MODELACIÓN Y GENERACIÓN DE ESTRATEGIAS DE INTERVENCIÓN DE CUENCAS PARAMUNAS.
CASO DE ESTUDIO CUENCAS ABASTECEDORAS DE AGUA POTABLE, PÁRAMO DE CHINGAZA.

AUTOR

Camilo Lombana Córdoba

ASESOR

Mario Díaz-Granados Ortíz

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL

SANTAFÉ DE BOGOTÁ

MAYO DE 2006

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Jeimar Alirio Tapasco por su colaboración en la elaboración de este proyecto y al profesor Mario Díaz-Granados por su orientación a lo largo de todo el proceso de este trabajo.

A mi madre por su apoyo

Incondicional.

BOGOTÁ D.C. DICIEMBRE 14 DE 2003

DIRECTOR DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

Respetado Doctor:

Por medio de la presente hago entrega del proyecto de grado titulado **MODELACIÓN Y GENERACIÓN DE ESTRATEGIAS DE INTERVENCIÓN DE CUENCAS PARAMUNAS. CASO DE ESTUDIO CUENCAS ABASTECEDORAS DE AGUA POTABLE, PÁRAMO DE CHINGAZA**" realizado bajo la asesoría del profesor Mario Díaz-Granados Ortiz.

Agradeciendo su amable atención,

_____

CAMILO LOMBANA CORDOBA.

TABLA DE CONTENIDO

1. LOS PARAMOS ..... **¡Error! Marcador no definido.**
1.1. CLASIFICACION DE LOS PARAMOS..... **¡Error! Marcador no definido.**
1.1.1. El Superpáramo. ..... **¡Error! Marcador no definido.**
1.1.2. El Páramo..... **¡Error! Marcador no definido.**
1.1.3. El Subpáramo..... **¡Error! Marcador no definido.**
1.2. CARACTERÍSITICAS ECOLÓGICAS DE LOS PARAMOS **¡Error! Marcador no definido.**
2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA CHINGAZA ..... **¡Error! Marcador no definido.**
3. CARACTERIZACIÓN PARQUE NACIONAL NATURAL CHINGAZA.. **¡Error! Marcador no definido.**
3.1 LOCALIZACION Y EXTENSIÓN ..... **¡Error! Marcador no definido.**
3.2 VARIABLES CLIMATOLOGICAS ..... **¡Error! Marcador no definido.**
3.2.1. *Precipitación* ..... **¡Error! Marcador no definido.**
3.2.2. Temperatura ..... **¡Error! Marcador no definido.**
3.2.3. Humedad Relativa ..... **¡Error! Marcador no definido.**
3.2.4. Nubosidad y Brillo Solar ..... **¡Error! Marcador no definido.**
3.2.5. Velocidad del Viento ..... **¡Error! Marcador no definido.**
3.2.6. Balance Hídrico ..... **¡Error! Marcador no definido.**
4. ACTIVIDADES AGRARIAS Y PECUARIAS DESARROLLADAS EN EL AREA DE ESTUDIO ..... **¡Error! Marcador no definido.**
4.1. Tala y Rocería ..... **¡Error! Marcador no definido.**
4.2. Quema ..... **¡Error! Marcador no definido.**
4.3. Establecimiento de cultivos ..... **¡Error! Marcador no definido.**
4.4. Establecimiento de pastos ..... **¡Error! Marcador no definido.**
4.5. Introducción de la ganadería ..... **¡Error! Marcador no definido.**
5. CLASIFICACIÓN EDÁFICA ..... **¡Error! Marcador no definido.**
6. CARACTERIZACIÓN DE LOS TIPOS DE COBERTURA VEGETAL..... **¡Error! Marcador no definido.**
6.1. Bosque natural ..... **¡Error! Marcador no definido.**
6.2. Bosque Plantado ..... **¡Error! Marcador no definido.**
6.3. Arbustal Alto ..... **¡Error! Marcador no definido.**
6.4. Arbustal Bajo ..... **¡Error! Marcador no definido.**
6.5. Pastizales ..... **¡Error! Marcador no definido.**
6.6. Pastos Arbolados ..... **¡Error! Marcador no definido.**
6.7. Pastizal / Arbustal ..... **¡Error! Marcador no definido.**
6.8. Pastos / Cultivos ..... **¡Error! Marcador no definido.**
6.9. Prado Paramuno ..... **¡Error! Marcador no definido.**
6.10. Vegetación Baja de Páramo ..... **¡Error! Marcador no definido.**
6.11. Misceláneos ..... **¡Error! Marcador no definido.**
6.12. Tierras Erosionadas ..... **¡Error! Marcador no definido.**
6.13. Afloramientos Rocosos ..... **¡Error! Marcador no definido.**
7. DESARROLLO DEL MODELO ..... **¡Error! Marcador no definido.**
7. 1. Descripción General del Modelo ..... **¡Error! Marcador no definido.**

7. 2. Entradas del Modelo Descrito para Llevar a Cabo la Implementación en la Cuenca de Estudio. ..... **¡Error! Marcador no definido.**
7.2.1. Generación del Modelo Digital de Terreno (DEM) ..... **¡Error! Marcador no definido.**
7.2.2. Preprocesamiento del DEM ..... **¡Error! Marcador no definido.**
7.2.3. Definición de las líneas de escorrentía ..... **¡Error! Marcador no definido.**
7.2.4. Definición de Entradas y Salidas. ..... **¡Error! Marcador no definido.**
7.2.5. Definición de Reservorios. ..... **¡Error! Marcador no definido.**
7.2.6. Definición de los tipos de suelo. ..... **¡Error! Marcador no definido.**
7.2.7. Definición de los tipos de cobertura vegetal. **¡Error! Marcador no definido.**
7.2.8.Generación de las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU) ..... **¡Error! Marcador no definido.**
7.2.9.Entrada de variables climatológicas. ..... **¡Error! Marcador no definido.**
7.2.9. Generación de las Bases de Datos de Entrada. ..... **¡Error! Marcador no definido.**
7.2.10. Corrida del Modelo. ..... **¡Error! Marcador no definido.**
8. RESULTADOS DEL MODELO ..... **¡Error! Marcador no definido.**
8.1. Calibración del Modelo. ..... **¡Error! Marcador no definido.**
8.2. Verificación del Modelo. ..... **¡Error! Marcador no definido.**
8.3. Análisis de Resultados del Modelo Implementado. ..... **¡Error! Marcador no definido.**
9. SIMULACION OTROS ESCENARIOS ..... **¡Error! Marcador no definido.**
9.1. Descripción de la Simulación. ..... **¡Error! Marcador no definido.**
9.2. Resultados de la Simulación de otros escenarios. **¡Error! Marcador no definido.**
9.3. Análisis de Resultados de la Simulación de otros escenarios.. **¡Error! Marcador no definido.**
10. CORRIDA DEL MODELO CON PRECIPITACION HORIZONTAL .... **¡Error! Marcador no definido.**
10.1. Generación de las series de Precipitación Horizontal: ..... **¡Error! Marcador no definido.**
10.2. Resultados de la Simulación Incorporando Precipitación Horizontal ..... **¡Error! Marcador no definido.**
10.3. Simulación de otros escenarios Incorporando Precipitación Horizontal... **¡Error! Marcador no definido.**
10.4. Análisis de Resultados de la Modelación, Incorporando la Precipitación Horizontal ..... **¡Error! Marcador no definido.**
11. APLICACIONES DEL MODELO EN TOMA DE DECISIONES..... **¡Error! Marcador no definido.**
11.1 Costos de las diferentes estrategias de intervención..... **¡Error! Marcador no definido.**
11.2. Control de la erosión asociada a las diferentes estrategias de intervención ..... **¡Error! Marcador no definido.**
11.3. Construcción de la curva de costo marginal ..... **¡Error! Marcador no definido.**
12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES . **¡Error! Marcador no definido.**
13. BIBLIOGRAFIA ..... **¡Error! Marcador no definido.**
A mi madre por su apoyo 5
Incondicional. 5

INTRODUCCIÓN

A escasos ochenta kilómetros de la capital de Colombia, en la cordillera oriental colombiana, se encuentra una amplia extensión de tierra en uno de los ecosistemas únicos en el norte de los Andes, El Páramo. Caracterizado por la alta humedad que recibe del Océano Atlántico, la Orinoquía y la Amazonía, la cual transforma en altas precipitaciones, el Páramo de Chingaza es la principal cuenca abastecedora de agua potable para la ciudad de Bogotá y once de sus municipios anexos.

El Sistema Chingaza, nombre característico de la infraestructura con la que cuenta El Acueducto de Bogotá en el Páramo de Chingaza para realizar los procesos de captación y aducción, aprovecha el agua retenida por la vegetación la cual es almacenada y lentamente liberada e infiltrada a través del suelo hacia pequeñas conducciones, vallados, lagunas y quebradas que conducen al agua hacia las diferentes estructuras de captación con las que cuenta El Acueducto de Bogotá.

El Sistema Chingaza está rodeado por los municipios Fómeque, Choachí, La Calera, Guasca, Junín, San Juanito y El Calvario, cuyas economías están basadas en actividades agrícolas y pecuarias principalmente, esto sumado a las tradiciones culturales, tales como las quemas no controladas, la ganadería extensiva y el sistema de cultivo con excesivos productos químicos, representan una amenaza para la protección del Páramo Chingaza, por cuanto la extensión de la frontera agrícola de los vecinos del sector representa un inminente cambio del uso del suelo. Dada la jerarquía que representa el páramo en mención, no solo por su variabilidad en fauna y flora, con cuantiosas especies endémicas, sino por la importancia que para la ciudad de Bogotá tiene la cuenca aportante del ochenta por ciento del recurso que esta demanda, se hace necesario conocer los fenómenos físicos que gobiernan el ciclo del

agua en cuencas paramunas, realizando un estudio piloto en las cuencas del páramo de Chingaza.

Para el caso de estudio se eligió realizar la modelación sobre la cuenca alta del Río Guatiquía, esto teniendo en cuenta la importancia que esta representa para el hidrosistema en cuestión, al aportar aproximadamente el 50% del recurso recibido por el Embalse de Chuza. Adicionalmente la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, tiene como uno de sus planes de expansión la construcción de Chingaza II, proyecto que estaría ubicado en la zona del presente estudio.

PROBLEMA

Con el crecimiento de la población y el afán de la sociedad por generar más recursos, los ecosistemas vulnerables y desprotegidos tales como el del páramo se han visto amenazados por el hombre, éste lentamente ha ido ascendiendo en las alturas con sus proyectos productivos que no tienen entre sus cometidos el preservar el medio ambiente. Es así como la agricultura y la ganadería entre otras son prácticas comunes y fáciles de encontrar en los páramos colombianos; pese a los esfuerzos de las autoridades competentes para mitigar estos impactos sobre el ecosistema paramuno, en la actualidad no existe una legislación clara y estricta ni alternativas viables que permitan reemplazar las actividades económicas de agricultura y ganadería en lugares como el mencionado.

Si bien el macizo de chingaza estuvo bien preservado durante las primeras décadas del siglo pasado, situación fomentada por el difícil acceso a la zona, la construcción de vías de acceso así como la expansión de las fronteras agrícolas generó la incursión campesina y de habitantes de la región al páramo de Chingaza, generando así un impacto relacionado con los cambios en el uso del suelo y el aprovechamiento y contaminación del recurso hídrico principalmente. En la actualidad esta situación no ha cambiado y el páramo continúa siendo afectado, lo que genera una incertidumbre sobre el futuro de este ecosistema en cuanto a la capacidad de absorción y retención de agua se refiere.

JUSTIFICACION

Una vez entendida la problemática con la que cuentan los páramos en Colombia, se hace necesario brindar una herramienta que sirva para la toma de decisiones sobre las políticas de protección de los ecosistemas de páramo, la cual a partir de escenarios diferentes genere las respuestas que daría el sistema. Se busca saber a priori que "pasa si" hay cambios en el uso del suelo tal como ha venido sucediendo en lugares específicos del páramo y cómo esta situación puede afectar la cantidad y la calidad de agua que es captada por el Acueducto de Bogotá para el suministro del recurso a la ciudad.

Por otro lado, los entes competentes en la preservación de este tipo de ecosistemas, carecen de herramientas objetivas que les permitan decidir el nivel de intervención óptimo en las cuencas con el fin de preservar el recurso y minimizar la erosión, la cual está asociada al tipo de vegetación presente en la cuenca.

OBJETIVOS

Objetivo general.

- Implementar un modelo que represente los procesos asociados con el ciclo hidrológico del agua, dando un especial énfasis a los fenómenos de lluvia y escorrentía, en cuencas paramunas, esto con el fin de generar una herramienta objetiva, útil a la hora de tomar decisiones de intervención de los ecosistemas de páramo.

Objetivos específicos.

- Describir las generalidades de los ecosistemas de Páramo.
- Recopilar y verificar información hidrológica y cartográfica relevante para la implementación del modelo
- Determinar la viabilidad del uso del modelo SWAT en ecosistemas de páramo
- Modelar la respuesta hidrológica de la cuenca con las coberturas existentes.
- Modelar la respuesta hidrológica de la cuenca con escenarios supuestos.
- Reconocer la importancia de la precipitación horizontal para el caso de estudio.
- Comparar la respuesta de la cuenca, en cuanto a cantidad se refiere, ante cambios en el uso del suelo.
- Verificar la utilidad del modelo, como herramienta de toma de decisiones para los entes competentes en la administración del páramo.

1. LOS PARAMOS

Con el fin de entender las características propias del ecosistema en el cual se implementará el modelo propuesto a continuación se presenta una descripción general de los páramos. La definición del páramo no está completamente determinada, si bien estos no se pueden definir como un ecosistema determinado, se puede clasificar como páramo a un ecosistema dado, por las características geográficas, geológicas, climáticas y de flora y fauna específicas. Los estudios en el tema han hecho de los límites altitudinales la característica más relevante para definir un ecosistema dado como páramo. Se puede decir que los páramos son los biomas propios de las montañas neotropicales que se localizan entre el límite superior de la vegetación boscosa (3200-3800 MSNM) y el límite inferior de las nieves perpetuas (4400-4700 MSNM) en los sistemas andinos de Venezuela, Ecuador y Colombia, y con extensiones en Costa Rica y Panamá. (Cleef, 1978; Molano, 1989; Luteyn, 1999; Rangel-Ch, 2000).Ver Figura 1. Localización de los Páramos en América (Tomado de Vargas 2003).

Figura 1. Localización de los Páramos en América (Tomado de Vargas 2003).

Algunas estribaciones al norte del Perú tienen características similares a las de los páramos antes mencionados, especialmente en cuanto a la vegetación se refiere, pero Rangel-Ch(2000), afirma que los regímenes de las lluvias, los niveles de precipitación y la cantidad de meses con deficiencia hídrica, caracterizan a esta región como puna, con climas mas secos que los del páramo.(Vargas 2004). Los trópicos húmedos y fríos donde se encuentran los páramos constituyen un ambiente único que combina el régimen de clima tropical (isotermismo anual, fluctuaciones pequeñas de la duración de los días a lo largo del año, o de niveles de radiación), con bajas temperaturas y heladas frecuentes. Estas condiciones climáticas, combinadas con altas precipitaciones pluviales, permiten la existencia de los páramos en los Andes

1.1. CLASIFICACION DE LOS PARAMOS

A continuación se presenta la clasificación adoptada por Cuatrecasas la cual está basada en criterios fisionómicos y florísticos. En esta se clasifica al páramo según la variación de la vegetación en tres divisiones, que están relacionadas con la altura a la cual se encuentra sobre el nivel del mar cada una de estas; a saber el Superpáramo, el Páramo y el Subpáramo

1.1.1. El Superpáramo.

Su límite inferior está aproximadamente a los 4200 msnm en las cordilleras central y oriental y 4400 metros más alto en la oriental hasta aproximadamente los 5200 msnm. En este se presentan heladas durante todas las noches del año y la temperatura varía, generalmente, entre los 0 y los 6°C, pero puede presentar grandes oscilaciones térmicas que alcanzan los 25°C durante días soleados y temperaturas mínimas de hasta 2°C bajo cero. Como característica a resaltar en este tipo de páramo, está la calidad del suelo dada su condición móvil e inestable como consecuencia del congelamiento y descongelamiento al que se ve sometido diariamente, de igual forma en el superpáramo se presentan con alguna frecuencia nevadas.

Para este hábitat, se cuenta con 69 tipos de comunidades vegetales conocidas; la cobertura vegetal del suelo es baja y está ocupado principalmente por

musgos y otras plantas, presenta gramíneas pequeñas, de los géneros Agrostis y Festuca. (Navarrete, 2004)

1.1.2. El Páramo

En la vertiente occidental de la cordillera Occidental Esta subdivisión del páramo abarca desde los 2900 hasta los 3800 msnm; en el flanco oriental solo es nítida entre los 3300 y 3800 msnm; en la cordillera Central, vertiente occidental, se encuentra entre 3400 y 4000 msnm, en la cordillera Oriental va desde los 3200 a 3900 msnm; en la cordillera Oriental su mayor extensión está en la vertiente occidental de 3000 a 3800 msnm, la cual es la franja más extensa y la mejor consolidada ecológicamente. Los suelos tienen una cobertura mas densa que la presentada en el super-páramo, que ayuda a evitar la erosión causada por la precipitación y la escorrentía superficial. En cuanto a la vegetación se refiere la subdivisión páramo presenta un dominio del pajonal frailejonal y de los pastizales, con 146 especies, entre los cuales predominan las gramíneas del género Calamagrostis, acompañados de frailejones de los géneros Espeletia,Espeletiopsis,Libanothamnus y Tamana. (Navarrete, 2004)

1.1.3. El Subpáramo.

En la cordillera Oriental se observa de los 3000 a los 3500 msnm, mientras que en la cordillera Occidental el límite superior se encuentra alrededor de los 3900 msnm. Esta subdivisión del páramo es considerada como una transición entre el bosque altoandino y el páramo propiamente dicho; entre la vegetación presente sobresalen los arbustos y árboles bajos que proceden del bosque adyacente, entremezclados con la vegetación propia de páramo. La altitud donde se presenta la transición entre el bosque y el subpáramo es muy variable y en muchos casos la actividad del hombre la ha transformado mediante la adaptación de terrenos para llevar a cabo actividades agrarias y pecuarias. En esta subdivisión se presentan cerca de 112 comunidades vegetales, como resultado de una gran homogeneidad de condiciones ambientales y fisiográficas; entre ellas se destacan algunos árboles propios de los bosques enanos, densos matorrales compuestos por ericáceas, varios tipos de chuscales y algunos frailejones. (Navarrete, 2004)

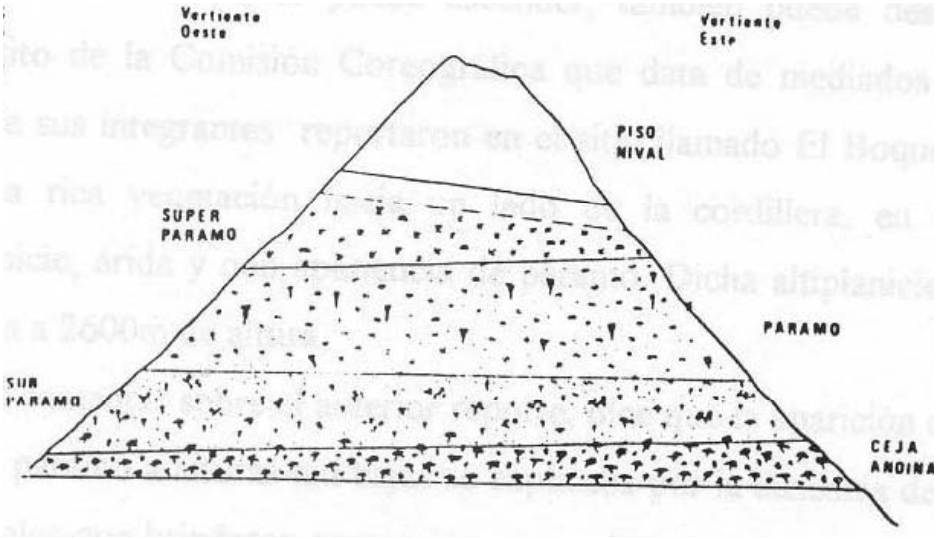


Figura 2. Asimetría de las vertientes en los Andes. (Suárez, 1989)

1.2. CARACTERÍSITICAS ECOLÓGICAS DE LOS PARAMOS

Según Vargas (2004) como características a resaltar del ecosistema de páramo se encuentran las siguientes:

- Presencia de un régimen isotérmico anual y alternancia térmica diaria por debajo de cero grados, ambiente propicio para la presencia de heladas, en especial en la época seca. Adicionalmente se cuenta con bajas temperaturas del suelo, vientos fuertes que desecan la vegetación, una baja presión atmosférica, alta radiación ultra-violeta y bajas concentraciones de oxígeno representando limitantes para el desarrollo de las plantas.
- Suelos humíferos con gran capacidad de almacenamiento de agua y pH ácidos, que genera sequedad en las plantas
- La vegetación presenta una baja biomasa, crecimiento lento, productividad primaria baja, descomposición de materia orgánica lenta, y acumulación de necromasa en pie y en suelo. Estos aspectos hacen que los procesos de sucesión y regeneración sean lentos (Vargas 2004).

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA CHINGAZA

Teniendo en cuenta que el presente proyecto de investigación será realizado en una zona importante del Sistema Chingaza, cuya función principal es la captación y conducción del agua que se produce en el páramo del mismo nombre, se presenta una descripción general de dicho sistema, con el fin de contextualizar al lector. Entre los años de 1965 y 1971 se realizaron los estudios de factibilidad que sirvieron como herramienta de toma de decisión para llevar a cabo la construcción del Sistema Chingaza. Las obras comenzaron en el año de 1971 y terminaron en el año de 1983, asegurando así el suministro de agua potable para la ciudad de Bogotá, hasta el año 2010.

Las obras construidas bajo el alcance del proyecto comprendieron la construcción de: Túnel de Guatiquía, Túnel de Leticia, Presa de Golillas, Pozo de compuertas, Túnel Palacio Río Blanco, Sistema Río Blanco (Pozos 1-4), Canal de Simaya, Túnel el Faro, Tubería de Simaya, Túnel de Siberia, Sifón del Teusacá, Planta de Tratamiento El Sapo (Francisco Wiesner) y la Conducción por gravedad desde la planta de tratamiento hasta Santa Ana.

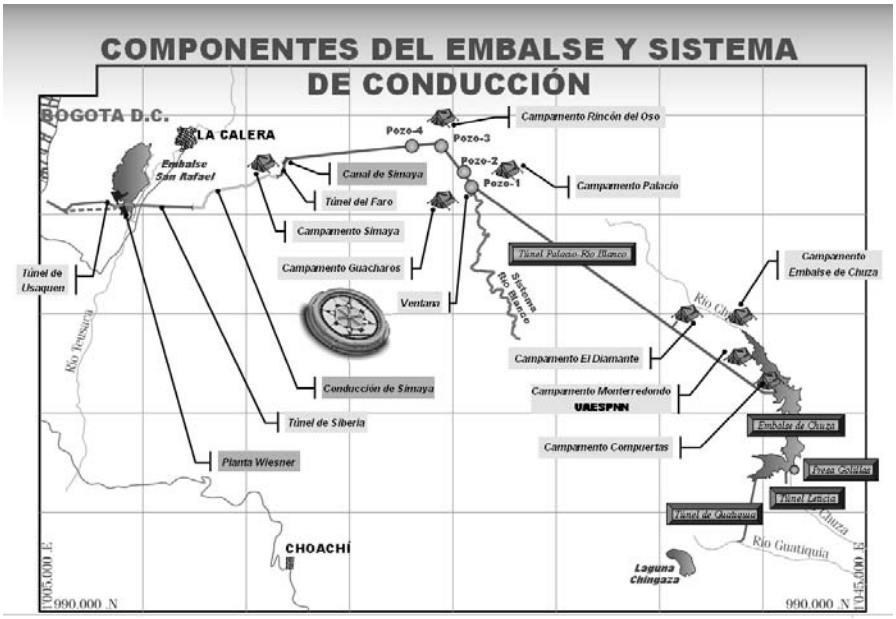


Figura 3. Componentes del Sistema Chingaza

El costo total de las obras hasta 1983 fue de $425.48 millones de dólares de 1984.

El Sistema Chingaza ubicado en la cordillera oriental, a aproximadamente 80 kilómetros de Bogotá, toma aportes de los ríos La Playa y Frío, los cuales son captados y desviados a través del Túnel de Guatiquía; La quebrada Leticia que es desviada por el túnel del mismo nombre y el río Chuza con los aportantes propios de la cuenca alta.

Mes	Cuencas		
	Río Guatiquía	Río Chuza hasta presa Golilla	Chorro Leticia
Enero	1.72	1.97	0.11
Febrero	2.15	2.73	0.15
Marzo	2.62	3.25	0.17
Abril	5.29	6.14	0.31
Mayo	8.35	9.27	0.46
Junio	10.63	12.88	0.61
Julio	11.29	13.38	0.65
Agosto	8.20	8.66	0.44
Septiembre	6.18	6.09	0.33
Octubre	5.77	5.95	0.31
Noviembre	4.79	4.56	0.27
Diciembre	2.74	2.81	0.17
Anual	5.81	6.47	0.33

Tabla 1. Afluencias Mensuales Embalse de Chuza (m3/s)

El embalse de chuza tiene una capacidad útil de 227 millones de Mm^3, el agua allí almacenada se transporta a través de una serie de túneles y conducciones hasta la planta Wiesner.

Adicionalmente se cuenta con las captaciones y conducciones del río Blanco, mediante las cuales se aumenta la captación de caudales llevados a Bogotá.

AFLUENTE	AREA DE CUENCA (Km2)	TOTAL AREA AFLUENTE (Km2)
RIO CHUZA	95.87	
EMBALSE DE CHUZA	5.73	101.6
RIO LA PLAYA	60.26	
RIO FRIO Y LAGUNA CHINGAZA	29.7	
RIO GUATIQUIA	8.05	98.01
QUEBRADA LETICIA	3.62	3.62
RIO BLANCO	75.89	75.89

Tabla 2. Areas de las Cuencas Aferentes Sistema Chingaza

3. CARACTERIZACIÓN PARQUE NACIONAL NATURAL CHINGAZA

3.1 LOCALIZACION Y EXTENSIÓN

El Parque Nacional Natural Chingaza se encuentra localizado en la cordillera Oriental, al nororiente de Bogotá entre los 4° 51'- 4° 20' de latitud norte y los 73° 30' – 73° 55' de longitud occidental. Cuenta con un área aproximada de 76.600 hectáreas que comprenden los municipios de Medina, Junín, Guasca, Gachalá, Fómeque, Choachí y La Calera en el departamento de Cundinamrca y los municipios de El Calvario, Cumaral, Restrepo y San Juanito en el departamento del Meta.

El Parque comienza en el páramo de Guasca, continua por los páramos de Palacio y Barajas hasta el Páramo de Chingaza; desde este punto se divide en dos ramales hacia los llanos orientales, el de la serranía de Los Órganos y el de los Farallones de Medina. Aunque su rango altitudinal se encuentra entre los 800 y los 4020 metros de altitud, la mayor parte de su extensión está en niveles superiores a los 3.300 m de altitud, donde el ecosistema de páramo es dominante (Lora, 1999).

