

**INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMATICO EN LA DINAMICA DE SEMIENTOS  
DEL SISTEMA HIDROLOGICO DE LA CUENCA DEL NEUSA.**

**PRESENTADO POR:**

DAYAM SORET CALDERON RIVERA  
LAURA MERCEDES LEMUS SANCHEZ

**Universidad Santo Tomas  
Facultad Ingeniería Ambiental  
Bogotá D.C.**

**2016**

**INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMATICO EN LA DINAMICA DE SEMIENTOS  
DEL SISTEMA HIDROLOGICO DE LA CUENCA DEL NEUSA.**

**DAYAM SORET CALDERON RIVERA  
LAURA MERCEDES LEMUS SANCHEZ**

**TRABAJO DE GRADO  
PARA OPTAR POR EL TITULO DE INGENIERIA AMBIENTAL**

**DIRECTOR:**

**DARWIN MENA RENTERIA  
INGENIERO AMBIENTAL Y SANITARIO  
MSc EN RECURSOS HIDRICOS**

**Universidad Santo Tomas  
Facultad Ingeniería Ambiental  
Bogotá D.C.**

**2016**

## **AGRADECIMENTOS**

Queremos agradecer...

a nuestros padres, por su constante apoyo, la constancia y amor que recibimos a diario durante este proceso de formación,

a nuestro director, el Ingeniero Darwin Mena, por confiar en nosotras y alentarnos en los momentos más difíciles para la realización del proyecto además de apoyarnos en el proceso tanto de formación profesional como personal,

a nuestro amigo, el Ingeniero Miguel Cañón, por la amistad que nos ha brindado, su constante colaboración, amabilidad y ayuda,

a la profesora Claudia Romero por su guía, enseñanza y paciencia en los momentos más difíciles del desarrollo del presente proyecto,

al Ingeniero Juan José Montoya, por su contribución en el aprendizaje sobre el software TETIS,

a la CAR, por brindarnos la información necesaria para el desarrollo del proyecto,

a nuestros amigos y compañeros, por el apoyo, el ánimo, la paciencia, la constancia y la fuerza; los cuales hicieron posible este proyecto.

## DEDICATORIA

*A mi familia por el apoyo incondicional, amor y comprensión,  
sentando las bases de responsabilidad,  
constancia y fuerza para el desarrollo  
de mi vida profesional y personal.*

*A Dios por iluminar el camino  
en los momentos decisivos.*

**Dayam**

*A mis papas, que me han enseñado a no desfallecer jamás,  
a mi hermano por darme fortaleza y enseñarme a confiar.*

*A mi familia, por estar siempre.*

**Laura**

## TABLA DE CONTENIDO

1	RESUMEN .....	10
2	INTRODUCCIÓN .....	11
3	OBJETIVOS .....	12
3.1	General .....	12
3.2	Específicos .....	12
4	MARCO CONTEXTUAL .....	13
4.1	Localización Geográfica.....	13
4.2	Morfometría de la cuenca .....	14
4.3	Geología .....	14
4.4	Suelo.....	15
4.5	CLIMATOLOGIA .....	16
4.5.1	Precipitación.....	16
4.5.2	Temperatura.....	19
4.5.3	Evaporación .....	20
4.6	Cobertura y uso de suelo.....	22
4.6.1	Uso de suelo actual.....	24
5	MARCO TEORICO.....	25
5.1	Cambio Climático.....	25
5.2	Impulsores del cambio climático .....	25
5.2.1	Forzamiento radiativo.....	25
5.3	Escenarios de cambio climático.....	26
5.4	Escenarios de cambio climático establecidos para Colombia en la tercera comunicación nacional ante la convención: Marco de las naciones unidas sobre cambio climático.....	27
5.4.1	Método de ensamble.....	28
5.5	Modelación hidrológica .....	29
5.6	Modelos hidrológicos distribuidos .....	30
5.6.1	TETIS.....	30
5.6.2	Modelo de erosión WEPP (Water Erosion Prediction Project) .....	34
6	MARCO METODOLOGICO .....	39
7	ANALISIS Y RESULTADOS.....	46
7.1	SELECCIÓN DEL MODELO.....	46

7.1.1	TETIS.....	46
7.1.2	WEPP.....	50
7.2	CAMBIO EN EL CLIMA EN LA ZONA DE ESTUDIO .....	51
7.3	RESULTADOS GENERALES DEL MODELO WEPP RESPECTO A LADERAS Y DRENAJES .....	54
7.4	PÉRDIDA DE SUELO Y TASA DE SEDIMENTACIÓN SEGÚN ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMATICO.....	57
7.4.1	CONDICIONES ACTUALES .....	57
7.4.2	RCP 2.6.....	61
7.4.3	RCP 8.5.....	65
7.5	ANÁLISIS SOCIO-ECONOMICO.....	70
8	CONCLUSIONES.....	73
9	RECOMENDACIONES .....	75
10	BIBLIOGRAFÍA .....	76

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Morfometría de la cuenca del Neusa.....	14
Tabla 2. Código y ubicación de estaciones meteorológicas dentro de la sub-cuenca del Neusa .....	17
Tabla 3. Porcentaje de área para las coberturas de la cuenca del Neusa, clasificación Nivel 3 Leyenda Corine Land Cover. ....	22
Tabla 4. Descripción de los métodos utilizados en la proyección poblacional. .	45
Tabla 5. Descripción de las estaciones utilizadas en la modelación con TETIS. ....	46
Tabla 6. Parámetros estadísticos y propios de la cuenca, calculados por TETIS. ....	49
Tabla 7. Tasas de cambio aplicadas a cada una de las variables climatológicas según el período de tiempo y RCP utilizado. ....	52
Tabla 8. Clasificación de laderas con sus respectivas características de tipo de suelo y cobertura vegetal. ....	54
Tabla 9. Pérdida de suelo y tasa de sedimentación en laderas para condiciones de clima actual. ....	58
Tabla 10. Variación temporal de la tasa de sedimentación y pérdida de suelo en los drenajes bajo la influencia del clima actual. ....	59
Tabla 11. Clasificación de la CAR para la pérdida de suelo por erosión. ....	60
Tabla 12. Variación temporal de la tasa de sedimentación y pérdida de suelo respecto al clima del escenario RCP 2.6 y los diferentes períodos de tiempo evaluados.....	61
Tabla 14. Variación temporal de la tasa de sedimentación y pérdida de suelo en los drenajes respecto al clima del escenario RCP 2.6 y los diferentes períodos de tiempo evaluados.....	64
Tabla 15. Variación temporal de la tasa de sedimentación y pérdida de suelo respecto al clima del escenario RCP 8.5 y los diferentes períodos de tiempo evaluados.....	66
Tabla 16. Variación temporal de la tasa de sedimentación y pérdida de suelo en los drenajes respecto al clima del escenario RCP 8.5 y los diferentes períodos de tiempo evaluados.....	69
Tabla 17. Porcentaje de reducción del volumen útil del embalse del Neusa ....	71

## LISTA DE GRAFICAS

Gráfica 1. Histograma de precipitación mensual multianual. ....	17
Gráfica 2. Histograma de temperatura media mensual multianual. ....	19
Gráfica 3. Histograma de evaporación mensual multianual. ....	21
Gráfica 4. Caudales observados vs. Caudales simulados, generados por TETIS.....	49

