada en este trabajo, consiste en obtener características generales de la cuenca alta del río San Juan (clima, coberturas, suelos, relieve), necesarios para realizar la simulación del ciclo hidrológico en la zona de estudio.

#### **3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN**

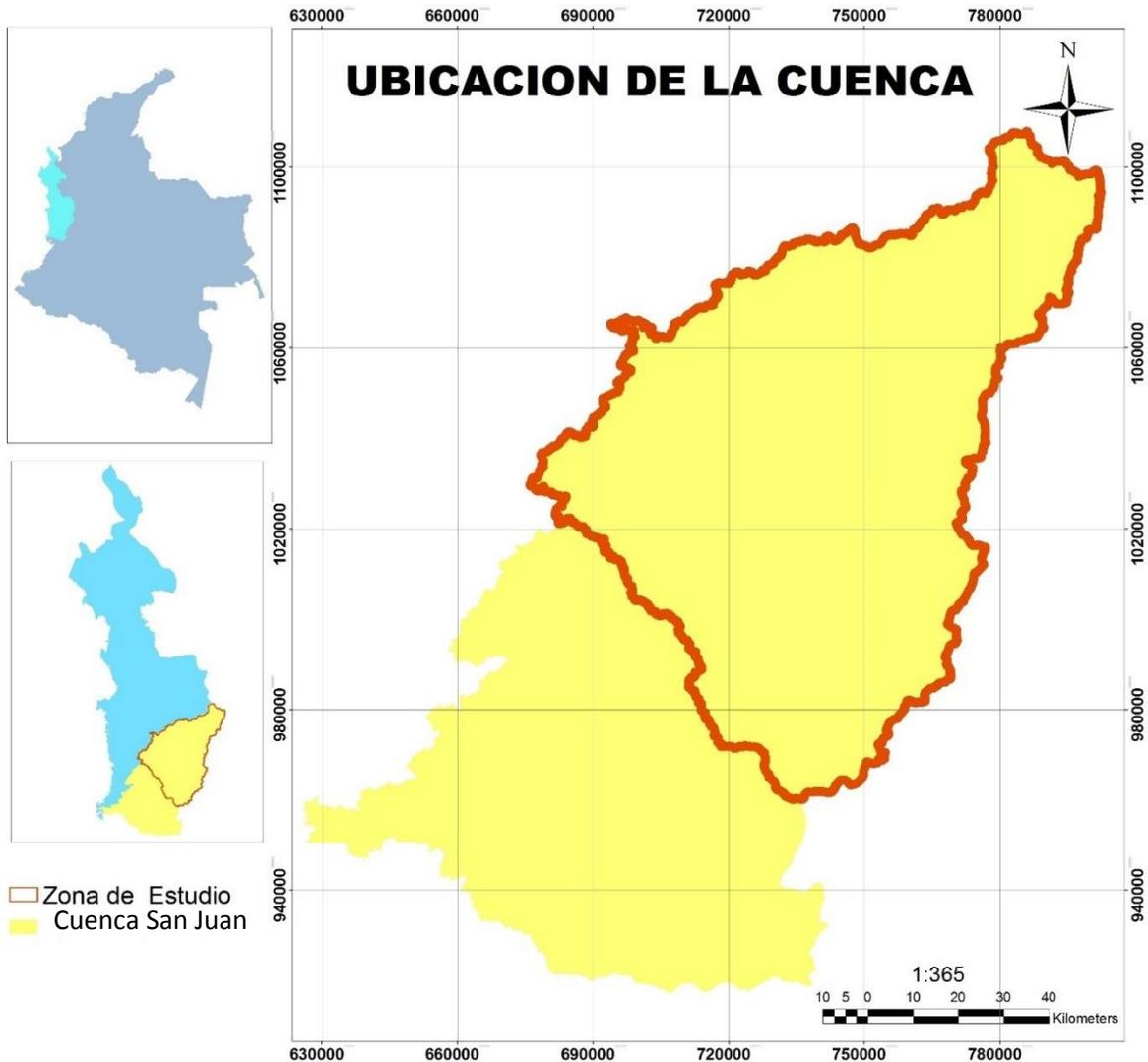
La investigación realizada fue de carácter determinística, ya que describe el comportamiento de las variables que componen el modelo hidrológico y persigue el conocimiento de la afectación de los escenarios de deforestación al régimen hidrológico de la cuenca media del río San Juan.

#### **3.2. INFORMACIÓN BASE**

##### **3.2.1. Zona de estudio.**

La cuenca de estudio se encuentra ubicada en el departamento del Chocó, en la parte alta de la cuenca del río San Juan como se observa en la **figura 11**. Esta área de estudio tiene una extensión de 907181,2249 Ha, sus aguas drenan al océano Pacífico y comprende algunos de los municipios como Istmina, Tado, Condoto, Novita, Sipí, donde más se desarrolla la actividad minera, por ende presentan mayores focos de deforestación derivados de esta actividad.

**Figura 11.** Localización de la cuenca.



### **3.2.2. Información Meteorológica**

En la cuenca se cuenta con 3 estaciones, de las cuales se disponen de registros de precipitación temperatura máximas y mínimas diarias.

#### **3.2.2.1. Características climáticas de la zona.**

La zona de confluencia intertropical, los vientos marítimos que circulan del océano hacia el continente, la corriente de Humboldt que modifica la temperatura de los vientos alisios al pasar por esta y la conformación orográfica.

En general en general la zona de estudio presenta un clima de tipo tropical caracterizado por pequeñas oscilaciones de temperatura durante todo el año.

Según la clasificación de Koeppen, el clima de la cuenca media del rio San Juan es súper húmedo de selva (AF), con lluvias durante todo el año.

### 3.2.2.1.1. Precipitación

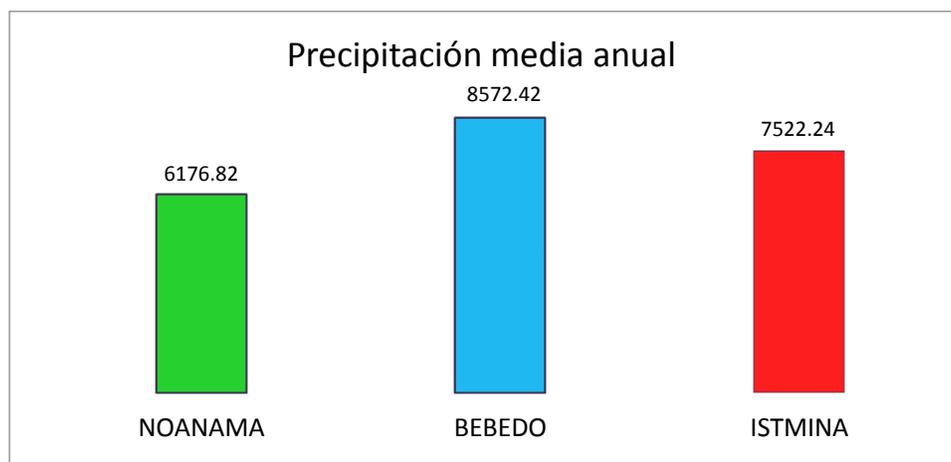
Los diferentes ascensos de aire, originados por múltiples causas que se dan en la zona de estudio, se unen para producir durante el año abundantes lluvias con valores puntuales máximos superiores a los 10,000 mm, anuales.

El comportamiento de la precipitación durante el año responde a una distribución de tipo bimodal, la cual se caracteriza por la alteración de dos temporadas muy lluviosas y dos relativamente menos lluviosas.

La primera temporada lluviosa se inicia en el mes de abril y se prolonga hasta finales de junio; máxima intensidad se presenta en el mes de mayo. La segunda temporada lluviosa (la más intensa) abarca el periodo de septiembre a noviembre, con máximas intensidades en septiembre y octubre. La temporada menos lluviosa, tiene lugar en el lapso comprendido entre los meses de diciembre a marzo.

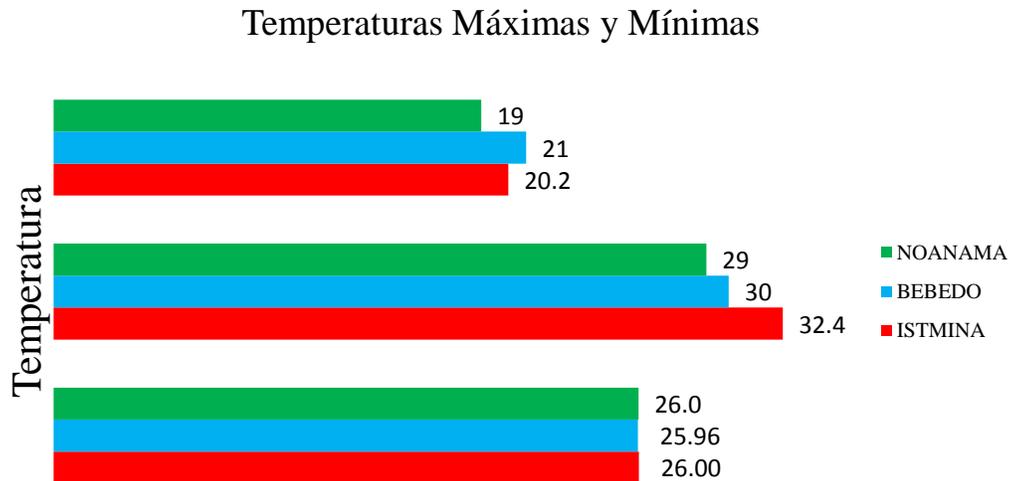
La siguiente grafica representa los valores promedios de precipitación anual para cada estación.

**Figura 12.** Valores promedio de precipitación de las estaciones



La temperatura está determinada por factores como: exposición solar, nubosidad, intensidad y procedencia de los vientos y circunstancias de tipo local como el relieve, microclimas y altitud. En la zona se presentan temperaturas medias anuales que oscilan entre 26° y 27 °; con máximas que oscilan entre 33.9 ° y 34.9 °C.

**Figura 13.** Temperaturas mínimas, máximas, y promedio de las estaciones



**Tabla 2.** Información de las estaciones

Nombre	Coordenadas Geográficas		Altitud msnm
	Latitud	Longitud	
NOANAMA	4.41	-76.56	40
PIE DE PEPE	5.07	-76.46	57
OPOGODO	5.03	-76.38	70
BEBEDO	4.55	-76.44	50
ITSMINA	5.09	-76.41	90

### 3.2.3. Características edáficas de la cuenca.

Las características del suelo de una cuenca hidrológica influyen fuertemente en cómo se desarrolla el escurrimiento superficial, así como el flujo su superficial. Propiedades del suelo, tales como la textura, profundidad de las capas impermeables y las modificaciones del suelo provocadas por las actividades humanas y procesos naturales, son factores que influyen en el comportamiento de aguas lluvias en las cuencas.

La formación de los suelos es el producto de varios procesos naturales. Típicamente, los suelos se desarrollan de modo tal que las capas superiores presentan el mayor impacto de la vegetación.

Dentro de los factores naturales que participan en la formación de los suelos cabe mencionar en tipo y distribución de la vegetación, la geología local, la actividad biológica, las reacciones minerales y topografía de la cuenca hidrológica. Estos determinan la cantidad de agua lluvia que penetra en el suelo y como se desplaza o se almacena en el suelo.

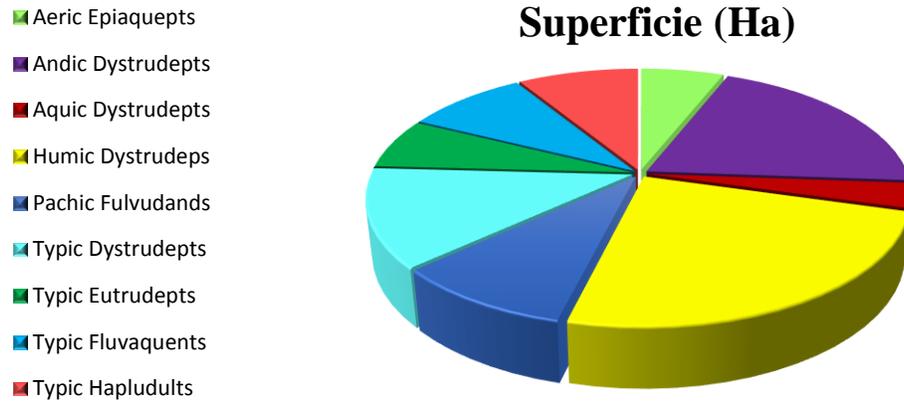
En presente trabajo se utilizó el estudio general de suelos y zonificación de tierras para el departamento del Chocó, realizado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2012).

Los suelos presentes en la cuenca media del rio San Juan se mencionan en la siguiente tabla.

**Tabla 3.** Tipos de suelo y superficie ocupada

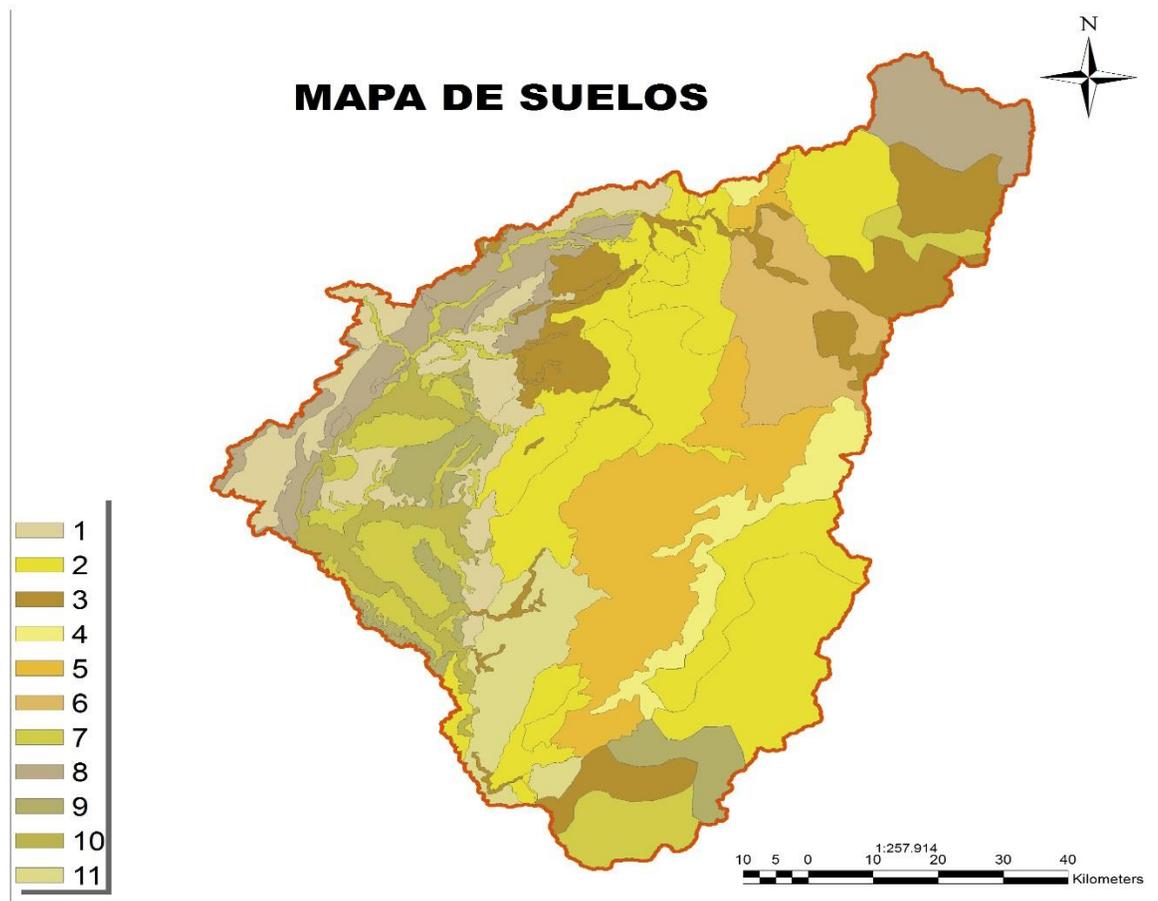
<b>Tipo de suelo</b>	<b>Superficie (Ha)</b>
Aeric Epiaquepts	34286,79331
Andic Dystrudepts	114261,7365
Aquic Dystrudepts	18484,1569
Humic Dystrudepts	139081,4315
Pachic Fulvudands	52908,27213
Typic Dystrudepts	71659,07389
Typic Eutrudepts	36821,95938
Typic Fluvaquents	50282,2734
Typic Hapludults	50094,68766
Typic Udifluvensts	49699,18952
Vitrandic Udorthents	39497,60881

**Figura 14.** Distribución de los suelos en la cuenca



En la **figura 15**, Se presenta el mapa con las diferentes clases de suelos encontrados en la cuenca.

**Figura 15.** Distribución de suelos en la cuenca media del Rio San Juan



A continuación se describen cada una de unidades de suelo presenten en la zona de estudio.

- **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 coluvión 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 ácida; 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 Dystrudepts:** 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 bajo en profundidad; la reacción es muy fuertemente ácida; 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:** ocupan las lomas y colinas, con relieve fuertemente quebrado y pendientes 25 – 50%; se originan a partir de rocas sedimentaria 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.
- **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 flocculante; 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 subadyacentes 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.
- **Vitrándic 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.

#### 3.2.4. Vegetación y uso de suelo en la cuenca.

Para la obtención de los mapas de uso de suelo en la cuenca, se partió del análisis de vegetación, realizado por Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), en el estudio de deforestación: sistema de monitoreo de bosques y carbono para Colombia, para el periodo 1990 – 2013.