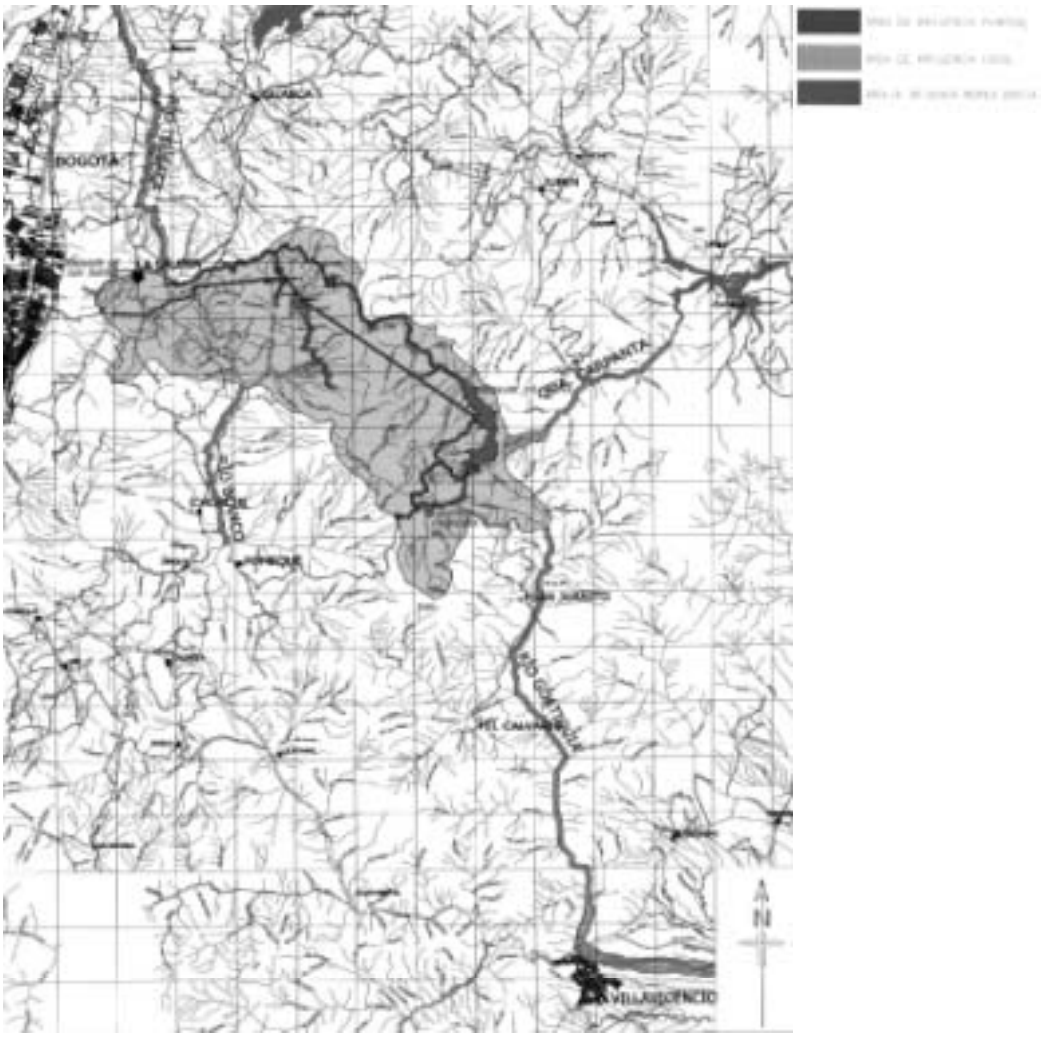


Figura 4. Area de influencia Sistema Chingaza, Tomado de A.A, 2003.

El Parque inicialmente abarcó un área aproximada de 50,374 ha, incluyendo la totalidad del Páramo de Chingaza. En 1998 fue extendida su cobertura en 26,226 ha, correspondientes al ecosistema de Selva Andina de los Farallones de Medina desde los 800 m de elevación en la vertiente oriental de la cordillera. Durante la década de los años '70s la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá adquirió grandes extensiones del Páramo de Chingaza y construyó en él importantes obras de infraestructura, como carreteras de acceso, el embalse de Chuza y un sistema de túneles de conducción de agua de aproximadamente 40 km de longitud, con el fin de atender la creciente demanda de agua potable para la ciudad de Bogotá y algunos municipios vecinos. Gracias a los esfuerzos de esta institución, el Páramo de Chingaza es

hoy uno de los páramos mejor conservados de Colombia. Su cercanía a la capital del país, le confiere especial importancia, dado que es fuente de agua para cerca de 11 millones de habitantes y una importante localidad ecoturística (Anónimo 1986, Homewood 1996, Escobar & Solano 1999).

3.2 VARIABLES CLIMATOLOGICAS

Las tierras altas tropicales se caracterizan por presentar una relativa constancia de la cantidad de radiación, la duración del día y la temperatura media anual, por lo que no es posible referirse a un clima sino a un conjunto de ellos (Sarmiento, 1986 citado por Vargas, 2004). Esta diversidad climática resulta de la interacción de tres gradientes principales. El primero es la latitud, determina la oscilación anual de la temperatura, el segundo hace referencia a la relación presente entre la altitud, la temperatura y la precipitación y el tercero es la posición geográfica de las montañas respecto al océano y a las cadenas de circulación atmosférica (Sarmiento, 1986 citado por Vargas 2004). Teniendo en cuenta lo anterior se entiende que cada páramo es característico dadas las diferencias de los factores antes mencionados; así las cosas los páramos de la vertiente oriental, entre los cuales se encuentra el Páramo Chingaza, son más húmedos y sus precitaciones describen un comportamiento monomodal-biestacional como consecuencia de la descargas orogénicas (Aguilar & Rangel-Ch, 1996; Franco, 1982 Molano, 1988; Sarmiento, 1986 citados por Vargas 2004).

El área de influencia del sistema Chingaza se encuentra actualmente expuesta a fenómenos climáticos y ambientales de escala global que pueden haber incidido en la modificación del comportamiento de la precipitación y en el nivel de los cuerpos de agua (ríos, quebradas y lagunas). Entre éstos se encuentra el ENOS (El Niño-Oscilación del Sur) y El cambio global que consiste en el calentamiento de la atmósfera por el incremento de la concentración de dióxido de carbono acelerada por la actividad antrópica y cuya repercusión se observa en los ámbitos global y local (IDEAM, 1998)

La temperatura se caracteriza por ser baja, con valores medios entre los 6.7 y 7.9 °C y con la característica propia de los páramos de una alta variación a lo largo del día. Adicionalmente se ve una variación espacial de la temperatura por cuanto se cuenta con diferentes valores de altitud en el Parque, lo que

representa temperaturas mas altas a las cotas mas bajas 21°C a los 800 m de altitud y temperaturas inferiores en las zonas por encima de los 4000 m. Generalmente la época de pluviosidad alta se encuentra relacionada con le época de bajas temperaturas y viceversa

En general, en las partes altas del Parque se presenta una gran nubosidad debido al ascenso de las masas de aire, por los cambios de temperatura. Esta nubosidad afecta de manera importante la luminosidad y la energía radiante que llega a la tierra. (Vargas, 2003). El Parque Chingaza presenta alta radiación (4.2 h/d) para el período comprendido entre los meses de noviembre a febrero y baja radiación (1.2 h/d) para los meses de junio y julio, que coincide con la época mas húmeda. La insolación media de todo el Parque varía de 2.5 a 3.5 horas de brillo solar al día. (Carreño & Ramírez, 1979).

En los páramos la intensidad de los vientos suele ser baja con valores que rodean los 4 m/s, aunque se registran valores hasta de 16 m/s en las zonas altas. Los vientos locales dominantes en el sector del embalse de Chuza y al sur del mismo, son provenientes del noreste.

A continuación se describen en detalle las diferentes variables atmosféricas relevantes para el estudio, en el área de interés la cual está relacionada con la cuenca del río Guatiquía[1].

3.2.1. *Precipitación*

En el área de interés, se evidencia la transición entre los comportamientos en la precipitación de la vertiente este de la Cordillera Oriental y la parte central de la cordillera Oriental en la cuenca del Bogotá-Magdalena.

Vertiente Este

La vertiente este se encuentra expuesta a los vientos alisios y presenta un régimen *monomodal* característico de la llanura oriental de la cuenca del Orinoco. Sobre la franja suroriental caen en promedio unos 4.500 mm de precipitación al año y van disminuyendo gradualmente hasta unos 1.200 mm sobre el costado oeste del Parque (AA, 2003).

Sector Chuza-Guatiquía

[1] Esta caracterización fue obtenida del documento Plan de Manejo Ambiental Sistema Chingaza, elaborado por la firma Auditoría Ambiental Ltda cuyos trabajos fueron realizados basados en la información recopilada por la EAAB. ESP y el IDEAM

La distribución dentro del año de las precipitaciones medias anuales muestra un solo pico de lluvias intensas hacia los meses de mayo a agosto, durante los cuales se presenta un poco más del 60% de las lluvias totales del año. Los meses de diciembre a febrero son los de menores precipitaciones y aportan entre un 9 y 17% al total anual (AA, 2003).

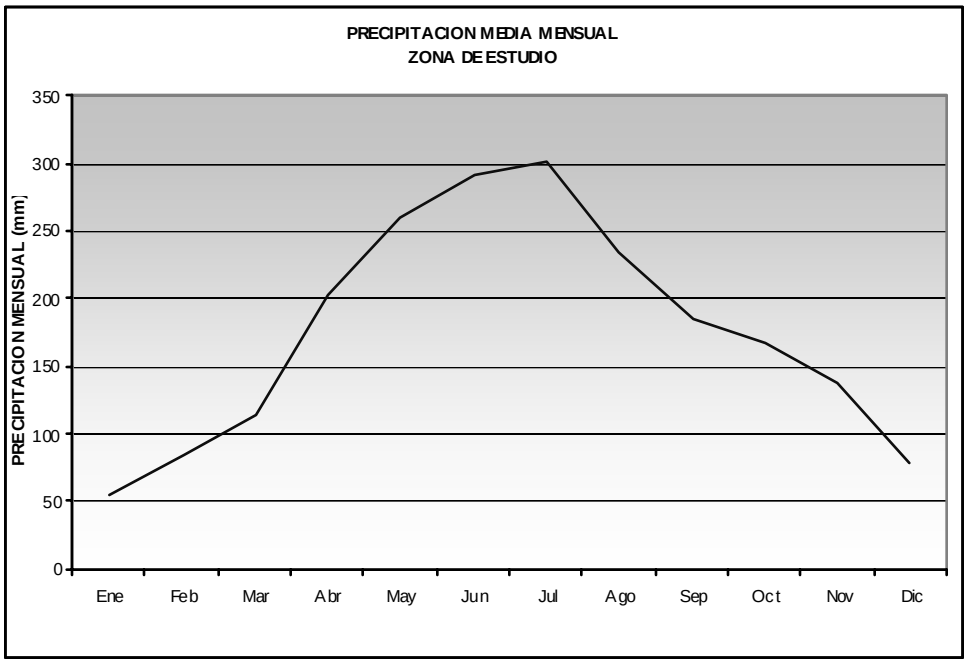


Figura 5. Precipitación media mensual Zona de Estudio

Distribución espacial y temporal de la precipitación

Teniendo en cuenta el área de estudio se analizan las estaciones allí instaladas. Se utiliza el período y las estaciones analizadas y completadas por Auditoría Ambiental Ltda. Período comprendido entre los años 1973 y 1996 para las estaciones de relevancia en el estudio.

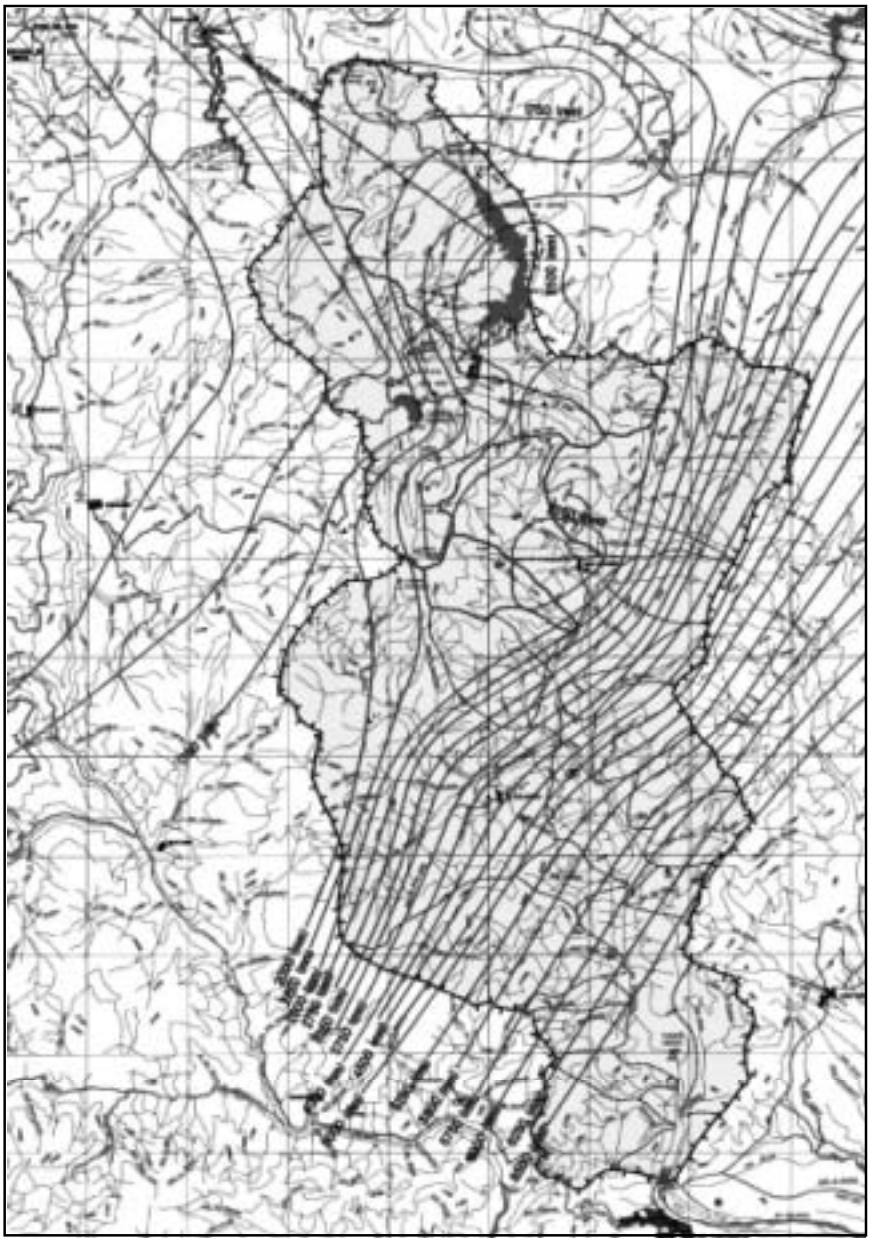


Figura 6. Isoyetas cuenca río Guatiquía, Tomado de A.A, 2003

Con base en la tabla anterior se generan los histogramas que definirán el tipo de distribución anual de lluvias.

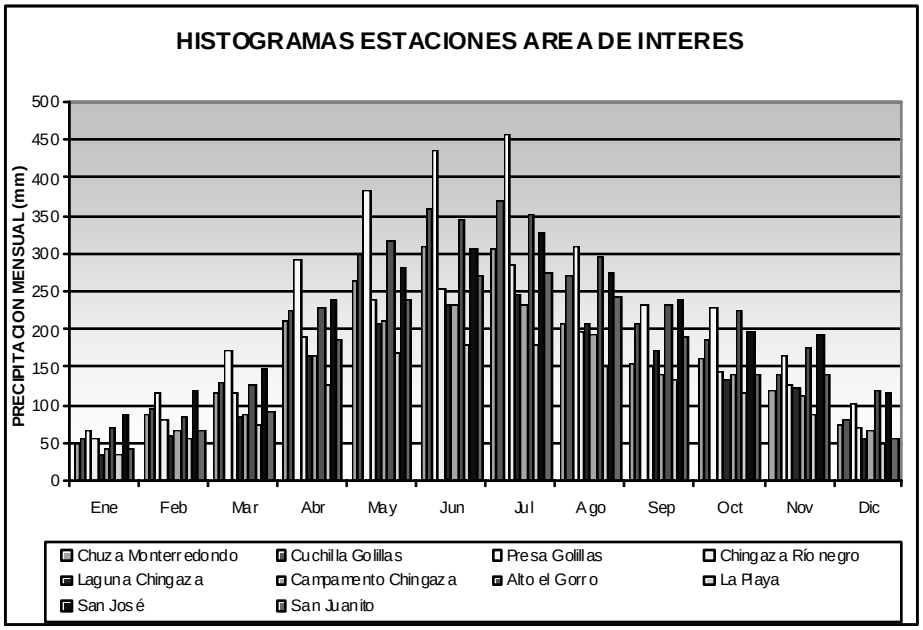


Figura 7. Histogramas Estaciones Area de Interés

Del gráfico anterior se puede concluir que la zona presenta una distribución de lluvias en el año de tipo unimodal, característico del lado este de la cordillera oriental, con un período húmedo de mayo a agosto y seco de diciembre a febrero; siendo los meses de junio y julio los meses con mayores precipitaciones.

3.2.2. Temperatura

- Comportamiento Altitudinal

El clima de la región está determinado por la influencia de la circulación planetaria de la atmósfera representada por los vientos Alisios del suroriente, su situación latitudinal en la región intertropical, y la variación altitudinal que propone el relieve que oscila entre los 1000 y 4000 m.s.n.m., lo que permite la conformación de pisos térmicos(A.A, 2003).

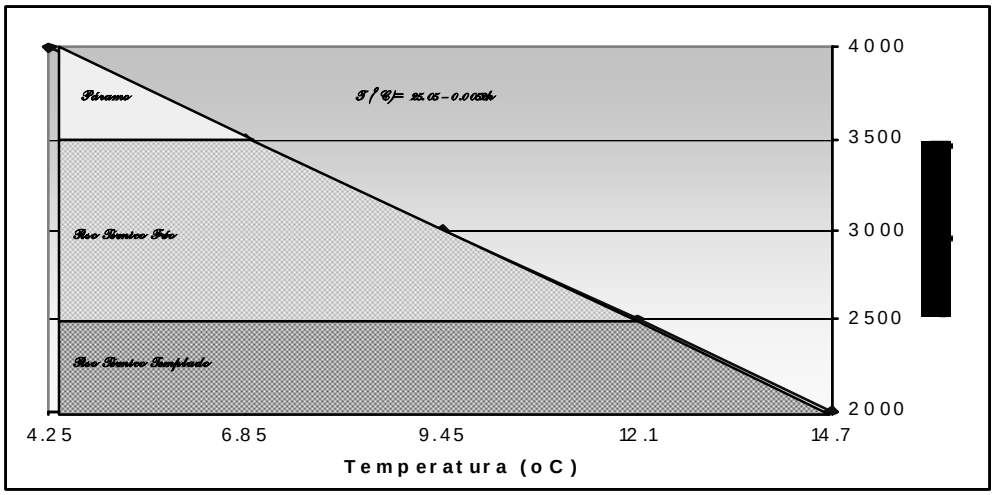


Figura 8. Variación de la Temperatura Respecto a la Altura en el Flanco Este de la Cordillera Oriental tomado de A.A, 2003

Las variaciones térmicas en este sector, se encuentran estrechamente relacionadas con la variación altitudinal y el grado de humedad, donde el gradiente térmico corresponde a 0.52ºC por cada 100 metros, situación que obedece a la gran nubosidad y humedad de esta vertiente que genera un efecto de estancamiento. (IGAC, 1980 en Betambiental, 2001).

De esta gráfica se puede concluir que los valores de la temperatura media para la cuenca alta del río Guatiquía es de aproximadamente 6.5°C

Al graficar la temperatura media a lo largo del año para la estación de Chingaza-Campamento, ubicada en la zona de estudio se obtiene la siguiente gráfica.

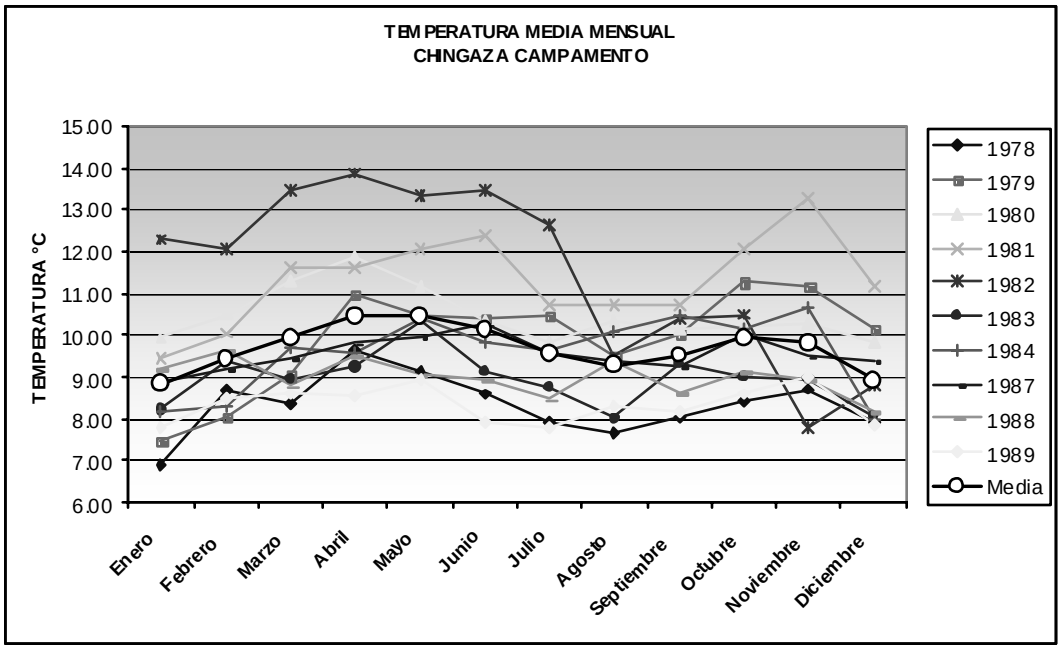


Figura 9. Temperatura Media Mensual Area de Interés.

En la grafica se observa que la distribución de temperatura cuenta con un ciclo anual marcado por dos períodos de temperaturas mayores. Adicionalmente se concluye que la temperatura media (9.5°C) está un poco por encima de la temperatura estimada para la altitud de la zona.

La distribución dentro del año de las altas y bajas temperaturas operan en forma simétrica e inversa a la de la precipitación: a altas pluviosidades corresponden bajas temperaturas y viceversa, observándose, sin embargo, que la diferencia de temperaturas medias del mes más frío al más cálido no alcanza los 5ºC. El rango de variación de la amplitud térmica diaria va desde los 25ºC para los meses de diciembre a febrero, hasta los 13ºC durante los meses de junio y agosto.

3.2.3. Humedad Relativa

La Humedad relativa es la humedad que contiene una masa de aire, en relación con la máxima humedad absoluta que podría admitir, sin producirse condensación, conservando las mismas condiciones de temperatura y presión atmosférica. Esta es la forma más habitual de expresar la humedad ambiental (wikipedia.org). El comportamiento de la humedad relativa obedece a un

régimen inverso al de la temperatura, donde al incrementarse esta última, aumenta la capacidad atmosférica de retener vapor de agua y si ésta no recibe aportes adicionales de vapor, la humedad disminuye. (Guillo, 1994).

De acuerdo con las características de la zona, es decir su altura y posición, se presentan valores considerablemente altos frente al resto del país, encontrándose estos entre un 86 a un 90%. El valor promedio registrado para la zona es del 75%, cifra que se mantiene a lo largo del año, aunque registra disminución durante la época seca manteniendo así la relación inversa entre la humedad y la temperatura, fenómeno coincidente con la disminución en el aporte de pluviosidad. Los mayores valores se registran en el período de lluvias entre para el mes de abril y junio con medio máximo superior al 90% (A.A, 2003).

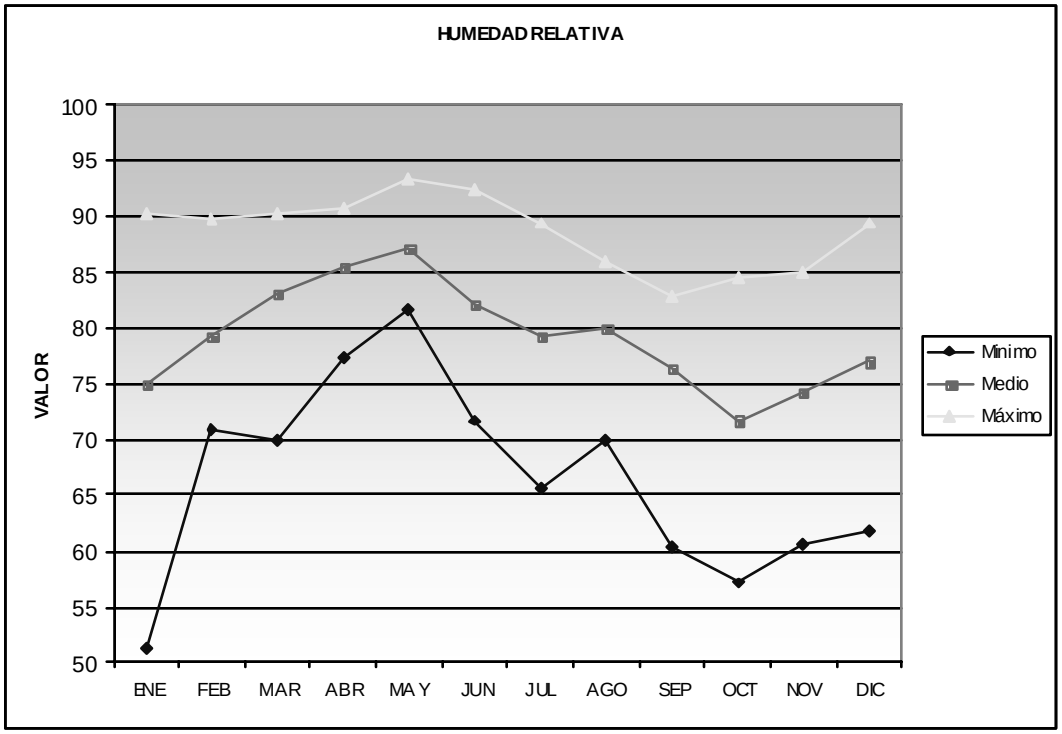


Figura 10. Humedad Relativa Area de Interés

3.2.4. Nubosidad y Brillo Solar

Se define el brillo solar como el proceso de transmisión de energía por medio de ondas electromagnéticas y el modo por el cual llega la energía solar a la tierra; este depende de factores tales como la latitud, la altitud y la nubosidad.

Se registra un valor de 2.5 a 3.5 horas diarias para el Parque Chingaza, con valores máximos de 4,2 horas/día presentados en Enero, y mínimos de 1.2 horas/día presentados en Julio.

Los días más nublados se presentan durante los meses de Junio y Julio alcanzando valores promedio mensuales de 18 a 20 horas/día. La mayor concentración de radiación se produce en la mañana dando paso al proceso de evaporación, que con dificultad logra dispersarse, la cual al disminuir la temperatura hacia la tarde produce condensación, imprimiéndole a la zona el continuo carácter nublado que la caracteriza (Bernard y Torres, 1988 citado por A.A, 2003).

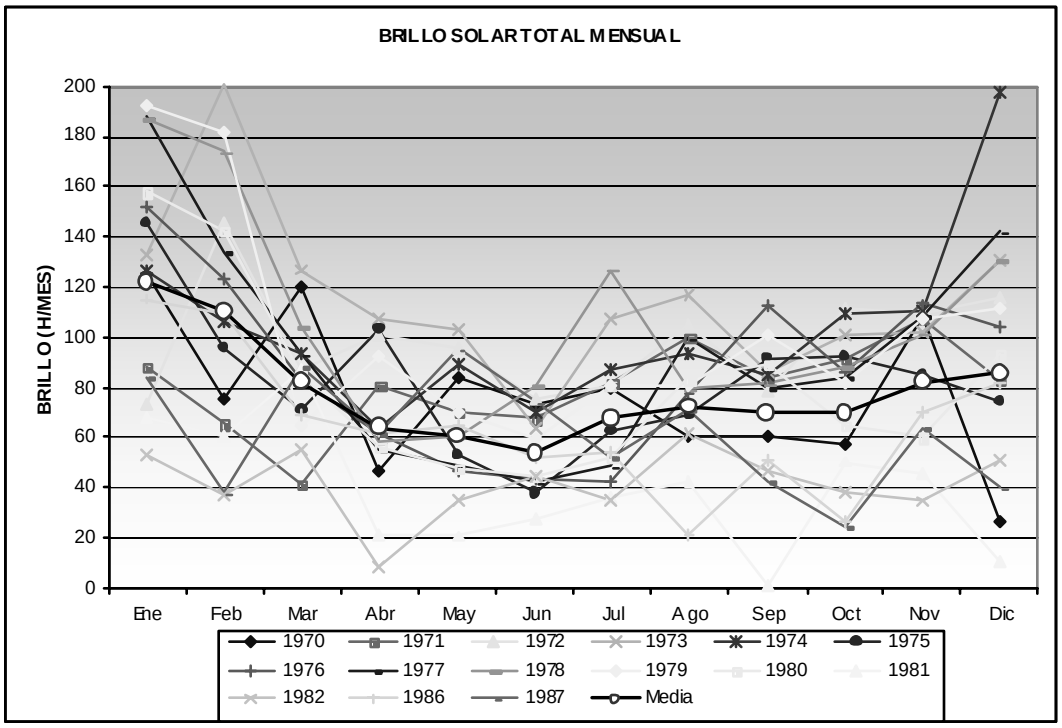


Figura 11. Brillo Solar Total Mensual, Area de Interés.

De las gráficas se concluye que la intensidad del brillo solar está ligada a los períodos de lluvia, para los meses húmedos comprendidos entre abril y julio el brillo total mensual disminuye mientras que para los meses de verano aumenta considerablemente este valor.