Gráfica 5. Cambio de la temperatura máxima respectiva a cada escenario de cambio climático comparados con los valores registrados en el período de 2000-2014.....	52
Gráfica 6. Cambio de la temperatura mínima respectiva a cada escenario de cambio climático comparado con los valores registrados en el período de 2000-2014.....	53
Gráfica 7. Cambio de la precipitación respectiva a cada escenario de cambio climático comparados con los valores registrados en el período de 2000-2014.....	53
Gráfica 8. Crecimiento del consumo VS. Volumen útil disminuido.....	72

### LISTA DE MAPAS

Mapa 1. Ubicación geográfica de la cuenca del Neusa. ....	13
Mapa 2. Distribución espacial de la geología presente en la zona .....	15
Mapa 3. Distribución espacial de los perfiles de suelo presentes en la cuenca. ....	16
Mapa 4. Distribución espacial de la precipitación anual de la cuenca. ....	18
Mapa 5. Distribución espacial de la temperatura en la cuenca del Neusa.....	19
Mapa 6. Distribución espacial de la evaporación en la cuenca del Neusa.....	21
Mapa 7. Distribución espacial de los tipos de cobertura vegetal en la cuenca del Río Neusa.....	23
Mapa 8. Ubicación geográfica de las estaciones utilizadas en la modelación en TETIS.....	47
Mapa 9. Modelo Digital de Elevación (DEM), resolución 30x30 utilizado en la modelación con el software TETIS. ....	48
Mapa 10. Zona de estudio escogida para la modelación en WEPP .....	51

### LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Descripción de los 4 caminos representativos de forzamiento radiativo .....	27
Figura 2. Esquema conceptual del modelo hidrológico TETIS.....	31
Figura 3. Diagrama de proceso hídrico del modelo SWRRB .....	35
Figura 4. Diagrama de flujo del proceso metodológico .....	41
Figura 5. Distribución espacial de las laderas generadas por WEPP dentro del área de estudio. ....	56
Figura 6. Ubicación espacial de los drenajes generados por WEPP en el área de estudio. ....	57
Figura 7. Pérdida de suelo en condiciones climáticas actuales .....	58
Figura 8. Distribución especial de pérdida de suelo para la zona de estudio seleccionada.....	61
Figura 9. Pérdida de suelo y deposición de sedimentos para el escenario de cambio climático RCP 2.6, período de tiempo 2011-2040 .....	62

Figura 10. Pérdida de suelo y deposición de sedimentos para el escenario de cambio climático RCP 2.6, período de tiempo 2041-2070 .....	63
Figura 11. Pérdida de suelo y deposición de sedimentos para el escenario de cambio climático RCP 2.6, período de tiempo 2071-2100 .....	63
Figura 12. Pérdida de suelo y deposición de sedimentos para el escenario de cambio climático RCP 8.5, período de tiempo 2011-2040 .....	66
Figura 13. Pérdida de suelo y deposición de sedimentos para el escenario de cambio climático RCP 8.5, período de tiempo 2041-2070. ....	67
Figura 14. Pérdida de suelo y deposición de sedimentos para el escenario de cambio climático RCP 8.5, período de tiempo 2071-2100. ....	67

## 1 RESUMEN

La pérdida del suelo es un problema global que afecta de manera directa a las zonas de productividad y diversidad del suelo en el mundo. Adicional a esto el cambio climático que ha venido incrementándose con mayor intensidad en los últimos años por las actividades antrópicas industriales [1], tiene una influencia bastante alta dentro del ciclo hidrológico y de sedimentos, siendo esto un posible limitante para las obras civiles hidráulicas que han sido construidas con el objetivo de aprovechar el recurso hídrico; por ejemplo los embalses.

En el presente proyecto se realizó una modelación de la dinámica de sedimentos a partir del uso de dos software diferente para la modelación de condiciones actuales: el programa *Water Erosion Prediction Project* (WEPP, por sus siglas en inglés) y el modelo TETIS. Con el objetivo de identificar cuál de los modelos pudiese llegar a ser más práctico para aplicarlo en la zona de estudio, respecto a los posibles resultados sino también en la practicidad, funcionalidad, fácil obtención y pre-procesamiento de los parámetros de entrada.

Respecto a lo anterior las condiciones futuras de clima fueron evaluadas con el modelo WEPP. Se realizó un análisis de eficiencia bajo la solución de la ecuación del Error Cuadrático medio dando como resultado un valor de 0.602 considerando este como un ajuste aceptable del modelo.

Paras las condiciones actuales se obtuvo un promedio de pérdida de suelo de 1.7 Ton/ha/año. Para condiciones climáticas futuras bajo cualidades del escenario RCP 2.6 se obtuvo un promedio de 1.6, 1.01, 1.47 Ton/ha/año evaluados en los períodos de tiempo de 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100, respectivamente. La cuenca dio un resultado promedio de 1.77, 6.2 y 5.8 Ton/Ha/año para los períodos nombrados anteriormente, respectivamente, para el escenario de cambio climático RCP 8.5.

Se evidenció que el embalse no se ve altamente afectado por el cambio en la dinámica de sedimentos y tasa de pérdida de suelo evidenciado en las laderas que influyen en su funcionamiento, debido a que la disminución del volumen útil de este en las condiciones más extremas es de: 1% respecto al volumen actual que es de 86.2 millones de m<sup>3</sup>.

## 2 INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha visto una variación significativa en las condiciones climáticas tanto globales como locales. Por ejemplo en la zona de la sabana de Bogotá y el Magdalena medio se ha visto un incremento en la temperatura y precipitación; esto es debido a la cantidad de emisiones de gases efecto invernadero, concentrados en la atmosfera ya sea por origen antrópico o natural [1].

Dichos cambios en el clima podrían generar entre diversas consecuencias el aumento y/o cambio en la pérdida de suelo por erosión. Lo cual tiene efectos no solamente en el sitio de producción sino también en el conjunto de elementos que la rodea [2]. Por ejemplo los cauces en donde es posible sean depositados los sedimentos y aquellos sistemas hidrológicos cercanos a las laderas generando posibles afectaciones sobre la vida útil de estos sistemas.

Para evitar los efectos adversos del aumento de la pérdida de suelo dentro una cuenca o sistema hidrológico perteneciente a esta se deben plantear y considerar recomendaciones y propuestas de mitigación basados en estimaciones generadas a partir de modelos de erosión donde se pueda tener en cuenta la tasa de cambio de las condiciones climáticas, el tipo de suelo y el tipo de la cobertura; debido a que estas dos últimas características son determinantes para la generación de pérdida de suelo y por lo tanto sedimentación en laderas y cauces.

En el presente trabajo se realiza la modelación de pérdida de suelo por erosión y tasa de sedimentación en la cuenca alta del Río Neusa siendo esta la zona aledaña del embalse, debido a que la zona baja de esta no presenta sedimentación representativa ni tiene afectaciones sobre el embalse ya que este se encuentra en una vertiente diferente.

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 General**

Evaluar la dinámica de sedimentos en el sistema hidrológico de la cuenca del Neusa.