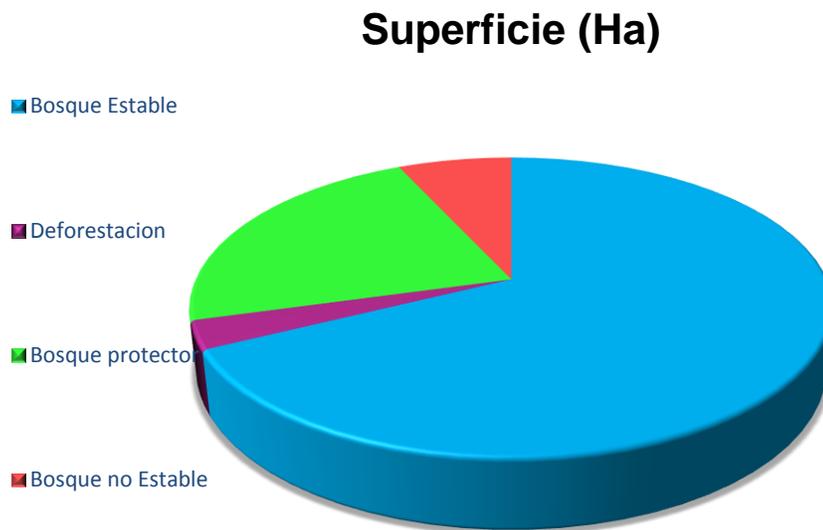
A partir del análisis de la información se pudo diferenciar 4 tipos de coberturas: **a)** Bosques estable, **b)** Bosque en transición, **c)** Bosque fragmentado, **d)** Deforestación.

La siguiente figura muestra la distribución espacial del uso del suelo en la cuenca para las condiciones actuales.

**Tabla 4.** Tipos de usos y coberturas del suelo

Tipo de cobertura	Superficie( Ha)
Bosque Estable	456771,40
Deforestación	20,80605
Bosque en transición	15,200
Bosque Fragmentado	43264

**Figura 16.** Distribución de los usos y coberturas del suelo



### 3.3. SECUENCIA METODOLÓGICA DE LA INVESTIGACIÓN

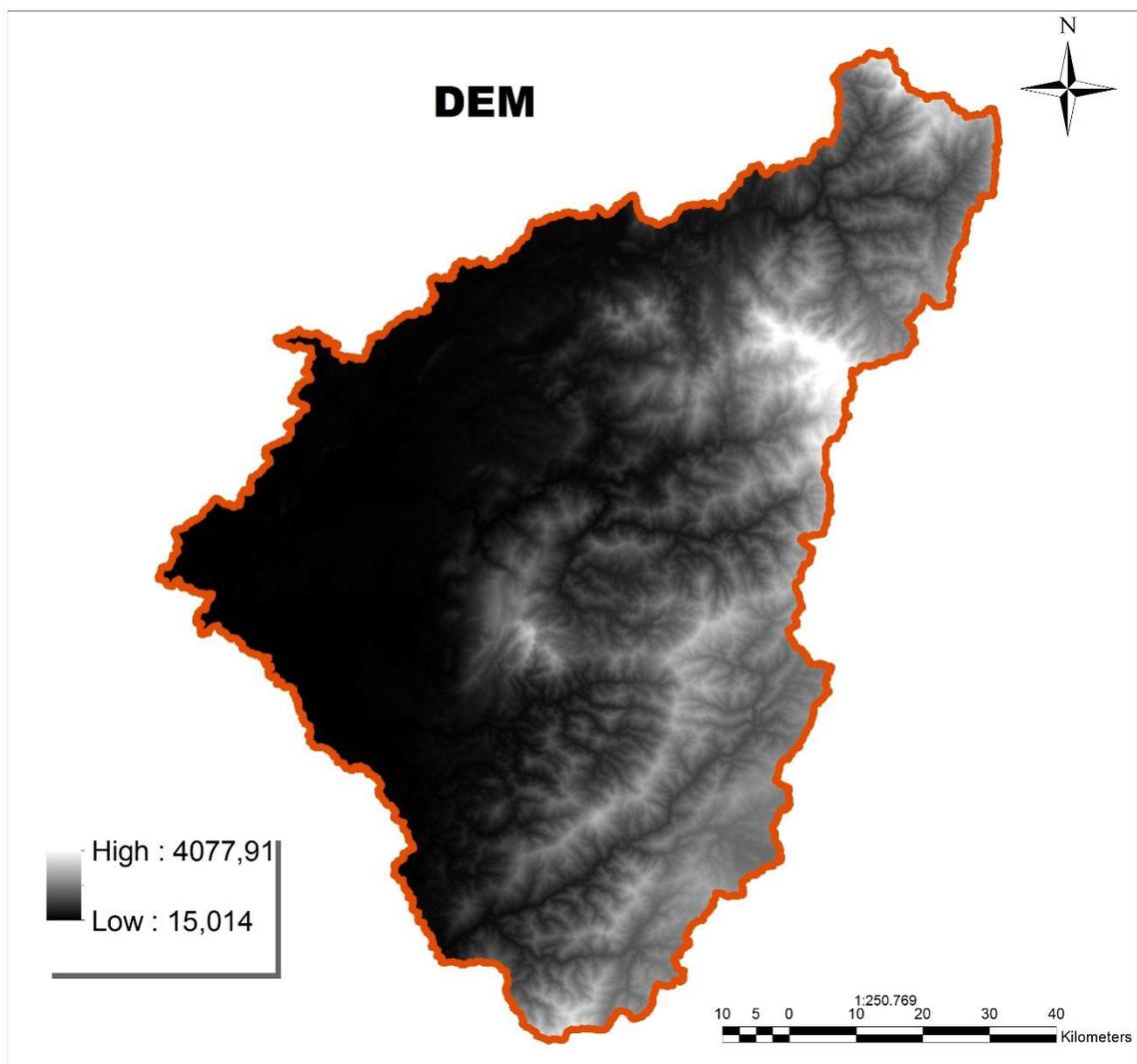
La simulación hidrológica que se realizó en el presente estudio tiene por objetivo principal es el análisis de la variación de respuesta hidrológica de la cuenca media del río San Juan ante diferentes escenarios de modificación de la cobertura vegetal (deforestación consecuencia de la actividad minera).

A continuación se describe la metodología utilizada en el desarrollo de este trabajo.

### 3.3.1. Delimitación digital de la cuenca

Para la delimitación de la cuenca fue necesario contar con el Modelo Digital de Elevaciones, DEM (figura 17); el cual se generó a partir de las coordenadas geográficas máximas y mínimas del área de estudio; se obtuvo un archivo digital (\*.Grid) para poder ser procesado en el sistema de información geográfica GIS, ArcView.

**Figura 17.** Modelo digital de Elevación de la cuenca media del rio San Juan



### 3.3.2. Evaluación de patrones de deforestación en la cuenca

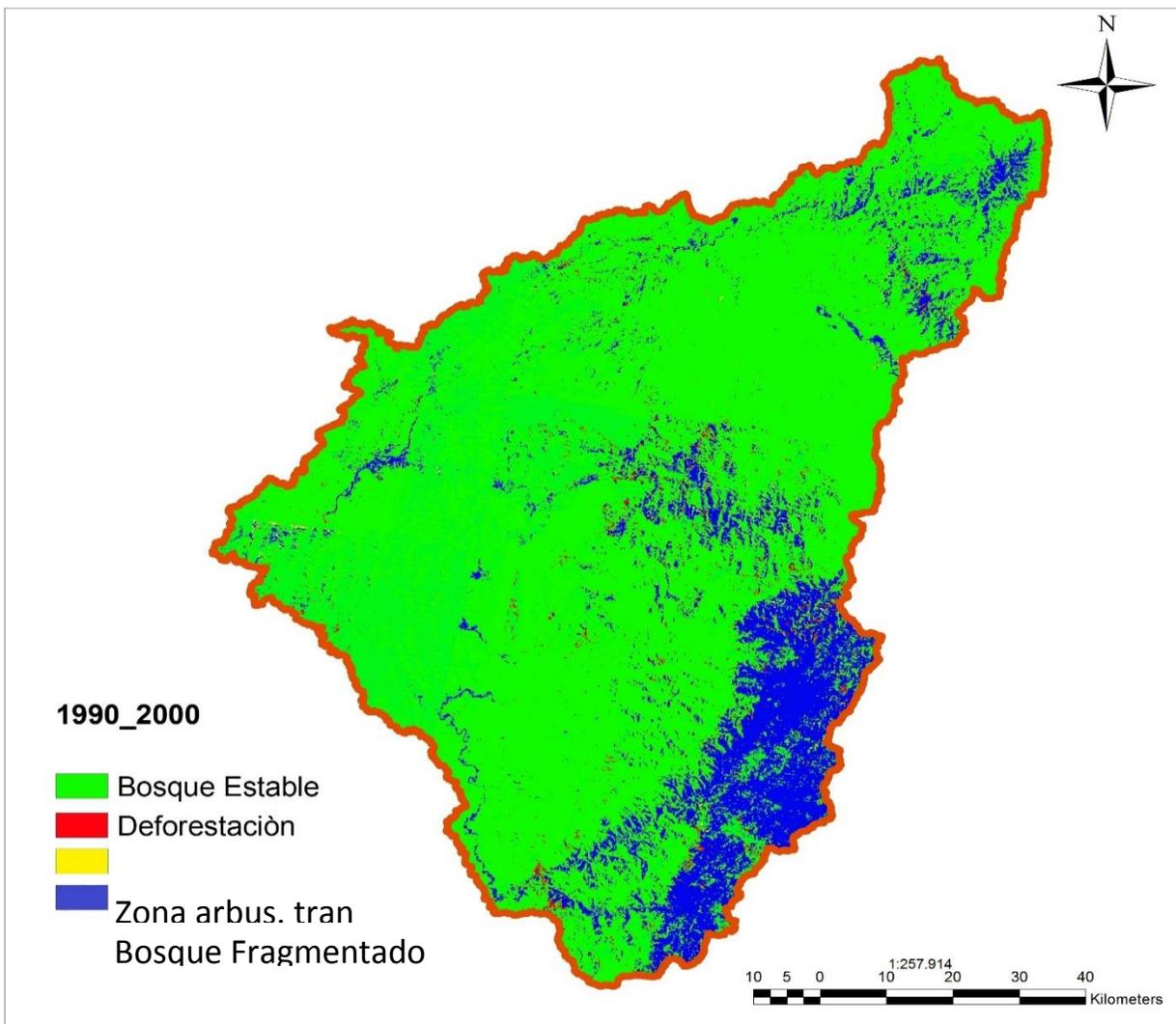
La evaluación de los patrones de deforestación en la cuenca se hizo mediante la confección de mapas que recrean situaciones temporales de análisis de deforestación de la cuenca Media del río San Juan (escenarios de cambio), basadas en la variación del porcentaje de área deforestada por minería.

#### 3.3.2.1. Escenarios de cambio

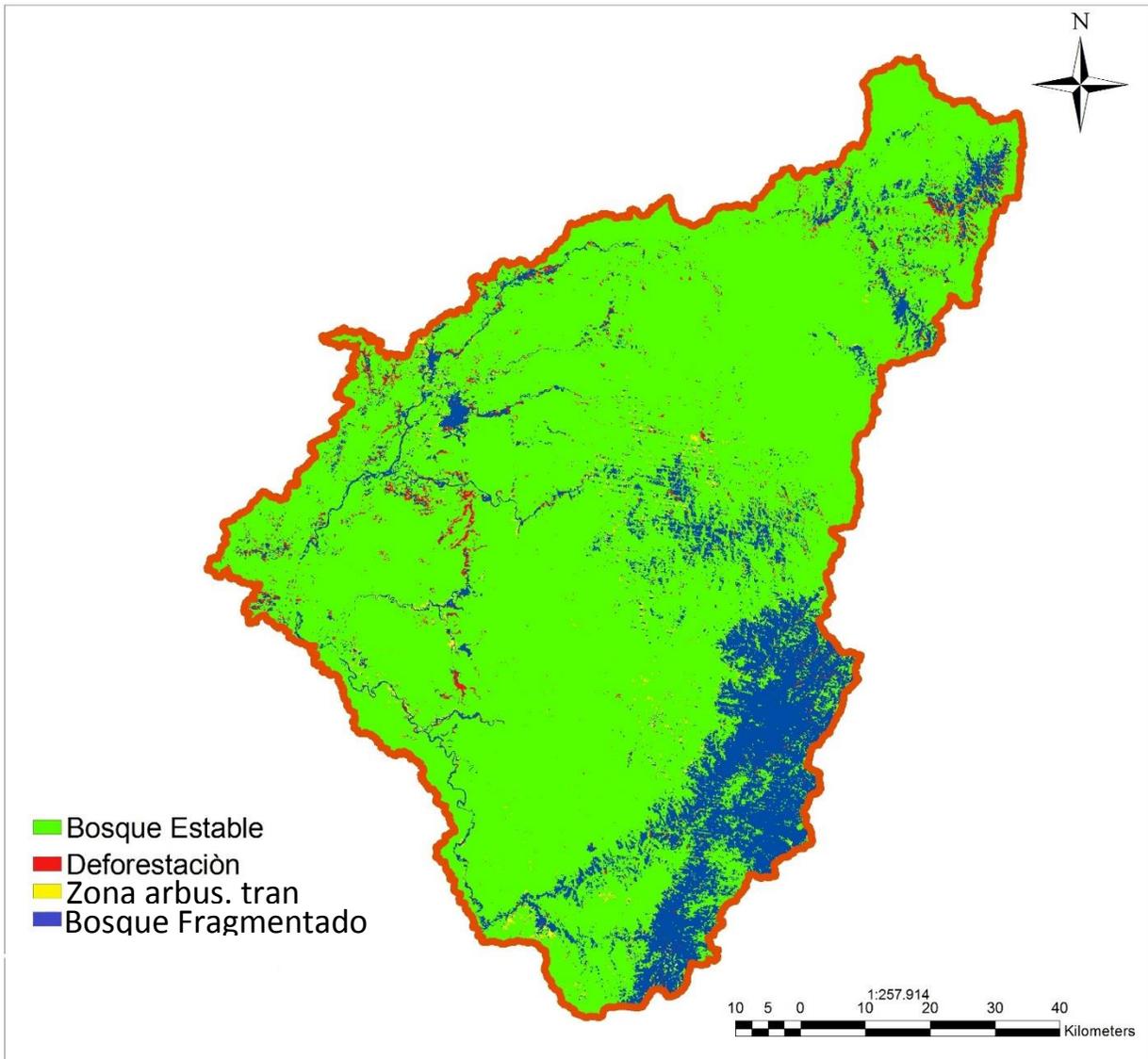
Se obtuvieron escenarios de cambios para la cuenca, los cuales describen en cambio en el uso de suelo.

Se analizaron dos escenarios: **a)** período 1990 – 2000 y **b)** periodo 2000 – 2010. Los cuales se muestran a continuación.

**Figura 38.** Escenario de cobertura de la cuenca para el periodo 1999 – 2000



**Figura 49.** Escenario de cobertura de la cuenca para el periodo 2000 – 20010

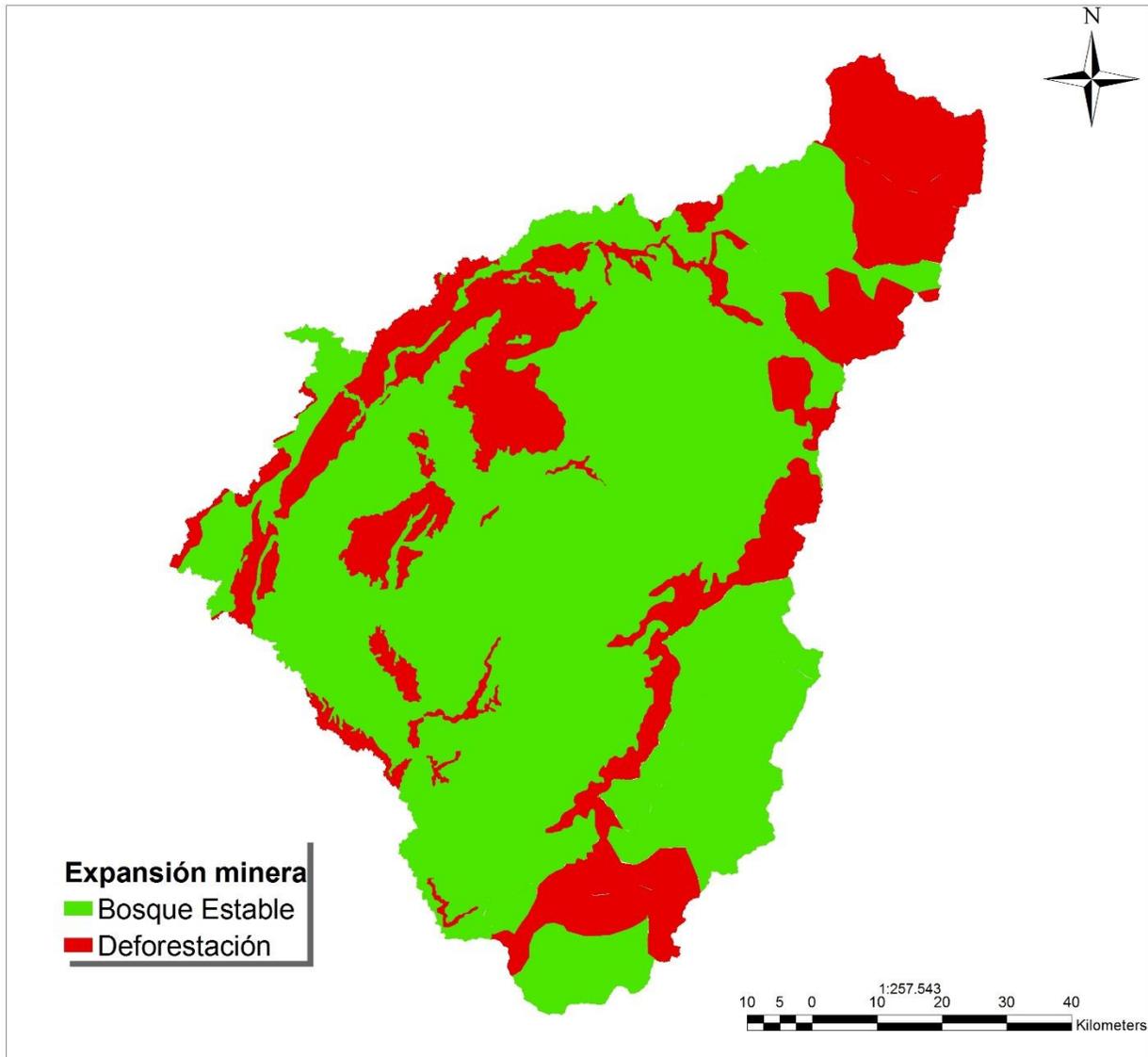


### 3.3.2.2. Escenario hipotético.

Se desarrolló un escenario (**Figura 20**) que consiste en el hipotético aumento del área deforestada para recrear condiciones de minería adversa.