3.2.5. Velocidad del Viento

Para toda la zona de estudio la velocidad anual promedio de los vientos es de 0.8 m/s, alcanzando los más altos niveles en el periodo Diciembre - Febrero, con mínimos en el mes de septiembre. La influencia de la cordillera es tan acentuada que logra una importante reducción en la velocidad de los vientos que alcanzan la Sabana de Bogotá (A.A, 2003).

Dirección del Viento

Para el área de influencia del Sistema Chingaza la dirección predominante es la componente en dirección Este, la cual presenta ligeros cambios durante Junio y Septiembre que no representan cambios significativos (HIMAT, 1979 en Betambiental 2000).

3.2.6. Balance Hídrico

El balance hídrico permite establecer la disponibilidad de agua en un espacio o volumen de control definido y las relaciones temporales entre la oferta y la demanda hídrica, representadas por las entradas y las salidas del recurso al volumen de control mencionado. Consiste en una representación gráfica en la que se comparan la evapotranspiración potencial y la real con la precipitación. Esta relación proporciona la información referente al exceso o déficit de agua disponible en el suelo a través de un período específico.

- Sector Chuza-Guatiquía

Para efectos de este análisis se ha empleado la información consignada en el Plan de Ordenamiento y Manejo Ambiental de la Cuenca Hidrográfica del Sistema Chingaza, elaborado por el Consorcio NAM Ltda - DHV Consultants B.V., (1998) para el Acueducto y recopilado por Auditoría Ambiental (2003).

De esta forma, se han empleado los balances calculados para las estaciones Chuza, Chingaza - Campamento y Palacios, que se presentan a continuación.

Para realizar el balance hídrico se han involucrado las siguientes variables:

- Temperatura (TºC)
- Indice calórico mensual (i)
- Evapotranspiración (Et)
- Evapotranspiración potencial (Ep)
- Precipitación (P)
- Almacenamiento (A)

- Variación del almacenamiento (dA)
- Exceso (E)
- Déficit (D)
- Evapotranspiración real (Er)
- Relación de humedad (RH).

Evaluación del balance hídrico

De las tablas presentadas en el anexo 1, se puede concluir que la zona de interés presenta una disponibilidad hídrica favorable, esto teniendo en cuenta que a lo largo de todo el año el suelo mantiene las condiciones de almacenamiento, generando así un ambiente propicio para el crecimiento de la vegetación. De igual forma se pueden apreciar los excesos constantes que se convierten en escorrentía y que hace el lugar propicio para los proyectos de aprovechamiento hídrico.

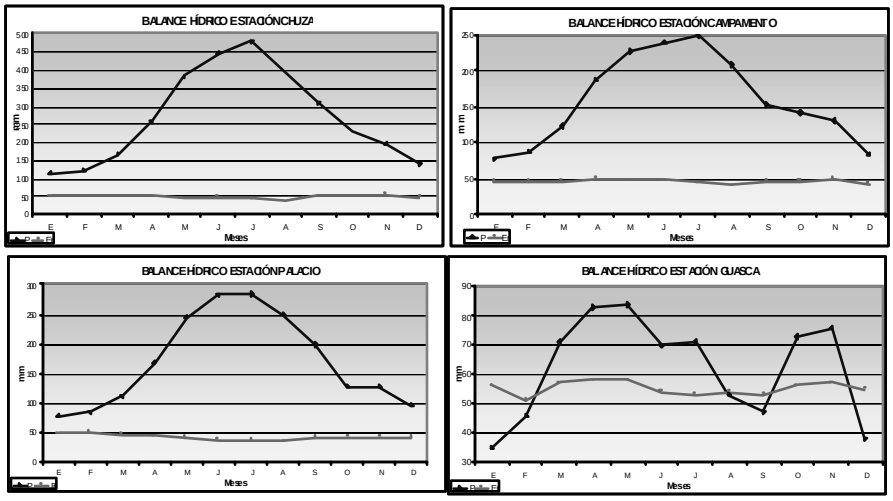


Figura 12. Balance Hídrico Estaciones en el Area de Interés.

De las gráficas anteriores se puede evidenciar que la evapotranspiración es inferior a la precipitación, esto se puede relacionar con las bajas temperaturas que se presentan en la zona.

4. ACTIVIDADES AGRARIAS Y PECUARIAS DESARROLLADAS EN EL AREA DE ESTUDIO

A continuación se realiza un inventario de las actividades que se han venido desarrollando en el Parque Chingaza y que generan impacto ambiental al ecosistema, como consecuencia de estas prácticas se tiene el cambio en el uso del suelo que afecta la flora, la fauna y la disponibilidad del recurso. Es de aclarar que estas prácticas han sido aprendidas culturalmente por los campesinos del sector y es la forma como se ha venido trabajando la tierra históricamente. De igual forma se debe tener claro que estas prácticas representan la principal fuente de ingreso de la gente de la región y hasta tanto no se encuentren alternativas económicamente viables para reemplazar la fuente de ingreso que representan las actividades agrarias y pecuarias para los habitantes de la región, el páramo continuará siendo utilizado en proyectos productivos.

ACTIVIDADES AGRARIA TÍPICAS DE COLONIZACIÓN / INDICADORES AFECTADOS			ACTIVIDADES PRINCIPALES						
			TALA, ROZA Y QUEMA	SIEMBRAS DE PAPA	ESTABLECIMIENTOS DE PASTOS	INTRODUCCION DE GANADERIA	CONSTRUCCION DE VIVIENDAS	INTRODUCCION DE ESPECIES DOMESTICAS	CAZA DE ESPECIES SILVESTRES
COMPONENTE	**ELEMENTO**	**INDICADOR AMBIENTAL**							
BIOFISICO	**FAUNA**	Fragmentación de Hábitat	■	■	■	■	■		
		Reducción de Hábitat	■	■	■	■	■		
		Modificación de Hábitat	■	■	■	■	■		
		Desaparición de Hábitat únicos	■	■	■	■	■		
		Disminución de las Poblaciones Silvestres e intromisión de especies	■	■	■	■	■	■	■
		Ahuyentamiento de Especies	■	■	■	■	■	■	
	FLORA	Destrucción de Hábitat	■	■	■	■	■		
		Afectación de la Vegetación	■	■	■	■	■		
		Cambio en el Uso del Suelo	■	■	■	■	■		
		Destrucción de Especies Silvestres Vegetales	■	■	■	■	■		
		Disminución De Germinación de las Especies Nativas e intromisión de especies	■	■	■	■	■	■	
		Perdida de Diversidad	■	■	■	■	■		
	AGUA	Afectación de la Calidad del Agua	■	■		■	■	■	
		Reducción de la Capacidad de Almacenamiento Hídrico Disminución de regulación por la afectación de cuencas		■	■				

Tabla 3. Actividades Desarrolladas en la zona de Estudio.

4.1 Tala y Rocería

Es una de las problemáticas más antiguas en el área de estudio, esta fue convirtiéndose en una práctica generalizada a medida que la colonización avanzaba a través de las vertientes de los ríos Guatiquía, Negro y Guavio, en busca de terrenos para establecer sus actividades agrarias y pecuarias. Adicionalmente y debido a la sobreexplotación de los bosques de las zonas

basales, se presenta tala de árboles como una explotación de recursos madereros, sin ningún programa de resiembra.

La primera actividad realizada para adecuar las fincas consistió en la tala, quema y roza de todas las especies nativas presentes en el área seleccionada para llevar a cabo el establecimiento del terreno de producción, esta actividad trajo como consecuencia la deforestación de todo tipo de vegetación presente, la destrucción de especies vegetales lo cual también modifica el uso del suelo y con esto se inicia una cadena de impactos que están asociados unos a otros como son: La destrucción, la fragmentación, la modificación y reducción del hábitat y en algunos casos la desaparición de hábitats únicos.

Con la generalización de la tala y la rocería en Chingaza se ahuyentaron y disminuyeron poblaciones de animales silvestres y en algunos casos se motivó la desaparición de especies endémicas.

Con la tala y rocería se produjo igualmente una modificación en el uso del suelo y en el paisaje, ya que se cambia de una zona boscosa o de vegetación de páramo a una zona deforestada donde predominan los pajonales y pastos. Adicionalmente se produjo una afectación de la calidad del agua por el arrastre de sedimentos debido al cambio en la cobertura, así como un cambio en el patrón de drenaje del suelo, como consecuencia de la nueva vegetación.

Con la tala de los bosques presentes se pierde la capacidad de almacenamiento hídrico por parte de las plantas, lo cual hace que se aumente los caudales instantáneos, generando crecientes rápidas en los cuerpos de agua y bajos niveles de almacenamiento de agua para las épocas más secas. De igual forma debido a la carencia de vegetación se pierden las condiciones de humedad propicias para la germinación de nuevas semillas y plántulas

4.2 Quema

La quema es otra práctica generalizada en el páramo de Chingaza, esta ha sido utilizada por la gente de la región históricamente, una vez se ha realizado la tala de la zona elegida, y es realizada para aprovechar la rápida germinación del pasto como consecuencia de los nutrientes incorporados al suelo, debido a la combustión de la materia. Es de anotar que casi la totalidad de los incendios forestales que afectan al páramo de Chingaza en las épocas de verano, y que

pueden llegar a acabar con varios cientos de hectáreas, son iniciados por los habitantes del sector quienes no pueden controlar la quema realizada.

Las quemas afectan la vegetación y destruyen las diferentes especies que encuentran a su paso, ya sea talada o que se encuentre en pie, con está afectación se produce a su vez una fragmentación de hábitats, reducción, modificación, destrucción y desaparición de hábitats únicos. Adicionalmente se genera ahuyentamiento y disminución de las poblaciones silvestres que se encuentran en el área afectada.

Al ser quemadas las especies vegetales se produce una disminución en la retención de agua o una disminución en la capacidad de almacenamiento lo que disminuye la oferta hídrica de las zonas. Así como una afectación al recurso ocasionado por el arrastre de cenizas y material fino a los cuerpos de agua.

4.3. Establecimiento de cultivos

Se generó un cambio en el uso del suelo que conllevo al establecimiento de cultivos que en el municipio de Fómeque se dio desde antes de la guerra de los Mil Días, dándose una ampliación de la frontera agrícola por las vertientes del río Negro desde la desembocadura del río Blanco, básicamente por los colonos de Choachí, Ubaque y Fómeque, quienes tumbaron monte, sembraron maíz, habas, cubios, chuguas y papa: Con el paso del tiempo se fueron formando fincas y organizando haciendas con el trabajo de peones. Fue así como se pasó de un uso netamente protector a un uso productor, cuya implementación sin tener en cuenta ningún tipo de normas ambientales o criterios conservacionistas, se convierte en un factor desestabilizador del medio natural y en una pérdida de los valores estéticos. La modificación de manera acelerada del paisaje, se inicia a principios de siglo y se acentúa después de los años 50. (A.A, 2003)

Actualmente la tala de vegetación nativa tiene como objetivo transformar áreas protegidas en áreas productoras de alimentos, donde se elimina la vegetación típica del páramo y se establecen cultivos y pastos para mantener la ganadería extensiva.

El avance de la producción papera bajo la modalidad del monocultivo se dio aprovechando el potencial natural de los suelos húmicos. La incorporación de

paquetes tecnológicos y de agroquímicos modificaron profundamente las propiedades de los suelos, además de contaminarlos con las descargas elevadas de insumos que sustentan la producción de papa. Esta actividad generó un cambio más notorio en el uso del suelo, ya que además de la remoción del suelo produjo un cambio notorio con el establecimiento de los surcos, esto generó también un cambio en el paisaje de la zona de cultivo (A.A,2003)

Con la implantación de cultivos también se disminuye la regulación hídrica debido a la conformación de surcos, que en la mayoría de los casos, funcionan como canales que evacuan el agua de los cultivos. Adicionalmente la mayoración del caudal y de la velocidad del agua genera erosiones locales relacionadas con el transporte de sedimentos, que deterioran la calidad del agua.

4.4. Establecimiento de pastos

Debido a la implementación de hatos ganaderos en la zona, se realizó una siembra selectiva y homogenizada que desplazó la variabilidad de cobertura presente en la zona. Adicionalmente y como mecanismo de preparación de terreno para la implementación de ganadería se realizan quemas, constantes que afectan al suelo.

Como consecuencia de la implementación de la ganadería se produce un cambio en el uso del suelo y una sustitución de la vegetación nativa por especies foráneas. En el caso del actual parque Chingaza, se utilizaban extensas áreas del sector del río La Playa para el aprovechamiento ganadero las cuales recibían el nombre de "*El Común*" donde se pastoreaban hasta 1000 reses. Esta situación cambio cuando el Acueducto empezó el proceso de compra de predios a partir del año 1972 y cuando el Páramo de Chingaza fue elevado a la categoría de Parque Nacional Natural en el año 1977.(A.A, 2003)

A su vez, el establecimiento de los pastos también afecta la capacidad de almacenamiento hídrico propio de la zona.

4.5. Introducción de la ganadería

Con la introducción de la ganadería se cambio el uso del suelo y se introdujeron nuevos elementos ajenos al páramo. La calidad del agua se vio afectada con la ganadería por el arrastre de materia orgánica hacia los cuerpos de agua, afectando no solo la calidad bacteriológica del agua sino las condiciones fisicoquímicas de la misma. Por otro lado la ganadería genera erosión y altera la capacidad de absorción del suelo debido al constante pisoteo de los animales el cual afecta los porcentajes de germinación de las semillas de especies nativas, lo anterior debido al cambio en las condiciones del suelo y en la cobertura vegetal.

5. CLASIFICACIÓN EDÁFICA

Se presentan las características principales del suelo para la zona de estudio, con el fin de conocer las propiedades del mismo y así alimentar el modelo planteado.

- **Sector Chuza-Guatiquía**

Para la zona de estudio el terreno es predominantemente quebrado, con planicies reducidas en las cimas, y pendientes altas que varían desde el 12% hasta el 50%, con sectores puntuales cuya pendiente alcanza el 75%.

Los suelos de este sector son el resultado de la meteorización de los materiales constituyentes de las formaciones Cáqueza, Une, Quetame y las capas de Chingaza, correspondientes a arcillas rojas, areniscas fragmentadas, filitas, lutitas y arcillolitas, esquistos pizarrosos y cenizas volcánicas, estas últimas típicas de las áreas que presentan ángulos y formas suavizadas. Presentan textura arcillosa a franco-arcillo-arenosa, con elementos gravillosos localizados de acuerdo con los procesos desarrollados en el área. (Unión Temporal Betambiental, 2000)

Los suelos en el sector de Chuza-Guatiquía son en general suelos superficiales, con alto contenido de carbón orgánico en las capas superiores y reducido en los estratos inferiores, con excepción de las zonas en que la pendiente permite la acumulación de material y su evolución. Tienen unas características químicas generales de suelos ácidos de alta capacidad de intercambio catiónico. La saturación de bases es muy baja, al igual que la fertilidad. Presentan buen drenaje en su mayoría, con algunas imperfecciones en sitios localizados, con erosión hídrica laminar ligera a moderada y de moderada a fuerte. (Unión Temporal Betambiental, 2000)

A continuación se caracterizan las unidades agrológicas presentes en el área de estudio, adicionalmente se presentan localizadas en el mapa de suelos presentado en el Anexo A. Esta clasificación fue obtenida del documento Plan

de Manejo Ambiental Sistema Chingaza, elaborado por la firma Auditoría Ambiental Ltda.

Unidad		Asociación Campamento (CE)	
Altitud	**Relieve**	**Textura**	**Drenaje**
h > 3.500 msnm	Quebrado y escarpado con pendientes entre el 12 - 25%	Franco arcillosa a franco arcillo arenosa	Buen drenaje y erosión hídrica ligera
PROPIEDADES Químicas		**Material Parental**	**Uso**
Ácidos con alta CIC. Alto contenido en carbón orgánico. Saturación de aluminio alta.		Esquistos y cenizas volcánicas, sobre areniscas calcáreas Superficiales a moderadamente profundos	Cultivos de papa y ganadería. Presenta problemas de compactación de suelos por sobrepastoreo
Ubicación		**Clasificación**	**Profundidad**
Sector Noreste		Lithic Humitropept	33 cms.

Tabla 4. Unidades Agrológicas Asociación Campamento

Unidad		Asociación Diego Largo (DL)	
Altitud	**Relieve**	**Textura**	**Drenaje**
h > 3.000 m.s.n.m	Ondulado a fuertemente quebrado y escarpado, con pendientes entre el 7 y el 75%.	Franco Arenosa a Franco arcillo arenosa.	Bien a imperfectamente drenados con erosión hídrica ligera.
Propiedades Químicas		**Material Parental**	**Uso**
Suelos ácidos. Alta CIC. Bajos contenidos de bases. Alto contenido en Carbón orgánico y alta saturación en aluminio.		Cenizas volcánicas sobre arcilla y esquistos.	Bosques. También se presenta ganadería ocasionando conflictos por sobrepastoreo.
Ubicación		**Clasificación**	**Profundidad**
Porción Central		Typic Placandept	15 cms.

Tabla 5. Unidades Agrológicas Asociación Diego Largo

Unidad		Asociación Jabonera (JA)	
Altitud	**Relieve**	**Textura**	**Drenaje**
2650 a 2900 msnm	Ligeramente quebrado a escarpado, en cimas redondeadas y agudas con pendientes entre el 7 – 75%	Gruesa a medianamente gruesa.	Bien a excesivamente drenados.
Propiedades Químicas		**Material Parental**	**Uso**
Alta CIC. Carbón orgánico en superficie. Presentan reacción ácida. Presentan baja fertilidad propiciada por el exceso de aluminio.		Cenizas volcánicas sobre arcillas y areniscas.	Ganadería y cultivos con apropiadas medidas de manejo.
Ubicación		**Clasificación**	**Profundidad**
Porción Media oriental		Andic Humitropept	60 cms.

Tabla 6. Unidades Agrológicas Asociación Chochos

Unidad		Asociación Chochos (CO)	
Altitud	**Relieve**	**Textura**	**Drenaje**
2.300 a 3.000 m.s.n.m	Fuertemente quebrado a escarpado con pendientes entre 25 - 75%.	Franco - arenosa	Erosión hídrica laminar (movimientos en masa y pata de vaca) Bien drenados.
Propiedades Químicas		**Material Parental**	**Uso**
La saturación de aluminio > al 75%. Presentan reacción ácida. Alta CIC. Bajo contenido de bases y alto contenido de carbón orgánico.		Cenizas volcánicas depositadas sobre lutitas y arcillas.	Ganadería y agricultura con constantes medidas de manejo. El uso más recomendado corresponde a bosques.
Ubicación		**Clasificación**	**Profundidad**
Sector circundante del Embalse de Chuza		Entic Dystrandept	16 cms.

Tabla 7. Unidades Agrológicas Asociación Chochos

Unidad		Asociación Hatogrande (HG)	
Altitud	**Relieve**	**Textura**	**Drenaje**
2.000 a 3.000 m.s.n.m	Quebrado a fuertemente quebrado, con pendientes de 12-50%	Franco arcillo gravilloso	Bien a moderadamente bien drenados. Registran erosión hídrica de ligera a moderada.
PROPIEDADES QUÍMICAS		**MATERIAL PARENTAL**	**USO**
Reacción ácida. Alta CIC. Bajo contenido de bases. Alto contenido en carbón orgánico y alta saturación de aluminio.		Arcillas, cenizas alteradas, limolitas y areniscas.	Bosque. Los cultivos necesitan de medidas de manejo.
UBICACIÓN		**CLASIFICACIÓN**	**PROFUNDIDAD**
Sector Oriental Embalse de Chuza		Typic Troporthent	21 cms.

Tabla 8. Unidades Agrológicas Asociación Hatogrande

Unidad		Misceláneo Rocoso (MR)	
Altitud	**Relieve**	**Textura**	**Drenaje**
	Vertientes con pendientes superiores al 75%.		
Propiedades Químicas		**Material Parental**	**Uso**
		Areniscas y arcillolitas de formación Cretácica.	Uso limitado debido a la alta pedregosidad y condiciones extremas de relieve.
Ubicación		**Clasificación**	**Profundidad**
Sector suroeste embalse de Chuza.		-	-

Tabla 9. Unidades Agrológicas Misceláneo Rocoso

Unidad		Asociación San Pedro (Sp)	
Altitud	**Relieve**	**Textura**	**Drenaje**
1.000 a 1.800 msnsm.	Quebrado a fuertemente quebrado, con pendientes entre el 12 - 50%. En Vertiente estructural	Franco arcillosa a más gruesa.	Bien drenados, con erosión ligera a moderada.
Propiedades Químicas		**Material Parental**	**Uso**
Reacción ácida y baja saturación de bases. Baja fertilidad.		Lutitas silicea en arenisca cuarzosa	Potreros, cultivos de caña y algunos frutales.
Ubicación		**Clasificacion**	**Profundidad**
Sector El Calvario		Typic Troporthent	15 cms.

Tabla 10. Unidades Agrológicas Asociación San Pedro

Unidad		Asociación Represa (RE)	
Altitud	**Relieve**	**Textura**	**Drenaje**
h > 3.000 msnm.	Ligeramente quebrado a muy escarpado, con pendientes entre el 12 - 50%. En aglomerado estructural.	Franco arcillo arenosa.	Bien a excesivamente drenados. Erosión hídrica, laminar, ligera.
Propiedades Químicas		**Material Parental**	**Uso**
Reacción muy ácida a ácida, con altos contenidos de aluminio. Alta CIC. Medio contenido en bases totales.		Bloques, areniscas, cantos y gravas.	Bosque natural.
Ubicación		**Clasificacion**	**Profundidad**
Porción sur Laguna de Chingaza		Typic Humitropept	35 cms.

Tabla 11. Unidades Agrológicas Asociación Represa.

Para el caso de estudio se utilizaron 5 de los perfiles, realizados por el IGAC en el Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Cundinamarca (IGAC, 2000), que representan la mayor parte de los tipos de suelo presentes en la zona de estudio. A continuación se presentan las

características de cada uno de los perfiles asociados a los tipos de suelo presentes. Las cuales fueron obtenidas del estudio mencionado.

PERFIL No. CU – 149

Fecha: 28 - 08 – 81			
Taxonomía: Humic Dystrudepts			
Símbolo: MGFe			
Localización Geográfica:	**Departamento:** C/marca;	**Municipio:** Usme	
Sitio:500 metros debajo de la escuela de Santa Rosa, en la carretera a Nazareth			
Altitud: 3200 m			
Coordenadas Geográficas:	**Latitud** 4°11´36´	**Longitud** 74°11´20´	
Fotografía aérea: 102	**Vuelo**:C-2520	**Faja**: 12	**Plancha**: 265
Paisaje: Montaña	**Tipo de relieve**: Crestón		
Relieve: Ligeramente escarpado		**Pendiente**: 25%	
Material Parental:Roca clástica limoarcillosa			
Clima ambiental: Muy frío y muy húmedo			
Precipitación promedia anual: 700-1500 mm			
Temperatura promedia anual:10 °C.			
Clima edáfico:Isofrígido, údico			
Clase y grado de erosión:Hídrica laminar, ligera			
Drenajes:	**Interno:**medio,	**Externo:**rápido,	**Natural:**moderadamente bien drenado
Profundidad efectiva: Profunda			
Horizontes diagnósticos:Epipedón:úmbrico; Endopedón: cámbico			
Uso actual:Cultivo de papa y potrero con pasto kikuyo			
Limitantes del uso:Bajas temperaturas, fuertes vientos			
Vegetación natural:Mortiño, rabo de monte, chusque.			
Descrito por: H. Rodríguez y A. Parra.			

A

0-22 cm

Color en húmedo pardo grisáceo muy oscuro (10YR3/2), con regulares manchas de oxidación pequeñas, claras y contrastadas de color pardo rojizo y rojo amarillento (5YR5/4); textura franco arcillosa con 17% de gravilla; estructura en bloques subangulares mediana, moderada; consistencia en húmedo firme, en mojado pegajosa, plástica; regulares poros finos; abundantes raíces finas y medianas; regular actividad de macroorganismos; límite claro, plano; pH: 4.7.

Bw1

22-38 cm

Color en húmedo pardo grisáceo muy oscuro (10YR3/2), combinado con un 30% de pardo amarillento (10YR5/4); textura arcillosa con 21% de gravilla; estructura prismática mediana y gruesa, moderada; consistencia en húmedo firme, en mojado pegajosa, plástica; abundantes raíces finas, regulares medianas; regular actividad de macroorganismos; límite claro, plano; pH: 4.8.

Bw 2

38-60 cm

Color en húmedo gris oscuro (10YR4/1), con abundantes manchas litocrómicas, pequeñas, claras y contrastadas de color rojo amarillento (5YR5/8); textura arcillosa con 20% de gravilla; estructura prismática gruesa, moderada; consistencia en húmedo firme, en mojado muy pegajosa, muy plástica; abundantes poros finos; regulares raíces finas; poca actividad de macroorganismos; límite claro, plano; pH: 4.9.

BC

60-88 cm

Color en húmedo gris claro a gris (5Y6/1), con abundantes manchas litocrómicas, claras y contrastadas de color rojo amarillento (5YR5/8) y amarillo pardusco (10YR6/8); textura arcillosa; estructura prismática gruesa y débil, con tendencia a masiva; consistencia en húmedo muy firme, en mojado pegajosa, plástica; abundantes poros finos; regulares raíces finas; límite claro, plano; pH: 4.9.

C

88-150 cm

Color en húmedo gris a gris claro (5Y6/1) con abundantes manchas litocrómicas, claras y contrastadas de color amarillo pardusco (10YR6/8); textura arcillosa; sin estructura (masiva); consistencia en húmedo muy firme, en mojado pegajosa, plástica; pocos poros finos; pH: 5.0.

PERFIL No. CU – 132

Taxonomía: Typic Dystrocryepts		
Símbolo: MEFe		
Localización Geográfica:	**Departamento:** C/marca	**Municipio:** Usme
Sitio: Vereda Chisacá, páramo de Sumapaz, km 29.5, vía Usme-Nazareth, sitio Recebera.		
Altitud: 3740 m		
Coordenadas Geográficas:	**Latitud:** 4°17´36´	**Longitud:** 74°13´03´
Fotografía aérea: 79	**Vuelo:** C-2520	**Faja:** 11 **Plancha:** 246
Paisaje: Montaña	**Tipo de relieve:** Espinazo	
Relieve: Fuertemente quebrado	**Pendiente:** 35%	
Material parental: Roca clástica arenosa		
Clima ambiental: Extremadamente frío y húmedo.		
Precipitación promedia anual: 500 – 1000 mm		
Temperatura promedia anual: 6°C		
Clima edáfico: Críico, údico.		
Clase y grado de erosión: Hídrica laminar, ligera.		
Drenajes:	**Interno:** rápido,	**Externo:** rápido, **Natural:** bien drenado
Profundidad efectiva: Superficial;		**Limitada por:** Fragmentos de roca
Horizontes diagnósticos: Epipedón: úmbrico		
Uso actual: Sin uso agropecuario		
Limitantes del uso: Fuertes pendientes y bajas temperaturas		
Vegetación natural: Frailejón, chilca, romero, chusque, grama, winche, cortadera, colorado.		
Descrito por: H. Perdomo.		

A

00 – 36 cm

Color en húmedo negro (7.5YR2/0); textura franco arenosa; estructura en bloques subangulares, media y débil; consistencia en húmedo muy friable, en mojado no pegajosa y no plástica; pocos poros gruesos; abundante actividad de macroorganismos; abundantes raíces finas y medias; límite abrupto y ondulado; pH: 4.5.

AC

36 – 64 cm

Color en húmedo 60% negro (10YR2/1), 30% pardo grisáceo (10YR4/2) y 10% pardo amarillento (10YR5/4); textura arenosa franca con 68% de gravilla; sin estructura (suelta); consistencia en húmedo friable, en mojado no pegajosa y no plástica; pocos poros gruesos y medios; regular actividad de macroorganismos; regulares raíces medias; límite gradual y ondulado; pH: 4.8.

C

64 – 120 cm

Color en húmedo pardo amarillento (10YR5/4); textura franco arenosa con aproximadamente 30% de gravilla; pH: 4.9.

PERFIL AC-73

Fecha: 28-10-99.			
Taxonomía: Typic Hapludands			
Símbolo: MGIf.			
Localización Geográfica:	**Departamento:** C/marca.	**Municipio:** Fómeque.	
Sitio: Aproximadamente a 700 m. de la laguna de Chingaza, vía al retén.			
Altitud: 3255 m.			
Fotografía aérea: 96	**Vuelo:**C-2523	**Faja:** 19 **Plancha**: 247	
Paisaje: Montaña	**Tipo de relieve:** Viga		
Relieve: Moderadamente escarpado		**Pendiente:** 50 %.	
Material Parental: Ceniza volcánica			
Clima ambiental: Muy frío muy húmedo			
Precipitación promedia anual: 1400 mm			
Temperatura promedia anual:10°C			
Clima edáfico: Isofrígido, údico.			
Movimientos en masa: Deslizamientos localizados.			
Drenajes:	**Interno:** medio,	**Externo:** rápido,	**Natural:** bien drenado.
Profundidad efectiva: Profunda.			
Horizontes diagnósticos: Epipedón: úmbrico; Endopedón: cámbico			
Uso actual: Sin uso agropecuario (Parque Natural)			
Limitantes del uso: Fuertes pendientes, bajas temperaturas			
Vegetación natural: Frailejón y grama.			
Descrito por: C. Castro y E. Ávila.			