#### **3.2 Específicos**

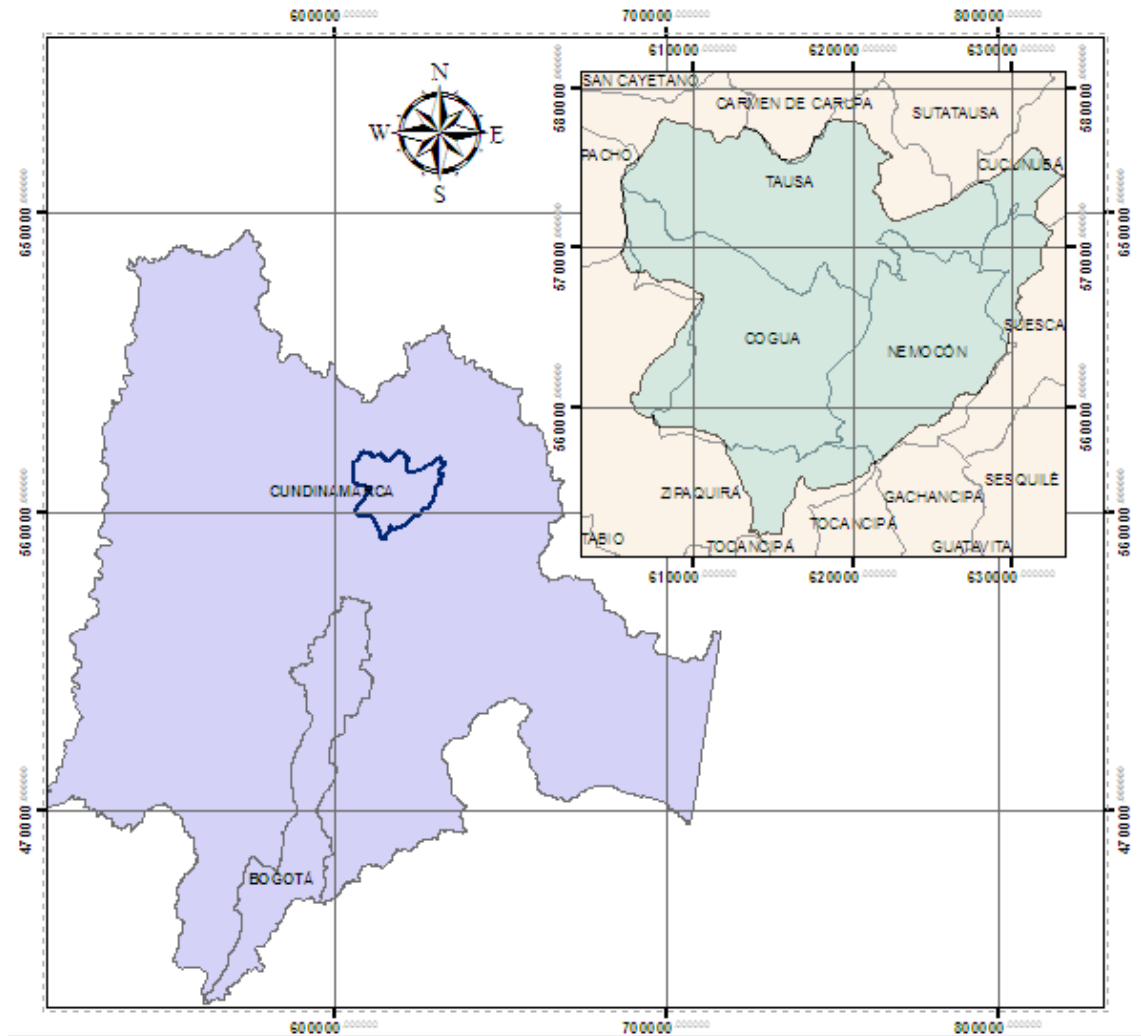
- Estimar la pérdida de suelo bajo las condiciones climáticas actuales en el sistema hidrológico de la cuenca del Neusa.
- Identificar las condiciones futuras del clima en la zona con relación a los escenarios climáticos establecidos en Colombia.
- Analizar la dinámica de sedimentos en la cuenca hidrológica de los escenarios de cambio climático establecidos en Colombia.
- Evaluar el impacto de la producción y el transporte de sedimentos en la cuenca del Neusa sobre el embalse.
- Analizar las implicaciones socioeconómicas que genera la modificación en el ciclo de sedimentos sobre el sistema hidrológico del Neusa.

## 4 MARCO CONTEXTUAL

### 4.1 Localización Geográfica

La subcuenca del Neusa se encuentra ubicada en el sector meridional de la Provincia de la Cordillera Oriental, en el departamento de Cundinamarca entre los municipios de Carmen de Carupa, Tausa, Cucunubá, Suesca, Nemocón, Cogua, Pacho, Zipaquirá, Pacho; Sutatausa y Tocancipá [3].

**Mapa 1.** Ubicación geográfica de la cuenca del Neusa.



**Fuente:** Elaboración propia.

Esta sub cuenca nace en el rio Guandoque en el municipio de Cogua en el páramo de guerrero y recibe aguas de diferentes causas como el rio Cubillos y salitre que alimentan el embalse del Neusa, una vez sale la vertiente se alimenta de las aguas del rio Checua para finalmente desembocar en el Rio Bogotá.

## 4.2 Morfometría de la cuenca

En la morfometría de la cuenca se describen los principales aspectos y características del comportamiento y flujo hídrico de la cuenca.

**Tabla 1.** Morfometría de la cuenca del Neusa

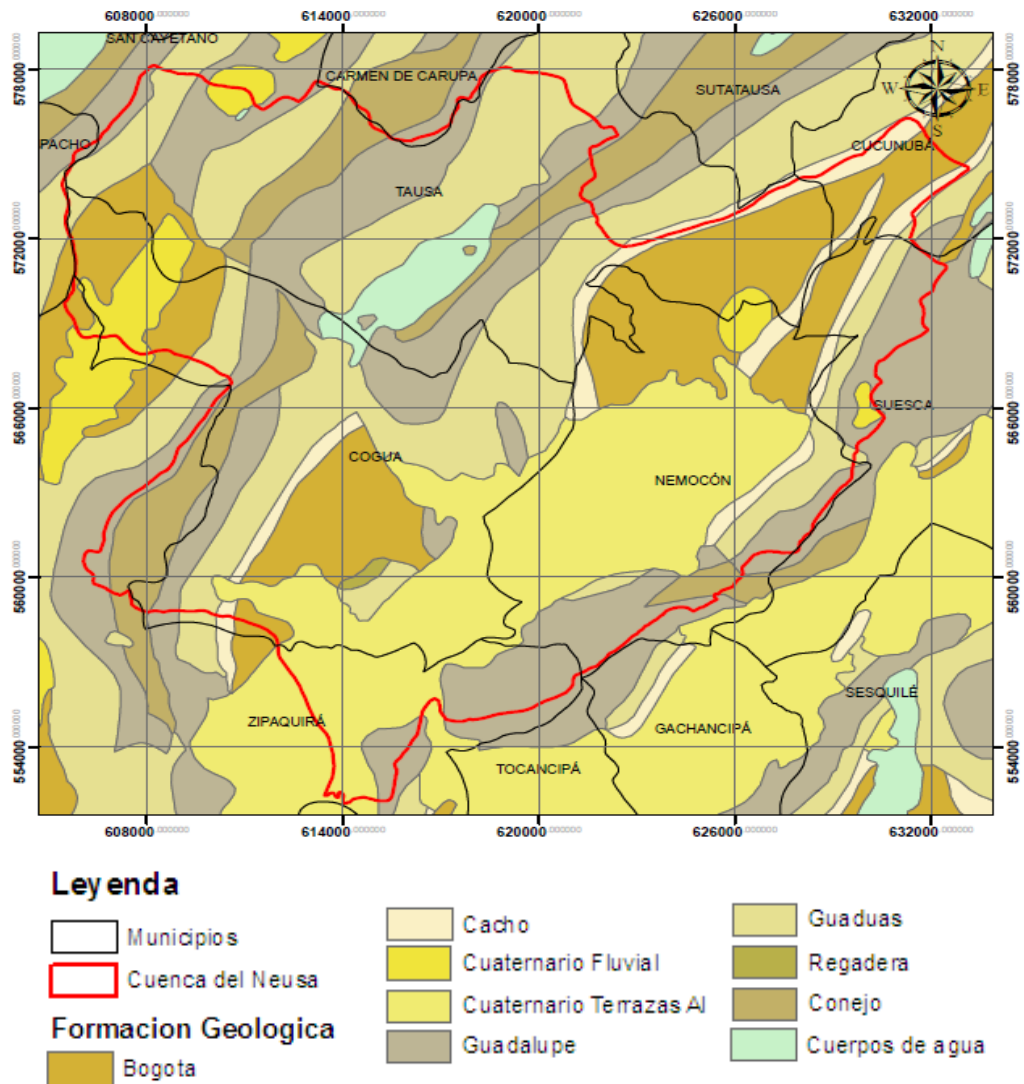
<b>Característica</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
<b>Área de la cuenca</b>	Área plana sobre una proyección horizontal, incluida dentro de su divisoria de aguas	431.73 Km <sup>2</sup>
<b>Perímetro</b>	Longitud sobre un plano horizontal, que recorre la divisoria	113.31 Km
<b>Elevación media</b>	Elevación sobre el nivel del mar dada en metros	3163 m
<b>Pendiente media</b>	Variación de altura por unidad de longitud del fondo del cauce principal, determina el escurrimiento de los canales de agua y Controla la velocidad de la esorrentía superficial	5.89m/Km
<b>Densidad de drenajes</b>	Es la relación entre la longitud total de las corrientes de flujo pertenecientes a la red de drenajes y la superficie de la cuenca	3.852 Km/Km <sup>2</sup>