Cabe resaltar que los escenarios propuestos obedecen a la iniciativa del autor del trabajo.

**Figura 20.** Escenario expansión minera



### 3.3.3. Alimentación del Modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool)

El modelo SWAT está conformado por procesos físicos, los cuales se utilizan para simular los procesos hidrológicos de una cuenca.

La alimentación de este modelo parte de la información base, la cual hace referencia a: datos climatológicos, atributos de uso del suelo y atributos de suelos.

- **Datos climáticos:** Se definieron 3 estaciones, con suficiente número de registros de precipitación, temperatura mínima y temperatura máxima diarias.

La gráfica 21, presenta la interface de entrada de datos climatológicos de las estaciones.

**Figura 21.** Tabla de entrada de datos para cada estación.

The screenshot shows the 'User Weather Station Edits' window. On the left, a list of stations includes 'BEBEDO', 'ISTMINA', and 'NOANAMA'. The 'Weather Station Parameters' section contains the following data:

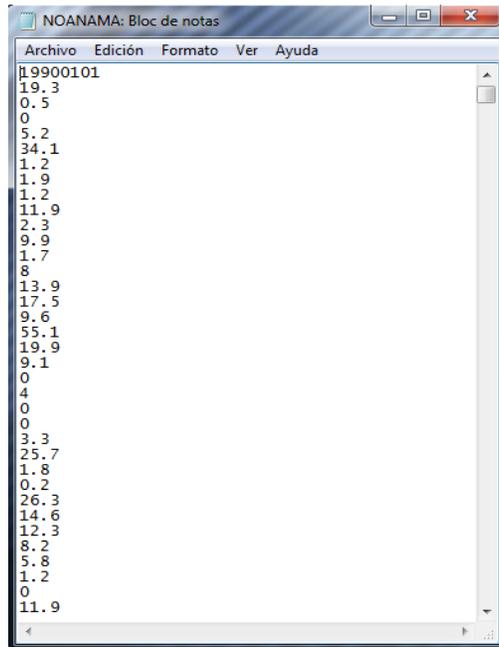
Station Name	BEBEDO		
WLONGITUDE (deg)	WLATITUDE (deg)	RAIN_YRS (yrs)	WELEV (m)
-76.82	4.94	10	50

The 'Monthly Weather Parameters' section shows a dropdown menu for 'Parameter' with 'TMPMX' selected. The monthly values are as follows:

Parameter	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
TMPMX	27	25.3	30	26.5	29	27.5	29.6	27.1	25.9	23.9	27.8	27.4

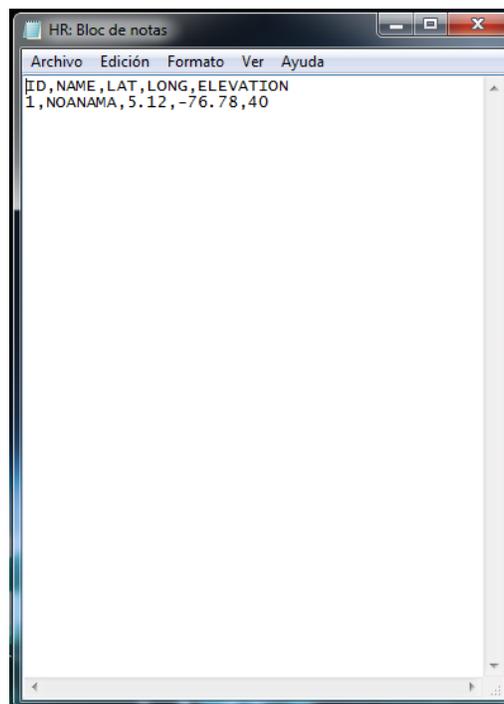
Además, de ingresar el valor de cada una de estas variables para cada estación, se debe hacer en formato txt los archivos que contengan la información de los registros diarios, de precipitación, temperaturas máximas y mínimas, donde la primera línea corresponde a la fecha de inicio (Años/mes/día) de los registros de la serie; debajo de esta se ponen los valores medidos para cada día.

**Figura 22.** Información de precipitación diaria, formato txt.



Otro archivo importante a la hora de introducir la información climatológica, es el archivo en formato txt que contenga los datos de ubicación de la estación.

**Figura23.** Tabla de localización de la estación, formato txt.



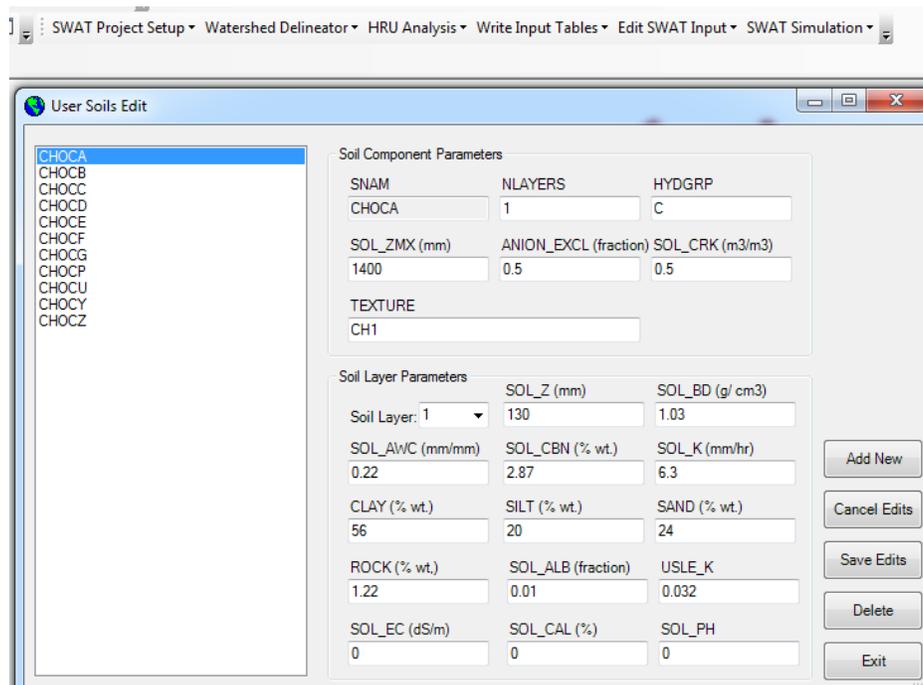
Nótese que el nombre de la estación que aparece en la tabla de localización, es el mismo nombre del archivo que contiene los datos climatológicos, esto se debe a que SWAT los importa como datos asociados a esa estación, por lo tanto se necesita que estos archivos estén guardados en la misma carpeta.

- **atributos de suelos:** las variables requeridas para el modelo son: número de capas del perfil (NUMLAYER), espesor de cada capa (Z), grupo hidrológico (HRDGRP), albedo(ALB), valor de K de las EUPS (USLEK), densidad aparente (BD), conductividad hidráulica (K), carbón orgánico (CBN), % arcilla (CLAY), % arena (SAND) y % limo (SLT) (Anexo).

El grupo hidrológico para cada suelo se clasificó de acuerdo a su clase textural, el factor K de la EUPS se determinó para la primera capa de los perfiles.

La siguiente figura muestra la interfaz de SWAT para poder ingresar los datos de cada tipo de suelo presente en la cuenca.

**Figura 24.** Tabla de entrada de datos de suelo.



- **Atributos de uso del suelo:** las variables requeridas por cada cobertura, se encuentran en la base de datos del programa, en este trabajo se escogieron las coberturas equivalentes a las presentes en la zona ya que es complicado contar con la información tan detallada que requiere el programa.

A continuación se muestra la ventana que despliega el modelo para poder introducir la información necesaria.

**Figura 25.** Tabla de entrada de datos de coberturas vegetales.

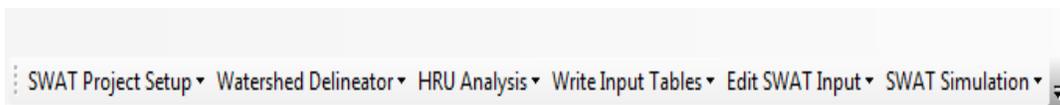
The screenshot shows the 'Land Cover/Plant Growth Database Edit' window. On the left is a list of crop types, with 'Forest-Mixed' selected. The main area is divided into 'Crop type Parameters' and 'Hydrological Parameters'. The 'Crop type Parameters' section includes fields for Crop Name (Forest-Mixed), CPNM (FRST), IDC (Trees), and various biological parameters like BIO\_E, HVSTI, BLAI, FRGRW1, LAIMX1, CHTMX, RDMX, etc. The 'Hydrological Parameters' section includes OV\_N (0.1) and SCS Runoff Curve Numbers (A: 36, B: 60, C: 73, D: 79). Buttons for 'Add New', 'Save Edits', 'Cancel Edits', 'Delete', 'Default', and 'Exit' are on the right.

### 3.3.4. Modelación hidrológica.

Para la modelación hidrológica se utilizó el modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool), como una extensión del ARCGis, siguiendo la secuencia de pasos establecidos en los diferentes menús disponibles en la barra de herramientas del modelo.

La barra de herramientas ofrece al usuario seis (6) opciones: SWAT Project Setup, Watershed Delineator, HRU Analysis, Write Input Tables, Edit SWAT Input Menú y SWAT Simulation.

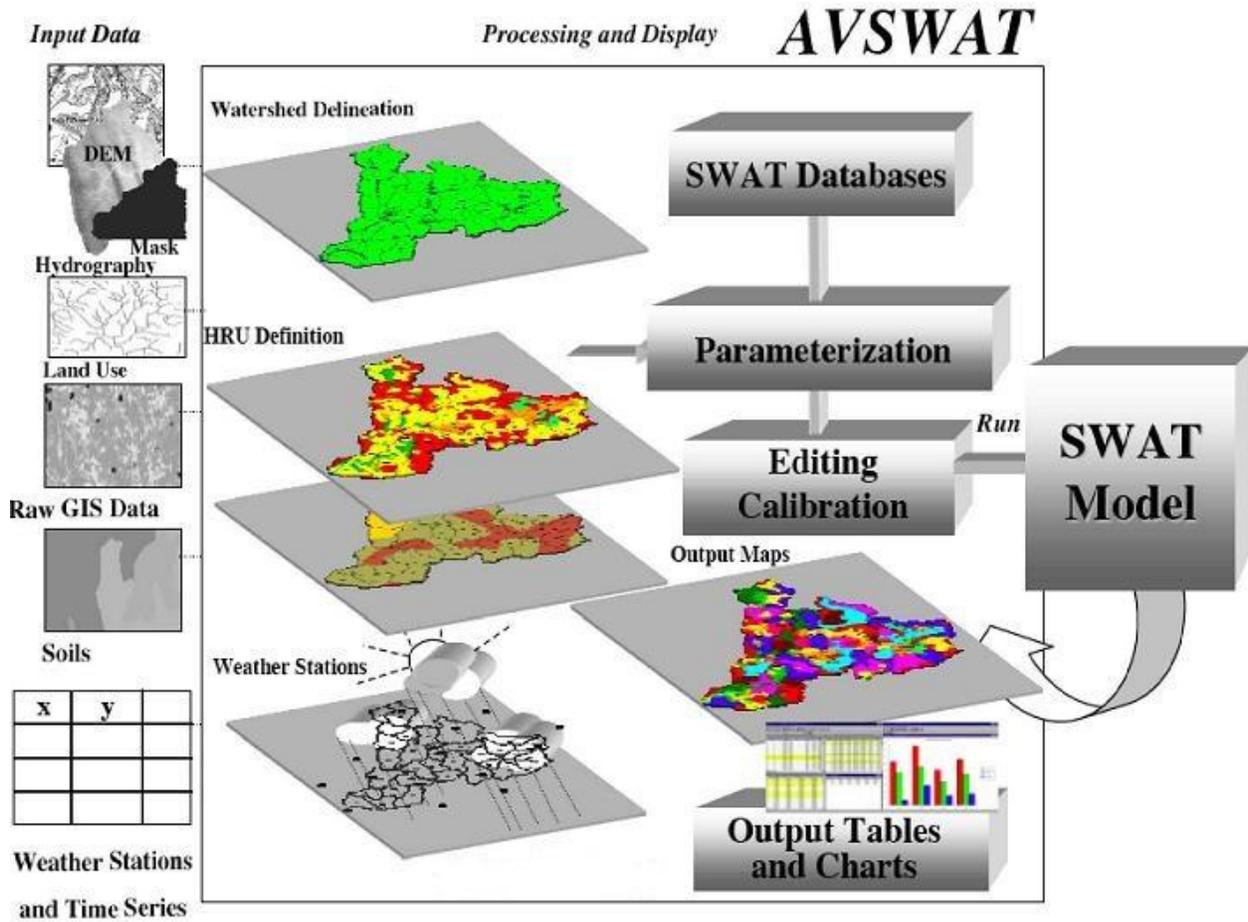
**Figura 26.** Barra de menú de la interface ArcGis.



Los menús personalizados de la interface contienen los comandos necesarios para procesar los datos de la cuenca, generar archivos de entrada, correr el modelo, y mostrar los resultados. La variedad en cada uno de los seis (6) menús están listados de arriba hacia abajo y deben ser procesados en este orden de secuencia. Debido al número de diferentes pasos requeridos para procesar la información, la interface mantiene un registro del usuario y no permite que se seleccione comandos hasta que los comandos prioritarios hayan sido ejecutados.

El proceso realizado en la interface ArcSWAT se presenta a continuación en la **figura 21**.

**Figura 57.** Proceso y despliegue de salida de la interface ArcSWAT.



## 4. RESULTADOS

### 4.1. SIMULACIÓN DEL CICLO HIDROLOGICO.

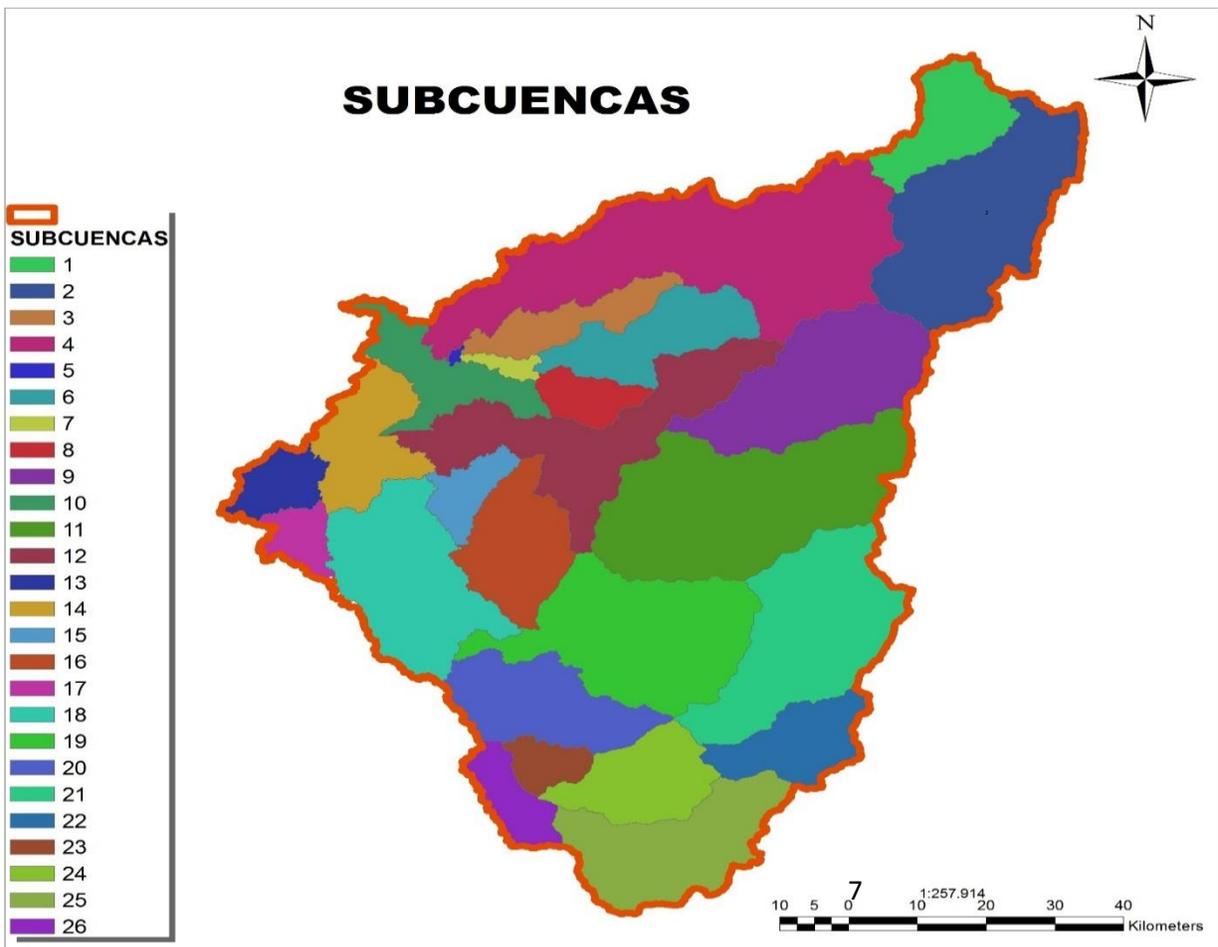
SWAT permite la simulación de diferentes procesos físicos en una cuenca hidrográfica.