A

00 – 22 cm

Color en húmedo negro (10 YR 2/1); textura arcillo limosa; estructura granular, fina y media, moderada; consistencia en húmedo muy friable, en mojado no pegajosa, no plástica; muchos poros finos y medianos; muchas raíces finas y medias y frecuentes raíces muy finas; frecuente actividad de macroorganismos (chiza); fuerte reacción al H2O2; límite difuso e irregular; pH: 4.3.

A2

22 – 37 cm

Color en húmedo gris muy oscuro (10 YR 3/1); textura arcillo limosa; estructura en bloques subangulares, media y gruesa, débil a moderada; consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente pegajosa, ligeramente plástica;

frecuentes poros medianos; frecuentes raíces muy finas y finas y pocas medias y gruesas; frecuente actividad de macroorganismos (chiza); fuerte reacción al NaF y al H2O2; límite claro y plano; pH: 4.7.

Bw

37 – 62 cm

Color en húmedo pardo oliva (2.5 Y 4/3); chorreaduras de materia orgánica pardo grisáceo muy oscuro (2.5 Y 3/2); textura arcillo limosa; estructura en bloques subangulares, media y gruesa, débil a moderada; consistencia en húmedo friable, en mojado pegajosa y plástica; frecuentes (45%) recubrimientos de materia orgánica; muchos poros finos y medianos; frecuentes raíces muy finas y finas y pocas medias; poca actividad de macroorganismos; fuerte reacción al NaF y ligera al H2O2; límite gradual y plano; pH: 5.2.

C1

62 – 73 cm

Color en húmedo oliva pálido (5 Y 6/4); concreciones de hierro y aluminio rojo amarillento (5 YR 5/6); textura arcillo limosa; estructura en bloques subangulares, gruesa, débil; consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente pegajosa y plástica; frecuentes concreciones (40%) de aluminio y hierro, medias, blandas, de distribución irregular; frecuentes poros finos y medianos; fuerte reacción al NaF; límite difuso e irregular; pH: 5.8.

C2

73 – 130 cm

Color en húmedo oliva (5 Y 5/4); moteados color amarillo rojizo (7.5 YR 6/6), frecuentes (10%), pequeños, claros; textura arcillo limosa; consistencia en húmedo friable, en mojado pegajosa y plástica; pocos poros gruesos; fuerte reacción al NaF; pH: 5.8.

PERFIL CC – 340

Fecha: 04-10-78			
Taxonomía: Hydric Haplohemists			
Símbolo: MGT			
Localización Geográfica:	**Departamento:** C/marca;	**Municipio:** Fómeque	
Sitio: Vereda Cabeceras de Quebradablanca, kilómetro 32 carretera Fómeque - Chingaza			
Altitud: 3260 m			
Coordenadas Geográficas:	**Latitud** 4°31´58´	**Longitud** 73°46´18´	
Fotografía aérea: 96	**Vuelo**:C-2523	**Faja**: 19	**Plancha:** 247
Paisaje: Montaña	**Tipo de relieve**: Vallecito		
Relieve: Ligeramente plano	**Pendiente**: 2%		
Material Parental: Depósito orgánico			
Clima ambiental: Muy frío muy húmedo			
Precipitación promedia anual: 1000-2000 mm			
Temperatura promedia anual: 10 °C.			
Clima edáfico: Isofrígido, údico			
Drenajes:	**Interno:**medio,	**Externo:**muy lento,	**Natural:** muy pobremente drenado
Nivel freático: Muy superficial			
Profundidad efectiva: Muy superficial		**Limitada por:** Nivel freático	
Horizontes diagnósticos: Epipedón: hístico			
Uso actual: Sin uso agropecuario			
Limitantes del uso: Bajas temperaturas e hidromorfismo			
Vegetación natural: Cardón, pajonales y musgos.			
Descrito por: A. Parra.			

Oe

00 – 60 cm

Color en mojado negro (10YR 2/1), orgánico; regulares raíces finas; límite gradual y plano; pH: 4.9.

2A

60 – 90 cm

Color en húmedo negro a gris muy oscuro (5Y 2.5/1), con inclusiones pardo fuertes (7.5YR5/6); textura franco arcillo arenosa; pocas raíces finas; pH: 4.9.

6. CARACTERIZACIÓN DE LOS TIPOS DE COBERTURA VEGETAL

A continuación se presenta la descripción de la cobertura vegetal encontrada en el área de estudio, esto con el fin de generar una línea base del uso del suelo, para así poder crear diferentes escenarios de cobertura vegetal que permitan predecir el comportamiento del sistema ante situaciones cambiantes.
Según la clasificación realizada por la firma Auditoría Ambiental Ltda, (A.A, 2003) se pueden distinguir dos tipos de unidades: áreas con cobertura vegetal y áreas sin uso agropecuario o forestal; cada unidad se clasifica por clases y tipos; las clases se diferencian por su naturaleza y por su apariencia exterior, es decir, por características fisionómicas, las cuales se desarrollan gracias a un ambiente particular, y los tipos se identifican por cualidades o atributos que les son propios; se incluye el uso predominante que se les da a estos últimos y finalmente se registra el símbolo y el color que los identifica en el mapa presentado en el Anexo A.

6.1. Bosque natural

- Descripción general y fisionomía

Este tipo de cobertura comprende las masas de vegetación distribuidas en diversos estratos (arbóreo, arbustivo, herbáceo y epífitas) que crecen y evolucionan espontáneamente, sin intervención directa del hombre y cuyas características y composición florística obedecen a las condiciones ecológicas propias de la región.

En general, la fisionomía de los bosques es densa y estratificada; el estrato arbóreo dominante puede alcanzar alturas entre 15 y 20 m. El estrato subarbóreo se encuentra representado por individuos con alturas entre 5 y 10 m., siendo característica la presencia de helechos arborescentes. Es de anotar que la altura de los individuos decrece conforme aumenta la altura sobre el nivel del mar.

El estrato arbustivo es poco denso y cuenta con individuos cuya altura no supera los 5 m, en algunos casos se convierte en un estrato graminoide alto, cuyo representante principal es el chusque. Finalmente se encuentra un estrato herbáceo y muscinal, con hierbas de diferentes especies, bromelias y orquídeas, plántulas de las especies leñosas del bosque y numerosos musgos, hepáticas, líquenes y hongos. (Salamanca, 1984). Como características adicionales del Bosque Natural se tiene que la capa de hojarasca es por lo general gruesa y las copas de los árboles son frecuentemente globosas y más o menos compactas o en forma de cono invertido y con largas ramificaciones divergentes como en los encenillos, según Sánchez *et al*, citados por el Ministerio el Medio Ambiente (1998). El tamaño de las hojas del estrato arbóreo es predominantemente micrófilas y nanófilas.

- Composición florística

Desde el punto de vista florístico, se observa una selección de especies tolerantes o adaptadas a las temperaturas bajas, lo que ha conllevado a la formación de bosques más o menos homogéneos, dominados por una o por algunas pocas especies, como es el caso de los bosques de encenillo (*Weinmannia tomentosa, Weinmannia balbisiana)* y los bosques de coloradito (*Polylepis cuadrijuga*),. Otras especies arbóreas frecuentes en estos bosques son: manzano (*Clethra fimbriata*), arrayán (*Myrcianthes sp.*), salvio (*Buddleja americana*), tunos (*Miconia spp.*, *Axinanea macrophylla*), cucharo (*Geissanthus andinus*), tagua (*Gaiadendron punctatum*), palma boba (*Cyathea sp.*), colorado (*Polylepis quadrijuga*), sietecueros (*Tibouchina lepidota),* mulato *(Ilex sp.),* cucharo (*Myrsine sp.*), zapato *(Symplocos sp.),* cedrillo (*Brunellia cf. colombiana sp.),* gaque (*Clusia sp.),* duraznillo *(Abatia parviflora),* trompo *(Ternstroemia meridionalis),* mano de oso (*Oreopanax bogotense)* y ají de páramo *(Drymis granadensis),* entre otras. (Betaestudio, 2000)

6.2. Bosque Plantado

Corresponde a las plantaciones forestales de especies introducidas, en la mayoría de los casos el propósito de las plantaciones mencionadas es la explotación maderera, aunque también cumplen con la función de preservar las cuencas. El bosque plantado está caracterizado por individuos de gran altura y

campos monopolizados por una o muy pocas especies. Para la zona de interés en el presente estudio no se cuenta con este tipo de cobertura vegetal

- Composición

Entre las especies utilizadas en el medio se encuentran, el pino (*Pinus patula, Pinus radiata*), ciprés (*Cupressus sp.*), eucalipto común (*Eucalyptus globulus*) y acacias (*Acacia melanoxylon, Acacia decurrens*)

6.3. Arbustal Alto

- Descripción general y fisionomía

En general se clasifica como arbustal bajo las zonas en las que la vegetación está representada por un estrato arbóreo con una altitud no superior a los 5 m y un estrato arbustivo y herbáceo entremezclado. La estructura horizontal es bastante densa y en ocasiones conforman marañas casi impenetrables.

Es común encontrar arbustales bajos en zonas donde la tala y la explotación maderera ha desplazado los ecosistemas boscosos y en zonas que sirvieron para la explotación agraria y pecuaria en épocas pasadas, que se han regenerado por si solas.

Según Salamanca (1984) citado por Auditoría Ambiental, (2003), los arbustales altos o bosques paramunos son de aspecto achaparrado y el interior con frecuencia es de difícil acceso por la profusión de ramas en el tronco bajo de los arbolitos; además, el suelo presenta tapices densos de briófitos. Estos parches dispersos de bosques alternan con la vegetación de páramo, generalmente en abrigos rocosos a lo largo de los cursos de ríos y quebradas.

- Composición florística

Las principales especies que se encuentran en este tipo de cobertura vegetal son: romero (*Diplostephium sp.*), laurel de cera (*Myrica pubescens*), laurel hojipequeño (*Myrica parvifolia*), uva camarona (*Macleania rupestris*), arrayán (*Myrcianthes leucoxyla*), cucharo (*Myrsine sp.*), tunos (*Miconia spp.*), encenillo (*Weinmannia spp.*), garrocho (*Viburnum tinoides*), mortiño (*Hesperomeles spp.*), charne (*Bucquetia glutinosa*), uñegato (*Berberis sp.*), rodamonte (*Escallonia myrtilloides*), amargoso (*Ageratina sp.*), raque (*Vallea stipularis*), uvo (*Disterigma sp.*), chusque (*Chusquea spp.*), cocua (*Verbesina elegans*), jarilla (*Stevia lucida*), doradilla (*Tibouchina grossa*), angelito (*Monochaetum*

myrtoideum), pegamosco (*Befaria resinosa*) y cucubo (*Solanum sp.*), entre otras. El estrato de arbolitos está conformado por amargoso (*Ageratina tinifolia)* y chilco (*Baccharis prunnifolia)* que alcanzan 4 m. de altura; las coberturas varían entre 60 y 80%. Inmediatamente por debajo de este se encuentran pequeños arbustos de chite (*Hypericum spp.),* reventadera (*Pernettya prostrata)* y ocasionalmente se registra rodamonte (*Escallonia myrtilloides).* El estrato herbáceo varía según las condiciones de humedad del suelo, así: en sectores encharcados dominan las cortaderas (*Carex jamesonii* y *Carex bonplandii)* acompañados por cardón (*Greigia collina*); en los sectores secos y con cantos rodados dominan las gramíneas pasto poa (*Triniochloa stipioides, Holcus lanatus)* y pasto de olor (*Anthoxanthum odoratum).* En el estrato rasante son abundantes y forman densos tapetes la plegadera (*Lachemilla cf. Orbiculata),* sombrilla de agua *(Hydrocotyle bonplandii)* y *Sibthorpia repens*. (Betaestudio, 2000)

Los arbustales altos están distribuidos en el área de estudio en pequeños parches y en especial en el valle del río la playa.

6.4. Arbustal Bajo

- Descripción general y fisionomía

Este tipo de cobertura comprende las masas de vegetación poco estratificadas donde predomina el componente arbustivo, con individuos que no superan los 3 m. de altura. Se caracteriza por ser bastante denso, cerrado y con las ramas entrelazadas, además, hay abundante presencia de especies herbáceas.

Tal como en los arbustales altos, el arbustal bajo se encuentra en zonas donde se realizaron actividades agrarias y pecuarias en épocas anteriores o en zonas que hayan sufrido derrumbes o incendios, generando así las condiciones propicias para la aparición de especies pioneras que constituyen la fase inicial de las sucesiones vegetales.

- Composición florística

Los matorrales son muy variados y la mayoría de unidades están conectadas con procesos de disturbio, siendo muy comunes: amarguero blanco (*Eupatorium angustifolium),* chites (*Hypericum goyanesii, Hypericum laricifolium* e *Hypericum myriicarifolium*), romeros (*Diplostephium phylicoides, Pentacalia vacciniodes, Pentacalia abietina* y *Pentacalia pulchella*), pinito de flor (*Aragoa*

abietina), sanalotodo (*Baccharis tricuneata*), chusque (*Chusquea spp.*), helecho (*Pteridium sp.*), chilco (*Baccharis prunifolia*), árnica (*Senecio pulchellus),* cordoncillo (*Piper lacunosum),* uva de anís (*Cavendishia cordifolia),* uva camarona (*Macleania rupestris*), mora silvestre *(Rubus sp.),* salvio negro (*Cordia lanata*), angelito (*Monochaetum myrtoideum),* garrocho (*Viburnum tinoides),* sangretoro (*Castilleja fiscifolia*), amargosos (*Ageratina vaccinifolia, Ageratina tinifolia*), tinto (*Monnina sp.*), sedo (*Gynoxis trianae*), cachitos (*Halenia sp.*), uñegato (*Berberis goudotii*), totiadera (*Gaultheria sclerophylla*), choroticas (*Vaccinium sp.*), y choritas (*Thibaudia floribunda*) y piojito (*Arcytophyllum sp.*). (Betaestudio, 2000)

En el área de estudio los arbustales bajos están distribuidos, en los alrededores de la laguna de Chingaza y en el valle del río La Playa.

6.5. Pastizales

- Descripción general y fisionomía

Este tipo de cobertura se caracteriza por estar conformada por especies herbáceas que por lo general no superan los 30 cm. de altura, aunque algunos pastos pueden alcanzar hasta 50 o 60 cm. de altura en terrenos que carecen de manejo. Las especies pertenecen básicamente a la familia Poaceae. Como es lógico suponerlo, la diversidad biótica es mínima. Los pastizales se encuentran generalmente en zonas donde se llevan a cabo actividades de ganadería.

- Composición florística

Las principales especies de pastos son el kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), pasto de olor (*Anthoxanthum odoratum)*, pasto raygrass (*Lolium sp.*), falso poa (*Holcus lanatus*); otras especies herbáceas y rastreras son: carretón blanco (*Trifolium repens*), carretón rojo (*Trifolium pratense*), diente de león (*Taraxacum officinale*), chicoria (*Acaena elongata*), lengüevaca (*Rumex obtusifolia*), digital (*Digitalis purpurea*) y helecho (*Pteridium sp.*), entre otras. (Betaestudio, 2000)

En el área de estudio se encuentran muy pocas zonas con pastizales.

6.6. Pastos Arbolados

Corresponden a una unidad de pastos con árboles dispersos o algo agrupados. La caracterización de la unidad de pastos es similar a la expresada

anteriormente. Entre las especies arbóreas se destacan encenillo (*Weinmannia spp.*), ajicillo (*Drymis granadensis*), garrocho (*Viburnum tinoides*) y arrayán (*Myrcianthes rhopaloides*), entre otras; además hay especies foráneas como eucalipto (*Eucalyptus globulus*), pinos (*Pinus spp.*), acacias (*Acacia spp.*) y ciprés (*Cupressus sp.*), que han sido plantados principalmente en los linderos de los predios formando cercas vivas. (Betaestudio, 2000)

6.7. Pastizal / Arbustal

El Pastizal / Arbustal está relacionado con las formaciones vegetales que cuentan con pastizales y arbustales altos y/o arbustales bajos, que en general han sido desarrollados en forma natural o como resultado del escaso manejo o abandono de áreas agropecuarias.

6.8. Pastos / Cultivos

Son zonas dedicadas a actividades de agricultura y ganadería, con presencia de pastos y cultivos. Las áreas agrícolas corresponden a cultivos tradicionales tales como papa, maíz, arveja, cebada y hortalizas. Para optimizar la producción de la actividad agrícola la gente de la región enriquece el suelo con fertilizantes químicos, los cuales cambian las propiedades químicas del suelo y afectan la calidad del agua, de igual forma una vez cosechado el cultivo en cuestión es necesario adicionar cal al suelo con el fin de corregir la acidez del suelo y fertilizar orgánica y químicamente el terreno.

6.9. Prado Paramuno

Se llama prado paramuno a los prados utilizados al levantamiento extensivo de la ganadería, en este caso la vegetación nativa del subpáramo y páramo ha sido degradada por la colonización y en su lugar aparecen los prados dedicados a la ganadería.

- Composición Florística:

En el prado paramuno se desarrollan los siguientes taxa: *Muehlenbergia fastigiata, Agrostis breviculmis, Lachemilla orbiculata, Acaena cylinsdristachya*, y *Orthrosanthus chimboracensis*. La fisionomía de estos prados está determinada en gran parte por la presencia de pequeñas plantas arrosetadas, generalmente lignificadas de la familia Rosaceae. (Betaestudio, 2000)

En el área de estudio la unidad de prado paramuno está principalmente en el sur de la laguna de Chingaza, y en la zona de ronda del río La Playa.

6.10. Vegetación Baja de Páramo

- Descripción general y fisionomía

Se determina como vegetación baja de páramo las zonas con vegetación abierta, caracterizada por la presencia de pajonales, frailejonales, arbustos enanos y plantas arrosetadas.

- Composición florística y distribución

En cuanto a las especies que alcanzan mayor cubrimiento en los páramos húmedos se mencionan las siguientes: *Chusquea tessellata, Calamagrostis effusa, Rhynchospora macrochaeta, Espeletia grandiflora, Pernettya prostrata, Paepalanthus karstenii, Aragoa abietina, Arcytophyllum muticum, Puya santosii, Hypericum goyanesii, Halenia asclepiadea, Orithrophium peruvianum, Gentianella corymbosa* y *Bartsia santolinifolia*. (Vargas, 2002)

De igual forma para el páramo de Chingaza se presentan las siguientes comunidades: Comunidad de *Espeletia grandiflora y Calamagrostis effusa*; Comunidad de *Calamagrostis effusa y Arcytophyllum nitidum*; Comunidad de *Espeletia argentea y Pernettya prostrata*; Comunidad de *Hypericum strictum y Espeletia argentea*; comunidad de *Carex bonplandii y Agrostis sp.*; Comunidad de *Hypericum strictum*; comunidad de *Escallonia myrtilloides*; comunidad de *Hypericum juniperum*; comunidad de *Espeletia argentea y Hypericum sp.*; comunidad de *Lachemilla orbiculata* y *Breutellia cf. allionii*; comunidad de *Gaultheria hapalotrichia e Hypericum cf. juniperum*; comunidad de *Carex pichinchiensis y Carex bonplandii*; comunidad de *Acaena cylindristachya e Hypericum cf. lancioides*; comunidad de *Paepalanthus columbiensis y Puya trianae*; comunidad de *Valeriana hirta y Puya trianae*; comunidad de *Calamagrostis effusa y Arcytophyllum nitidum* y comunidad de *Chusquea tessellata* (Betaestudio, 2000) .

6.11. Misceláneos

Según el estudio de elaborado por Betaestudio, 2000, se generó una clasificación correspondiente a diversos tipos de cobertura vegetal en una misma zona, razón por la cual no pueden ser separados cartográficamente.

Los tipos de vegetación clasificados en esta unidad son: pastos, cultivos, pastos arbolados, pastizal/ arbustal y arbustales.

Para el estudio particular, es fácil identificar las clase de cobertura por lo que no se utiliza la clasificación de misceláneos.

6.12. Tierras Erosionadas

Corresponden a zonas carentes de cobertura vegetal y de suelo orgánico, debido a la explotación minera o a eventos de fallas geotécnicas.

6.13. Afloramientos Rocosos

Son áreas en las que afloran los estratos rocosos del subsuelo, en general debido a condiciones geomorfológicas naturales.

7. DESARROLLO DEL MODELO

7. 1. Descripción General del Modelo

Para llevar a cabo el desarrollo del presente trabajo fue utilizado un modelo ya desarrollado, por el Servicio de Investigación Agrícola del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés), creado con el fin de predecir la afectación del recurso hídrico, la producción de sedimentos y diferentes reacciones de carácter químico, como función de las diferentes practicas de uso del suelo que se puedan presentar en una cuenca dada. El modelo SWAT por sus siglas en inglés (Soil and Water Assesment Tool), cuenta con características importantes, que lo hicieron útil para el desarrollo del presente proyecto, las cuales se mencionan a continuación (SWAT2000THEORY).

Es Físicamente Basado: El modelo no genera regresiones para encontrar las relaciones entre las entradas y las salidas, éste en cambio, requiere como datos de entrada todas las características de la cuenca, del suelo, del clima, del tipo de vegetación y de las prácticas de cultivo, con el fin de realizar la modelación directa de los procesos físicos asociados con el movimiento del agua y los sedimentos, el crecimiento de las plantas y la dinámica de los nutrientes, entre otros.

Es Eficiente Computacionalmente: Es capaz de modelar grandes cuencas, durante largos períodos de tiempo, en un computador personal y de una manera rápida

Es Capaz de Analizar Impactos a Largo Plazo: El modelo puede llevar a cabo simulaciones para períodos futuros extensos, de los cuales no se tiene información climatológica, gracias a los generadores de clima sintéticos y

aun así sigue siendo consistente en sus parámetros de salida. Es de aclarar que el modelo no pretende simular eventos instantáneos, por lo que no se deben esperar buenos ajustes para períodos inferiores a un mes.

Para efectos de modelación, el modelo SWAT divide una cuenca en varias subcuencas, lo cual es útil al momento de asignar el tipo de suelo o de cobertura vegetal, en una cuenca dada. La información de entrada que se suministra al modelo es organizada en una de las siguientes categorías: clima, unidades de respuesta hidrológica (HRU), reservorios, humedales y canal principal. Sin importar el proceso que este modelando al interior de la cuenca el programa, SWAT se basa, para todos sus cálculos en la ecuación de balance hídrico, para predecir de una forma precisa el movimiento de pesticidas, sedimentos y nutrientes. Con respecto al movimiento del agua, se pueden generar dos divisiones principales; la primera se refiere a la fase terrestre del ciclo hidrológico definida por todos los procesos que se presentan en cada una de las subcuencas. La segunda fase hace referencia a los procesos presentes en la red de canales que se dirigen hacia el punto de salida de la cuenca.

A continuación se presenta la ecuación en la cual se basa el modelo, para llevar a cabo el balance hídrico de la fase terrestre, de igual forma se presenta de manera esquemática los diferentes procesos del ciclo hidrológico para esta fase.

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=1}^{t} (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

Donde,

SW_t: Contenido final de agua en el suelo

SW_o: Contenido inicial de agua en el suelo

R_{day}: Precipitación en el día i

Q_{surf}: Flujo superficial en el día i

W_{seep}: Percolación en el día i

Q_{gw}: Recarga del acuífero en el día i

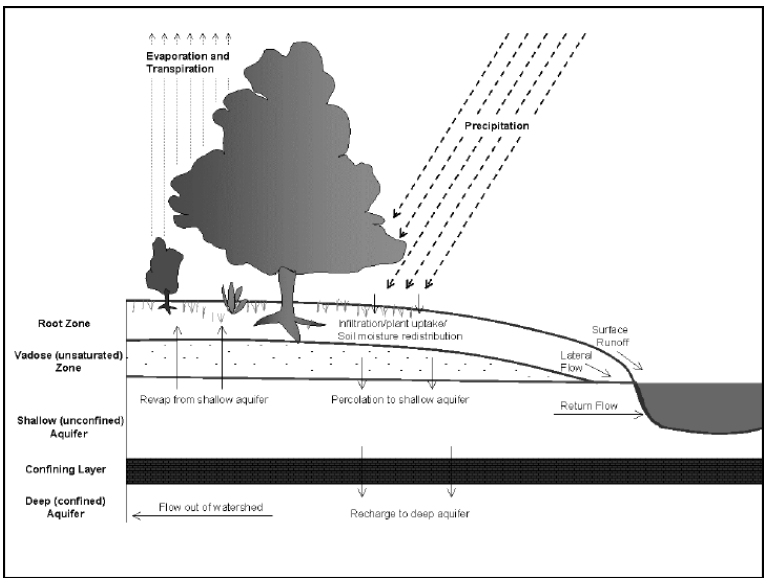


Figura 13. Procesos Ciclo Hidrológico _ Fase Terrestre

(Tomada de SWAT2000 THEORY)

Para llevar a cabo este proyecto se utilizó la versión SWAT2000, la cual cuenta con una interfaz gráfica que utiliza el programa ARCVIEW GIS 3.2 y adicionalmente puede generar variables de clima, tales como, radiación solar, humedad relativa, velocidad del viento y evapotranspiracion potencial a partir de rangos introducidos por el usuario.

A continuación se presenta un esquema del funcionamiento de SWAT2000 en el cual se identifican las herramientas con las que cuenta el modelo y los 8 grupos en los que se clasifican

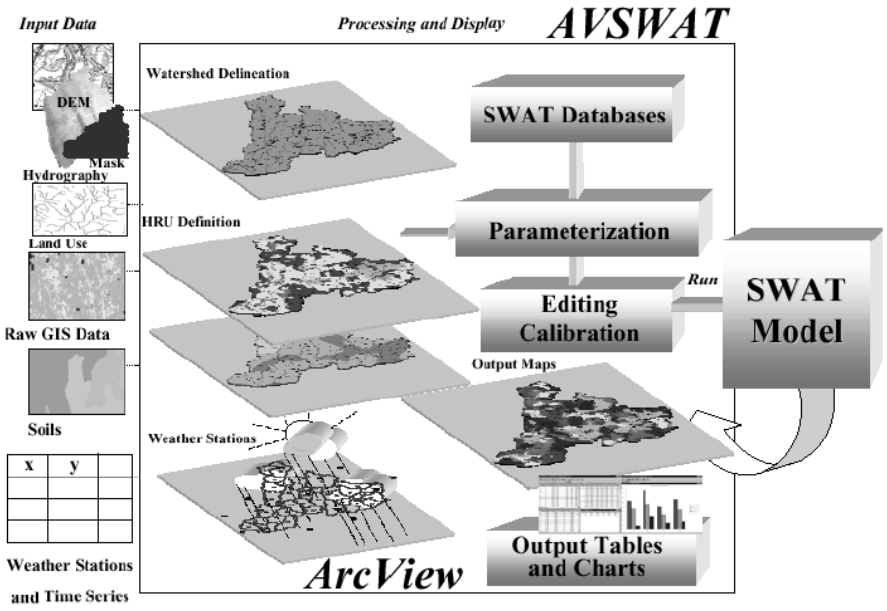


Figura 14. Esquema de Funcionamiento SWAT 2000

1. Definición de cuencas
2. Definición de HRU's
3. Definición de estaciones Climatológicas
4. Bases de datos AVSWAT
5. Parámetros de entrada y administración de escenarios
6. Ejecución del modelo
7. Lectura y presentación de resultados
8. Herramientas de calibración.

7. 2. Entradas del Modelo Descrito para Llevar a Cabo la Implementación en la Cuenca de Estudio.

Una vez entendido el funcionamiento básico del modelo se presenta la forma como fueron realizadas todas las entradas para llevar a cabo la simulación de la cuenca alta del río guatiquía, cuenca descrita anteriormente.

7.2.1. Generación del Modelo Digital de Terreno (DEM)

A partir de los archivos con extensión .adf se generó el DEM con una resolución de 30 m, es decir que por cada cuadrado de 30 m de lado del terreno natural, se toma la altura promedio y ese es el valor que se introduce

en el modelo digital para toda el área en cuestión. Para este caso en especial y teniendo en cuenta que el DEM generado arrojó una precisión buena para el objeto de la investigación, se generaron las líneas de escorrentía automáticamente y no fueron cargadas desde archivo, tal como ofrece la posibilidad el softw are trabajado

7.2.2. Preprocesamiento del DEM

Una vez cargado el DEM se procede a realizar una depuración del mismo con el fin de eliminar los sumideros o aquellos sitios puntuales que no drenan a una de las celdas adyacentes. De igual forma se indica que aquellas celdas ubicadas en los extremos de la cuenca deben drenar hacia fuera de la misma con el fin de representar la realidad de una manera más precisa y no mayorar los caudales que drenan hacia la cuenca en cuestión.