**Fuente:** Elaboración propia.

## 4.3 Geología

Cundinamarca se encuentra en la cordillera oriental la cual en un principio fue un depósito de sedimentos formado principalmente por arenas y lodos y en ocasiones conglomerados, sufriendo más tarde un metamorfismo en el paleozoico [4]. La sub-cuenca está Constituida por formaciones geológicas de las eras Proterozoica-paleozoica, precámbrico, mesozoico, cretácico inferior, cenozoica y paleógeno, las cuales se describirá a continuación.

**Mapa 2.** Distribución espacial de la geología presente en la zona

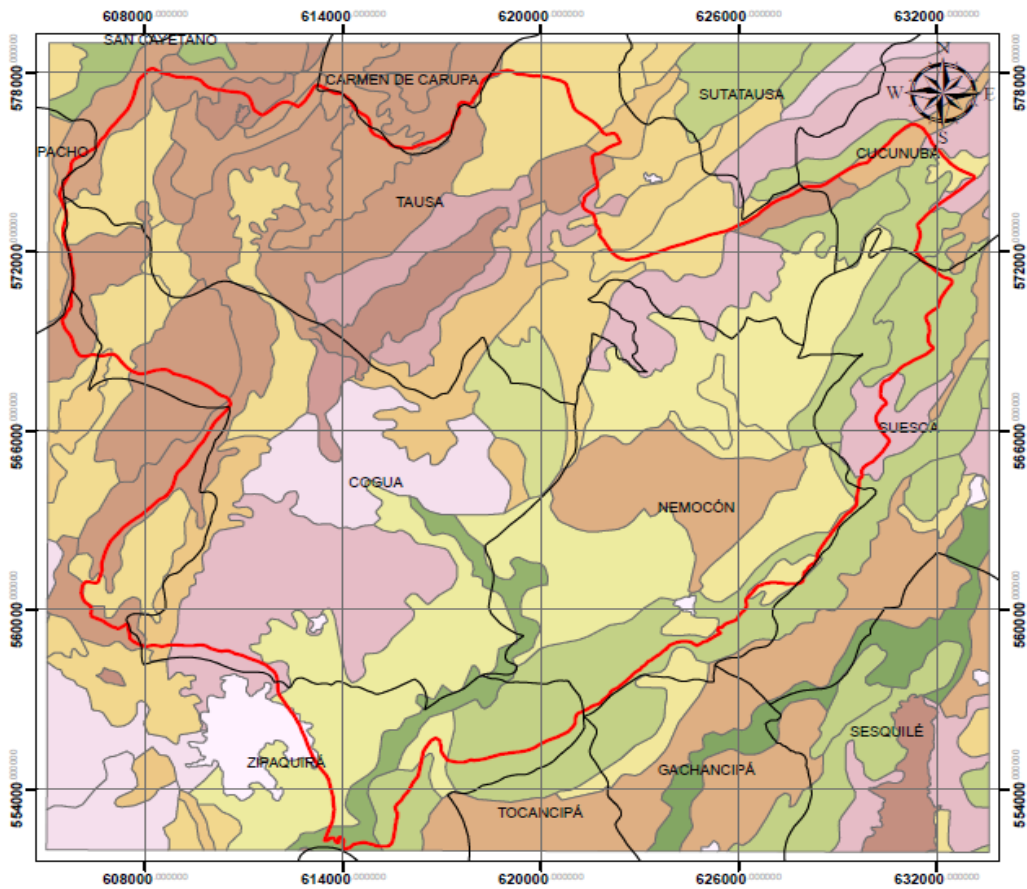


Fuente: [5]




























#### 4.4 Suelo

Por medio de un estudio cartográfico de las unidades del suelo en cuanto a sus perfiles, horizontes y taxonomía se logra distinguir las diferentes características del suelo ya sean físicas y químicas de los cuales se tomarán en cuenta principalmente factores como perfiles de suelo para determinar el contenido de materia orgánica, salinidad, porcentaje de grava, compactación y textura; los parámetros nombrados anteriormente se encuentran ubicados en el Anexo 1. En el mapa No. 3 se identifican la distribución espacial de los diferentes perfiles de suelo.

**Mapa 3.** Distribución espacial de los perfiles de suelo presentes en la cuenca.



**Leyenda**

 Municipios	 CC174, CC220, CC176	 CU152, CU135
 Cuenca del Neusa	 CC205, CC251, AC55	 Cuerpos de agua
<b>PERFILES</b>	 CC284, MU 11, MU 12	 MU8, MU 24
 AC14, CU142	 CC307, CU79, CC 308	 MU9, N16, CC306
 AC19, CT2b, AC7	 CC333, CC332	 PB35A, CC230
 AC34, AC33, CU111	 CC94, MU23	 PN31, PN33, AC16
 AC40, CU150	 CU107, CU108	 PS177, CC226, CU75, CC228
 AC69, AC70	 CU132, CU171, CC255	 Zonas urbanas
 AC8, CT4a, AC18, CT14a	 CU132, EB23, EB24	
 B124, AC90, J17A	 CU149, CU126, CC210	

Fuente: [6]

**4.5 CLIMATOLOGIA**

**4.5.1 Precipitación**

Se define como toda forma de humedad que se origina en las nubes y llega a la superficie terrestre ya sea en forma de lluvia, llovizna, nieve, granizo, etc.