En el presente trabajo para la simulación del ciclo hidrológico de la cuenca alta del río San Juan el modelo SWAT utilizó los siguientes métodos para el cálculo de las variables.

SWAT realiza la simulación hidrológica de manera diaria, mensual o anual para cada una de las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU). En el presente estudio se realizaron comparaciones mensuales de la información, ya que se facilita el análisis de datos de salida, debido a la cantidad de datos generados y manejados.

SWAT para mejorar la representación del balance hídrico de una cuenca, la divide en partes más pequeñas llamadas subcuencas (**figura 28**) y en HRU, que son zonas que tienen características físicas y climatológicas homogéneas.

**Figura 28.** Subcuencas generadas por ArcSWAT.



Una vez que el modelo crea las subcuencas, genera un archivo con el reporte de cada una, donde especifica el área, tipo de suelos, tipos de coberturas y pendientes presentes.

La siguiente figura muestra un ejemplo de los registros generados en este trabajo.

**Figura 29.** Reporte de la configuración de las subcuencas.

Detailed LANDUSE/SOIL/SLOPE distribution SWAT model class Date: 18/11/2015 0:00:00 Time: 15:56:30.7858684			
Watershed		Area [ha]	Area[acres]
Number of Subbasins: 26		907181,2249	2241690,1657
<hr/>			
LANDUSE:		Area [ha]	Area[acres] %Wat.Area
Agricultural Land-Close-grown --> AGRC		4,8652	12,0222 0,00
Forest-Mixed --> FRST		627948,6311	1551692,4648 69,22
Pasture --> DEFO		10773,7222	26622,4062 1,19
Forest-Deciduous --> FRSD		145320,9871	359095,4252 16,02
Agricultural Land-Generic --> AGRL		2959,1569	7312,2247 0,33
Forest-Evergreen --> FRSE		120173,8624	296955,6226 13,25
SOILS:			
	CHOCA	71113,1989	175724,2702 7,84
	CHOCB	254322,7735	628444,2895 28,03
	CHOC	100050,8406	247230,6296 11,03
	CHOCB	36534,2641	90277,9933 4,03
	CHOCE	114210,5698	282220,0286 12,59
	CHOCE	52813,4499	130504,6754 5,82
	CHOCG	78612,5166	194255,4591 8,67
	CHOC	39104,9963	96630,4011 4,31
	CHOCU	82765,5434	204517,7959 9,12
	CHOCY	34078,5103	84209,7030 3,76
	CHOCZ	43574,5614	107674,9200 4,80
SLOPE:			
	0-10	184475,4301	455848,0116 20,34
	10-20	114922,8804	283980,1837 12,67
	20-30	113394,8978	280204,4622 12,50
	30-36	70295,1439	173702,8153 7,75

#### 4.1.1. Análisis de sensibilidad del modelo.

Tomando como base los trabajos realizados por Torres et al., (2001 y 2006), y con el objetivo de mirar la sensibilidad del modelo a cambios en algunos parámetros, se pudo observar que este presenta una sensibilidad alta a la variación del número curva ( $CN_2$ ), la capacidad de agua disponible en el suelo (SOL\_KWC) y la conductividad hidráulica saturada (SOL\_K). Dichos parámetros fueron variados para cada subcuenca, posterior mente a estos cambios se observó la respuesta hidrológica de esta misma.

Ortiz, (2010), indica que además de los parámetros variados en este trabajo para realizar la prueba de sensibilidad, sugiere que el modelo también presenta sensibilidad alta al cambio de parámetros como el factor de compensación de la evaporación del suelo (ESCO), coeficiente del “revap” del agua subterránea (GE\_REVAP), factor partículas de labranzas (USLE\_P) entre otras.

El cuadro 7, indica los parámetros variados en el análisis de sensibilidad del modelo.

**Tabla 5.** Parámetros variados en la prueba de sensibilidad.

Parámetro modificado	Significado	Grado de Sensibilidad	Parámetro de salida que modifica
$CN_2$	Numero curva en la subcuenca	Alto	Escurrimiento superficial
			Escurrimiento subsuperficial
SOL_K (mm/h)	Conductividad hidráulica saturada	Alto	Escurrimiento superficial
SOL_KWC	capacidad de agua disponible	Alto	Escurrimiento superficial

Sensible según la teoría el CN<sub>2</sub> es uno de los parámetros al cual el modelo presenta mayor sensibilidad, para cuantificar el efecto de este sobre los procesos hidrológicos, en especial sobre el escurrimiento superficial se realiza una metodología donde se tiene en cuenta una variación del valor de CN<sub>2</sub> para cada una de las coberturas presentes en la cuenca, estas variaciones corresponden al aumento del 10 %, 20%, y disminución del 30% del valor utilizado del CN<sub>2</sub> para la simulación. Esto se hizo con el objetivo de ver el verdadero efecto del cambio del número cuerva en la respuesta hidrológica de esta.

El cuadro 7 muestra los valores de los CN<sub>2</sub> utilizados en el análisis de sensibilidad.

**Tabla 6.** Valor de CN<sub>2</sub> para análisis de sensibilidad

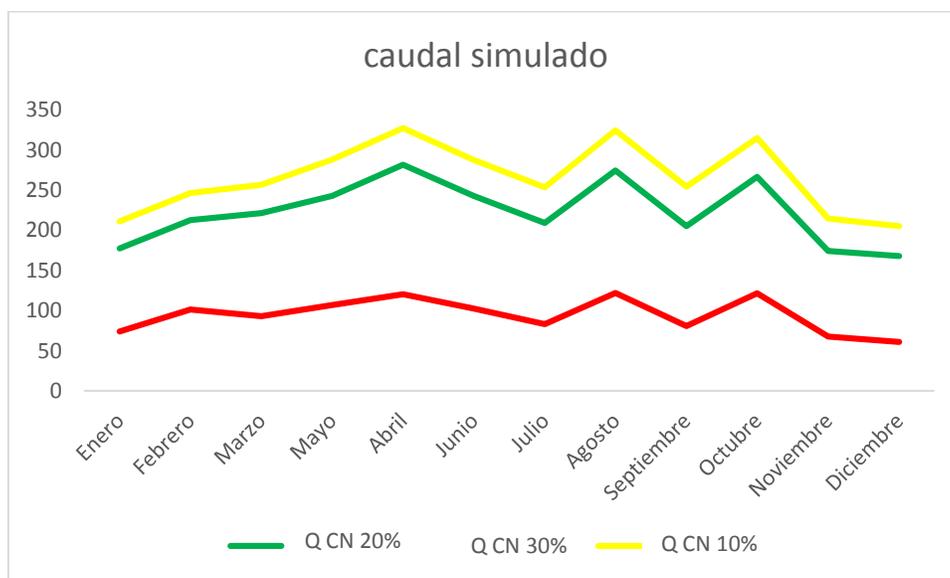
Cobertura	CN <sub>2</sub> inicial	CN <sub>2</sub> aumento 10%	CN <sub>2</sub> aumento 20%	CN <sub>2</sub> disminución 30%
Bosque Denso	69.6	76.6	83.52	48.42
Deforestación	79.10	87.01	94.92	55.37
Bosque en transición	73.10	80.41	87.72	51.17
Bosque fragmentado	75.84	83.42	91	56.1

La siguiente tabla muestra resultados de caudales de escorrentía superficial mensual obtenidos para variación de CN<sub>2</sub>.

**Tabla 7.** Valor de caudales simulados para diferentes CN<sub>2</sub>

MES	Q CN 10%	Q CN 20%	Q CN 30%
Enero	177.50	211.14	73.98
Febrero	212.68	146.22	101.51
Marzo	221.54	256.47	93.08
Mayo	242.94	287.99	107.04
Abril	281.73	327.03	120.26
Junio	242.77	287.57	102.45
Julio	209.02	253.55	83.22
Agosto	274.58	324.26	121.79
Septiembre	204.97	254.25	80.69
Octubre	266.71	315.01	121.54
Noviembre	174.23	214.59	67.63
Diciembre	167.92	205.27	60.94

**Figura 30.** Representación gráfica de caudales de escorrentía simulados para diferentes variaciones de CN<sub>2</sub>



Con lo anterior se puede apreciar una comparación de la respuesta hidrológica de la cuenca ante cambios del valor del CN<sub>2</sub>, con lo cual se aprecia la diferencia notoria entre resultados obtenidos a partir de CN<sub>2</sub> altos hasta CN<sub>2</sub> bajos.

Al aumentar los valores del CN<sub>2</sub> para ver la sensibilidad del modelo ante el cambio de este parámetro, se notó que si el valor del CN<sub>2</sub> aumentaba, el caudal se veía afectado notoriamente y aumentaba, y a medida que disminuía el CN<sub>2</sub>, el caudal era menor. Puede reflejarse entonces una incidencia directa entre el CN<sub>2</sub> y la producción de caudal de escorrentía en la cuenca alta del río San Juan.

#### 4.1.2. Análisis de escenarios de cambio propuestos

Los escenarios analizados en esta parte corresponden a los obtenidos a partir de los mapas proporcionados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), de su estudio de monitoreo de Bosques y carbono en Colombia.

Los escenarios propuestos son dos. El primero corresponde al período 1990 – 2000, el segundo al periodo 2000 – 2010 y de acuerdo con las figuras 18 y 19, se distribuyen de la siguiente manera en la cuenca.

**Tabla 8.** Distribución de la cobertura en la cuenca 1990 - 2000

cobertura	Área%	CN <sub>2</sub>
Bosque Denso	85.26	69.6
Deforestación	1.19	79.10
Bosque en transición	0.33	73.10
Bosque fragmentado	13.23	75.84

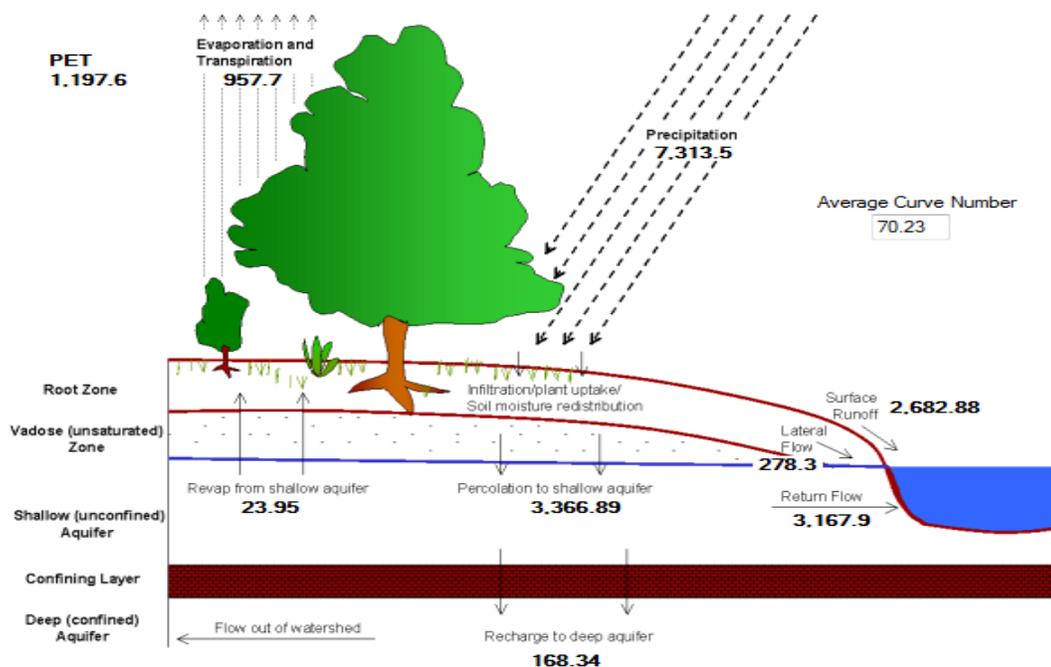
**Tabla 9.** Distribución de la cobertura en la cuenca 2000 - 2010

Cobertura	Área%	CN2
Bosque Denso	83.98	69.6
Deforestación	2.04	79.10
Bosque en transición	0.96	73.10
Bosque fragmentado	13.02	75.84

Estos escenarios se implementaron en SWAT y se analizaron los resultados en cuanto a las variables hidrológicas.

Al aplicar las coberturas y escenarios anteriores se obtuvo el resultado mostrado en las figuras 23 y 24.

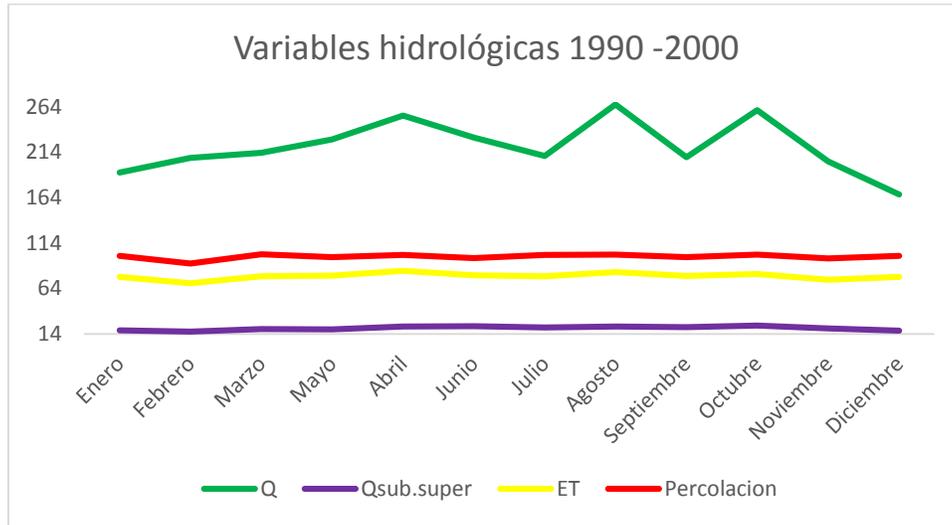
**Figura 31.** Representación gráfica de los valores de las variables del ciclo hidrológico generada por SWAT para el escenario de 1990 – 2000.



**Tabla 10.** Valores anuales de variables hidrológicas para el escenario de cambio 1990 - 2000.

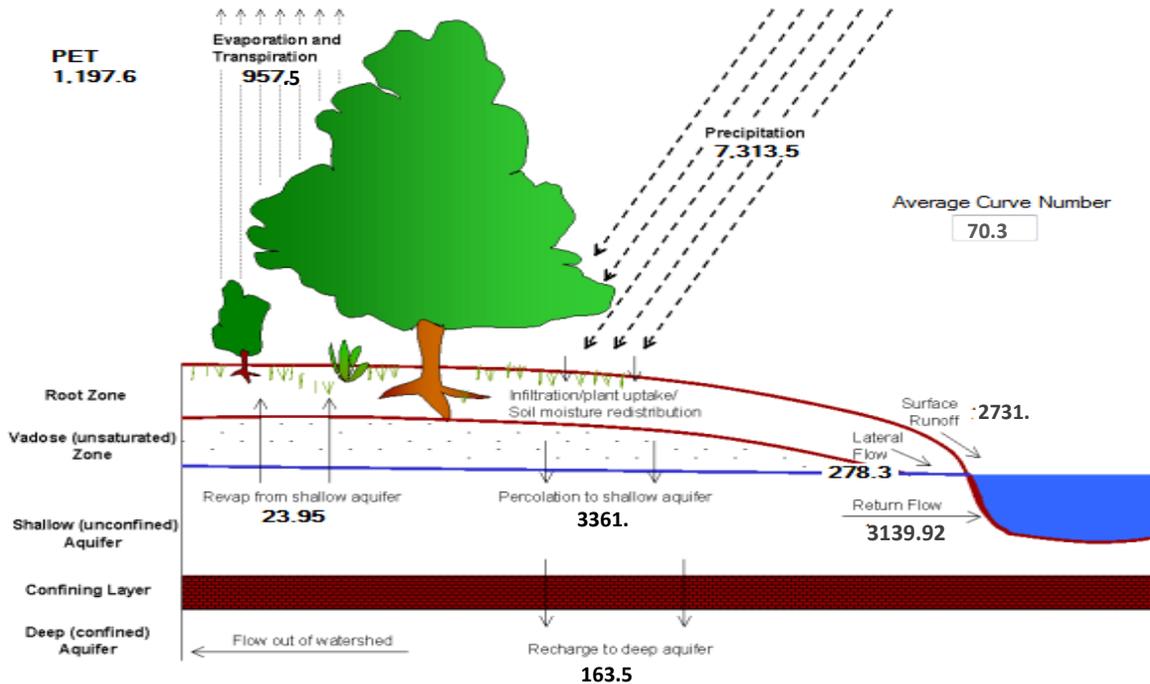
Escenario	pp(mm)	Q(mm)	ET (mm)	Q subsuperficial (mm)	Percolación (mm)
1990 - 2000	7313.5	2682.88	957.7	168.34	3366.89

**Figura 32.** Variables hidrológicas medias mensuales para escenario 1990 – 2000



Al relacionar la lluvia (pp), con el escurrimiento (Q), la evapotranspiración (EVT), el escurrimiento subsuperficial y la percolación, se puede decir que para el escenario de cambio 1990 -2000, la porción de la lluvia que se transformó en escurrimiento, tuvo un valor medio de 36.64%, la porción que se evaporó y transpiró fue de 13.1%, la porción que se convirtió en escorrentía subsuperficial es de 2.26 % y la porción que se percoló es de 46.41%.