7.2.3. Definición de las líneas de escorrentía

Como se mencionó anteriormente SWAT tiene la posibilidad de generar las líneas que definen los cauces, opción que se utilizó en el presente proyecto, dada la complejidad de la red que se tenía en los planos existentes. Para esto el área que se tomó para definir los cauces fue la menor posible, según las opciones arrojadas por el programa correspondiente a 135 Ha, lo cual llevó a generar para la cuenca en estudio 134 celdas en total. A continuación se muestra las redes de drenaje, para la cuenca en estudio, creada (color rojo) y la real (color azul) extraída de un plano del Sistema Chingaza.

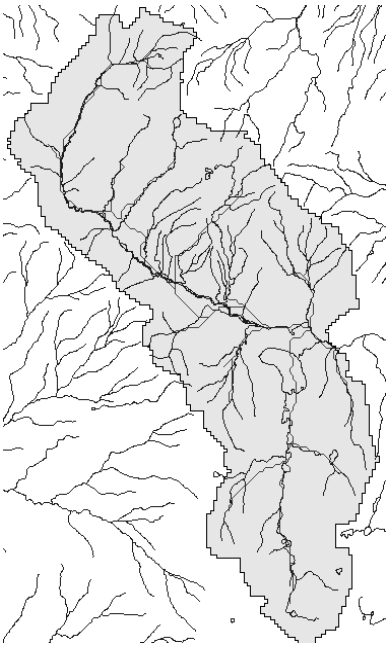


Figura 15. Red de Drenaje Real y Simulada por SWAT

7.2.4. Definición de Entradas y Salidas.

Las entradas se establecen, en la eventualidad de que haya una porción de la cuenca que no va a ser modelada y se conozca el caudal que entrega dicha porción, este caso no se presenta en el estudio, por lo que no fue necesario definir alguna entrada. La definición de la salida marca el punto final de la red de drenaje a estudiar, es decir la cuenca de interés. Con el fin de poder ver el ajuste del modelo se hace coincidir este punto de salida con la ubicación de una estación de caudales conocida, para este caso la estación limnigráfica de San José.

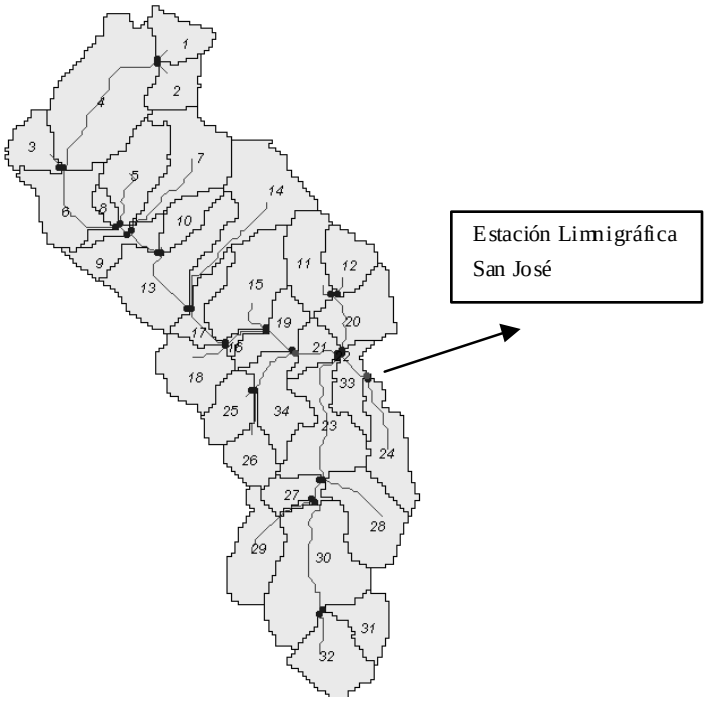


Figura 16. Estación Salida de la Cuenca

7.2.5. Definición de Reservorios.

SWAT permite crear reservorios en el área de estudio; si bien la cuenca escogida cuenta con un reservorio, La Laguna Chingaza, no fue introducida al modelo puesto que se carece de la información mínima, necesaria para alimentar las entradas solicitadas por el programa.

Una vez concluidos los pasos descritos de la implementación del modelo se obtiene la definición de las subcuencas de drenaje, con el fin de continuar con el modelamiento; a continuación se presenta el esquema de las subcuencas generadas para el área de estudio, la cual comprende una extensión de 9255ha.

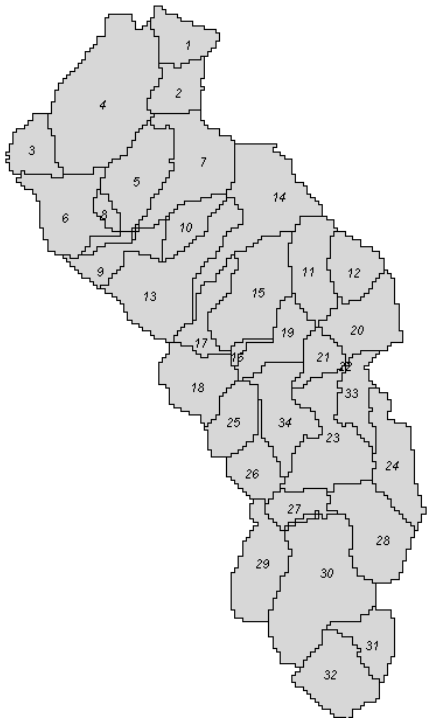


Figura 17. Delimitación de Subcuencas

SUBCUENCA	AREA(Ha)	%
1	171	1.85%
2	161	1.74%
3	164	1.77%
4	828	8.95%
5	318	3.44%
6	335	3.62%
7	404	4.37%
8	82	0.89%
9	171	1.85%
10	144	1.56%
11	267	2.88%
12	189	2.04%
13	510	5.51%
14	494	5.34%
15	422	4.56%
16	24	0.26%
17	156	1.69%

SUBCUENCA	AREA(Ha)	%
18	281	3.04%
19	199	2.15%
20	284	3.07%
21	117	1.26%
22	1	0.01%
23	419	4.53%
24	289	3.12%
25	196	2.12%
26	179	1.93%
27	123	1.33%
28	368	3.98%
29	327	3.53%
30	686	7.41%
31	175	1.89%
32	314	3.39%
33	166	1.79%
34	291	3.14%
TOTAL	4840	52.30%

Tabla 12. Areas de las Subuencas Generadas

7.2.6. Definición de los tipos de suelo.

El primer paso para generar la entrada de los tipos de suelo al modelo es cargar un archivo con extensión .shp, el cual contiene las polilíneas que delimitan cada uno de los tipos de suelo presentes en la zona de estudio. Para el presente proyecto se generó el archivo mencionado a partir de la plancha del Agustin Codazzi No. 247 del Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Cundinamarca (IGAC, 2000), cuya zona de interés se muestra a continuación.

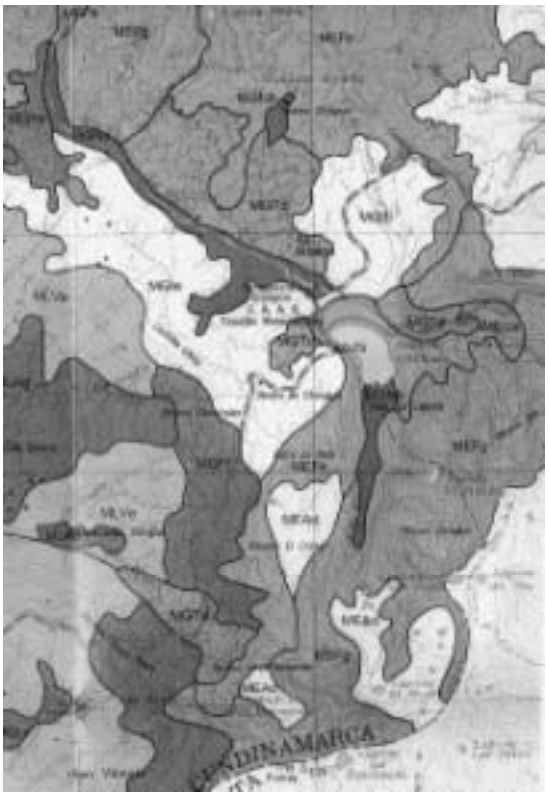


Figura 18. Clasificación de Suelos, Zona de Estudio (IGAC,2000)

Para efectos del modelo, se tomaron las 5 clases de suelo que presentaban un mayor porcentaje en la cuenca alta del río Guatiquía, para cada una de ellas se obtuvieron todos los parámetros requeridos por SWAT, dando especial interés a aquellos involucrados en el proceso lluvia escorrentías y concentrándose un poco menos en los parámetros relacionados con la calidad del agua y los fenómenos químicos al no ser el objeto de este trabajo de investigación el modelar los contaminantes. Los tipos de suelo de mayor importancia en la cuenca fueron: MEF, MGI, MGT y MGF. Para llevar a cabo el cálculo de los

valores de cada uno de los parámetros se siguió principalmente la metodología expuesta por Navarrete (2004), la cual se expone a continuación.

1. TITLE/TEXT: Es un campo reservado para los comentarios que quiera dar el usuario sobre el tipo de suelo definido
2. SNAM: Es el nombre del suelo introducido por el usuario.
3. HYDRGP: Grupo hidrológico, según la siguiente descripción:

A (Bajo potencial de escorrentía):

Suelos que tienen alta tasa de infiltración aún cuando estén húmedos. Consisten de arenas o gravas profundas bien a excesivamente drenados. Estos suelos tienen una alta tasa de transmisión de agua.

B(Moderadamente bajo potencial de escorrentía):

Suelos con tasa de infiltración moderada cuando están muy húmedos. Suelos moderadamente profundos a profundos, moderadamente bien drenados a bien drenados, suelos con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas, y permeabilidad moderadamente lenta a moderadamente rápida. Son suelos con tasas de transmisión de agua moderadas.

C (Moderadamente alto potencial de escorrentía):

Suelos con infiltración lenta cuando están muy húmedos. Consisten de suelos con un estrato que impide el movimiento del agua hacia abajo; suelos de textura moderadamente finas a finas; suelos con infiltración lenta debido a sales o alkali, o suelos con niveles freáticos moderados. Estos suelos pueden ser pobremente drenados o bien a moderadamente bien drenados, con estratos de permeabilidad lenta a muy lenta a poca profundidad (50-100cm).

D (Alto potencial de escorrentía):

Suelos con infiltración muy lenta cuando están húmedos. Consisten de suelos arcillosos con alto potencial de expansión; suelos con nivel freático alto permanente; suelos con estrato arcilloso superficial; suelos con infiltración muy lenta debido a sales o alkali, y suelos poco profundos sobre material casi impermeable. Estos suelos tienen tasas de transmisión de agua muy lentas.

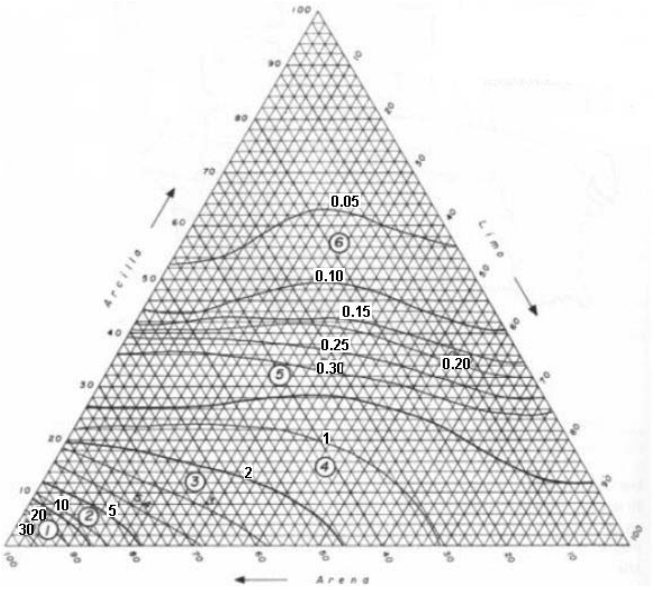
4. SOL_ZMX. Profundidad Máxima de las raíces. Para el caso de estudio se supone que toda la vegetación puede desarrollar las raíz libremente.

5. ANION_EXCL: Espacio de Vacíos: No se genera entrada para este parámetro por lo que el modelo lo tomo como 0
6. SOL_CRK: Porción del volumen máximo fraccionado del perfil del suelo: Este parámetro es opcional por lo que no fue tenido en cuenta.
7. TEXTURE: Textura del suelo: Este parámetro no es procesado por el modelo por loque se deja en blanco.
8. SOL_Z. Profundidad de la capa medida desde la superficie y expresada en cm.
9. SOL_BD. Densidad de bulbo húmedo o densidad aparente. Se define como la relación ente la masa de las partículas sólidas y el volumen total del suelo.
10. SOL_AWC. Es la cantidad de agua disponible para las plantas. Definido como 0.04 para arenas, 0.24 para limos y 0.21 para arcillas(SWAT200THEORY).
11. SOL_K. Conductividad hidráulica saturada. Mide la capacidad del suelo de conducir agua. Esta fue definida para cada uno de los estatos y obtenida de la tabla que se relaciona a continuación

Bed Material Group	Bed Material Characteristics	Hydraulic Conductivity
Very high loss rate	Very clean gravel and large sand	> 127 mm/hr
High loss rate	Clean sand and gravel, field conditions	51 - 127 mm/hr
Moderately high loss rate	Sand and gravel mixture with low silt-clay content	25 - 76 mm/hr
Moderate loss rate	Sand and gravel mixture with high silt-clay conter	6 - 25 mm/hr
Insignificant to low loss rate	Consolidated bed material: high silt-clay content	0.025 - 2.5 mm/hr

Tabla 13. Conductividad Hidráulica para varios materiales de lecho.
(Lane,1983 tomado de SWAT2000 THEORY)

Adicionalmente se tuvo en cuenta el valor de K que se obtuvo de la siguiente gráfica.



INDICE DE PERMEABILIDAD DEL SUELO
1 - Rápida a muy rápida
2 - Medianamente rápida
3 - Moderada
4 - Moderadamente lenta
5 - Lenta
6 - Muy lenta

Figura 1. Conductividad Hidráulica asaturación

Figura 19. Conductividad Hidráulica a Saturación (Tomado de Navarrete 2004)

12. SOL_CBN. Contenido de Carbono Orgánico.
13. CLAY. Contenido de arcilla. f_e<0.002mm
14. SILT. Contenido de limo. 0.002<f_e<0.05mm
15. SAND. Contenido de arenas. 0.05<f_e<2mm
16. ROCK. Contenido de gravas. f_e>2mm
17. SOL_ALB. Albedo de suelo húmedo. Cantidad de radiación solar reflejada. Este valor fue tomado a partir de la siguiente tabla.

Tipo de Cobertura	Albedo
Meadows and fields	0.14
Needle forest	0.07-0.09
Extended mixed forest	0.045
Grass-covered ground	0.25-0.33
Rocky ground	0.12-0.15
Vegetation early summer, leaves with high water content	0.19
Vegetation late summer, leaves with low water content	0.29
Clean snow	0.83
Old snow	0.42-0.70

Tabla 14. Albedo según el tipo de cobertura.
(Mccutcheon 1999, tomado de Navarrete 2004)

18. USLE_K. Factor de erodabilidad del suelo según la ecuación universal de pérdida de suelo USLE. Se refiere a la vulenrabilidad del suelo para ser disgregado por las gotas de agua y arrastrado por la corriente. Este factor

fue determinado para cada capa a partir de la granulometría la cual fue utilizada en la siguiente gráfica.

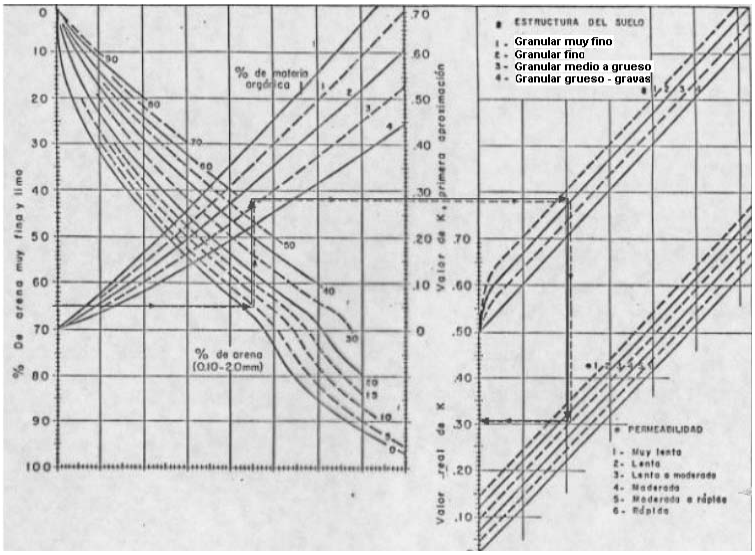


Figura 20. Factor K (Wischmeier 1971, Tomado de Navarrete 2004)

En la siguiente tabla se relacionan los valores de los parámetros para cada tipo de suelo tomados inicialmente.

SNAM	MEF	MGF	MLV	MGI	MGT	SNAM	MEF	MGF	MLV	MGI	MGT
CMPPCT	-	-	-	-	-	SOL_AWC 3	0.21	0.21	0.21	0.23	-
NLAYERS	3.00	5.00	4.00	5.00	2.00	SOL_K3	10.00	0.70	0.70	0.15	-
HYDGRP	B	A	B	A	C	SOL_CBN3	3.00	3.00	3.00	2.00	-
SOL_ZMX	1 200	1 500	1700	1 700	900	CLAY3	25.00	63.00	63.00	40.00	-
ANION_EXC L	0.50	0.50	0.50	0.50	0.05	SILT3	25.00	18.00	18.00	45.00	-
SOL_CRK	-	-	-	-	-	SAND3	50.00	19.00	19.00	15.00	-
TEXTURE	LFS-LFS-LFS	LFC-LC-LC	AAAA	A-A2-Bw-C1-C2	Oe-2A	ROCK3	30.00	20.00	20.00	10.00	-
SOL_Z 1	300	220	175	230	600	SOL_ALB3	0.12	0.14	0.14	0.14	-
SOL_BD1	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	USLE_K3					-

							0.40	0.20	0.20	0.20	
SOL_AWC1	0.04	0.21	0.25	0.22	0.12	SOL_EC3	-	-	-	-	-
SOL_K1	20.00	3.00	10.00	0.06	30.00	SOL_Z4	-	250	250	730	-
SOL_CBN1	4.00	4.00	4.00	8.00	10.00	SOL_BD4	-	1.40	1.40	1.20	-
CLAY1	15.00	40.00	40.00	60.00	23.00	SOL_AWC4	-	0.21	0.21	0.23	-
SILT1	37.00	32.00	32.00	25.00	19.00	SOL_K4	-	0.70	0.70	0.14	-
SAND1	48.00	28.00	28.00	15.00	58.00	SOL_CBN4	-	3.00	3.00	0.50	-
ROCK1	50.00	18.00	15.00	20.00	15.00	CLAY4	-	58.00	58.00	40.00	-
SOL_ALB1	0.20	0.20	0.20	0.14	0.08	SILT4	-	21.00	21.00	40.00	-
USLE_K1	0.30	0.50	0.50	0.50	0.21	SAND4	-	21.00	21.00	20.00	-
SOL_EC1	-	-	-	-	-	ROCK4	-	20.00	20.00	20.00	-
SOL_Z2	350	230	230	370	900	SOL_ALB4	-	0.13	0.13	0.13	-
SOL_BD2	1.30	1.20	1.20	1.20	1.10	USLE_K4	-	0.20	0.20	0.20	-
SOL_AWC2	0.04	0.21	0.21	0.21	0.12	SOL_EC4	-	-	-	-	-
SOL_K2	19.00	0.70	0.70	0.15	0.50	SOL_Z5	-	560	-	1300	-
SOL_CBN2	4.00	4.00	4.00	6.00	10.00	SOL_BD5	-	1.50	-	1.20	-
CLAY2	11.00	63.00	63.00	40.00	30.00	SOL_AWC5	-	0.21	-	0.23	-
SILT2	39.00	17.00	17.00	45.00	20.00	SOL_K5	-	0.50	-	0.14	-
SAND2	50.00	20.00	11.11	15.00	50.00	SOL_CBN5	-	2.00	-	0.50	-
ROCK2	68.00	20.00	20.00	15.00	10.00	CLAY5	-	61.00	-	40.00	-
SOL_ALB2	0.15	0.15	0.15	0.14	0.05	SILT5	-	22.00	-	40.00	-
USLE_K2	0.30	0.25	0.25	0.25	0.15	SAND5	-	17.00	-	20.00	-
SOL_EC2	-	-	-	-	-	ROCK5	-	15.00	-	15.00	-
SOL_Z3	600	240	240	620	-	SOL_ALB5	-	0.12	-	0.12	-
SOL_BD3	1.50	1.30	1.30	1.20	-	USLE_K5	-	0.25	-	0.25	-

Tabla 15. Parámetros de Suelos Iniciales

7.2.7. Definición de los tipos de cobertura vegetal.

Al igual que para la definición de los tipos de suelo, es necesario cargar un archivo con extensión .shp, que contenga las polilíneas que delimitan cada uno de los tipos de cobertura vegetal presentes en la zona. Para el caso de interés, se utilizó el levantamiento realizado por la Firma Auditoría Ambiental (AA,2003). Cuya zona de interés se presenta en la siguiente gráfica.

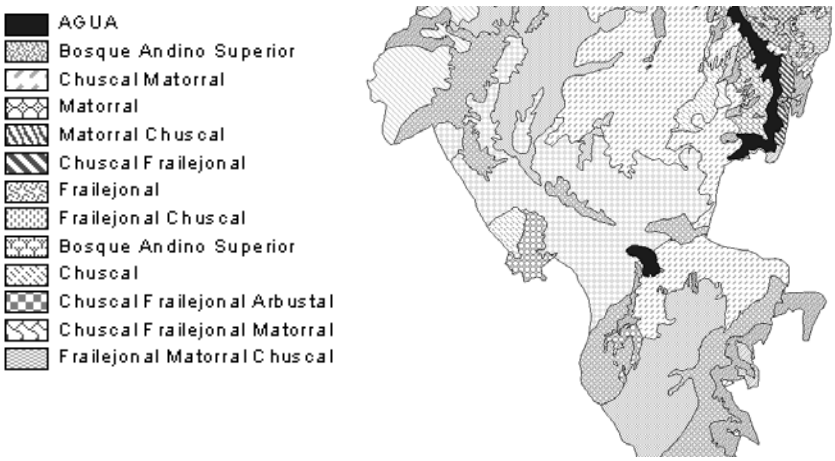


Figura 21. Clasificación de Cobertura, Zona de Estudio (AA,2003)

Teniendo como base la figura anterior se procedió a determinar los tipos de cobertura vegetal más representativos para la zona de estudio; de este análisis se obtuvieron las siguientes vegetaciones: Matorral Frailejonal, Chuscal Matorral, Frailejonal, Bosque Alto Andino, Frailejonal Chuscal y Agua.

A continuación se describen los parámetros solicitados por SWAT, para llevar a cabo la modelación.

1. CROP NAME: Nombre asignado a la cobertura vegetal
2. CPNM: Código de la cobertura
3. IDC: Clasificación de la cobertura Vegetal según la siguiente tabla.

IDC	TIPO DE CULTIVO
1	warm season annual legume
2	cold season annual legume
3	perennial legume
4	warm season annual
5	cold season annual
6	Perennial
7	Trees

Tabla 16. IDC Según el Tipo de Cultivo

4. BIO_E: Eficiencia en el uso de radiación; se define como la cantidad de biomasa seca producida por unidad de radiación interceptada.

5. HVSTI: Indice de cosecha; Define la porción de la bíomasa del subsuelo que es removido en la cosecha.

6. BLAI: Máximo potencial que puede alcanzar el área foliar. Representado por el punto más alto en la siguiente tabla.

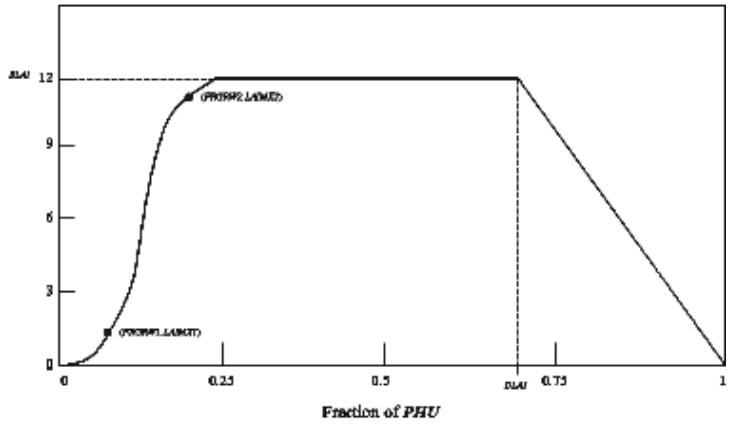


Figura 22. Indice de Area Foliar Como Función del Período de Crecimiento

Para un Cultivo en Especial

7. FRGRW1: Fracción del período de crecimiento de la planta (expresado en una porción del total de las unidades de calor requeridas para culminar el ciclo de vida de la planta), que corresponde al comienzo de la época de mayor desarrollo de la misma.

8. LAIMX1: Valor del índice de foliar, que corresponde al comienzo de la época de mayor desarrollo de la planta.

9. FRGRW2: Fracción del período de crecimiento de la planta, en la cual culmina la época de mayor desarrollo.

10. LAIMX2: Valor del índice de foliar, que corresponde al final de la época de mayor desarrollo de la planta

11. DLAI: Fracción del período de crecimiento de la planta, para el cual el índice de área foliar comienza a decaer; representa el inicio de la muerte de la planta.

12. CHTMX: Máxima altura de follaje.

13. RDMX: Máxima profundidad de raíces.

14. T_OPT: Temperatura óptima para el desarrollo de las plantas.

15. T_BASE. Temperatura mínima requerida por la planta para poder desarrollarse.

16. CNYLD: Fracción de nitrógeno medido en campo

17. CPYLD: Fracción de fósforo medido en el campo

18. BN1: Captura de nitrógeno al emerger.

19. BN2: Captura de nitrógeno al 50% de su madurez.

20. BN3: Captura de nitrógeno al 100% de su madurez.

21. BP1: Captura de fósforo al emerger.

22. BP2: Captura de fósforo al 50% de su madurez.

23. BP3: Captura de fósforo al 100% de su madurez.

24. WSYF: Límite inferior del índice de cosecha esperado como consecuencia de déficit en la cantidad de agua.

25. USLE_C. Mínimo valor del factor C de la ecuación de pérdida de suelos USLE.

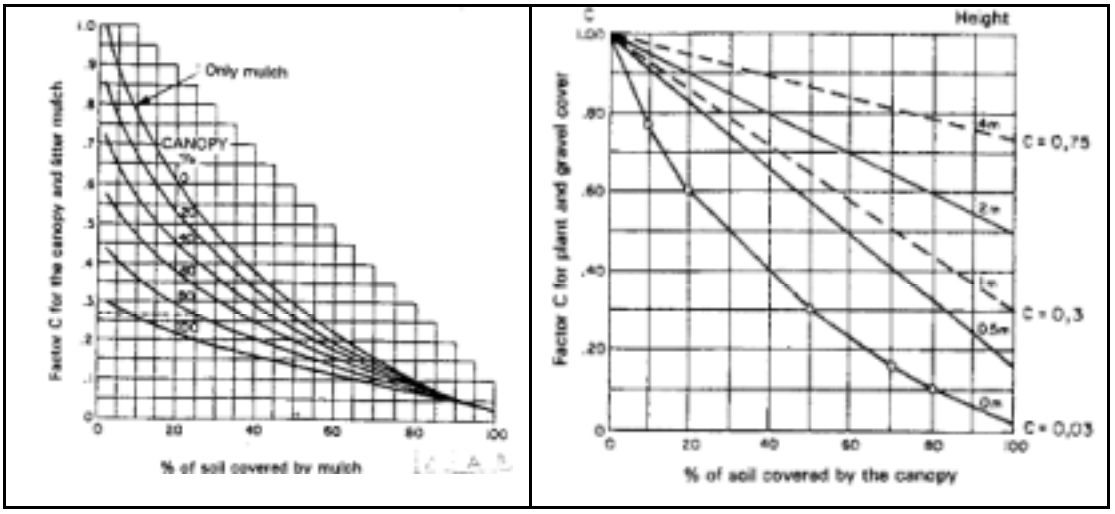


Figura 23. Cálculo de USLE_C en Función de la

Altura y de los Porcentajes de Forraje y Rastrojo

26. GSI: Máxima conductancia estomatal con una alta radiación solar y un bajo déficit de presión de vapor.

27. VPDFR: Déficit de presión de vapor.

28. FRGMAX: Máxima conductancia estomatal.

29. WAVP. Tasa de declinamiento de la radiación.

30. CO2HI. Concentración de dióxido de carbono en la atmósfera.

32. RSDCO_PL. Coeficiente de descomposición de residuos vegetales.

Así las cosas a continuación se presentan los valores de los parámetros para cada uno de los tipos de cobertura vegetal, presentes en la cuenca de estudio.