Donde la medida de cantidad de lluvia se expresa en milímetros (mm), la cual equivale a un litro de agua por metro cuadrado de superficie [7]. En cuanto a este estudio se tomaron en cuenta 6 estaciones que se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 2.** Código y ubicación de estaciones meteorológicas dentro de la sub-cuenca del Neusa

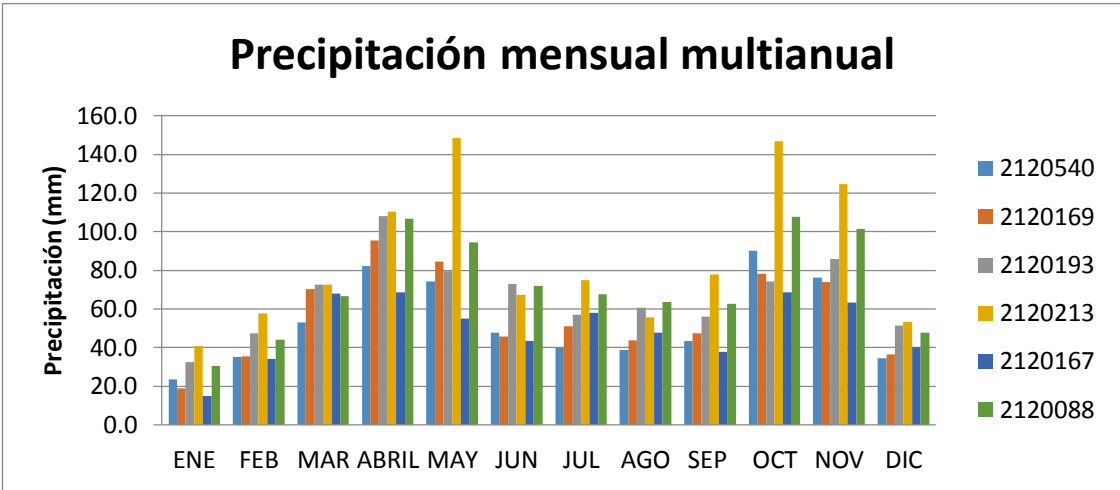
Nombre	Código	Este(UTM-X)	Norte(UTM-Y)
Checua	2120540	626206	565703
Ladera Grande	2120169	627272	571847
Guanguica	2120193	616739	573825
El Cedral	2120213	611467	558769
El Hoyo Arriba	2120167	630111	568689
El Salitre	2120088	610398	572587
Represa del Neusa	2120541	623282.00	568047

**Fuente:** Elaboración propia.

En la gráfica No. 1 se evidencia el comportamiento de la precipitación mensual multianual donde se puede observar que los picos con mayor precipitación en todas las estaciones se dan en los meses de abril, mayo, octubre y noviembre.

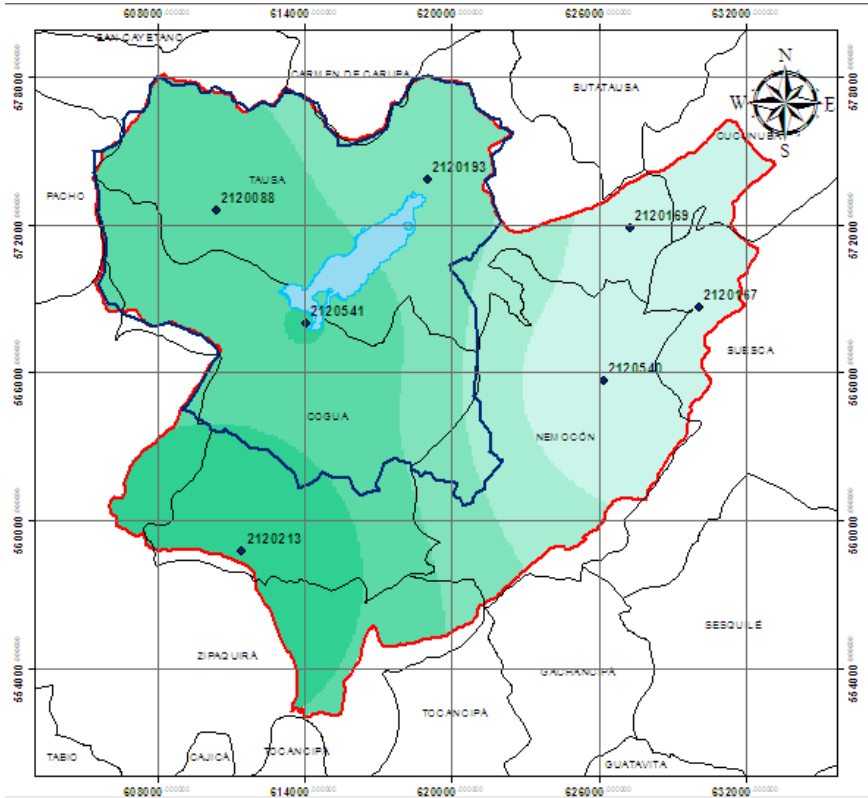
Además se evidencia que la estación 2120213 es la que presenta registros con mayor precipitación en los meses de mayo octubre y noviembre, esto va directamente relacionado con la ubicación de la estación puesto que esta se encuentra ubicada en la parte suroccidental de la cuenca, en donde se presenta una mayor precipitación como se puede corroborar en el mapa no. 4, presentado a continuación.

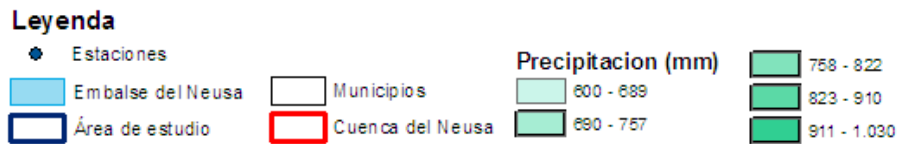
**Gráfica 1.** Histograma de precipitación mensual multianual.



En el mapa No. 4 se muestra la distribución espacial de la precipitación media en la cuenca, donde se observa que la zona con mayor precipitación es la sur occidental variando en un rango de 911-1030 mm. Mientras que la zona con menor precipitación es la parte nororiental de la cuenca obteniendo valores entre un rango de 600-689 mm.

**Mapa 4.** Distribución espacial de la precipitación anual de la cuenca.





**Fuente:** Elaboración propia.

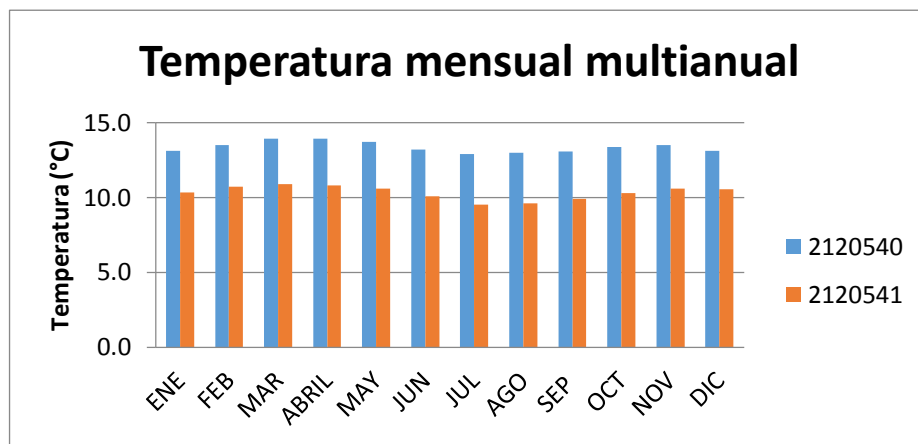
#### 4.5.2 Temperatura

Es uno de los elementos del clima, el cual que se refiere al grado de calor o energía calorífica específica en un lugar y en un momento determinado.

La sub-cuenca del Neusa posee una temperatura promedio de 11,7 °C, en la siguiente tabla se describe la estaciones climatológicas ubicadas dentro de la cuenca.