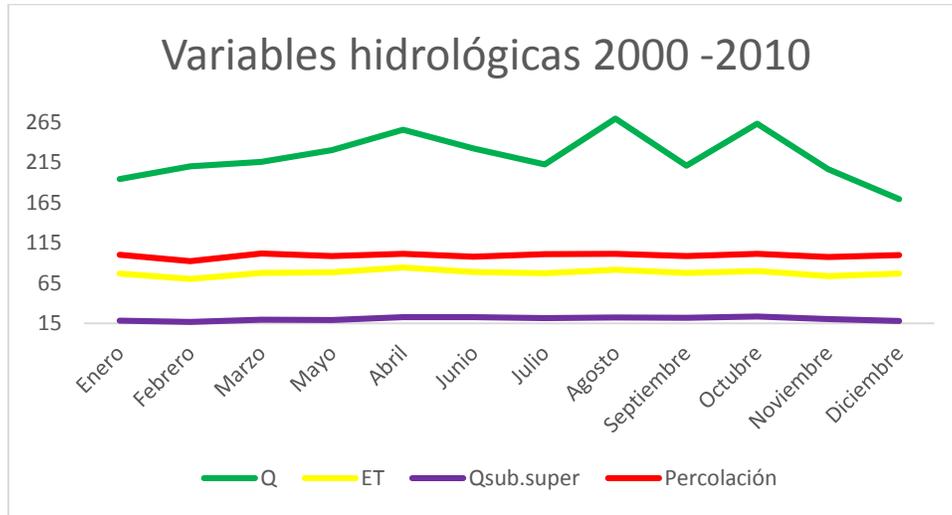
**Figura 33.** Representación gráfica de los valores de las variables del ciclo hidrológico generada por SWAT para el escenario de 2000 - 2010.



**Tabla 11.** Valores anuales de variables hidrológicas para el escenario de cambio 2000 - 2010.

Escenario	pp(mm)	Q(mm)	ET (mm)	Q subsuperficial (mm)	Percolación (mm)
2000 -2010	7313.5	2713.1	957.3	163.53	3361.94

**Figura 34.** Variables hidrológicas medias mensuales para escenario 2000 - 2010



Al relacionar la lluvia (pp), con el escurrimiento (Q), la evapotranspiración (EVT), el escurrimiento subsuperficial y la percolación, se puede decir que para el escenario de cambio 2000 – 2010, la porción de la lluvia que se transformó en escurrimiento, tuvo un valor medio de 37.10 %, la porción que se evaporó y transpiró fue de 13.08%, la porción que se convirtió en escorrentía subsuperficial es de 2.24 % y la porción que se percoló es de 45.96%.

Si se hace una comparación de las variables del ciclo hidrológico para estos dos escenarios, se observa una diferencia leve, casi imperceptible en ellas, lo que lleva a pensar que surten efectos similares.

#### 4.1.3. Análisis del escenario de expansión minera.

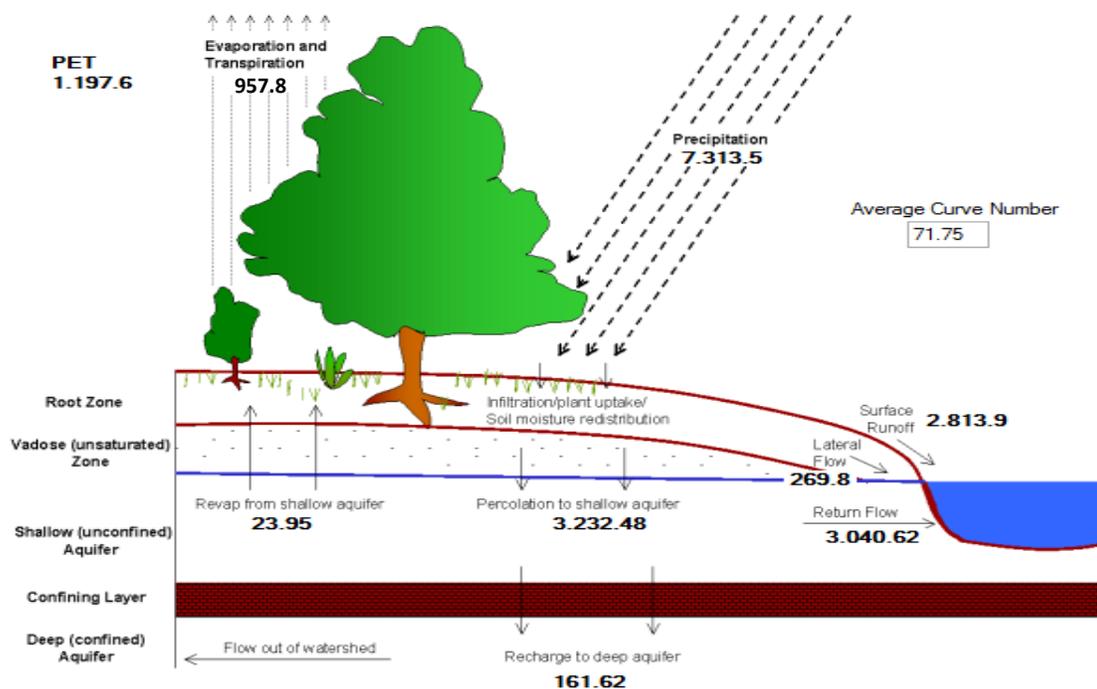
Este escenario obedece al hipotético aumento de las zonas deforestadas en la cuenca. Hay que tener en cuenta que los escenarios hipotéticos sirven para ver la respuesta ante cambios extremos, por ejemplo de deforestación como resultados de una actividad minera adversa.

La configuración de este escenario es la mostrada en el cuadro 11.

**Tabla 12.** Distribución de la cobertura en la cuenca, expansión minera

Cobertura	Área (%)	CN2
Bosque Denso	71.44	69.6
Deforestación	28.56	79.10

**Figura 35.** Representación gráfica de los valores de las variables del ciclo hidrológico generada por SWAT para el escenario de expansión minera.



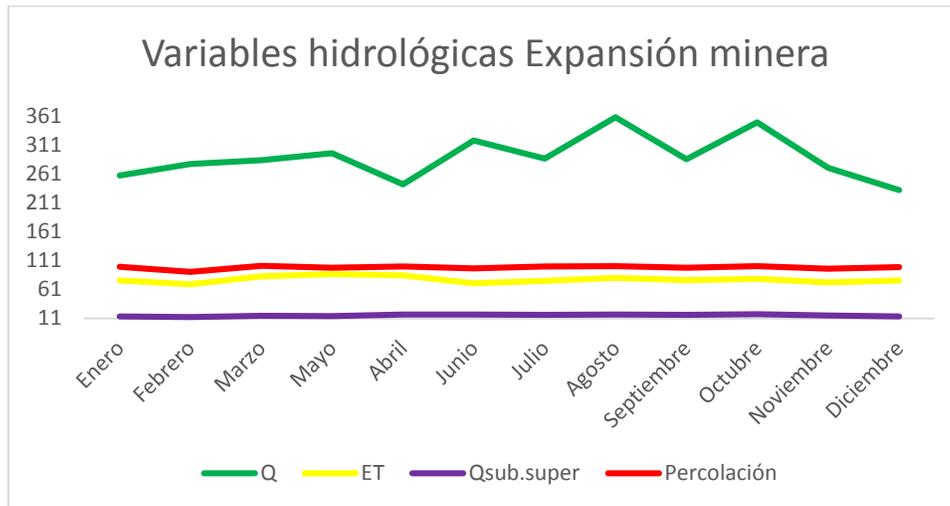
**Tabla 13.** Valores anuales de variables hidrológicas para el escenario de expansión minera.

Escenario	pp(mm)	Q(mm)	ET (mm)	Q subsuperficial (mm)	Percolación (mm)
Expansión minera	7313.5	2813.9	957.8	158.38	3256.22

La generación de este escenario de deforestación arrojó resultados que permitieron cuantificar de alguna manera el cómo interviene la cobertura vegetal en la respuesta hidrológica de cuencas.

La siguiente grafica muestra el comportamiento de las variables hidrológicas para este escenario.

**Figura 36.** Variables hidrológicas medias mensuales para escenario de expansión minera



Al relacionar la lluvia (pp), con el escurrimiento (Q), la evapotranspiración (EVT), el escurrimiento subsuperficial y la percolación, se puede decir que para el escenario de expansión minera, la porción de la lluvia que se transformó en escurrimiento, tuvo un valor medio de 38.47 %, la porción que se evaporó y transpiró fue de 13.27%, la porción que se convirtió en escorrentía subsuperficial es de 2.16 % y la porción que se percoló es de 44.52%.

#### 4.1.4. Análisis general de los resultados.

Los resultados a nivel mensual para los escenarios simulados, muestra una concordancia en cuanto al régimen hidrológico de la cuenca, pues el comportamiento es bastante homogéneo, lo que hace suponer que los cambios de cobertura no han sido muy grandes.

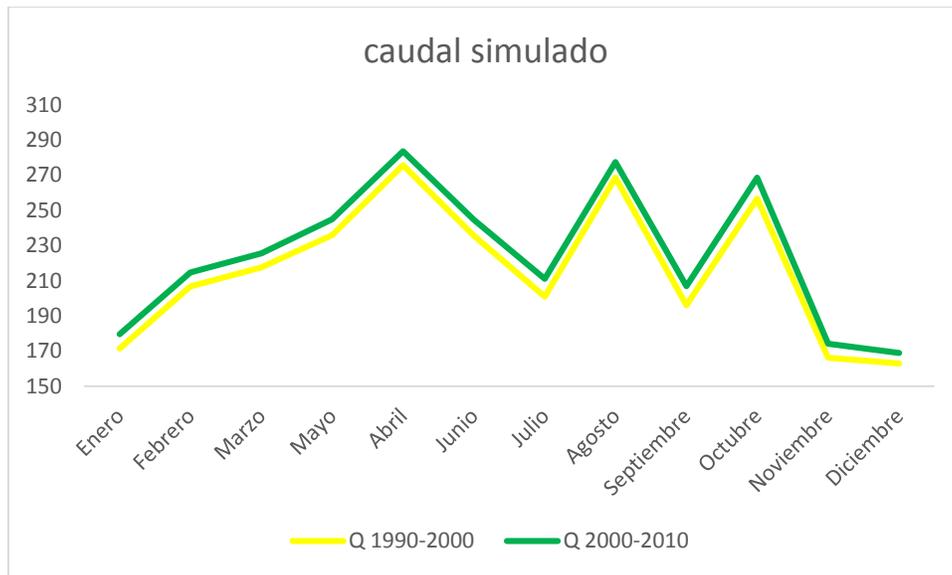
Si nos centramos en el área deforestada por minería en los escenarios del 1990 – 2000 y 2000 - 2010, se observa que para el primer escenario esta área corresponde al 1.19% del área total, para el segundo escenario esta área es del 2.04%, lo que muestra tan solo un incremento del 0.85% que al final resulta ser insignificante si se tiene en cuenta que el área de estudio es bastante grande.

Al comparar los valores de las variables del ciclo hidrológico para los dos escenarios, se tiene que los cambios en el escurrimiento superficial son casi imperceptible de 2643.8 mm a 2713.1 mm respectivamente, la evapotranspiración pasó de 957.7 a 957.3, el caudal subsuperficial varió 168.34 a 163.58, la percolación varió 3366.89 a 3361.94 respectivamente. El cambio en las variables de un escenario con respecto al otro, muestra una variación muy pequeña, lo que sugiere que el cambio de la cobertura en estos dos escenarios presenta una diferencia mínima, por tanto las variables del ciclo hidrológico se comportan de una manera similar.

Por lo mencionado anteriormente los cambios en la respuesta hidrológica de la cuenca no se vieron muy afectados por esta pequeña modificación en la cobertura vegetal.

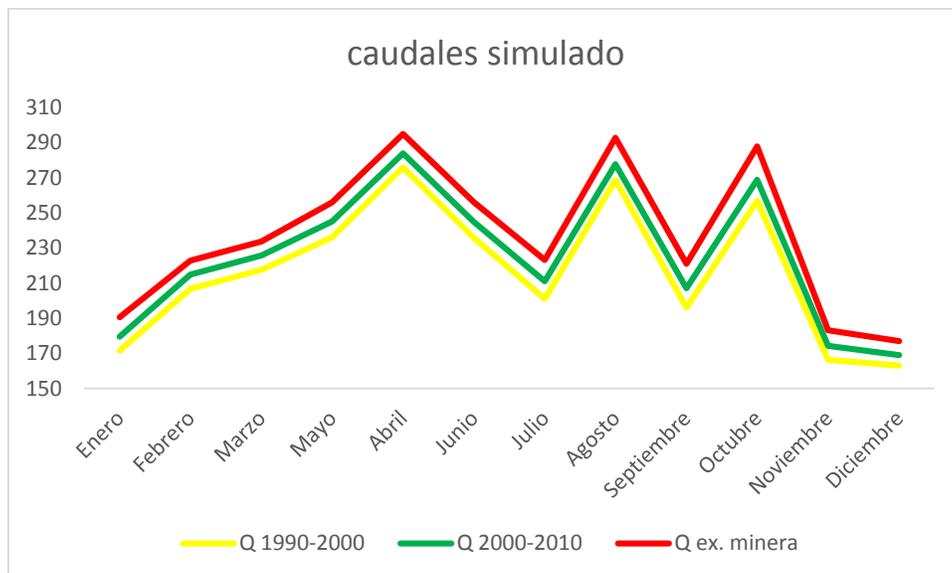
En las figuras 37, se representa el comportamiento de los caudales máximos de escorrentía superficial.

**Figura 37.** Representación gráfica de caudales de escorrentía simulados para los dos escenarios



Ahora bien si se comparan los resultados obtenidos para estos dos escenarios con el escenario hipotético de expansión minera **figura 38**, donde el área deforestada llega a ser el 28.56% del área total de la cuenca, se observa un cambio en el escurrimiento superficial, pasando de 2713.1 mm a 2813.9 mm, en la EVT de 957.3 a 957.8, caudal subsuperficial de 163.53 a 158.28, percolación de 3361.94 a 3256.22, lo que demuestra que una de las variables determinantes en la respuesta de una cuenca ante diferentes escenarios de lluvia, viene siendo la cobertura vegetal.

**Figura 38.** Caudales simulados para los tres escenarios.



A nivel anual el caudal aumentó en el escenario de expansión minera, lo que evidentemente nos muestra que al aumentar el área deforestada aumenta el caudal de escorrentía superficial en la cuenca.

El valor del parámetro CN promedio en los tres escenarios toma los valores de 70.23, 70.3, 71.17, respectivamente, mostrando un aumento muy pequeño entre los escenarios.

En general, la respuesta de una cuenca está íntimamente ligada al tipo y distribución de la cobertura en esta, al tener el suelo más cubierto se beneficia la respuesta hidrológica de la cuenca. Por tal motivo, la prevención del daño de la cuenca por procesos como la deforestación debe ser evitado, y es de imperiosa necesidad que los planeadores del recurso hídrico como los del uso del suelo en la cuenca media del río San Juan, vean la importancia de conservar o modificar mínimamente la estructura de la cubierta vegetal, garantizando la protección de la cuenca y además promoviendo el mantenimiento y/o el aumentos de la oferta hídrica como elemento articulador del proceso de ocupación y uso del suelo en la cuenca.

Si bien los parámetros del modelo no fueron calibrados, el funcionamiento de un modelo sin calibrar es un importante indicador de que tan bien funciona el modelo cuando no hay datos de aforo, como es el caso de muchas cuencas en el país. Esta es una de las ventajas que ofrece el modelo SWAT, porque permite representar y tener un estimativo de los diferentes procesos hidrológicos que ocurren en una cuenca sin calibración precisa.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

La modelación hidrológica es una herramienta fundamental en el manejo, planeación y aprovechamiento del recurso hídrico, ya que muestra de forma cuantificable los puntos o causas de posibles problemas que puedan afectar a una región desde el punto de vista del recurso hídrico. Los datos arrojados por la modelación deben ser interpretados correctamente de manera que los tomadores de decisión puedan planificar de mejor manera en base a la información que se les proporciona.

Debido a su versatilidad y eficiencia, el modelo SWAT ha sido ampliamente utilizado en varios lugares del mundo como apoyo en la toma de decisiones sobre el manejo del agua (Maldonado de León et al., 2001; Benavides et al.; 2005). En la mayoría de los casos el modelo se ha ajustado bien a los datos, por lo que es una buena alternativa para representar ciclos hidrológicos y predecir la variabilidad temporal de sus componentes, Benavides et al.; 2005).