NOMBRE	Water	Bosque Alto-Andino	Matorral Frailejonal	Chuscal Matorral	Frailejonal	Frailejonal Chuscal
CPNM	WATR	BOAA	MAFR	CHMA	FRAI	FRCH
ICNUM	18.000	93.000	94.000	95.000	96.000	97.000
IDC	6.000	7.000	1.000	6.000	1.000	1.000
BIO_E	0.000	15.000	47.000	35.000	45.000	35.000
HVSTI	0.000	0.760	0.010	0.010	0.010	0.010
BLAI	0.000	5.000	3.000	4.000	2.000	3.500
FRGRW1	0.000	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050
LAIMX1	0.000	0.050	0.100	0.100	0.100	0.100
FRGRW2	0.000	0.400	0.600	0.500	0.800	0.600
LAIMX2	0.000	0.950	0.900	0.900	0.900	0.900
DLAI	0.000	0.990	0.990	0.990	0.990	0.990
CHTMX	0.000	3.000	2.000	1.500	1.000	1.200
RDMX	0.000	2.500	0.800	0.500	0.200	0.500
T_OPT	0.000	18.000	11.000	11.000	11.000	11.000
T_BASE	0.000	8.000	1.000	2.000	0.750	1.250
CNYLD	0.000	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
CPYLD	0.000	0.000	0.002	0.002	0.002	0.002
BN1	0.000	0.006	0.020	0.020	0.020	0.020
BN2	0.000	0.002	0.015	0.015	0.015	0.015
BN3	0.000	0.002	0.004	0.004	0.004	0.004
BP1	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
BP2	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001
BP3	0.000	0.000	0.004	0.004	0.004	0.004
WSYF	0.000	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
USLE_C	0.000	0.020	0.012	0.018	0.022	0.018
GSI	0.000	0.002	0.008	0.003	0.003	0.003
VPDFR	0.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000
FRGMAX	0.000	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750

WAVP	0.000	8.000	9.000	9.000	9.000	9.000
CO2HI	0.000	660.00	660.00	660.00	660.00	660.00
BIOEHI	0.000	16.000	40.000	45.000	35.000	40.000
RSDCO_PL	0.000	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050
OV_N	0.010	0.100	0.050	0.050	0.050	0.050
CN2A	92.000	33.000	30.000	57.000	48.000	30.000
CN2B	92.000	57.000	48.000	73.000	67.000	48.000
CN2C	92.000	70.000	65.000	82.000	77.000	65.000
CN2D	92.000	74.000	73.000	86.000	83.000	73.000

Tabla 17. Parámetros de Vegetación Iniciales

7.2.8.Generación de las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU)

Con los tipos de suelo definidos, y las polilíneas que delimitan cada tipo de suelo, introducidas, se procede a realizar la reclasificación, en la cual se asigna a cada una de las áreas el tipo de suelo correspondiente. En la siguiente gráfica se muestran los suelos de la cuenca ya clasificados.

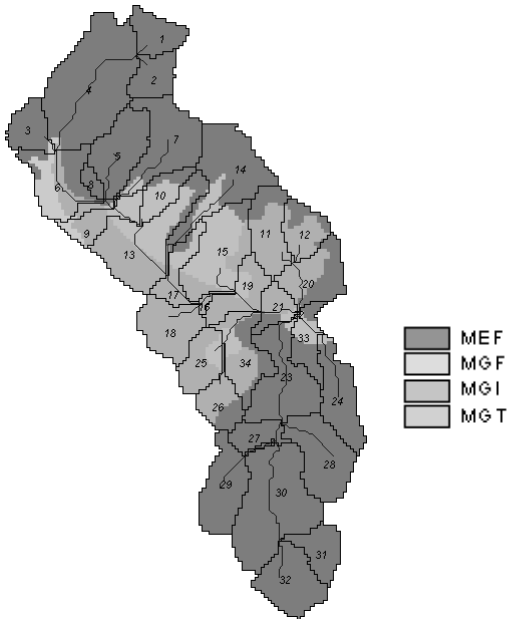


Figura 24. Distribución de Tipos de Suelo (Reclasificados)

De igual forma se procede a realizar la reclasificación para las coberturas vegetales.

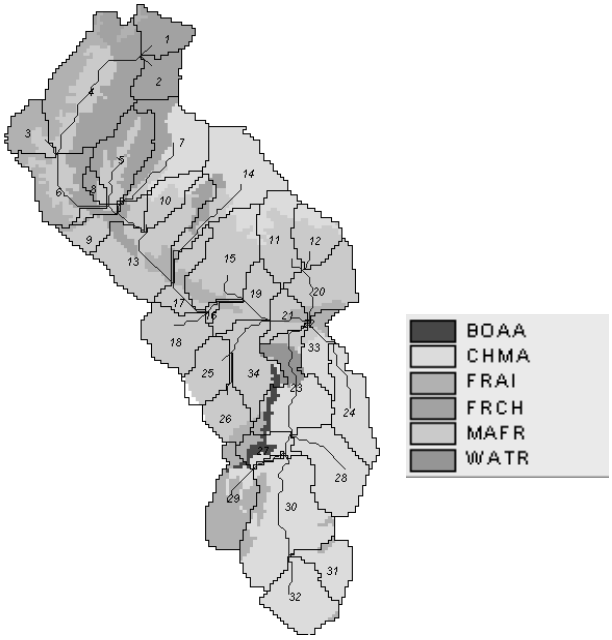


Figura 25. Distribución de Tipos de Cobertura Vegetal (Reclasificados)

Finalmente se procede a realizar el traslapo de los suelos y las coberturas, para así generar las HRU, unidades caracterizadas por un mismo tipo de cobertura, suelo y pendiente.

7.2.9. Entrada de variables climatológicas.

Para alimentar el modelo con las variables climatológicas se generan archivos con extensión .dbf, con campos establecidos según la variable a introducir. Para llevar a cabo esta modelación se introdujeron datos para el período de 7 años, comprendido entre enero de 1978 y diciembre de 1984; se escogieron estas fechas debido a que era el período que contaba con los datos más completos en las estaciones hidrometeorológicas disponibles en la zona. A continuación se enuncian las estaciones pluviográficas, limnigráficas y climatológicas, a partir de las cuales se obtuvieron las series de, temperatura, viento, humedad relativa y radiación solar.

Estaciones Climatológicas.

NOMBRE	ID	NAME	CORDENADAS	
			X	Y
CHINGAZA CAMPAMENTO	1	CL_CHING	1035300	993600
PRESA GOLILLAS	2	CL_GOLIL	1041800	998200

Tabla 18. Estaciones Climatológicas Utilizadas en el Modelo

Estaciones Pluviográficas:

NOMBRE	ID	NAME	CORDENADAS		ELEVACION
			X	Y	
ALTO DEL GORRO	1	P_GORRO	1037110	988100	3750
PRESA GOLILLAS	2	P_GOLILL	1041800	998200	3008
CHINGAZA CAMPAMENTO	3	P_CHINGA	1035300	993600	3250
LAGUNA DE CHINGAZA	4	P_LAGCHI	1036300	993500	3250
CUCHILLA DE GOLLIAS	5	P_CUCGOL	1037350	997150	3350

Tabla 19. Estaciones Pluviográficas Utilizadas en el Modelo

Estaciones Limnigráficas: Utilizadas para medir el ajuste del modelo

NOMBRE	CORDENADAS		LATITUD	LONGITUD	TIPO
	X	Y			
SAN JOSE	1037500	993300	4.53	73.75	O
BOQUERON	1035600	993700	4.55	73.77	O

Tabla 20. Estaciones Limnigráficas Utilizadas en el Modelo

SWAT 2000 cuenta con un generador aleatorio de clima, que utiliza los registros históricos para completar la información faltante o incompleta, dicho generador fue utilizado para completar algunos datos de precipitación que no se encontraron disponibles.

7.2.9. Generación de las Bases de Datos de Entrada.

El menú *Input* es habilitado por el programa una vez se han cumplido con todos los pasos descritos hasta el momento en el presente documento; éste permite al usuario dar la instrucción para que se generen las bases de datos que necesita SWAT para correr. Estos archivos se crean secuencialmente y no es necesario reemplazarlos a menos que se realice un cambio en los datos de entrada, de tal forma que se cambien las propiedades de las HRU´s definidas. En la siguiente tabla se presentan los nombres de los archivos de entrada generados.

ARCHIVOS REQUERIDOS
Configuration File
Soil Data
Weather Generador Data
Subbasin General Data
HRU General Data
Main Channel Data
Groundwater Data
Water Use Data
Management Data
Soil Chemical Data
Pond Data
Stream Water Quality Data

Tabla 21. Bases de Datos Generadas por el Modelo

De los archivos relacionados el único que se modificó, fue el relacionado con las prácticas de manejo, *Management Data,* esto con el fin de simular el comportamiento real de las coberturas presentes en la zona para las cuales, se estableció, como fecha de siembra el primer día del año O de modelación y la de cultivo el último día del año 7, gracias a esta práctica SWAT no incorpora al modelo el ciclo siembra, crecimiento, cultivo, muerte que tiene por defecto, el cual afectaría el ajuste que habría de presentar al compara los datos obtenidos con los datos modelados.

7.2.10. Corrida del Modelo.

Finalmente se procede a definir las fechas de modelación, especificar la frecuencia necesitada para los datos de salida, verificar que todos los datos de entrada estén dentro de los rangos establecidos, con el fin de asegurar que los cálculos que realiza internamente el programa tengan resultados definidos y finalmente dar la instrucción para que genere o lea los datos hidrológicos para el período establecido. Con todos estos requisitos satisfechos se inicia la corrida del modelo.

8. RESULTADOS DEL MODELO

Tal como se enunció anteriormente para alimentar el modelo se disponía de series de parámetros climatológicos y de precipitación para 7 años comprendidos entre 1978 y 1984. Se presenta el proceso de calibración y verificación del modelo corrido para la cuenca alta del río Guatiquía.

8.1. Calibración del Modelo.

Previo al inicio de la calibración del modelo fue necesario realizar el calentamiento, esto teniendo en cuenta que en simulaciones iniciales para los cuales se definía como año cero el año 1978, correspondiente al primer año de datos medidos, no se obtenían ajustes aceptables del modelo; se utilizó el año 1977 a partir de series generadas para realizar el calentamiento del modelo, con el objetivo principal de iniciar el desarrollo de la cobertura vegetal, de tal forma que una vez se iniciará la modelación con los datos medidos, la vegetación, simulada por el modelo, lograra realizar la interceptación y almacenamiento temporal de agua, acordes con el fenómeno presentado en la realidad.

Como quiera que la ejecución de SWAT se realiza desde DOS, y que posteriormente es necesario llenar unas bases de datos, no fue posible instaurar una metodología objetiva de calibración, por lo que esta se realizó con la metodología de ensayo y error, cuya función objetivo fue definida como maximizar el coeficiente de determinación R^2, el cual compara la correlación de dos series de tiempo.

$$R^2 = 1 - \frac{\frac{1}{n}\sum_{1=!}^{n}\left[d_i - O_i(\theta)\right]^2}{\frac{1}{n}\sum_{1=!}^{n}\left[d_i - \bar{d}\right]^2}$$

Donde *d* representa la serie de caudales observada en la estación ubicada a la salida de la cuenca y $O_i(\theta)$ representa la serie de caudales modelada a la salida de la última subcuenca

Es de aclarar que si bien SWAT entrega al usuario como datos de salida, información referente a transporte de sedimentos y contaminantes, no fue posible realizar una calibración con esta información debido a la carencia de muestreos que permitan conocer el comportamiento de la cuenca en cuanto a flujo de sedimentos y pesticidas se refiere.

En el capítulo 7 se relacionaron los parámetros de cada uno de los tipos de cobertura vegetal asignados para llevar a cabo la modelación, que en su mayoría fueron obtenidos a partir de comparaciones con coberturas trabajadas en proyectos anteriores y otras obtenidas por el USDA. Adicionalmente se tuvieron en cuenta los resultados obtenidos por Domínguez (2002), quien modeló con SWAT otra cuenca del Páramo de Chingaza y llegó a la conclusión que el modelo es altamente sensible a los parámetros Numero de Curva *(CN)*, Conductividad Hidráulica *(K)* y Densidad Aparente *(SOLBD)*, por lo cual se variaron por separado y agregando y suprimiendo el 40% del valor original asignado a cada uno de ellos, con el fin de observar la sensibilidad presentada por el modelo, para esta etapa se utilizaron los años 1978 y 1979. En la siguiente gráfica se presenta la respuesta generada ante la variación de los parámetros mencionados.

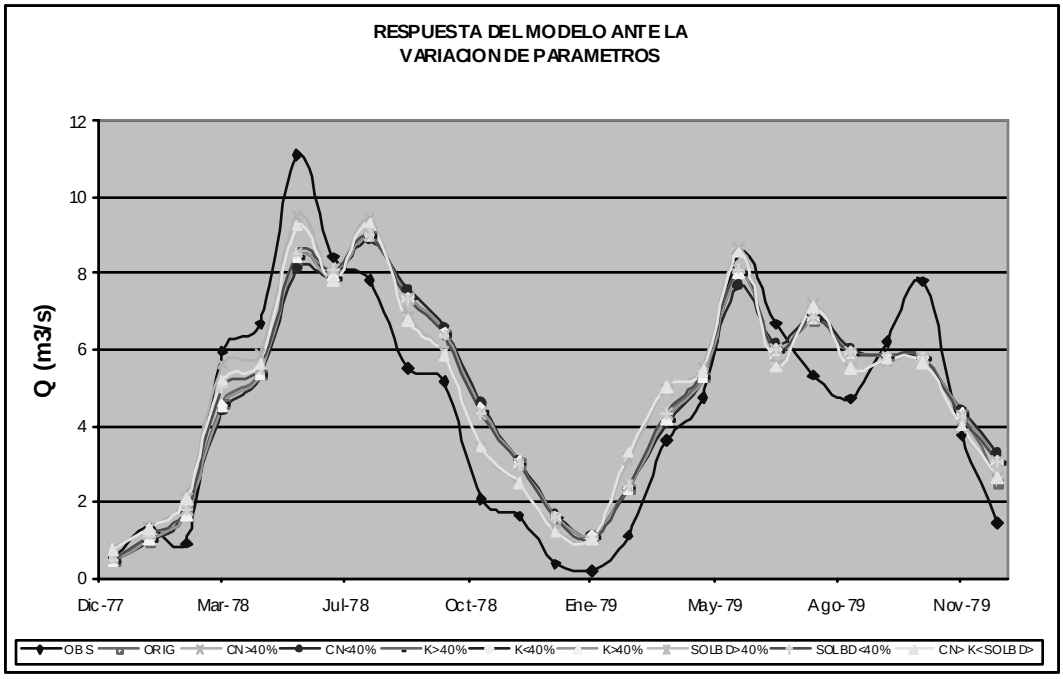


Figura 26. Respuesta del Modelo ante la Variación de los Parámetros

De este análisis se puede concluir que, contrario a lo encontrado por Domínguez (2002), el modelo es poco sensible a los parámetros Conductividad Hidráulica (*K)*, y Densidad Aparente (*SOLBD)*, pero tal como lo concluye en su estudio, el Número de Curva *(CN)* si resulta ser de gran influencia en la respuesta del modelo. En la tabla siguiente se presenta el ajuste del modelo para cada una de las variaciones.

ESCENARIO	AJUSTE (R^2)
INICIAL	83.95%
CN>40%	88.52%
CN<40%	80.69%
K>40%	83.77%
K<40%	83.42%
SOLBD>40%	85.32%
SOLBD<40%	85.32%
CN>40% K<40% SOLBD>40%	87.45%

Tabla 22. Ajuste para Diferentes Escenarios de Calibración

Posteriormente se procedió a realizar una verificación de conservación de masa con el fin de corroborar que los datos modelados mantenían el mismo volumen de agua que los datos observados para un período de tiempo definido.

Se tomó como tiempo de referencia un período de un mes, para el cual se calculó el volumen total de agua producido por la cuenca; se encontró que en general el modelo tiende a superar en magnitud a los caudales reales medidos en la estación de control ubicada aguas abajo de la cuenca estudiada, pero en un porcentaje aproximado del 6% valor que se encuentra en los límites de tolerancia, dada la escasez de información disponible. A continuación se presenta una tabla con los volúmenes totales mensuales, expresados en millones y el respectivo valor porcentual de conservación de masa, para cada uno de los escenarios de calibración.

SERIE DE CAUDALES	HM^3/MES	CONSERVACIÓN
OBSERVADO	11.69	100.00%
INICIAL	12.40	106.13%
CN>40%	12.68	108.54%
CN<40%	12.43	106.40%
K>40%	12.47	106.69%
K<40%	12.46	106.60%
SOLBD>40%	12.46	106.59%
SOLBD<40%	12.56	107.49%
CN> K< SOLBD>	12.56	107.49%

Tabla 23. Conservación de Masa para Diferentes Escenarios de Calibración

8.2. Verificación del Modelo.

Para llevar a cabo la verificación del modelo, se utilizaron como parámetros de entrada aquella combinación que arrojó un mejor ajuste en la etapa de calibración, a continuación se presentan las tablas de parámetros de suelos y vegetación con las cuales se obtuvo ese ajuste.

NOMBRE	Water	Bosque Alto-Andino	Matorral Frailejonal	Chuscal Matorral	Frailejonal	Frailejonal Chuscal
CPNM	WATR	BOAA	MAFR	CHMA	FRAI	FRCH
ICNUM	18.000	93.000	94.000	95.000	96.000	97.000
IDC	6.000	7.000	1.000	6.000	1.000	1.000
BIO_E	0.000	15.000	47.000	35.000	45.000	35.000
HVSTI	0.000	0.760	0.010	0.010	0.010	0.010
BLAI	0.000	5.000	3.000	4.000	2.000	3.500
FRGRW1	0.000	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050
LAIMX1	0.000	0.050	0.100	0.100	0.100	0.100
FRGRW2	0.000	0.400	0.600	0.500	0.800	0.600
LAIMX2	0.000	0.950	0.900	0.900	0.900	0.900
DLAI	0.000	0.990	0.990	0.990	0.990	0.990
CHTMX	0.000	3.000	2.000	1.500	1.000	1.200
RDMX	0.000	2.500	0.800	0.500	0.200	0.500
T_OPT	0.000	18.000	11.000	11.000	11.000	11.000
T_BASE	0.000	8.000	1.000	2.000	0.750	1.250
CNYLD	0.000	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
CPYLD	0.000	0.000	0.002	0.002	0.002	0.002
BN1	0.000	0.006	0.020	0.020	0.020	0.020
BN2	0.000	0.002	0.015	0.015	0.015	0.015
BN3	0.000	0.002	0.004	0.004	0.004	0.004
BP1	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
BP2	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001
BP3	0.000	0.000	0.004	0.004	0.004	0.004
WSYF	0.000	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
USLE_C	0.000	0.020	0.012	0.018	0.022	0.018
GSI	0.000	0.002	0.003	0.003	0.003	0.003
VPDFR	0.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000
FRGMAX	0.000	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750
WAVP	0.000	8.000	9.000	9.000	9.000	9.000
CO2HI	0.000	660.000	660.000	660.000	660.000	660.000
BIOEHI	0.000	16.000	40.000	45.000	35.000	40.000
RSDCO_PL	0.000	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050
OV_N	0.010	0.100	0.050	0.050	0.050	0.050
CN2A	92.000	46.200	42.000	79.800	67.200	42.000
CN2B	92.000	79.800	67.200	99.000	93.800	67.200
CN2C	92.000	98.000	91.000	99.000	99.000	91.000
CN2D	92.000	99.000	99.000	99.000	99.000	99.000

Tabla 24. Parámetros de Vegetación Finales

PARAMETRO	MEF	MGF	MLV	MGI	MGT	PARAMETRO	MEF	MGF	MLV	MGI	MGT
CMPPCT	-	-	-	-	-	SOL_AWC3	0.21	0.21	0.21	0.23	-
NLAYERS	3.00	5.00	4.00	5.00	2.00	SOL_K3	6.00	0.42	0.42	0.09	-
HYDGRP	B	A	B	A	C	SOL_CBN3	3.00	3.00	3.00	2.00	-
SOL_ZMX	1200	1500	1700	1700	900	CLAY3	25.00	63.00	63.00	40.00	-
ANION_EXCL	0.50	0.50	0.50	0.50	0.05	SILT3	25.00	18.00	18.00	45.00	-
SOL_CRK	-	-	-	-	-	SAND3	50.00	19.00	19.00	15.00	-
TEXTURE	LFS-LFS-LFS	LFC-LC-LC	AAAA	A-A2-Bw-C1-C2	Oe-2A	ROCK3	30.00	20.00	20.00	10.00	-
SOL_Z1	300	220	175	230	600	SOL_ALB3	0.12	0.14	0.14	0.14	-
SOL_BD1	0.66	0.66	0.66	0.66	0.40	USLE_K3	0.40	0.20	0.20	0.20	-
SOL_AWC1	0.04	0.21	0.25	0.22	0.12	SOL_EC3	-	-	-	-	-
SOL_K1	12.00	1.80	6.00	0.04	18.00	SOL_Z4	-	250	250	730	-
SOL_CBN1	4.00	4.00	4.00	8.00	10.00	SOL_BD4	-	0.84	0.84	0.72	-
CLAY1	15.00	40.00	40.00	60.00	23.00	SOL_AWC4	-	0.21	0.21	0.23	-
SILT1	37.00	32.00	32.00	25.00	19.00	SOL_K4	-	0.42	0.42	0.08	-
SAND1	48.00	28.00	28.00	15.00	58.00	SOL_CBN4	-	3.00	3.00	0.50	-
ROCK1	50.00	18.00	15.00	20.00	15.00	CLAY4	-	58.00	58.00	40.00	-
SOL_ALB1	0.20	0.20	0.20	0.14	0.08	SILT4	-	21.00	21.00	40.00	-
USLE_K1	0.30	0.50	0.50	0.50	0.21	SAND4	-	21.00	21.00	20.00	-
SOL_EC1	-	-	-	-	-	ROCK4	-	20.00	20.00	20.00	-
SOL_Z2	350	230	230	370	900	SOL_ALB4	-	0.13	0.13	0.13	-
SOL_BD2	0.78	0.72	0.72	0.72	0.66	USLE_K4	-	0.20	0.20	0.20	-
SOL_AWC2	0.04	0.21	0.21	0.21	0.12	SOL_EC4	-	-	-	-	-
SOL_K2	11.40	0.42	0.42	0.09	0.30	SOL_Z5	-	560	-	1300	-
SOL_CBN2	4.00	4.00	4.00	6.00	10.00	SOL_BD5	-	1.50	-	1.20	-
CLAY2	11.00	63.00	63.00	40.00	30.00	SOL_AWC5	-	0.13	-	0.14	-
SILT2	39.00	17.00	17.00	45.00	20.00	SOL_K5	-	0.30	-	0.08	-
SAND2	50.00	20.00	11.11	15.00	50.00	SOL_CBN5	-	2.00	-	0.50	-
ROCK2	68.00	20.00	20.00	15.00	10.00	CLAY5	-	61.00	-	40.00	-
SOL_ALB2	0.15	0.15	0.15	0.14	0.05	SILT5	-	22.00	-	40.00	-
USLE_K2	0.30	0.25	0.25	0.25	0.15	SAND5	-	17.00	-	20.00	-
SOL_EC2	-	-	-	-	-	ROCK5	-	15.00	-	15.00	-
SOL_Z3	600	240	240	620	-	SOL_ALB5	-	0.12	-	0.12	-
SOL_BD3	0.90	0.78	0.78	0.72	-	USLE_K5	-	0.25	-	0.25	-

Tabla 25. Parámetros de Suelos Finales

Se utilizaron los años 1980-1982, para corroborar el ajuste que presentaba el modelo, al simular el comportamiento de la cuenca para otros años diferentes a los utilizados para ser calibrado.

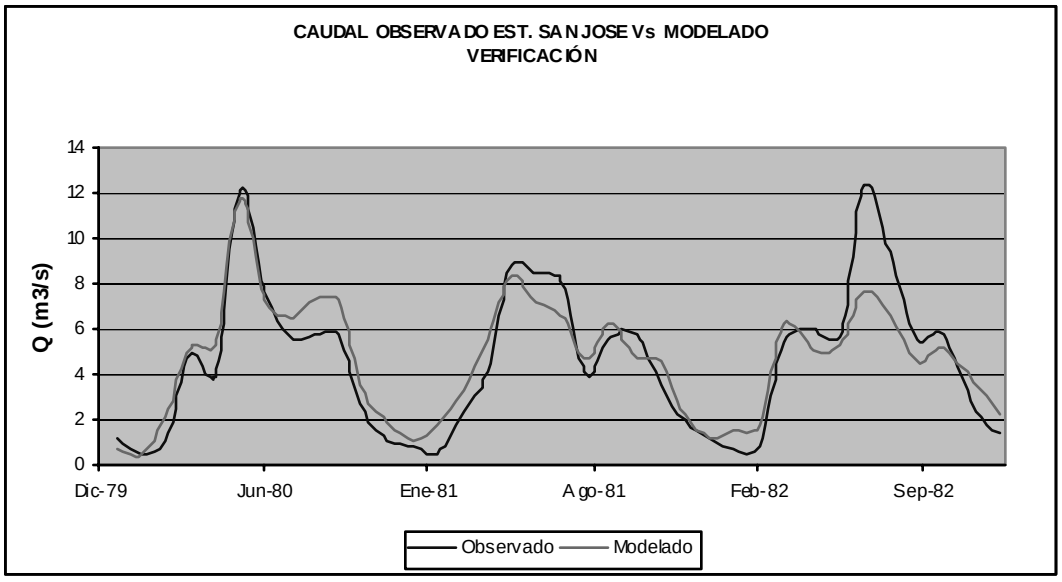


Figura 27. Verificación del Modelo

Tal como se aprecia en la gráfica anterior el modelo predice adecuadamente los caudales de salida, aún para años diferentes a los utilizados en la calibración. En la siguiente tabla se presentan los coeficientes de correlación para cada uno de los años utilizados en la verificación, así como el acumulado de los tres años

AÑO DE VERIFICACION	AJUSTE (R^2)
1980	95.62%
1981	89.94%
1982	90.17%
ACUMULADO	**85.88%**

Tabla 26. Coeficiente de Correlación para la Verificación del Modelo

8.3. Análisis de Resultados del Modelo Implementado.

Una vez implementado y calibrado el modelo, se puede concluir que los datos generados por este representan de una manera adecuada los fenómenos físicos presentados en la cuenca, esto se corroboró gracias a los buenos ajustes presentados para los años de calibración y de verificación utilizados en este trabajo. Al comparar las series de caudales observadas y modeladas se ve que el modelo implementado es capaz de predecir adecuadamente los tiempos

de primer arribo de las crecientes y la duración de las mismas pero en algunos casos no logra predecir el pico máximo de las series, esto puede estar relacionado con el almacenamiento temporal de agua, realizado por el conjunto suelo vegetación, definido en el alcance del proyecto, para cada una de las HRU´s definidas por el programa.

Después de realizar un análisis de conservación de masa se observó que los datos modelados tienden a ser un poco superiores a los observados; si se supone que para un período extenso, el cambio en el almacenamiento de la cuenca no cambia, y teniendo en cuenta que las entradas son conocidas al provenir de datos de lluvias medidos, se puede concluir que el modelo tiende a subvalorar los procesos asociados con los sumideros de agua (evapotranspiración, generación de biomasa, recarga de acuíferos profundos, etc).

Tras realizar un análisis de sensibilidad de los parámetros para los cuales Domínguez (2002) encontró una gran importancia, se encontró que el parámetro que realmente genera cambios en los datos arrojados por el programa es el relacionado con el Número de Curva (CN); este al ser mayorado en un 40% generó ajustes mayores a los obtenidos con los datos iniciales. Es de aclarar que dada la plataforma sobre la cual trabaja SWAT 2000, no fue posible utilizar una metodología objetiva de calibración, por lo que este proceso fue muy demorado y no contempló una mayor cantidad de parámetros, lo cual habría generado un modelo más preciso.