En la gráfica No. 2 se evidencia el comportamiento mensual multianual de la temperatura dentro de la cuenca del Neusa, donde se puede observar un comportamiento parecido entre las estaciones resaltando que la estación 2120540 registra valores más altos de temperatura debido a su ubicación dentro de la cuenca, puesto que está ubicada en la parte nororiental de la cuenca donde se presentan mayor temperatura como se evidencia en el mapa No. 5, presentado a continuación.

**Gráfica 2.** Histograma de temperatura media mensual multianual.

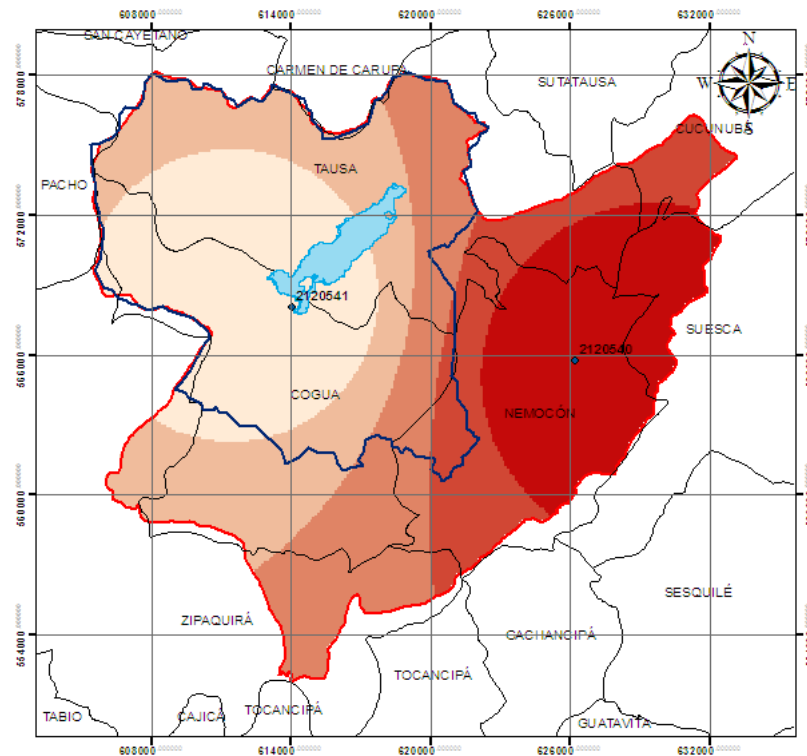


**Fuente:** Elaboración propia.


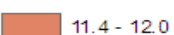

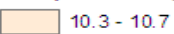
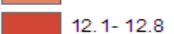

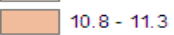
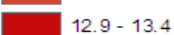
En el mapa No. 5, se muestra la distribución espacial de la temperatura obtenida a partir de los registros de solo dos estaciones identificadas con los códigos: 2120540 y 2120541.

Las zonas de la cuenca con mayor temperatura se encuentran en la parte nororiental de esta, registrando valores que oscilan entre 12.9 y 13.4 °C, mientras que la zona con menor temperatura es la parte noroccidental de la cuenca donde se registran valores que oscilan entre los 10.3 y 10.7 °C.

**Mapa 5.** Distribución espacial de la temperatura en la cuenca del Neusa.



**Legenda**

	Área de estudio	<b>Temperatura (°C)</b>		11.4 - 12.0	
	Municipios		10.3 - 10.7		12.1 - 12.8
	Cuenca del Neusa		10.8 - 11.3		12.9 - 13.4

Fuente: Elaboración propia.

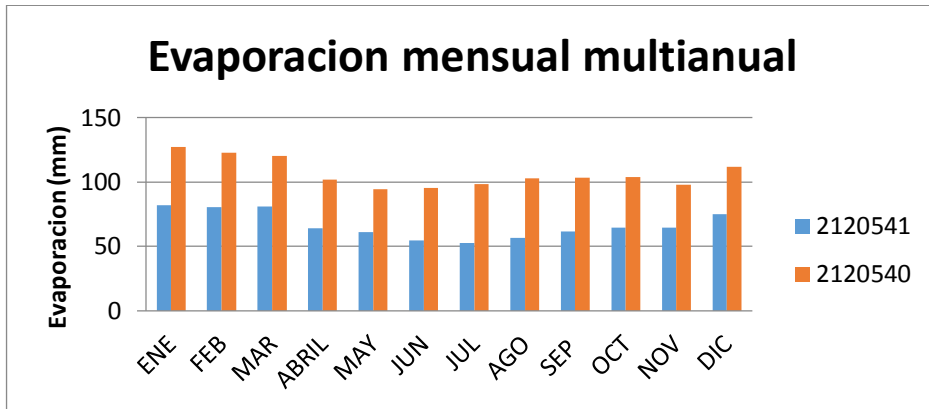
**4.5.3 Evaporación**

La evaporación es un proceso físico el cual consiste el paso de estado líquidos del agua en depositada en el suelo a un estado gaseoso, causado por la temperatura ambiente, la cual se mide en milímetros (mm).

En la cuenca del Neusa se toma en cuenta dos estaciones anteriormente descritas en el parámetro de temperatura, en la cual se tiene una evaporación promedio de 86.55 mm.

La grafica No. 3 hace referencia al comportamiento de la evaporación dentro de la cuenca, teniendo en cuenta los registros de las estaciones identificadas con el código 2120540 y 2120541.

**Gráfica 3.** Histograma de evaporación mensual multianual.

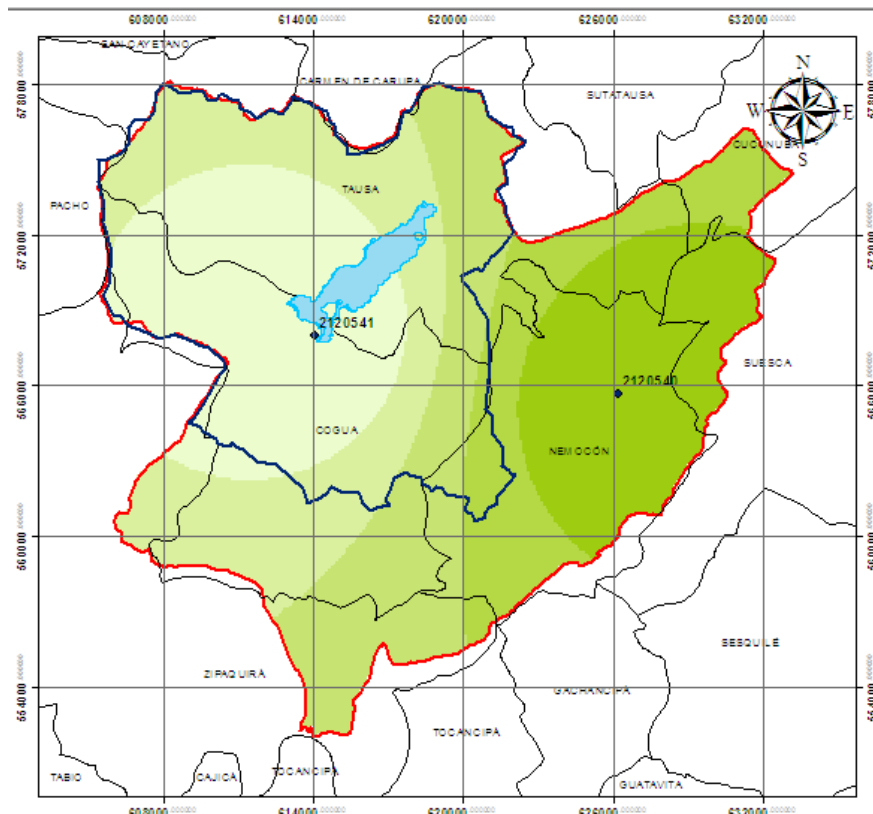


**Fuente:** Elaboración propia.









Se puede evidenciar que la estación que presenta los mayores valores de evaporación es la 2120540, siendo la misma que registró los mayores valores de temperatura.