El uso de Modelos de Elevación (DEM) en conjunto con los sistemas de información Geográfica ArcGis y el modelo hidrológico SWAT representan una herramienta en el análisis de sistemas hidrológicos, específicamente cuando se habla de la delimitación de cuencas y el trazado de su hidrografía superficial, permitiendo reducir el tiempo de ejecución, que en muchos casos es un factor importante.

Los requerimientos de información para el empleo de SWAT pueden ser satisfechos con dificultades sorteables, es un modelo que demanda mucha cantidad y calidad de información, así como el tiempo invertido en él. Debe tenerse presente que las estimaciones o suposiciones de datos de entrada para efectuar las simulaciones, influyen en la calidad de estas, por eso es conveniente realizar análisis de sensibilidad para saber el efecto que causaría estas suposiciones, sobre el comportamiento de las salidas de interés

Los resultados obtenidos del procedimiento empleado para la evaluación del ciclo hidrológico de la cuenca, ante escenarios de deforestación, resultan ser una fuente de información a la hora de efectuar la planeación y ordenación de los recursos hídricos.

El estudio mostró claramente que la respuesta hidrológica de una cuenca, además de verse afectada por los parámetros hidroclimatológicos, se ve seriamente influida por el tipo de cobertura vegetal y de suelo. Esto se puede concluir al comparar el aumento del caudal de escorrentía con el aumento del área deforestada.

La simulación de diversos escenarios de cobertura en la cuenca dio la posibilidad de observar cómo influye el cambio de esta en el comportamiento de las variables hidrológicas de la cuenca, no solo en efecto de caudal, sino también en el comportamiento de otras variables como: evapotranspiración, percolación y flujo subsuperficial.

Con estos escenarios se concluyó el parámetro CN importante en el momento de definir modificaciones en el uso del suelo, por tal razón, la variación de este parámetro permite recrear diferentes escenarios y así observar el comportamiento de las variables hidrológicas, ante estos cambios.

El modelo utilizó para el cálculo de la escorrentía superficial el método del número de curva, por tal motivo los valores que se obtuvieron de esta variable están ligados a los valores de CN que se asignaron para realizar la simulación hidrológica.

Al aumentar el escurrimiento superficial, el caudal subsuperficial disminuyó, la percolación disminuyó, lo cual indica que las dos últimas variables dependen del comportamiento de la primera variable en el ciclo hidrológica de la cuenca alta del río San Juan.

La precipitación se mantuvo constante en los tres escenarios debido a que la hidrología que se le introdujo al modelo para los tres escenarios es la misma y corresponde al periodo de 1990 – 2002.

Es necesario calibrar el modelo y validar la información que nos aporta, sin embargo recordemos que un modelo no nos da soluciones, sino aproximaciones a ciertos cambios o toma de decisiones a nivel de cuencas hidrográficas.

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

La selección del modelo también debe estar ligada al tipo, cantidad y calidad de la información que requiere para su funcionamiento, ya que muchas veces proponemos estudios y elegimos el modelo de simulación sin antes haber realizado una investigación exhaustiva de su manejo y los requerimientos de este.

La recomendación más relevante para este estudio es, realizar la calibración y validación, ya que estas nos permiten saber que tan cerca se está de la realidad.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

**Aparicio, F. L. 1999.** Fundamentos de hidrología de superficie. Ed. LIMUSA. México, D. F.

**Areendran, G., Rao, P., Raj, K., Mazumdar, S., & Puri, K. (2013).** Land use/land cover change dynamics analysis in mining areas of Singrauli district in Madhya Pradesh, India. *Tropical Ecology*, 54(2), 239-250.

**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.

**Benavides S., J. de D. 1998.** Calibración y validación del modelo hidrológico SWRRB en la cuenca forestal el Carrizal, Tapalpa, Jalisco. Tesis de maestría en ciencias. Colegio de posgraduados. Especialidad Instituto de recursos naturales. Especialidad de ciencias forestales, montecillo, México. 261 p.

**Bingner R. L. 1996.** Runoff simulated from Goodwin Creek watershed using SWAT. *Trans. ASAE* 39(1): 85-90.

**Caro Camargo, C. A., & Díaz-Granados, M. (2005).** Modelación y cuantificación del efecto de la vegetación en la respuesta hidrológica de cuenca.

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

**CONAGUA. 2006.** Ley de Aguas Nacionales. México, D. F

[http://www.cana.gob.mx/eCNA/español/Estadisticas/Central/Estadisticas\\_Aguas\\_2006/](http://www.cana.gob.mx/eCNA/español/Estadisticas/Central/Estadisticas_Aguas_2006/)

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

**Duque, Ana. (1993).** Estudio de evapotranspiración por los modelos de Penman y Pennan Montey en la cuenca de Piedra Blancas, Antioquia.

**Geist, H. J. and E. F. Lambin (2002),** "Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation", *BioScience* 52, pp. 143-150.

**Guo H., Q. Hu., T. Jiang. 2008.** Annual and seasonal streamflow responses to climate and land-cover changes in the Poyang Lake Basin, China. *Journal of Hydrology* 355: 106-122.

**Hurtado, P. B., Cohen, I. S., Arriaga, G. E., Rodríguez, M. P., & Valle, M. A. V. (2014).** Impacto del cambio en la vegetación sobre el escurrimiento utilizando el modelo swat. *AGROFAZ*, 14(2).

**Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacifico. (2013).** Plan Estratégico de la Macro Cuenca del Pacifico.

**Kazmann, R. G. 1975.** Hidrología Moderna. Ed. CEC., S.A. ed 3ª. México, D. F.

**L. A., & Hernández-Saucedo, F. R., Rivera-Toral, F., Pérez-Nieto, S., Ibáñez-Castillo. (2012).** Aplicabilidad del Modelo SWAT para la estimación de la erosión hídrica en las cuencas de México. *Agrociencia*, 46(2), 101-105.

**Lambin, E. F., B. L. Turner, J. G. Helmut, S. B. Agbola, A. Angelsen, J. W. Bruce, O. T. Coomes, R. Dirzo, G. Fischer, C. Folke, P. S. George, K. Homewood, J. Imbernon, R. Leemans, X. Li, E. F. Mora, M. Mortimore, P. S. Ramkrishnan, J. Richards, A. Skånes, W. Steffen, G. D. Stone, U. Svedin, T. A. Veldkamp, C. Vogel and J. Xu (2001), "The causes of land cover change: moving beyond the myths", Global Environmental Change, 11, pp. 261.269.**

**Llamas, J. 1993.** "Hidrología general: "Principios y aplicaciones". Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco.

**Linsley, R. K. 1977.** Hidrología para ingenieros. Ed. Ed McGraw. Ed. 2ª. México, D. f.

**Longley, P. A., et al 1990.** Geographical information systems. Ed John Wiley & Sons. Inc. Ed. 2ª. Volumen 1.

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

**Navarrete, Juan David.** Tesis "Hidrología de Páramos, Modelación hidrológica de la cuenca alta del Río Blanco". Universidad de los Andes. Departamento de ingeniería Civil y Ambiental. Bogotá, Colombia.

**Nicks, A. D. 1974.** Stochastic generation of the occurrence, patterns, and location of maximum amount of daily rainfall: Pruc. No. 1275. Pp. 154-171.

**Oropeza M., J. L. 1999.** Modelos matemáticos y su aplicación al manejo de cuencas hidrográficas. Memorias del IX Congreso Nacional de Irrigación. Culiacán Sinaloa.

**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.

**Palacios v., E. 2005.** Inédito. Demanda evapotranspirativa. Colegio de Posgraduados, Montecillo.

**Remenieras G. 1974.** Tratado de hidrología aplicada. Editores técnicos asociados S.A- ed 2°. Barcelona, España.

**Reyes Hernández, H., Aguilar Robledo, M., Aguirre Rivera, J. R., & Trejo Vázquez, I. (2006).** La integración del modelo SWAT y el hidrodinámico MODFLOW es una alternativa a esta necesidad, que para el acuífero Valle de Acambay, México, 1973-2000. Investigaciones geográficas, (59), 26-42.

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

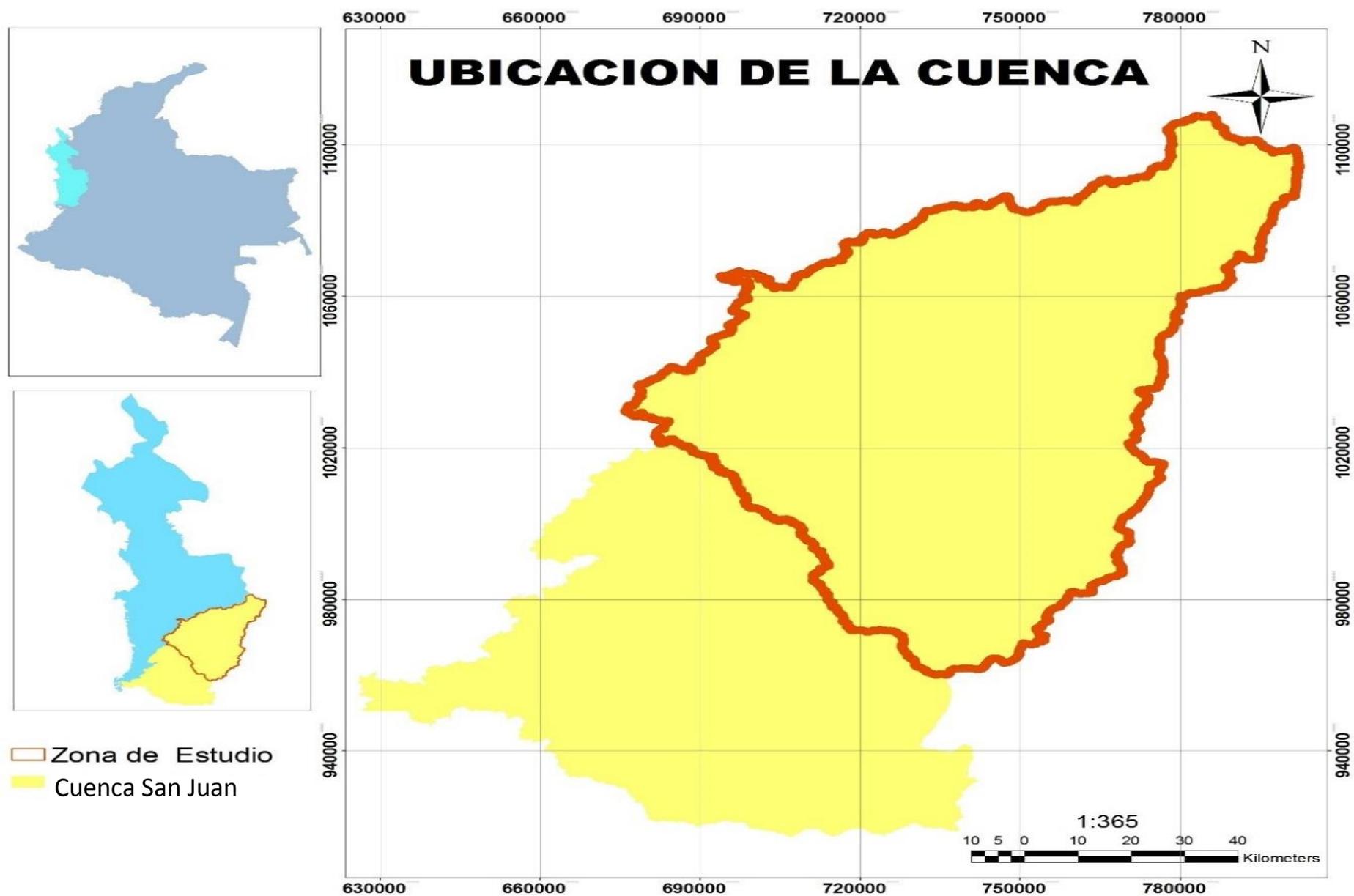
**Saghafian B., Simas S., Sadeghi S. and Jeirani F. (2012).** Applications of unit response approach for spatial prioritization of runoff and sediment source. Agricultural Water Management 109, 36 – 45.

**Swat User's Manual, 2000.**

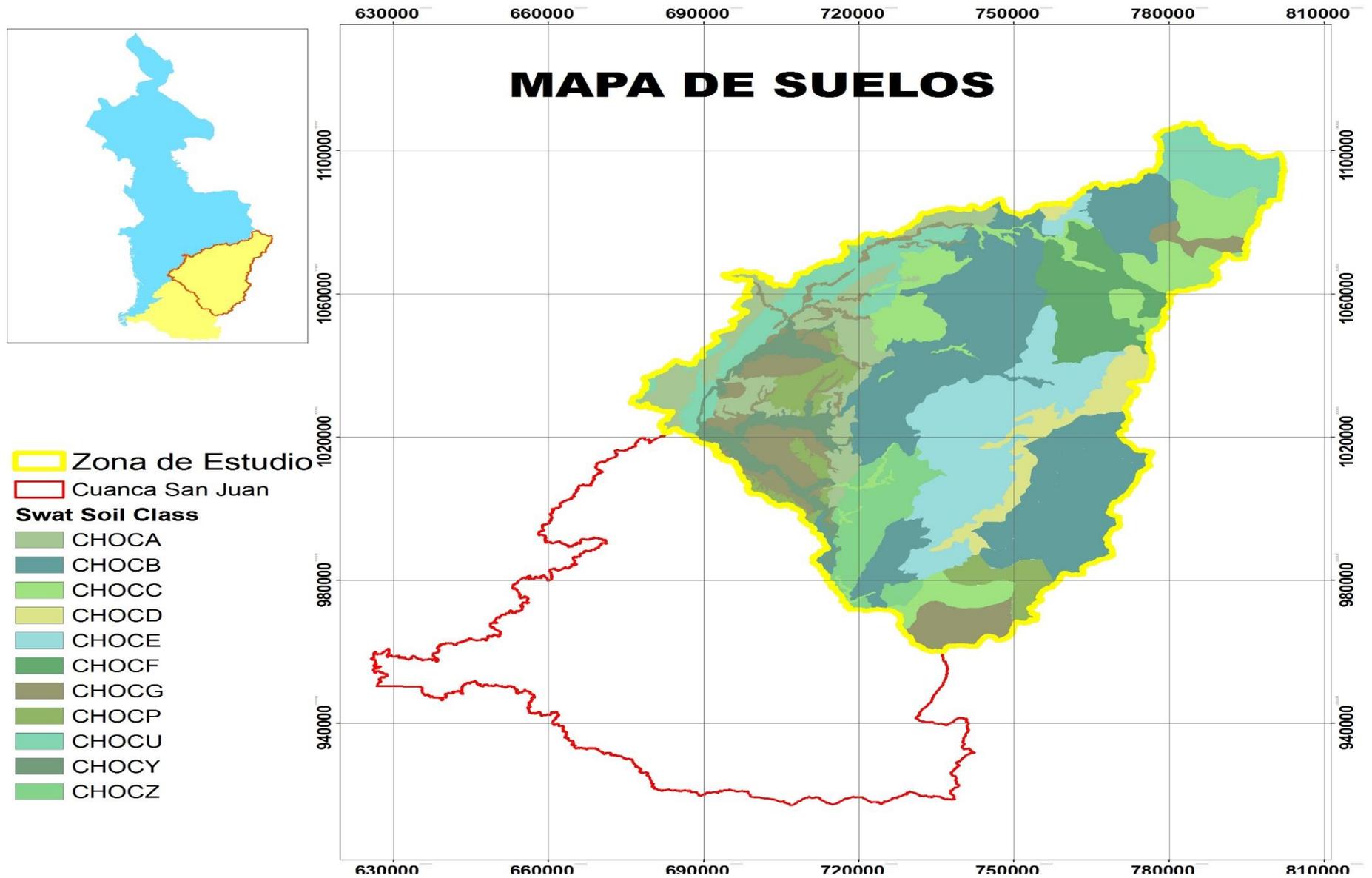
**Velásquez, José. (1984).** Estudio sobre influencia de algunos elementos del ciclo hidrológico sobre distintas coberturas vegetales en microcuencas.