9. SIMULACION OTROS ESCENARIOS

9.1. Descripción de la Simulación.

Después de modelar la cuenca alta del río Guatiquía y una vez evidenciada la capacidad que tiene el modelo para representar los fenómenos físicos presentes en la cuenca de interés, se utilizó el modelo ya implementado para predecir el comportamiento de la cuenca ante las intervenciones antrópicas descritas en el Capítulo 4 de este estudio.

Se supusieron 4 escenarios correspondientes al mismo número de amenazas descritas anteriormente, (quema, cultivo de papa, otros cultivos típicos de páramo y siembra de pasto) las cuales fueron representadas por cambios en los parámetros de la vegetación que se suministran al modelo como datos de entrada; para cada uno de los escenarios se cambió el uso del suelo de toda la cuenca por el de la amenaza simulada. La siguiente tabla presenta los parámetros de entrada suministrados a SWAT para realizar la simulación.

PARAMETRO	QUEMA	PASTOS	PAPA	CULTIVOS PARAMO
IDC	1	1	1	7
BIO_E	35.00	35.00	25.00	25.00
HVSTI	0.01	0.90	0.95	0.40
BLAI	3.50	4.00	4.00	2.50
FRGRW1	0.05	0.05	0.15	0.12
LAIMX1	0.10	0.05	0.01	0.04
FRGRW2	0.60	0.49	0.50	0.70
LAIMX2	0.90	0.95	0.95	0.95
DLAI	0.99	0.99	0.60	0.80
CHTMX	1.20	0.50	0.60	0.80
RDMX	0.50	2.00	0.60	1.00
T_OPT	11.00	25.00	22.00	20.00
T_BASE	1.25	12.00	7.00	9.00
CNYLD	0.0015	0.0234	0.0246	0.0280
CPYLD	0.0020	0.0033	0.0023	0.0034
BN1	0.0200	0.0600	0.0550	0.0550
BN2	0.0150	0.0231	0.0200	0.0200
BN3	0.0038	0.0134	0.0120	0.0120
BP1	0.0014	0.0084	0.0060	0.0060
BP2	0.0010	0.0032	0.0025	0.0025
BP3	0.0035	0.0019	0.0019	0.0019
WSYF	0.010	0.900	0.950	0.400
USLE_C	0.600	0.003	0.200	0.100
GSI	0.003	0.005	0.005	0.007
VPDFR	4.000	4.000	4.000	4.000
FRGMAX	0.750	0.750	0.750	0.750
WAVP	9.000	10.000	14.800	8.000
CO2HI	660.0	660.0	660.0	660.0
BIOEHI	40.000	36.000	30.000	33.000
RSDCO_PL	0.050	0.050	0.050	0.050
OV_N	0.07	0.15	0.14	0.10
CN2A	90.00	49.00	67.00	67.00
CN2B	99.00	69.00	77.00	77.00
CN2C	99.00	79.00	83.00	83.00
CN2D	99.00	84.00	87.00	87.00

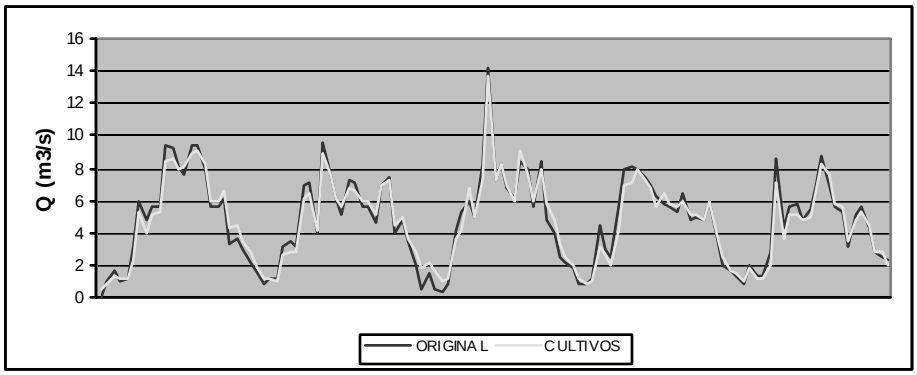
Tabla 27. Parámetros de Vegetación Otros Escenarios

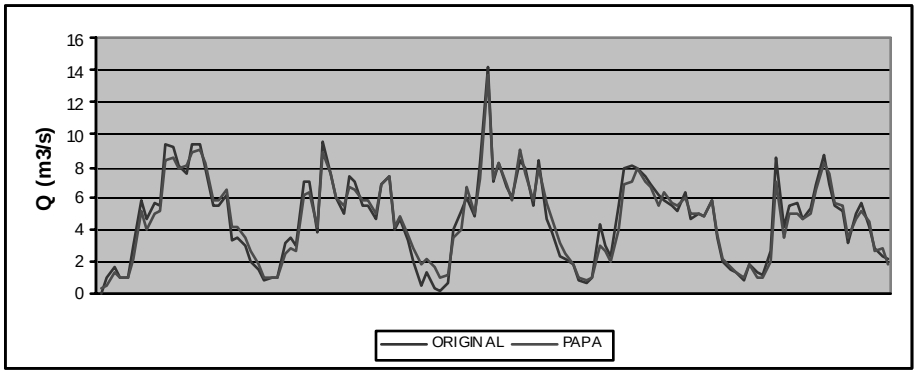
Como variables de salida fueron analizadas, la cantidad de agua producida por toda la cuenca, la variación en las crecientes o picos de lluvias con respecto al

escenario original y la producción de sedimento en cada uno de estos escenarios.

9.2. Resultados de la Simulación de otros escenarios.

Con los datos de entrada ya cargados, se procedió a correr el modelo nuevamente para el período comprendido entre enero de 1978 y diciembre de 1982; esta operación se repitió para cada uno de los casos a analizar, con el fin de poder comparar las respuestas entre el escenario original y cada uno de los escenarios antrópicos. A continuación se presentan las gráficas que representan las series de caudales de salida para cada caso.





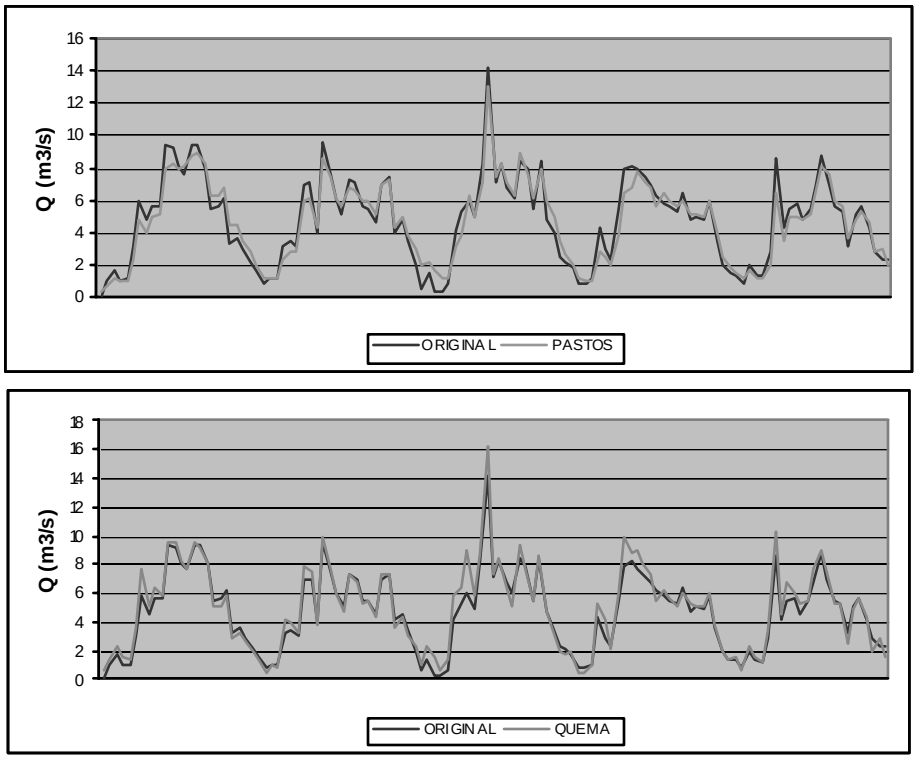


Figura 28. Comparación Escenarios de Intervención

Se puede observar que en la eventualidad de presentarse un incendio forestal, que abarcara la cuenca de estudio, en los eventos de grandes precipitaciones, asociados a crecientes (Caudales superiores a 6 m^3/s), se podrían incrementar hasta en un 20% el caudal de la creciente, con todo lo que esto representa, para el ecosistema y las comunidades ubicadas aguas abajo del punto de estudio en el río Guatiquía. Para los tres escenarios restantes no se percibe un cambio importante en la magnitud de los caudales pico, asociados a las crecientes.

La segunda variable de salida analizada fue la cantidad de agua total drenada por la cuenca en cada escenario, cuya grafica se presenta a continuación.

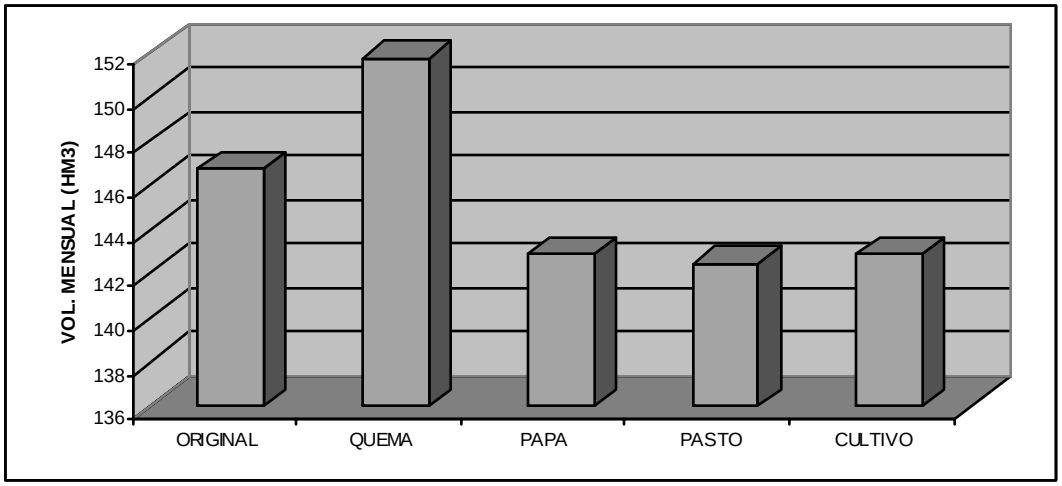


Figura 29. Volumen Mensual de Agua Producida

Como se puede observar el establecimiento de cualquier tipo de cultivo representa una cantidad de agua consumida para la generación de biomasa por lo que la disponibilidad del recurso se reduce, en una pequeña proporción, en este tipo de escenario. Para el caso de los incendios se ve un aumento significativo en la disponibilidad del recurso, ya que no se cuenta con ningún tipo de vegetación que demande agua para su crecimiento.

Finalmente se analiza la cantidad de sedimento generado por la cuenca para cada uno de los escenarios propuestos. La siguiente gráfica ilustra la diferencia de los valores arrojados por el modelo.

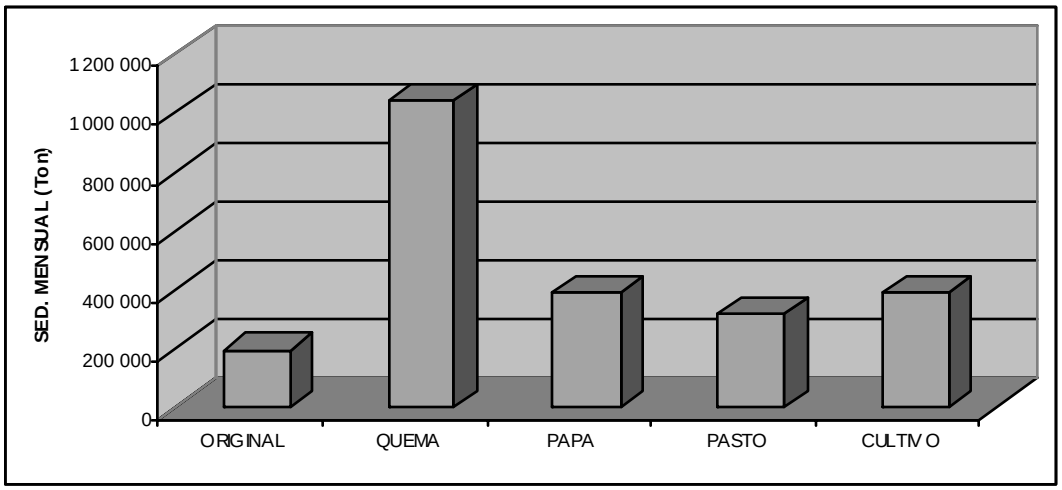


Figura 30. Sedimento Mensual Producido

Es evidente la cantidad adicional de sedimento que produciría la cuenca en la eventualidad que se presentara un cambio en el uso del suelo actual. Según el resultado del modelo el caso más crítico sería el de un incendio forestal, lo cual es consistente con la realidad, ya que como consecuencia de las quemas el suelo queda completamente expuesto a la erosión.

9.3. Análisis de Resultados de la Simulación de otros escenarios.

Con el análisis realizado en el presente capitulo queda evidenciado que en la eventualidad que hubiera un cambio radical en el uso del suelo, la disponibilidad del recurso hídrico, como un servicio prestado por el ecosistema, no sería objeto de gran preocupación; como se demostró este disminuiría pero en proporciones inferiores al 10%. De igual forma, la vegetación nativa como elemento de almacenamiento temporal no resulta ser tan importante para amortiguar las crecientes, salvo en el caso de las quemas no controladas, ya que la atenuación de los puntos máximos de las gráficas no es muy representativa. Finalmente se ve que el verdadero servicio prestado por el páramo está relacionado con el control de la erosión; la vegetación presente sirve como elemento de amortiguación en la caída de las gotas de agua, al igual que no permite que el esfuerzo cortante producido por el agua al suelo, en su viaje hacia los canales recolectores, erosione la capa superficial. Este tema toma mayor relevancia si se tiene en cuenta que el punto utilizado para todo el análisis del presente proyecto está ubicado unos 30 metros aguas arriba del túnel de trasvase, que lleva las aguas del río Guatiquía al Embalse de Chuza, que como se explicó en el capítulo 2 del presente documento, es la fuente principal para abastecimiento de agua potable, para la ciudad de Bogota. Así las cosas una mayor cantidad de sedimentos entregados al embalse, representa un período de vida útil inferior, lo que representa una pérdida económica al largo plazo. En el plazo inmediato este exceso de sedimentos genera pérdidas económicas, puesto que la concentración de los sólidos suspendidos en el agua aumenta, lo cual genera un incremento en la turbiedad del agua derivada a través de los túneles hasta la Planta de Tratamiento de Agua Potable Francisco Wiesner.

10. CORRIDA DEL MODELO CON PRECIPITACION HORIZONTAL

Una vez calibrado y verificado el modelo se busca conocer la incidencia que tiene para el caso de estudio, la precipitación horizontal; para ello se generaron series, con el fin de observar el cambio en el ajuste que presentaban los datos observados y los simulados:

10.1. Generación de las series de Precipitación Horizontal:

Para llevar a cabo la generación de las series de precipitación horizontal, se buscó, utilizando los datos climatológicos de la estación Chingaza Campamento, la altura de la base de las nubes. Para lo cual se siguió el modelo Atmosférico de Parcelas Implementado por Navarrete (2004); en este se busca conocer la altura del punto de condensación (base de nube) de la masa de aire húmedo, con la que se relaciona la precipitación horizontal sobre la cuenca.

En este fenómeno se supone que los procesos son adiabáticos, es decir que no se presenta intercambio de calor entre la masa de aire y su entorno, por lo que se supone que en la atmósfera, el enfriamiento del aire ascendente no saturado se debe sólo al trabajo por expansión el cual ocurre a una tasa Γ (Tasa adiabática seca) y en la masa de aire saturado a una tasa tasa Γ'(Tasa pseudoadiabática saturada). A continuación se presenta un esquema que ilustra lo enunciado.

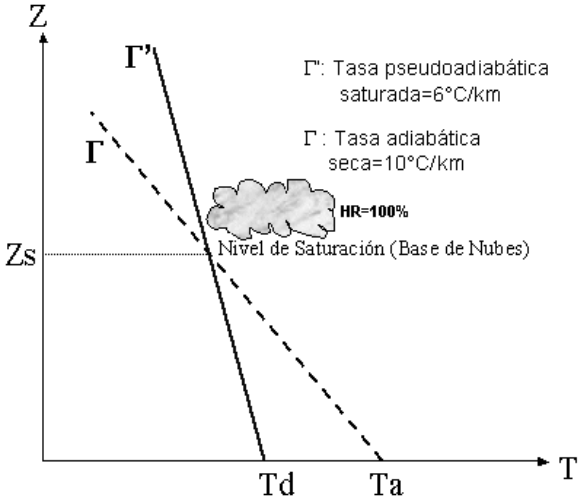


Figura 31. Esquema de Modelo Atmosférico

En la figura anterior *Ta* es la temperatura del aire y *Td* la temperatura de punto de rocío (temperatura a la cual el aire húmedo lograría condiciones de saturación). Según esto,

$$T_a - \Gamma . z_s = T_d - \Gamma' . z_s$$

Donde z_s es la altura del nivel de saturación a partir del lugar donde fueron medidos T_a y T_d. De acuerdo a lo anterior, la base de nubes puede estimarse con

$$Zs_t = Zest + \frac{Ta_t - Td_t}{\Gamma - \Gamma'}$$

Donde z_{est} es la altitud en msnm de la estación en la cual fue registrada la información climatológica.

Navarrete (2004), calcula la temperatura del punto de rocío por dos métodos diferentes, tal como se presenta a continuación.

El primer método utiliza la ecuación

$$HR \approx \left[\frac{112 - 0.1T_a + T_d}{112 + 0.9T_a} \right]^8 x100$$

A partir de la cual despeja la variable Td.

El segundo método el cual fue presentado en "*Weather and hydrology, Hydrology for Engineers*", busca a partir de un valor de humedad relativa

conocido, estimar la Td en un rango de Ta de –40 a 50°C, para ello utiliza la ecuación

$$T - T_d \approx (14.55 + 0.114T)X + [(2.5 + 0.007T)X]^3 + (15.9 + 0.117T)X^{14}$$

Donde, X es el complemento de la humedad relativa expresada como fracción decimal, $X = 1 - HR * 0.01$

A partir del promedio de la Td obtenida por los dos métodos, Navarrete (2004) obtiene la altura del punto de condensación, para las temperaturas máximas medias y mínimas. Finalmente se realiza un promedio ponderado y obtiene una serie que representa la base de las nubes.

Teniendo en cuenta que Navarrete (2004), utilizó los datos climatológicos de la estación Chingaza Campamento, y comoquiera que esta se encuentra en el área del presente estudio, se utilizaron las series obtenidas en dicho estudio para generar las series de precipitación horizontal para las estaciones pluviográficas de este proyecto, para ello se realizó la siguiente aproximación.

Obtención de Series de Precipitación Horizontal:

Para generar las series de precipitación que incluyeron el efecto de la precipitación horizontal, se utilizaron dos metodologías; en la primera se comparó la altura del punto de condensación de cada uno de los días del período de estudio, con la altura a la cual se encuentra cada estación utilizada en el estudio; en el caso de que dicha estación se encuentre a una altura superior a la definida para ese día como la altura de la base de las nubes, se obtiene el área correspondiente a la diferencia entre las dos elevaciones mencionadas; de igual forma se realiza para cada uno de los días del período y adicionalmente se obtiene la sumatoria de todas las áreas calculadas. En el siguiente esquema se presenta la representación gráfica de la altura de nubes así como el nivel en el cual están ubicadas las estaciones de interés.

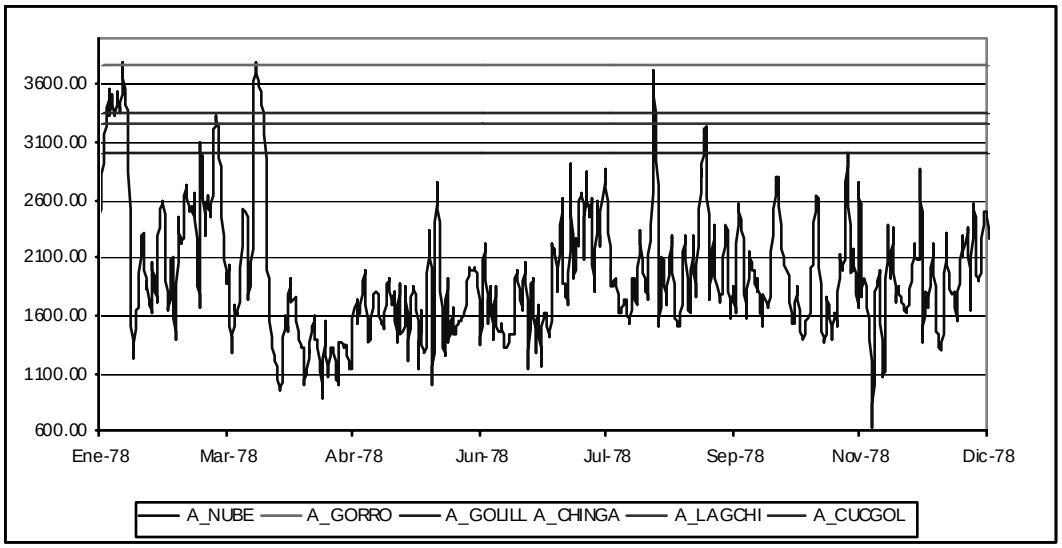


Figura 32. Altura de Nubes y Estaciones área de Interés

En la gráfica anterior se entiende que si la altura de la nube está por debajo de la línea horizontal que representa el nivel de cada estación, se genera precipitación horizontal, de lo contrario el valor de la precipitación horizontal para ese día y esa estación es cero.

Partiendo de los resultados encontrados en páramos de Costa Rica (Dorewend, 1979; citado por Bruijnzeel y Proctor, 1973), cuyos estudios concluyeron que el valor de la precipitación horizontal es aproximadamente el 18% de la precipitación vertical, se supuso que la sumatoria de las áreas, para los días en que se presenta precipitación horizontal, al ser multiplicada por una constante de transformación debería dar como resultado el 18% de la precipitación vertical medida para esa estación. Tal como lo representa la siguiente ecuación. $K_{PH} * \sum A = 0.18 * PV$

Así las cosas se obtuvieron los siguientes resultados, para cada una de las estaciones en cuestión.

ESTACION	ALT (msnm)	PREC VERT	AREA NUBES	PREC H	K_{PH}
P_GORRO	3750	2569	822492.99	462.46	0.00056226
P_GOLILL	3008	2963	556930.67	533.30	0.00095758
P_CHINGA	3250	1691	642709.26	304.38	0.00047359
P_LAGCHI	3250	1724	642709.26	310.32	0.00048283
P_CUCGOL	3350	2412	678443.24	434.14	0.00063991

Tabla 28. K_{PH} Para obtener el valor de la Precipitación Horizontal

Finalmente se multiplica el valor de la precipitación vertical de cada una de las estaciones por $(1+K_{PH})$, y se obtiene la nueva serie de lluvias que incluye la precipitación horizontal y vertical.

El segundo método buscaba incorporar la precipitación horizontal, incluso en aquellos días en los cuales no había presencia de precipitación vertical. Entonces se dividió el valor correspondiente al 18% de la precipitación vertical entre el número de días en los cuales había presencia de nubes para cada una de las estaciones pluviográficas. Posteriormente se sumó este valor al de la precipitación vertical para todos aquellos días en los que se presentó neblina para cada una de las estaciones. Los resultados de las series de caudales arrojadas por el modelo fueron muy similares, por lo que es indiferente para el ejercicio en cuestión la serie de precipitación horizontal con la cual se alimente el modelo.

10.2. Resultados de la Simulación Incorporando Precipitación Horizontal

Con las series de precipitación totales se dispuso a alimentar nuevamente el modelo para los años con los cuales este había sido calibrado y validado; adicionalmente se ajustaron otros parámetros relacionados con la recarga de acuíferos, con el fin de buscar mejores ajustes al implementar el efecto de la precipitación horizontal. En la siguiente gráfica se presenta el resultado de dicho ejercicio.

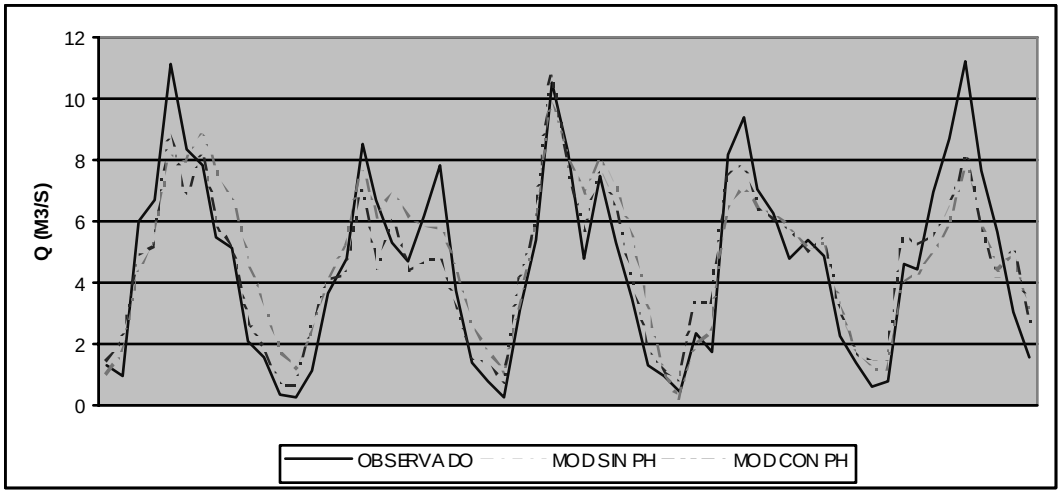


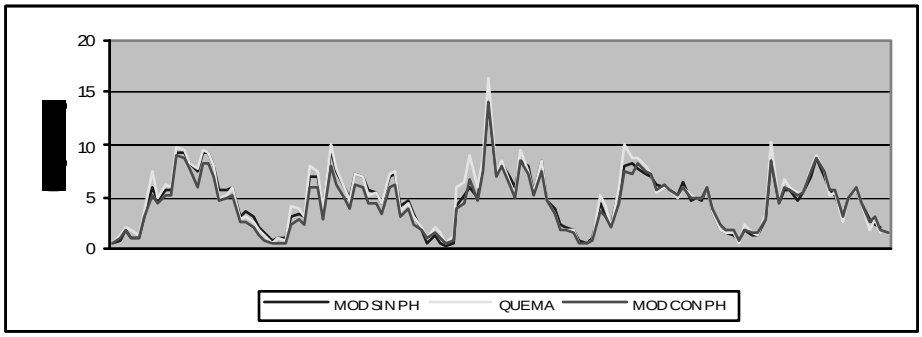
Figura 33. Series Observada y Modelada con y sin PH

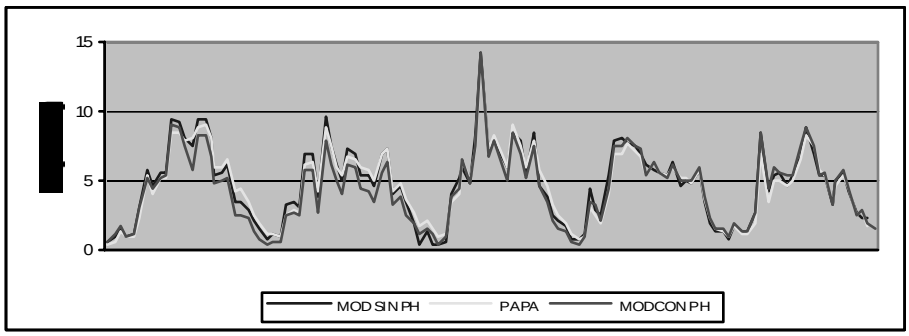
Como se puede observar gráficamente, la serie que incluye la Precipitación Horizontal y el ajuste en los parámetros relacionados con la recarga de acuíferos, logra representar de una mejor forma los datos medidos en la estación de control. Adicionalmente se obtuvo el coeficiente de correlación para los dos escenarios de precipitación estudiados, cuyos resultados se presentan resumidos en la siguiente tabla y confirman una mayor precisión del modelo al incluir la precipitación horizontal.