En el mapa No. 6 se evidencia que la zona con mayor evaporación dentro de la cuenca hace referencia a la zona nororiental con valores que oscilan entre los 1205-1279 mm. Mientras que las zonas con menores valores de evaporación se encuentran ubicadas en la zona nororiental dentro el rango de 798-881 mm.

**Mapa 6.** Distribución espacial de la evaporación en la cuenca del Neusa.



### Leyenda

	Área de estudio	<b>Evaporación (mm)</b>		997 - 1.119	
	Municipios		798- 881		1.120 - 1.204
	Cuenca del Neusa		882 - 996		1.205 - 1.279

Fuente: Elaboración propia.

El mapa No. 6 se encuentra directamente relacionado con el mapa de la distribución espacial de la temperatura puesto que ambas variables son directamente proporcionales; a mayor temperatura mayor evaporación.

#### 4.6 Cobertura y uso de suelo

En la cuenca del Río Neusa existe una gran variedad de tipos de cobertura vegetal los cuales con el paso del tiempo han sido cambiados por las necesidades del hombre que han hecho que el uso de la tierra sea cada vez más diferente en la zona.

Dentro de las coberturas existentes en la cuenca, se destacan las categorías de: Pastos limpios, mosaico de pastos y cultivos, arbustales y herbazales las cuales cuentan con un porcentaje de extensión de 32.2% m<sup>2</sup>, 19% m<sup>2</sup>, 12.8% m<sup>2</sup> y 7.2% m<sup>2</sup>; respectivamente. Mientras que el menor valor de área es dado para las coberturas de instalaciones recreativas, zonas industriales o comerciales con valores de 0.06% m<sup>2</sup> y 0.08% m<sup>2</sup>, respectivamente.

En la tabla No. 5 se muestra la relación de cobertura vs. Área, según el mapa de cobertura vegetal para Cundinamarca en escala 1:100.000 con la leyenda de Corine Land Cover Nivel 3, adaptada para Colombia.

**Tabla 3.** Porcentaje de área para las coberturas de la cuenca del Neusa, clasificación Nivel 3 Leyenda Corine Land Cover.

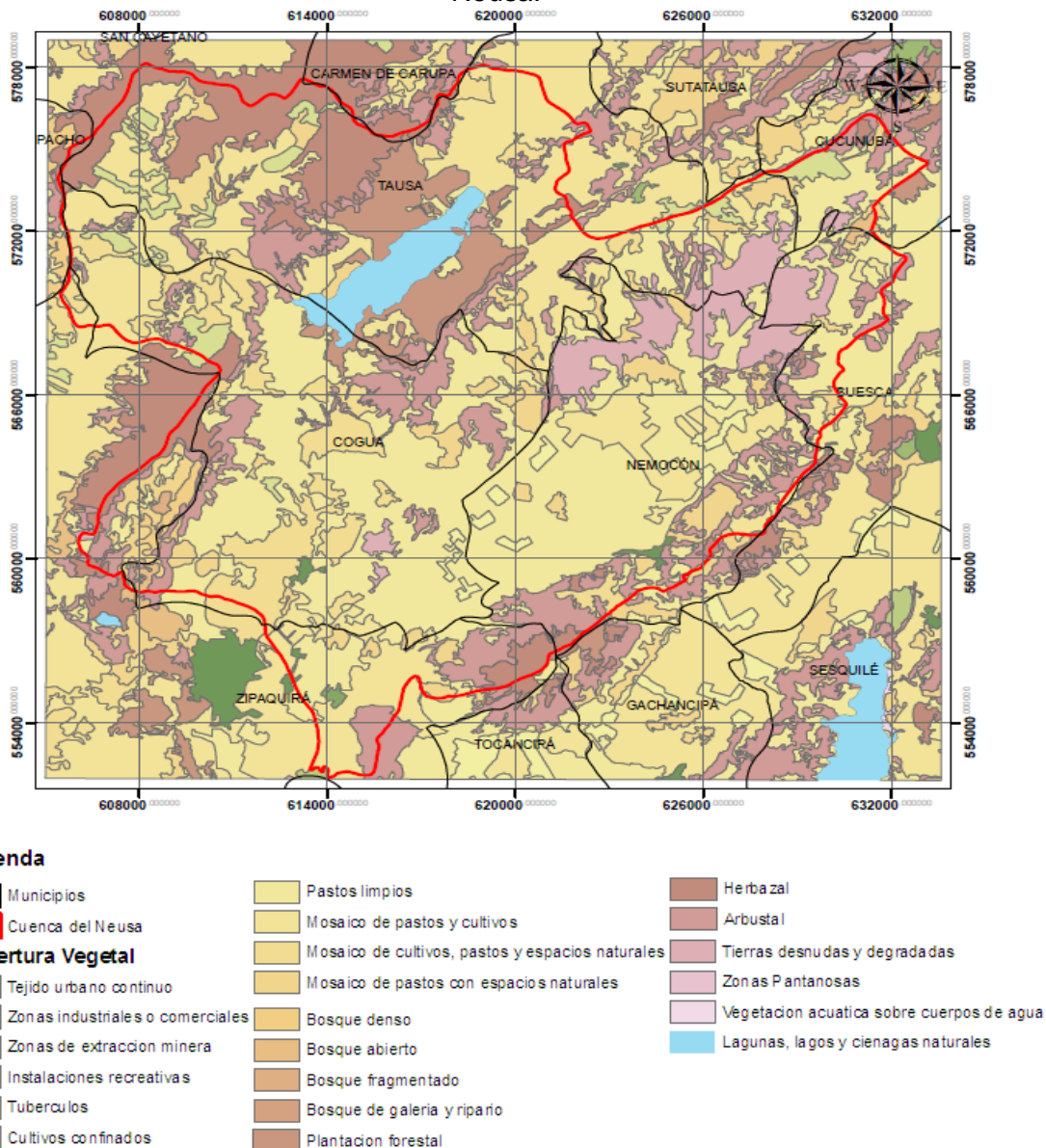
Clasificación Nivel 3	% de área
1.1.1. Tejido urbano continuo	0.3
1.2.1. Zonas industriales o comerciales	0.1
1.4.2. Instalaciones recreativas	0.0
2.1.5. Tubérculos	2.1
2.2.5. Cultivos confinados	1.2
2.3.1. Pastos limpios	32.2
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	19.0
2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	6.6
2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales	5.6
3.1.1. Bosque denso	0.4
3.1.2. Bosque abierto	0.3
3.1.3. Bosque fragmentado	0.1
3.1.4. Bosque de galería y ripario	0.2

3.1.5. Plantación forestal	3.9
3.2.1. Herbazal	7.2
3.2.2. Arbustal	12.8
3.3.3. Tierras desnudas y degradadas	5.1
5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales	2.1
No identificada	1.0
<b>TOTAL</b>	<b>100.0</b>

Fuente: Elaboración propia.

En el mapa No. 7, se muestra la distribución espacial de las diferentes tipos de cobertura existentes en la zona, identificando así el tipo de cobertura con mayor extensión.