**Anexos**

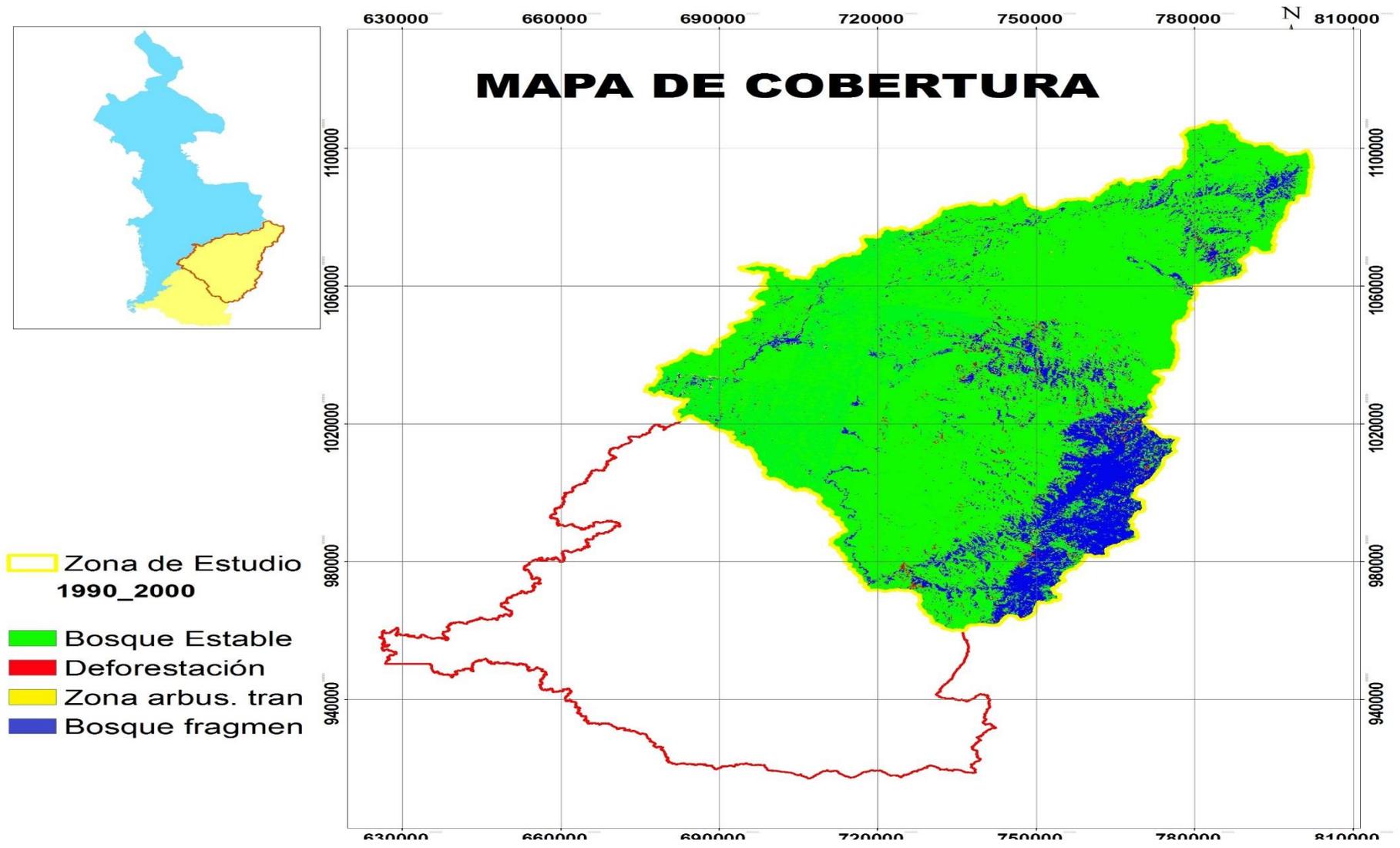
Anexo 1. Localización de la cuenca alta del Rio San Juan.



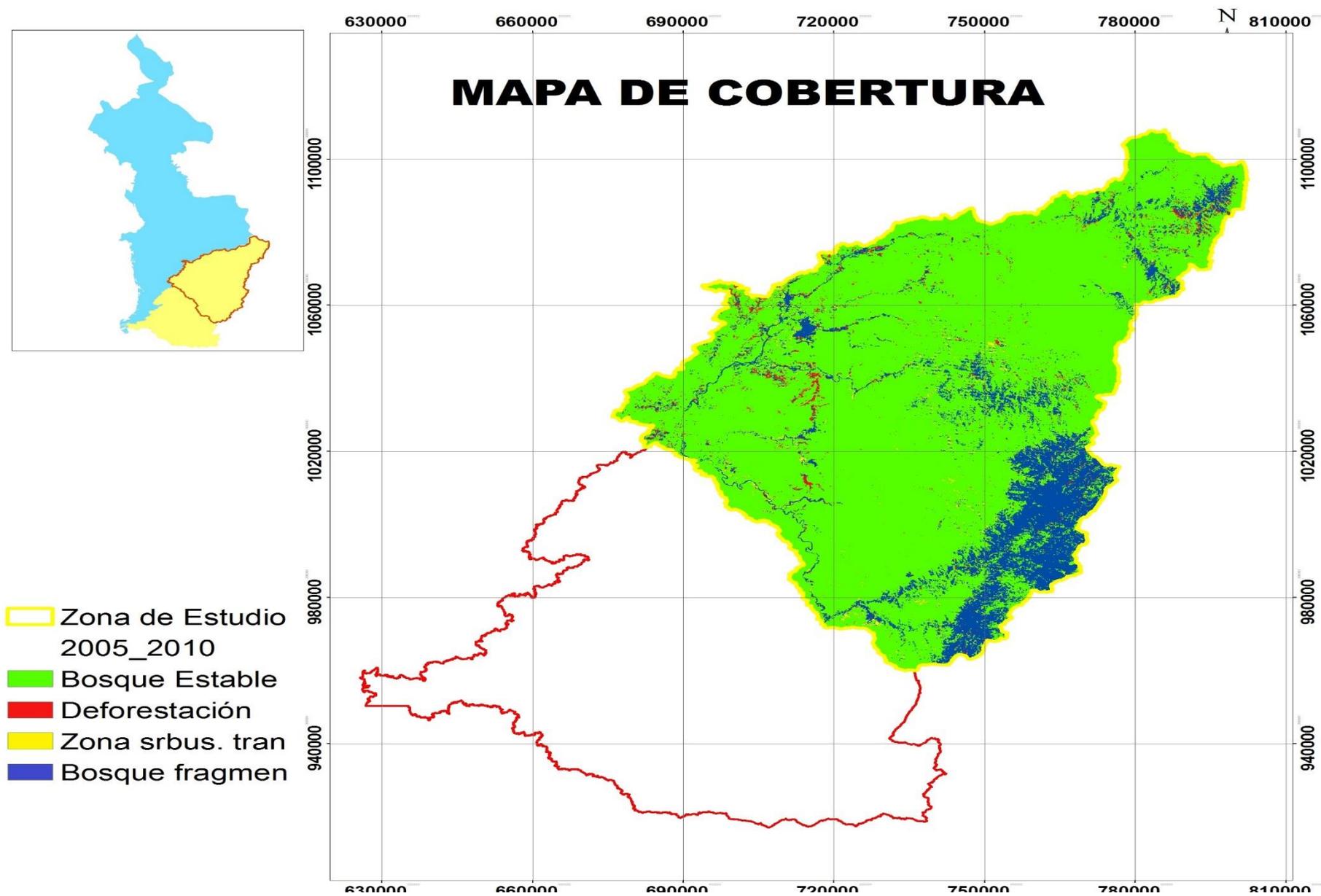
Anexo 2. Mapa de suelos generado por SWAT de la cuenca alta del Rio San Juan.



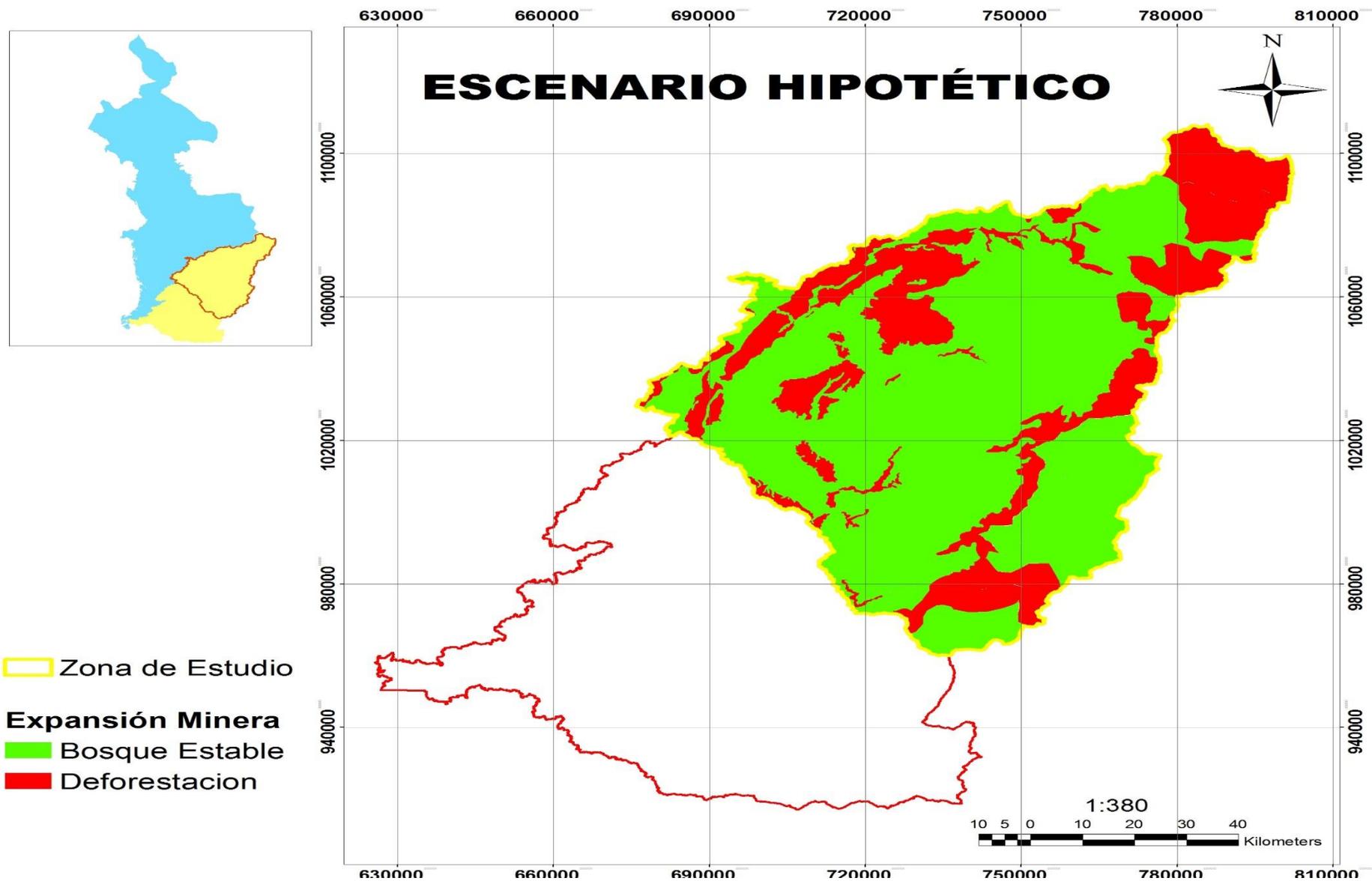
Anexo 3. Mapa cobertura vegetal 1990 – 2000 de la cuenca alta del Rio San Juan.



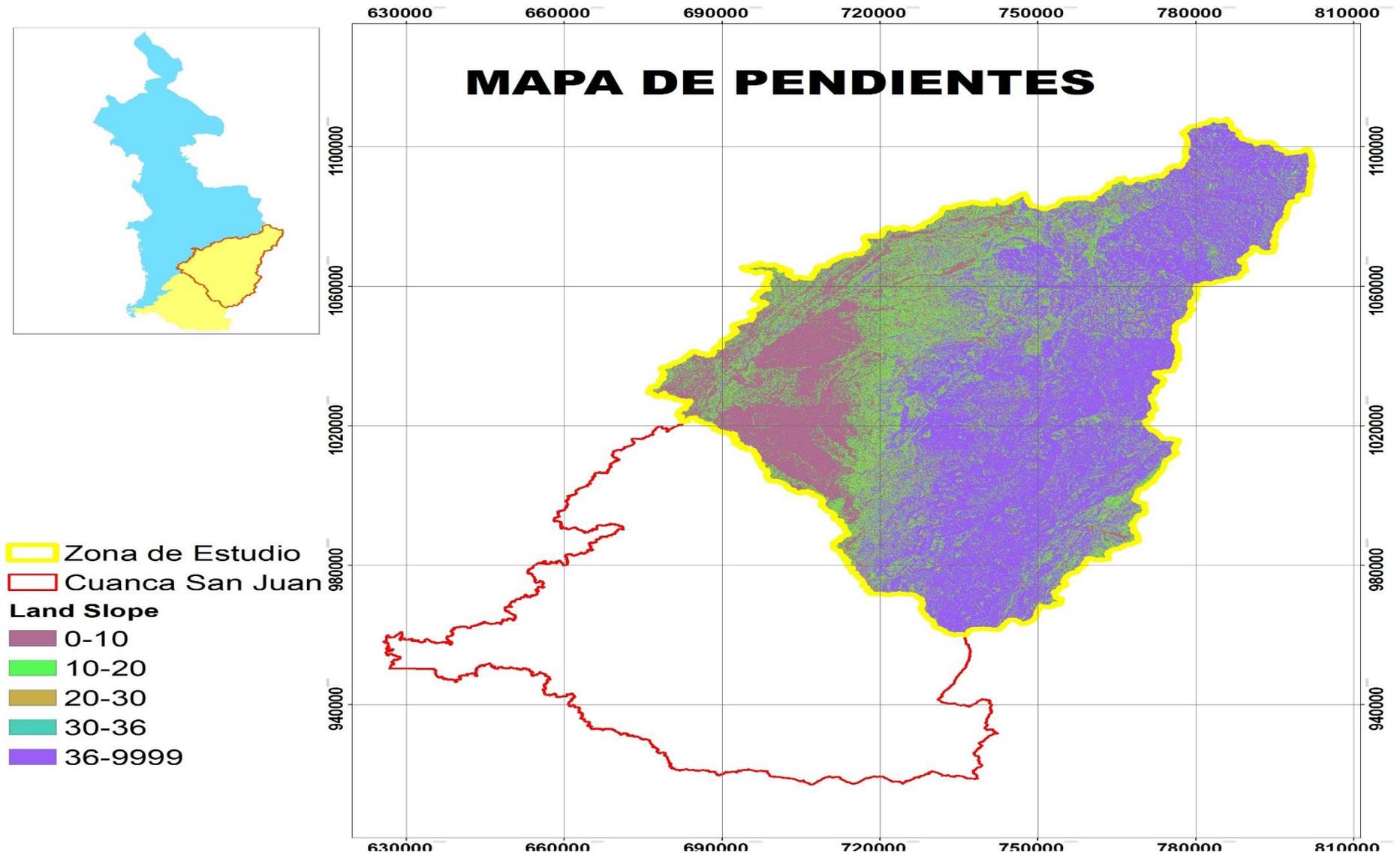
Anexo 4. Mapa cobertura vegetal 2000 – 2010 de la cuenca alta del Rio San Juan.



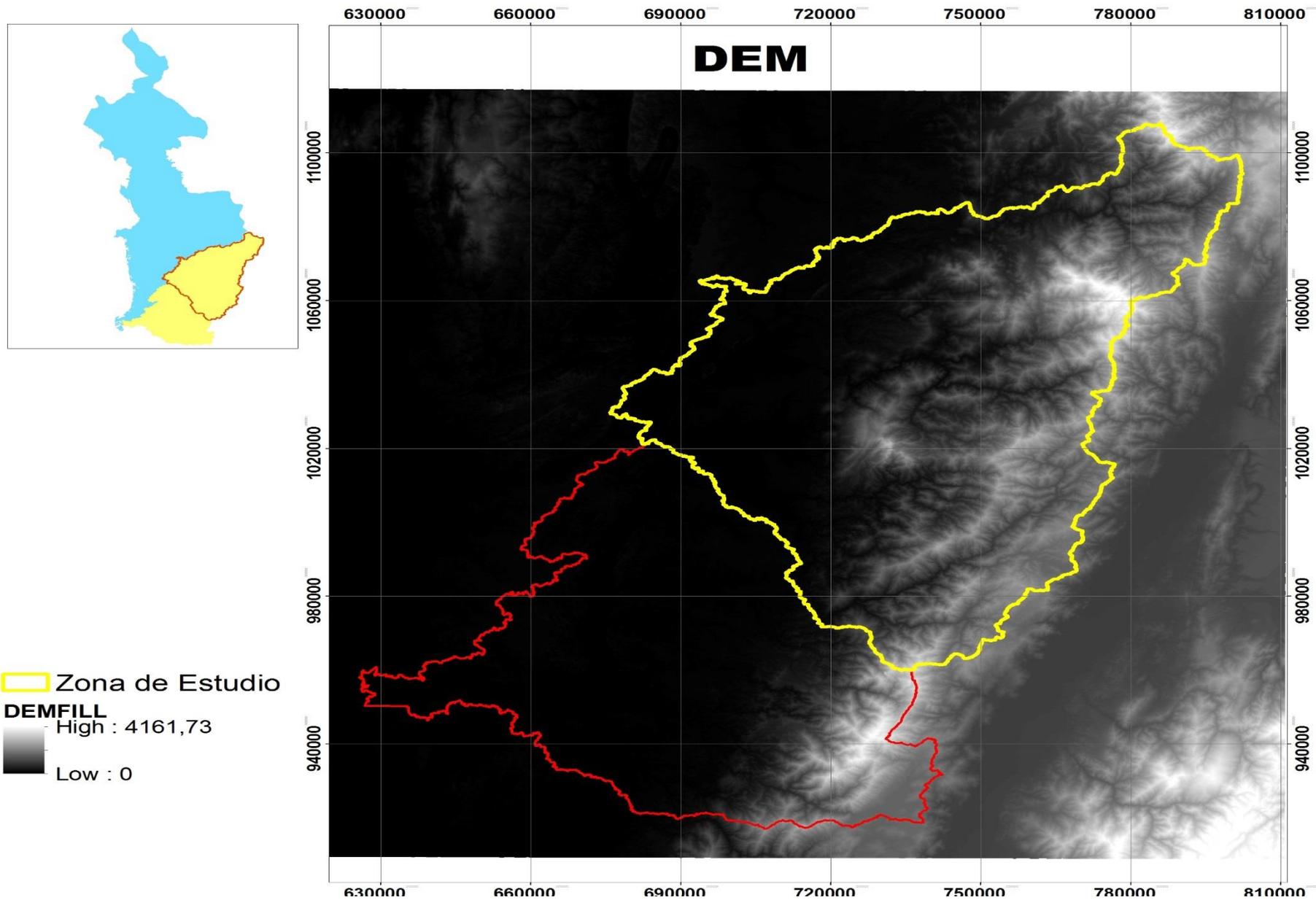
Anexo 5. Mapa escenario hipotético.