PROCESO	AÑO	AJUSTE (R2)	
		SIN PH	CON PH
CALIBRACION	1978-1979	87.45%	89.07%
VERIFICACIÓN	1980	95.62%	97.64%
	1981	89.94%	94.54%
	1982	90.17%	84.07%
	ACUMULADO	**85.88%**	**88.86%**

Tabla 29. Ajuste del Modelo con y sin PH

10.3. Simulación de otros escenarios Incorporando Precipitación Horizontal





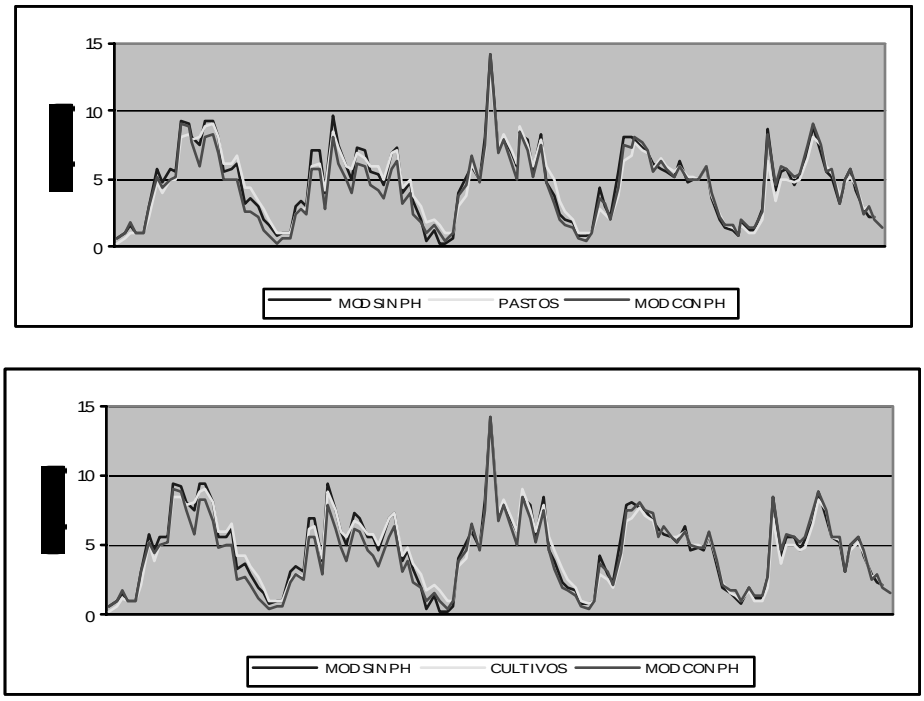


Figura 34. Respuesta de la Cuenca Ante Otros Escenarios con PH

Al comparar las series simuladas no se evidencia una diferencia importante entre aquellas que incluyen precipitación horizontal y las que no lo hacen.

De las gráficas anteriores se ve cómo el incorporar al modelo la precipitación horizontal y realizar simulaciones suponiendo otros escenarios. Al analizar la disponibilidad del recurso hídrico, se puede observar cómo éste, sí disminuye al no tener vegetación; esto debido a que la masa de aire húmedo no encuentra un obstáculo que la intercepte y de esta forma genere las gotas de lluvia que se han de incorporar al suelo.

10.4. Análisis de Resultados de la Modelación, Incorporando la Precipitación Horizontal

En general el modelo presenta mayores ajustes al incorporar la precipitación horizontal y la modificación de las variables relacionadas con la recarga de

acuíferos profundos, lo cual indica que al modelar la interceptación de la masa de aire húmedo por la vegetación, se representa de una mejor manera la realidad, lo que da a entender la importancia de considerar esta variable en los estudios que se lleven a cabo en este tipo de ecosistemas. Al comparar las series generadas por el modelo al incorporar precipitación horizontal, con aquellas generadas al simular algunos cultivos, se observa una leve reducción en la disponibilidad del recurso, esto como consecuencia de la carencia de barreras que intercepten la masa de aire húmedo en movimiento. Sumado a la demanda que presentan las especies cultivadas.

11. APLICACIONES DEL MODELO EN TOMA DE DECISIONES

Con el fin de presentar algunas aplicaciones y utilidad de la herramienta desarrollada se presenta un análisis de tipo económico, cuyos datos de entrada fueron obtenidos del modelo implementado en el presente proyecto.[2]

El trabajo realizó un análisis costo eficacia sobre diferentes estrategias de control de la erosión sobre la cuenca alta del río Guatiquía. Se calcularon los costos y el control de la erosión asociados a cada tipo de intervención. Posteriormente, se ordenaron las medidas de menor a mayor costo-eficacia (curva de costo marginal) y se cruzaron la curva de costo marginal con la de beneficio marginal, para así determinar el punto óptimo de intervención por parte de la empresa. En la siguiente tabla se presentan las medidas contempladas para realizar el análisis.

MEDIDA	ESTRATEGIA DE INTERVENCION		MODELADA EN SWAT	SEPARADA POR HRU
Estabilización de Taludes	Control de agua	Superficial		X
		Subsuperficial		
		Subterránea		
		Descole		
	Contención	Gaviones Trinchos		
Cobertura	Reforestación	Siembras p nativas	X	
	Protección	Biomato	X	X
Control de Ganadería	Guardabosques		X	X
	Compra de Tierra de Privada		X	
Control de Incendios Forestales	Brigada contra incendios		X	

Tabla 30. Medidas de Intervención Contempladas

[2] Obtenido del artículo "Priorización de estrategias de intervención en el Sistema Chingaza" presentado en el Congreso Internacional de los servicios ecosistémicos en los Neotropicos, Valdivia Chile, Noviembre de 2006 (Tapasco, Lombana y Usme, 2006).

11.1 Costos de las diferentes estrategias de intervención

Se calcularon los costos de cada una de las posibles medidas de intervención utilizando como base, registros históricos y estudios elaborados para el Acueducto de Bogotá, los cuales son relacionados en la siguiente tabla.

Intervención	Unidad	Costo unitario ($USD)
Siembra Especies Nativas	m2	0,2
Trinchos	Ml	0,5
Biomato	m2	7
Gaviones	m3	48
Control de agua	Ml	61
Compra predios	ha/año	267
Guardabosques	Año	15.004
Brigada contra incendios	Temporada (año)	17.391

Tabla 31. Costo Medidas de Intervención

11.2. Control de la erosión asociada a las diferentes estrategias de intervención

Para cada una de las medidas estudiadas se calculó el número total de toneladas de sedimento que se dejarían de generar en la cuenca, como resultado de la implementación de dicha medida de intervención. A continuación se describe brevemente la metodología seguida para realizar la estimación mencionada.

Brigada de incendios: con registros históricos se calculo el promedio de hectáreas que se dejan de quemar por causa de los incendios forestales en todo el Sistema Chingaza y posteriormente, se calculó la proporción correspondiente a la cuenca de estudio. Finalmente, se estimó a través del modelo implementado en SWAT, la cantidad promedio de toneladas de

sedimento generado de acuerdo al quemarse el número de hectáreas antes calculado.

Guardabosque: Esta es una medida orientada a evitar la presencia de ganado en predios de la EAAB, la cual esta asociada con cierto sector de la cuenca (ver gráfico). Se modelo a través del SWAT, el cambio de cobertura de pastizales a matorrales, y se calculó la diferencia de sedimento total propiciado por esta medida.

Compra de predios: mediante el modelo SWAT se corrieron dos escenarios de cobertura para los predios privados (Gráfico), la cobertura actual, y otro escenario de regeneración natura, representados por pastizal y matorral-chuscal respectivamente. Se calculo la erosión evitada promedio para cada URH.

Medidas de control de erosión por deslizamientos superficiales (control de agua, gaviones y trinchos): se determino el área impactada de las medidas, la cantidad de erosión evitada, y la efectividad de cada una de estas medidas. Se tomaron los puntos a intervenir según los diseños de las obras para la estabilización de taludes del Sistema Chingaza (Hidromecánicas, 2003), y se calculó el total de la erosión evitada por cada medida.

Siembra especies nativas: A través del modelo implementado en SWAT, se determinó la cantidad de erosión evitada promedio, al reforestar con especies nativas para cada una de las URH, esta estrategia se modelo como el cambio de suelo desnudo a matorral.

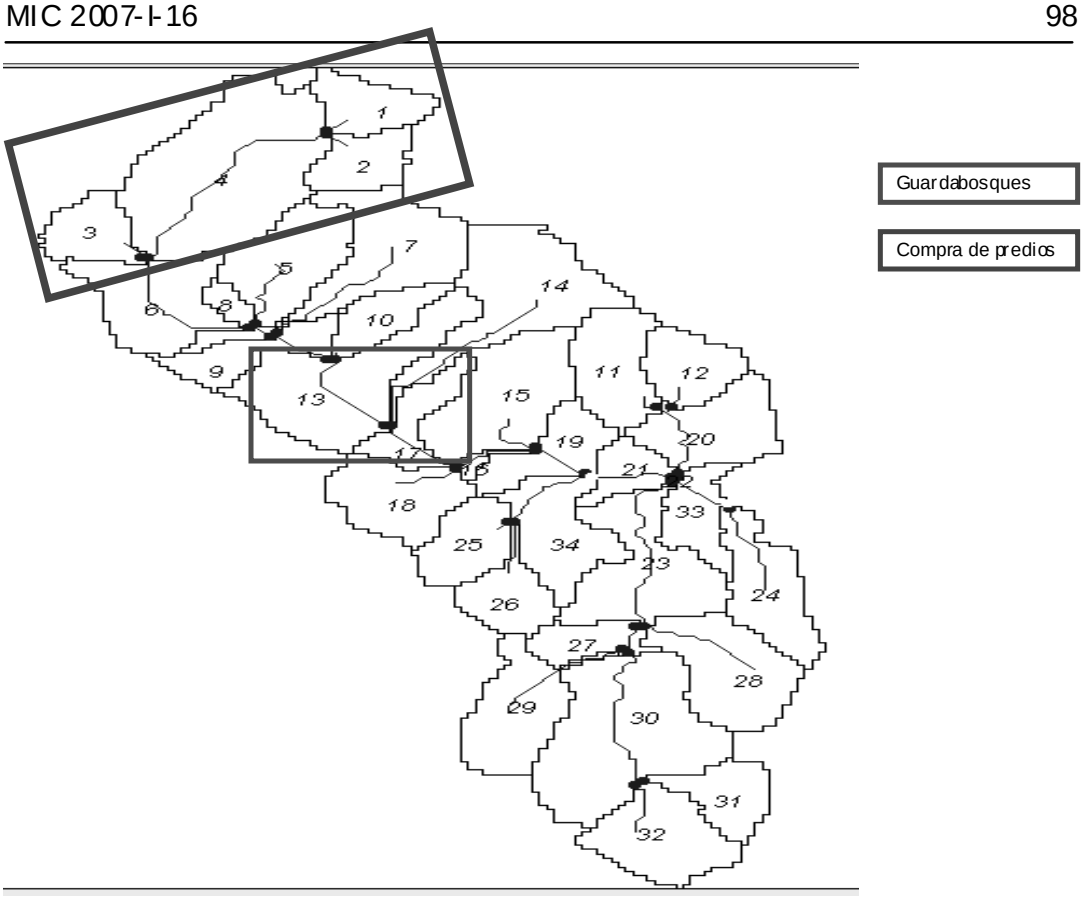


Figura 35. Sectores de Intervención de las medidas

Con las metodologías expuestas anteriormente se dispuso a calcular las toneladas de sedimento que se dejan de generar al año, gracias a las intervenciones realizadas; los valores se presentan en la siguiente tabla.

Medida	Unidad	Control erosión (ton)
Brigada contra incendios	Temporada (año)	805
Guardabosque	Año	677
Compra predios	ha/año	4
Control de agua	Ml	1
Gaviones	M3	1
Trinchos	Ml	0,05
Biomato	m2	0,004
Siembra sp	m2	0,001

Tabla 32. Control de Erosión por Medida de intervención

11.3. Construcción de la curva de costo marginal

Se calculó el valor del costo eficacia de cada una de las medidas enunciadas ($/ton), el cual resultó de dividir el costo de la medida por la cantidad de toneladas de erosión que se evitarían de ser implementada dicha estrategia. Se ordenaron de menor a mayor valor, y se graficó teniendo en cuenta el valor máximo de erosión que podría evitar cada medida. Es de aclarar que para las medidas siembra de especies nativas, instalación de biomanto y compra de predios; se establecieron puntos independientes de control de erosión por cada una de las unidades de respuesta hidrológica. En la tabla se presentan las estrategias contempladas con sus respectivos valores de costo eficacia y la cantidad máxima de cada una de estas estrategias que podría ser implementada.

ESTRATEGIA	COSTO EFICACIA ($/TON)	MAX TON	ESTRATEGIA	COSTO EFICACIA ($/TON)	MAX TON
Contención - Trinchos	$ 23 000	4800	Siembra sp URH 29	$ 1 261 756	47
Brigada de incendios	$ 49 711	805	Siembra sp URH 60	$ 1 408 446	60
Compra de tierra URH 2	$ 58 890	168	Siembra sp URH 70	$ 1 458 664	87
Compra de tierra URH 4	$ 66 987	6	Siembra sp URH 42	$ 1 620 012	76
Siembra sp – URH 59	$ 69 066	245	Compra de tierra URH 7	$ 1 854 035	7
Siembra sp – URH 61	$ 69 554	61	Biomanto URH 37	$ 1 916 337	1037
Contención - Gaviones	$ 71 429	5600	Compra de tierra URH 5	$ 2 173 928	4
Guardabosque	$ 72 952	473	Siembra sp URH 37	$ 2 214 892	21
Siembra sp – URH 80	$ 78 766	311	Biomanto URH 59	$ 2 332 467	310
Compra de tierra URH 1	$ 80 722	130	Biomanto URH 61	$ 2 363 154	76
Manejo de aguas – Control de agua	$ 125 729	11200	Biomanto URH 80	$ 2 669 896	392
Siembra sp URH 49	$ 460 496	64	Siembra sp URH 78	$ 2 773 113	56
Siembra sp URH 23	$ 537 120	75	Siembra sp URH 81	$ 2 860 206	46
Siembra sp URH 27	$ 555 366	58	Compra de tierra URH 8	$ 3 007 581	8
Siembra sp URH 40	$ 593 813	157	Siembra sp URH 33	$ 3 521 590	29
Siembra sp URH 26	$ 627 846	139	Compra predios URH 6	$ 4 311 226	3
Compra de tierra URH 3	$ 1 072 733	2			

Tabla 33. Clasificación de las Estrategias de Intervención

A partir de los valores de costo eficacia y el acumulado de la reducción de toneladas de sedimento que se produce al ir implementando en orden las estrategias planteadas se construye la siguiente gráfica.

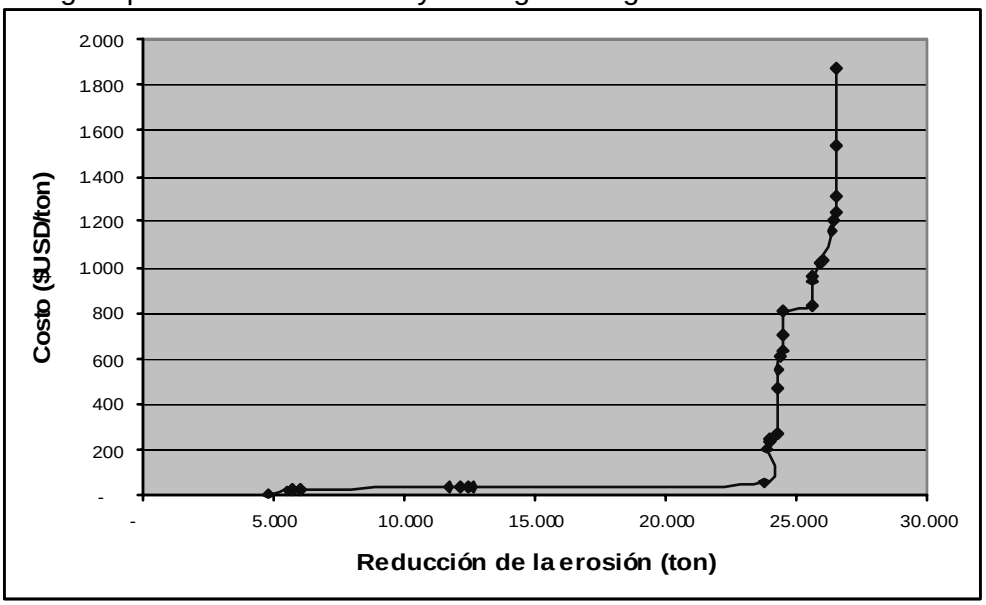


Figura 36. Curva Costo Marginal

Posteriormente y partiendo de los costos actuales de tratamiento de la Planta Francisco Wiesner, se construyó la curva de beneficio marginal, representando los costos de tratamiento que se evitarían al mejorar la calidad del agua. Esta curva de beneficio marginal se cruza con la curva de costo marginal, y el punto de intersección (CM=BM) es el punto óptimo de intervención (minimización de los costos de intervención). Si la empresa decide realizar obras en un orden de intervención diferente al planteado en la curva de costos marginal, estaría siendo ineficiente al incurrir en costos mayores innecesarios. Si la empresa no realiza estas obras, o las realiza en una menor cantidad de la cantidad óptima (en el orden definido por la curva de costo marginal), la empresa perdería dinero, ya que estaría incurriendo en unos costos de tratamiento mayores que se podrían evitar a menor costo, al controlar la erosión en las cuencas. Si la empresa realiza más actividades de las definidas por la cantidad óptima, la empresa estaría incurriendo en unos costos mayores a los que realmente estaría evitando, por lo cual estaría perdiendo dinero.

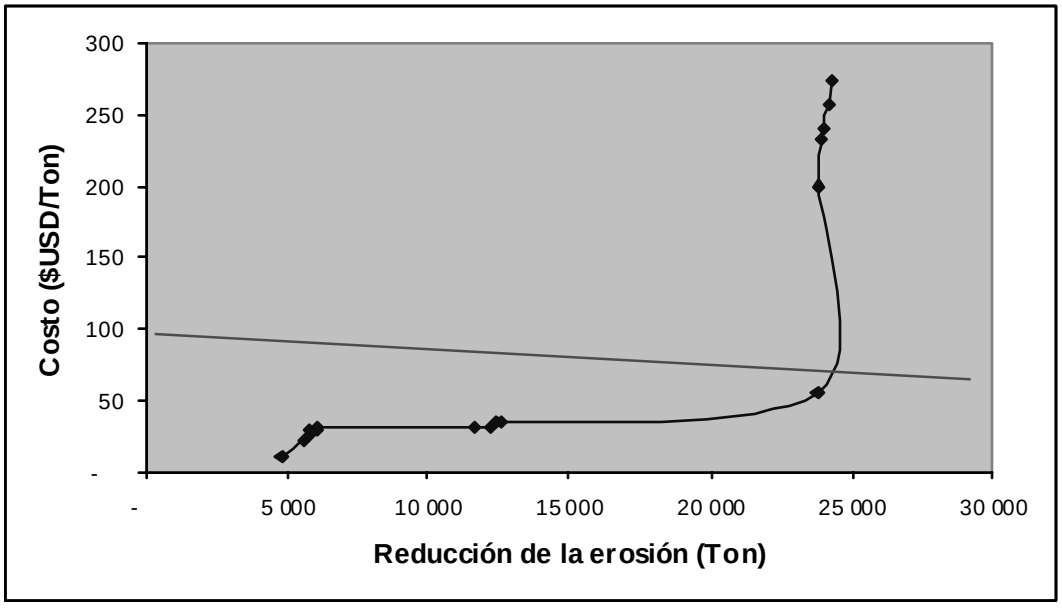


Figura 37. Curva Costo Marginal y Beneficio Marginal.

Finalmente se dividen las estrategias de intervención en 3 grupos, según el costo de cada medida. En la siguiente tabla se presenta el análisis realizado.

	Reducción erosión (Ton)	%	Costo total ($USD)	%	Costo promedio
Fase I	12.599	47	283.208	9	22
Fase II	11.972	45	912.883	29	76
Fase III	1.982	7	1.920.588	62	969
Total	**26.553**		**3.116.680**		

Tabla 34. Control de Erosión por Grupos de Intervención

De la tabla anterior se puede observar cómo con el 9% de la inversión se controla el 47% de la sedimentación que produce de la cuenca, al utilizar las medidas mas costo-eficaces. De igual forma y analizando la implementación de las medidas menos costo-eficaces se observa que para controlar el 7% final de la erosión total se requiere invertir el 62% del costo total de controlar la sedimentación de la cuenca.

Con estos resultados se pueden ordenar las diferentes medidas de intervención, según su ejecución.

Fase I	**% costo**	**% erosión**
Contención – Trinchos	17	38
Brigada contra incendios	6	6
Compra de tierras	3	2
Siembra sp	7	5
Contención – Gaviones	61	44
Guardabosques	5	4
	$USD	**Ton**
Total	283.208	12.599
Fase II	**% costo**	**% erosión**
Manejo de aguas - Control de agua	67	94
Siembra sp	32	6
Compra de tierra	1	0,08
	$USD	**Ton**
Total	912.883	11.972
Fase III	**% costo**	**% erosión**
Biomanto	89	91
Compra de predios	1	1
Siembra sp	10	8
	$USD	**Ton**
Total	1.920.588	1.982

Tabla 35. Control de Erosión Detallada por Grupos de Intervención

El objetivo de este ejercicio es demostrar la utilidad de la herramienta generada en las estrategias de intervención, la cual de ser implementada ahorraría costos importantes a las empresas. Es de aclarar que el análisis aquí presentado se realizó teniendo en cuenta la erosión que dejaría de generarse en la cuenca, al implementar diferentes estrategias de control y para elaborar la curva de beneficio marginal se utilizaron los costos actuales que representa en el tratamiento del agua potable, el remover una tonelada de sediento del agua.

12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con el levantamiento de información realizado para llevar a cabo el presente proyecto, se evidenció la problemática actual de los páramos los cuales requieren de una legislación ambiental severa que provea a las autoridades competentes de herramientas jurídicas para preservar los ecosistemas paramunos; sin embargo desde un ámbito netamente técnico se debe trabajar con el fin de conocer de una manera precisa la forma como se desarrollan los diferentes procesos físicos, químicos y biológicos en los páramos, esto con el fin de anticiparse a los cambios que se puedan generar, para así preservar de una mejor forma el páramo, cuyo importancia es invalorable

El programa AVSWAT2000, permite modelar de una manera adecuada los procesos físicos involucrados en el fenómeno lluvia-escorrentía para las cuencas ubicadas en ecosistemas de páramo, así se corroboró dados los ajustes arrojados al comparar las series de caudales modeladas con las observadas para una estación en especial. El modelo implementado tiende a subvalorar los procesos asociados con los sumideros de agua, lo que generó unas series de caudales con valores ligeramente superiores a los observados en la realidad.

Después de realizar simulaciones para posibles escenarios de cambios antrópicos se observó que un cambio radical en el uso del suelo, por la implantación de cultivos, genera reducciones leves en la disponibilidad del recurso hídrico, las cuales están asociadas a la evapotranspiración de las plantas así como a la demanda de las mismas para generar biomasa. Por otro lado y contrario a lo esperado se observó que el poder de amortiguamiento de crecientes, de la vegetación actual no es tan importante y que de implementarse algún tipo de cultivo, este también serviría para realizar un almacenamiento temporal de agua una vez presentado un evento de precipitación de magnitud importante. Para el caso de los incendios forestales, los cuales se modelaron como suelo completamente desnudo, se observó que

de presentarse, se incrementarían los caudales altos hasta en un 20%, lo que generaría crecientes mas severas con los perjucios que estas pueden causar. Como resultado final de este análisis se observó que el gran impacto, que el cambio en el uso del suelo genera, está asociado con la cantidad de sedimento que aporta la cuenca a los cauces de los ríos; se comprobó que se puede aumentar hasta en un 500% la cantidad de sedimento aportada por la cuenca. Esto es más crítico si se tiene en cuenta que el objeto del hidrosistema en cuestión, es el de recolectar agua para abastecimiento, lo que exige de un tratamiento con el fin de potabilizar el agua cuyo costo está asociado a la turbiedad la cual esta relacionada directamente con la concentración de los sedimentos en ele agua.

Con el modelo implementado de precipitación horizontal, se comprobó que evidentemente esta variable es relevante, a la hora de realizar estudios en ecosistemas de páramo, al alimentar al programa con las series que incorporaban la precipitación horizontal se observaron unos mejores ajustes para todos los períodos analizados, con lo cual se deduce que para la cuenca en cuestión es importante la cantidad de agua que puede ser interceptada por la vegetación.

Finalmente se comprobó que el modelo es útil a la hora de emplearse como una herramienta de toma de decisiones, al utilizar datos generados por el modelo implementado, como alimento de un análisis económico que entregó como resultado un esquema de intervención óptimo, con el fin de disminuir los costos asociados al tratamiento del agua potable.

Es necesario investigar de una manera exhaustiva las características de los suelos y la vegetación con el fin de generar entradas más precisas para este tipo de modelos, de tal forma que los datos que se utilizan para alimentar el programa tengan una validez irrefutable. De igual forma se debe mejorar las redes de toma de datos hidrológicos, esto con el fin de generar bases robustas que permitan a los investigadores desarrollar proyectos importantes, esto teniendo en cuenta que los datos disponibles no están completos y es necesario generar valores para completar las diferentes series lo cual va generando imprecisiones en las investigaciones que se realizan.

Como propuesta para investigaciones futuras que se realicen con la utilización de SWAT, se tiene el implementar una metodología de calibración automática y objetiva que genere juegos de parámetros de entrada, que representen un valor en el coeficiente de ajuste, y de esta forma adoptar como parámetros definitivos, aquella combinación que represente un mejor ajuste, de esta forma se asegura tener un modelo más preciso y que se adopta de una mejor manera a las condiciones reales.

Con el desarrollo de este proyecto se demostró cómo es posible tomar decisiones, que maximizan los beneficios de una empresa, a partir de investigaciones. Por esta razón sería interesante invitar a las instituciones a patrocinar proyectos investigativos, cuyos resultados además de generar una evolución en el estado del arte, representarían una ganancia económica para las empresas promotoras.

13. BIBLIOGRAFIA

Auditoría Ambiental Ltda. 2003. Plan de Manejo Ambiental Sistema Chingaza.

Beta Ambiental, U.T. 1999. Estudio de Impacto Ambiental para la ampliación del Sistema Chingaza.

Beta Ambiental. 2002. Plan de manejo Ambiental Indicativo para el Sistema Río Blanco. Bogotá.

Domínguez, D. F. 1999. *"Hidrología de Páramos, Modelación de la cuenca alta del río Blanco"*. Universidad de Los Andes. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Bogotá. Colombia

García P. Aspectos Básicos del Comportamiento de Suelos en Siembra Directa: Propiedades Físicas

Gradex S.A. 2005. *"Modelación Hidrológica de la Cuenca del Río la Vieja"* Bogotá, Colombia.

Hofstede, R. G. M. 1997. *"La importancia Hídrica del Páramo y aspectos de su manejo"*.1er Páramo Electrónic Forum, CONDESAN

IGAC. *Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras (Departamento de Cundinamarca)*. 2000 Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Subdirección e Agrología. Bogotá.

Lora C. 1999. *El Parque Nacional Natural Chingaza*.s.p. I Simposio taller de investigación para la región del PNN Chingaza. Ministerio del Medio Ambiente-Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales Naturales, Fundación Natura, Wildlife Conservation Society, Bogotá

Luteyn, , J. L. 1992. "Páramos: Why study them?". In *Páramos: An andean ecosystem under human influence*. H. Balslev & J.L. Luteyn, eds., London, Academic press.

Luteyn, J.L. 1999. Páramos: A check List of plant diversity in Páramo, geographical distribution and botanical literature, Memoirs of the New York botanical garden.

Madriñan S. "*Flora Ilustrada del Páramo de Chingaza*" Universidad de los Andes. Laboratorio de Botánica & Sistemática, Bogotá, Colombia

Merriam, R.A. (1973). "Fog Drip from Artificial Leaves in a Fog Wind Tunnel". Water Resources Research, Vol.9, No. 6.

Montenegro H, Malagon D. 1990. *"Propiedades Físicas de los Suelos"* Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá. Colombia.

Navarrete, J.D. 2004. *"Hidrología de Páramos, Modelación de la cuenca alta del río Blanco con AVSWAT2000"*. Universidad de Los Andes. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Bogotá. Colombia.

Suarez, T. 2005. *"Impacto del Cambio del Uso de la Tierra en la Respuesta Hidrológica de un Ecosistema de Páramo"* Universidad de Los Andes. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Bogotá. Colombia.

Vargas O. *"El Parque Nacional Natural Chingaza"* Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Biología, Bogotá, Colombia

Ven Te Chow, 1994 "*Hidrología Aplicada*" Ed. Mac Graw Hill, Bogota, Colombia.

Ven Te Chow, 1994 "*Hidráulica de Canales Abiertos*", Ed Mac Graw Hill, Bogotá, Colombia.