Anexo 6. Mapa pendientes generado por SWAT de la cuenca alta del Rio San Juan.



Anexo 7. DEM de la cuenca alta del Rio San Juan.



**Anexo 8. Estadística climática de la estación NOANAMA**

VARIABLE	Estación							Latitud	longitud	msnm		
	NAOANAMA							5.12	-76.78	40		
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOST	SEPTIEMBR E	OCTUBR E	NOVIEMBR E	DICIEMBR E
TMPMX	26	25.7	29	25.6	29	27.8	28	26.8	25.3	24.4	27	28
TMPMN	20.1	21.4	19	20.4	19.7	21.4	21.3	21.2	19.5	20.7	21.9	22.1
TMPSTDMX2	6.94	3.98	4.44	6.19	3.41	3.38	5.32	4.63	2.76	4.44	6.19	2.24
TMPSTDMN1	3.56	5.8	3.79	5.9	3.44	2.24	4.67	3.9	4.78	3.67	2.24	4.68
PCPMM1	419.2	348.8	358.1	494.0	610.08	513.9	573.8	680.2	596.6	534.7	520.1	490.3
PCPSTD1	12.7	14.22	14.22	17.78	18.29	19.05	16.51	16	22.1	20.32	19.56	16.2
PCPSKW1	2.23	2.27	0.91	0.94	1.5	2.78	0.94	1.44	2.27	1.93	2.41	3
PR_W1_1	0.17	0.18	0.19	0.22	0.21	0.16	0.15	0.13	0.13	0.14	0.13	0.15
PR_W2_5	0.43	0.41	0.39	0.41	0.49	0.44	0.4	0.39	0.47	0.4	0.46	0.43
PCPD1	7.12	6.78	7.36	8.15	9.04	6.67	6.2	5.45	5.91	5.86	5.82	6.46
RAINHHMX1	95	90	91	93	92	92	95	92	91	92	93	95
SOLARAV1	10.5	16.45	19.86	20.56	17.15	10.55	16.45	19.85	20.56	20.07	17.15	17.15
DEWPT1	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76
WNDV1	1.4	1.2	1.22	1.26	1.32	1.28	1.2	1.2	1.32	1.25	1.4	1.2



**Anexo10. Estadística climática de la estación ISTMINA**

VARIABLE	Estación							Latitud	longitud	msnm		
	ISTMINA							5.09	-76.68	90		
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOST	SEPTIEMBR E	OCTUBR E	NOVIEMBR E	DICIEMBR E
TMPMX	26.6	26	32.4	25.8	30.3	28	30	26.9	26.3	25	28.1	28.3
TMPMN	20.1	21.4	20.2	21.3	21.2	20.7	21.9	20	20.3	21.8	20.9	21.7
TMPSTDMX 2	3.56	5.7	6.25	3.94	4.5	6.48	2.78	3.78	6.14	5.23	3.57	4.67
TMPSTDMN 1	4.67	5.67	4.68	2.76	5.78	4.63	5.51	5.36	2.24	5.8	4.89	3.97
PCPMM1	487.7	362.8	434.5	701.7	765.2	687.2	763.2	772.8	643.3	609	665.6	538
PCPSTD1	12.7	14.22	14.22	17.78	18.29	19.05	16.51	16	22.1	20.32	19.56	16.2
PCPSKW1	2.23	2.27	0.91	0.94	1.5	2.78	0.94	1.44	2.27	1.93	2.41	3
PR_W1_1	0.17	0.18	0.19	0.22	0.21	0.16	0.15	0.13	0.13	0.14	0.13	0.15
PR_W2_5	0.43	0.41	0.39	0.41	0.49	0.44	0.4	0.39	0.47	0.4	0.46	0.43
PCPD1	7.12	6.78	7.36	8.15	9.04	6.67	6.2	5.45	5.91	5.86	5.82	6.46
RAINHHMX 1	95	90	91	93	92	92	95	92	91	92	93	95
SOLARAV1	10.5	16.45	19.86	20.56	17.15	10.55	16.45	19.85	20.56	20.07	17.15	17.15
DEWPT1	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76
WNDV1	1.3	1.22	1.2	1.23	1.3	1.2	1.31	1.25	1.2	1.28	1.22	1.3

**Anexo 11.** Factor fisiotécnico de las coberturas de la cuenca alta del río San Juan

CPNM	CROPNAME	BIO_E	HVSTI	BLAI	FRGRW1	LAIMX1	FRGRW2	LAIMX2	DLAI	CHTMX	RDMX	T_OPT	T_BASE
CHBE	Bosque Estable	15	0,76	5	0,1	0,99	0,25	0,99	0,95	10	3,5	30	0
CHDEF	Deforestación	30	0,5	1,5	0,1	0,05	0,5	0,95	0,6	0,5	0,6	35	18
CHZAR	Zona Arbustiva	35	0,95	4	0,05	0,05	0,49	0,95	0,95	0,5	2	25	12
CHBFR	Bosque Fragmentado	15	0,76	5	0,1	0,7	0,5	0,95	0,95	0,5	3,5	30	0

CPNM	CROPNAME	CNYLD	CPYLD	BN1	BN2	BN3	BP1	BP2	BP3	WSYF	USLE_C	GSI	VPDFR
CHBE	Bosque Estable	0,0015	0,0003	0,006	0,002	0,0015	0,0007	0,0004	0,0003	0,05	0,002	0,007	4
CHDEF	Deforestación	0,0218	0,0013	0,006	0,002	0,0015	0,0007	0,0004	0,0003	0,05	0,002	0,007	4
CHZAR	Zona Arbustiva	0,0234	0,0033	0,006	0,002	0,0015	0,0007	0,0004	0,0003	0,05	0,002	0,007	4
CHBFR	Bosque Fragmentado	0,0015	0,0003	0,055	0,0075	0,0134	0,007	0,0004	0,0003	0,05	0,002	0,007	4

**Anexo 42.** Factor fisiotécnico de las coberturas de la cuenca alta del rio San Juan

CPNM	CROPNAME	CNYLD	CPYLD	BN1	BN2	BN3	BP1	BP2	BP3	WSYF	USLE_C	GSI	VPDFR
CHBE	Bosque Estable	0,0015	0,0003	0,006	0,002	0,0015	0,0007	0,0004	0,0003	0,05	0,002	0,007	4
CHDEF	Deforestación	0,0218	0,0013	0,006	0,002	0,0015	0,0007	0,0004	0,0003	0,05	0,002	0,007	4
CHZAR	Zona Arbustiva	0,0234	0,0033	0,006	0,002	0,0015	0,0007	0,0004	0,0003	0,05	0,002	0,007	4
CHBFR	Bosque Fragmentado	0,0015	0,0003	0,055	0,0075	0,0134	0,007	0,0004	0,0003	0,05	0,002	0,007	4

CPNM	CROPNAME	USLE_C	VPDFR	FRGMAX	WAVP	CO2HI	BIOEHI	RSDCO_PL	OV_N	CN2A	CN2B	CN2C	CN2D
CHBE	Bosque Estable	0,002	4	0,75	3	660	16	0,05	0,14	25	55	70	77
CHDEF	Deforestación	0,002	4	0,75	3	660	16	0,05	0,14	67	77	83	87
CHZAR	Zona Arbustiva	0,002	4	0,75	3	660	16	0,05	0,3	31	59	72	79
CHBFR	Bosque Fragmentado	0,002	4	0,5	10	660	16	0,05	0,14	25	55	70	77

**Anexo 53.** Factor edáfico de la cuenca alta del rio San Juan

SNAM	S5ID	NLAYERS	HYDGRP	SOL_ZMX	ANION_EXCL	SOL_CRK	TEXTURE	SOL_Z1	SOL_BD1	SOL_AWC1
CHOCO5	CHAD	1	D	1600	0,5	0,5	CHAD5	260	1,03	0,22
CHOCO9	CHADY	1	D	900	0,5	0,5	CHADY9	160	1,03	0,22
CHOCO10	CHAE	1	C	1370	0,5	0,5	CHAE10	200	1,03	0,22
CHOCO2	CHHU	1	A	1500	0,5	0,5	CHHU2	250	1,03	0,12
CHOCO6	CHPF	1	D	1550	0,5	0,5	CHPF6	330	1,03	0,22
CHOCO1	CHTD	1	C	1400	0,5	0,5	CHTD1	130	1,03	0,22
CHOCO4	CHTE	1	A	1500	0,5	0,5	CHTE4	80	1,03	0,12
CHOCO7	CHTF	1	D	1000	0,5	0,5	CHTF7	40	1,03	0,22
CHOCO8	CHTH	1	D	1320	0,5	0,5	CHTH8	100	1,03	0,22
CHOCO3	CHTU	1	D	1200	0,5	0,5	CHTU3	100	1,03	0,14
CHOCO11	CHVU	1	C	1440	0,5	0,5	CHVU11	159	1,03	0,22

**Anexo 64.** Factor edáfico de la cuenca alta del rio San Juan

SNAM	S5ID	SOL_K1	SOL_CBN1	CLAY1	SILT1	SAND1	ROCK1	SOL_ALB1	USLE_K1	SOL_EC1
CHOCO5	CHAD	0,94	7,88	60	34	6	0	0,01	0,032	0
CHOCO9	CHADY	7,8	2,44	36	24	40	0	0,01	0,032	0
CHOCO10	CHAE	6,3	2,02	32	30	38	0	0,01	0,032	0
CHOCO2	CHHU	7,1	4,64	28	40	38	0	0,01	0,032	0
CHOCO6	CHPF	0,94	14,63	50	44	6	0	0,01	0,032	0
CHOCO1	CHTD	6,3	2,87	56	20	24	1,22	0,01	0,032	0
CHOCO4	CHTE	7,4	2,2	32	36	32	0	0,01	0,032	0
CHOCO7	CHTF	0,94	4,84	66	26	8	0	0,01	0,032	0
CHOCO8	CHTH	0,94	4,59	56	32	12	0	0,01	0,032	0
CHOCO3	CHTU	0,94	5,1	74	18	8	0	0,01	0,032	0
CHOCO11	CHVU	4,32	4,84	60	34	6	0	0,01	0,032	0

**Anexo 75.** Salida general del proceso de simulación en la cuenca alta del rio San Juan escenario 1990 - 2000.

AVE MONTHLY BASIN VALUES

MON	RAIN (MM)	SNOW		WATER			SED	
		FALL (MM)	SURF Q (MM)	LAT Q (MM)	YIELD (MM)	ET (MM)	YIELD (T/HA)	PET (MM)
1	518.42	0.00	177.50	20.75	449.59	80.42	123.48	100.72
2	556.33	0.00	212.68	18.82	452.06	72.23	145.67	92.01
3	591.71	0.00	221.54	22.06	496.66	79.70	90.71	102.40
4	616.98	0.00	242.94	21.54	511.82	79.95	23.70	99.04
5	726.84	0.00	281.73	25.38	579.13	85.75	15.35	101.7
6	657.76	0.00	242.77	25.88	560.23	80.96	12.21	98.13
7	591.37	0.00	209.02	24.50	541.97	78.71	25.57	101.59
8	720.31	0.00	274.58	25.23	601.57	83.34	58.03	101.97
9	602.27	0.00	204.97	24.69	529.53	79.46	46.68	99.02
10	699.04	0.00	266.71	26.54	607.47	82.15	92.48	101.94
11	516.47	0.00	174.23	23.02	499.48	75.16	58.42	97.81
12	513.49	0.00	167.92	20.54	470.60	78.96	80.24	100.46

AVE ANNUAL BASIN VALUES

PRECIP = 7313.5 MM  
 SNOW FALL = 0.00 MM  
 SNOW MELT = 0.00 MM  
 SUBLIMATION = 0.00 MM  
 SURFACE RUNOFF Q = 2682.88 MM  
 LATERAL SOIL Q = 278.3 MM  
 TILE Q = 0.00 MM  
 GROUNDWATER (SHAL AQ) Q = 3167.90 MM  
 GROUNDWATER (DEEP AQ) Q = 168.34 MM  
 REVAP (SHAL AQ => SOIL/PLANTS) = 23.95 MM  
 DEEP AQ RECHARGE = 168.47 MM  
 TOTAL AQ RECHARGE = 3369.48 MM  
 TOTAL WATER YLD = 6294.12 MM  
 PERCOLATION OUT OF SOIL = 3366.89 MM  
 ET = 957.7 MM  
 PET = 1197.6 MM  
 TRANSMISSION LOSSES = 0.00 MM  
 SEPTIC INFLOW = 0.00 MM  
 TOTAL SEDIMENT LOADING = 780.729 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 86.** Salida general del proceso de simulación en la cuenca alta del rio San Juan escenario 2000 - 2010.

AVE MONTHLY BASIN VALUES

MON	SNOW				WATER		SED	
	RAIN (MM)	FALL (MM)	SURF Q (MM)	LAT Q (MM)	YIELD (MM)	ET (MM)	YIELD (T/HA)	PET (MM)
1	518.42	0.00	178.60	20.75	449.59	80.42	123.48	100.72
2	556.33	0.00	213.67	18.82	452.06	72.23	145.67	92.01
3	591.71	0.00	223.03	22.06	496.66	79.70	90.71	102.40
4	616.98	0.00	244.04	21.54	511.82	79.95	23.70	99.04
5	726.84	0.00	282.34	25.38	579.13	85.75	15.35	101.70
6	657.76	0.00	242.34	25.88	560.23	80.96	12.21	98.13
7	591.37	0.00	211.98	24.50	541.97	78.71	25.57	101.59
8	720.31	0.00	276.00	25.23	601.57	83.34	58.03	101.97
9	602.27	0.00	206.12	24.69	529.53	79.46	46.68	99.02
10	699.04	0.00	267.87	26.54	607.47	82.15	92.48	101.94
11	516.47	0.00	175.56	23.02	499.48	75.16	58.42	97.81
12	513.49	0.00	168.92	20.54	470.60	78.96	80.24	100.46

AVE ANNUAL BASIN VALUES

PRECIP = 7313.5 MM  
 SNOW FALL = 0.00 MM  
 SNOW MELT = 0.00 MM  
 SUBLIMATION = 0.00 MM  
 SURFACE RUNOFF Q = 2713.09 MM  
 LATERAL SOIL Q = 278.31 MM  
 TILE Q = 0.00 MM  
 GROUNDWATER (SHAL AQ) Q = 3139.92 MM  
 GROUNDWATER (DEEP AQ) Q = 163.53 MM  
 REVAP (SHAL AQ => SOIL/PLANTS) = 23.95 MM  
 DEEP AQ RECHARGE = 166.87 MM  
 TOTAL AQ RECHARGE = 3337.35 MM  
 TOTAL WATER YLD = 6294.76 MM  
 PERCOLATION OUT OF SOIL = 3361.94 MM  
 ET = 957.3 MM  
 PET = 1197.6MM  
 TRANSMISSION LOSSES = 0.00 MM  
 SEPTIC INFLOW = 0.00 MM  
 TOTAL SEDIMENT LOADING = 790.164 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 97.** Salida general del proceso de simulación en la cuenca alta del rio San Juan escenario expansión minera.

AVE MONTHLY BASIN VALUES

MON	SNOW				WATER		SED	
	RAIN (MM)	FALL (MM)	SURF Q (MM)	LAT Q (MM)	YIELD (MM)	ET (MM)	YIELD (T/HA)	PET (MM)
1	518.42	0.00	186.49	20.16	448.85	80.50	127.65	100.72
2	556.32	0.00	222.16	18.26	452.10	72.55	147.99	92.01
3	591.71	0.00	231.69	21.44	496.36	79.90	108.97	102.40
4	616.98	0.00	254.93	20.85	513.38	80.06	51.64	99.04
5	726.83	0.00	294.67	24.50	579.21	86.01	33.13	101.70
6	657.75	0.00	253.73	25.04	557.59	81.17	20.98	98.13
7	591.37	0.00	219.46	23.67	538.28	79.26	33.30	101.59
8	720.31	0.00	288.26	24.46	601.33	83.95	82.76	101.97
9	602.28	0.00	216.78	23.92	528.04	79.91	66.30	99.02
10	699.04	0.00	280.47	25.67	607.89	82.47	113.13	101.94
11	516.48	0.00	183.99	22.27	496.41	75.38	72.32	97.81
12	513.49	0.00	177.72	19.93	468.67	79.11	93.38	100.46

AVE ANNUAL BASIN VALUES

PRECIP = 7313.5 MM  
 SNOW FALL = 0.00 MM  
 SNOW MELT = 0.00 MM  
 SUBLIMATION = 0.00 MM  
 SURFACE RUNOFF Q = 2813.90 MM  
 LATERAL SOIL Q = 269.80 MM  
 TILE Q = 0.00 MM  
 GROUNDWATER (SHAL AQ) Q = 3040.62 MM  
 GROUNDWATER (DEEP AQ) Q = 158.38 MM  
 REVAP (SHAL AQ => SOIL/PLANTS) = 23.95 MM  
 DEEP AQ RECHARGE = 161.62 MM  
 TOTAL AQ RECHARGE = 3232.48 MM  
 TOTAL WATER YLD = 6282.56 MM  
 PERCOLATION OUT OF SOIL = 3256.22 MM  
 ET = 957.8 MM  
 PET = 1197.6MM  
 TRANSMISSION LOSSES = 0.00 MM  
 SEPTIC INFLOW = 0.00 MM  
 TOTAL SEDIMENT LOADING = 959.418 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)