**Mapa 7.** Distribución espacial de los tipos de cobertura vegetal en la cuenca del Río Neusa.



**Fuente:** Elaboración propia

#### **4.6.1 Uso de suelo actual**

En la actualidad el uso del suelo en la cuenca del Neusa, tiene diferentes actividades en las cuales se reúnen las siguientes categorías: Uso forestal, uso agrícola, uso pecuario, uso urbano y de infraestructura además del uso especial; en este último se hace referencia a la plantación y/o existencia de vegetación de paramo, acuáticas y de matorrales [8].

Las categorías nombradas anteriormente son relacionadas directamente con la cobertura identificada en el mapa No. 7; donde se corrobora la existencia de bosques, zonas de cultivo y de ganado; junto con el suelo destinado a la construcción de edificaciones e instalaciones recreativas.

## 5 MARCO TEORICO

### 5.1 Cambio Climático

Inicialmente se debe tener en cuenta definición de clima, teniendo en cuenta que el IPCC en 2013 lo describe como:

*“El clima es definido en sentido restringido como el estado promedio del tiempo y, más rigurosamente, como una descripción estadística del tiempo atmosférico en términos de los valores medios y de la variabilidad de las magnitudes correspondientes durante períodos que pueden abarcar desde meses hasta millares o millones de años. El período de promedio habitual es de 30 años, según la definición de la Organización Meteorológica Mundial. Las magnitudes son casi siempre variables de superficie (por ejemplo, temperatura, precipitación o viento). En un sentido más amplio, el clima es el estado del sistema climático en términos tanto clásicos como estadísticos.”*

### 5.2 Impulsores del cambio climático

Los procesos naturales y antropógenos que puedan generar cambios en el balance energético de la tierra, son considerados como Impulsores del cambio climático. El forzamiento rotativo es una de las formas de cuantificar las modificaciones que existen en el flujo de energía generados por los impulsores en 2011 comparados con 1970. El forzamiento rotativo se mide a partir de observaciones in situ además de teledetección de las propiedades de los gases de efecto invernadero y los aerosoles [1].

#### 5.2.1 Forzamiento radiativo

Existen dos diferentes tipos de forzamiento radiativo: El forzamiento radiativo (RF) y el forzamiento radiativo efectivo, a continuación se realiza una breve descripción de cada uno:

- ***El forzamiento radiativo (RF):*** es el cambio generado en el balance energético de la tierra, es decir, que un forzante radiativo en clima significa cualquier variación en la radiación entrante o saliente de la tierra. Cuando este forzamiento es de orden positivo recibe mayor cantidad de energía que aquella emitida por lo tanto se genera un calentamiento de la zona. Cuando es negativo se genera un enfriamiento debido a que recibe menos cantidad de energía incidente en la superficie que aquella que pierde [9].

No siempre se puede tomar el forzamiento radiativo como un proceso de respuesta a los cambios evidenciados en la temperatura, debido a que ajustes rápidos de la troposfera pueden influenciar en las alteraciones de flujo generando así alteraciones sustanciales de flujo que a largo plazo pueden considerarse como influencias del cambio climático [10].

- **El forzamiento radiativo efectivo (ERF)** es el cambio de flujo radiativo neto descendente en la superficie de la atmósfera teniendo temperatura atmosférica, vapor de agua y presencia de nubes para poder ajustar el forzamiento real respecto a la temperatura superficial global o una parte de las condiciones normales sin cambios [10].

Existen diferentes impulsores de forzamiento radiativo: Por aerosoles antropógenos, cambio de uso de suelo y acciones naturales. La primera puede darse por dos diferentes tipos interacciones como podría ser aerosol-radiación y aerosol-nube; el forzamiento radiativo generado por este impulsor es normalmente de orden negativo [10].

Hay evidencias fuertes sobre la influencia del cambio el suelo con el aumento del albedo y la temperatura superficial en la tierra provocando de esta forma un forzamiento radiativo negativo. Además el cambio del suelo no solo influye en manera radiativa sino también generando otro tipos de afectaciones propias de la zona como el cambio de rugosidad del suelo, el flujo de calor latente, precipitación, entre otras propiedades que influyen en el cambio de la temperatura terrestre [1].

El forzamiento derivado de las actividades naturales se puede dar por cambios en la radiación solar y la actividad volcánica. Esta última no solo emite partículas minerales a la atmósfera sino también percursoros de aerosoles sulfatados que debido a su pequeño tamaño y largo tiempo de vida se convierten en uno de los responsables del forzamiento radiativo que afecta el clima. Respecto a las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por los volcanes son casi 100 veces menores a las emitidas por actividades antropogénicas [1].

### 5.3 Escenarios de cambio climático

Los escenarios se han utilizado desde la antigüedad cuando se planificaba la actividad y acción militar también en juegos de azar pero en la década de los 60's empieza a expandirse esta técnica al desarrollo de empresas con el objetivo de identificar las consecuencias de aplicar estrategias, invertir en nuevas áreas e identificar posibles ganancias a largo plazo. Los escenarios de cualquier tipo no son establecidos para predecir el futuro pero sirven para tomar decisiones no tan descabelladas en un conjunto de posibles y diferentes futuros.

Los científicos han empleado el uso de escenarios con el fin de dar a entender a la comunidad de forma sencilla y clara la interacción el sistema climático de la tierra, los ecosistemas y las actividades humanas. En este contexto el término de "escenarios" se refiere a una descripción coherente bajo bases consistentes y convincentes de un posible estado futuro del mundo. Los escenarios no son considerados como predicciones, más bien las proyecciones normalmente sirven como materia prima para la generación de escenarios pero actualmente no solo se basan en ellas sino también en información base, como por ejemplo observaciones del comportamiento climatológico [9].

En la figura No. 1 se muestran las características propias de cada RCP, respecto a forzamiento radiativo, concentración de gases efecto invernadero.

**Figura 1.** Descripción de los 4 caminos representativos de forzamiento radiativo

Nombre	Forzamiento radiativo <sup>1</sup>	Concentración <sup>2</sup>	Forma del itinerario
RCP 8.5	>8,5 W/m <sup>2</sup> en 2100	> ~1370 CO <sub>2</sub> -eq en 2100	En aumento
RCP 6.0	Estabilización en ~6 W/m <sup>2</sup> a partir de 2100	~850 CO <sub>2</sub> -eq (estabilización, a partir de 2100)	Estabilización sin translimitaciones
RCP 4.5	Estabilización en ~4.5 W/m <sup>2</sup> a partir de 2100	~650 CO <sub>2</sub> -eq (estabilización, a partir de 2100)	Estabilización sin translimitaciones
RCP 2.6	Máximo a ~3W/m <sup>2</sup> antes de 2100; disminución posterior	Máximo a ~490 CO <sub>2</sub> -eq antes de 2100; disminución posterior	Culminación seguida de disminución

Fuente: [9]

A continuación se hace una breve descripción de las características propias de cada uno de los cuatro escenarios de forzamiento rotativo según lo planteado y descrito por el IPCC en el 2013:

- **RCP 2.6:** Es un camino representativo donde el forzamiento radiativo toma valores máximos de 3 W m<sup>-2</sup> antes del año 2100 y posteriormente disminuye; se espera que luego del 2100 las emisiones sean constantes.
- **RCP 4.5 Y RCP 6.0:** Son consideradas las trayectorias de estabilización intermedia donde el forzamiento radiativo se estabiliza en un rango de 4.5 W m<sup>-2</sup> – 6 W m<sup>-2</sup> después del 2100. Estas trayectorias son ampliadas suponiendo que las emisiones luego del año 2150 serán constantes.
- **RCP 8.5:** Es la trayectoria alta en donde el forzamiento radiativo toma valores superiores a 8.5 W m<sup>-2</sup> en el 2100 y seguirá aumentando durante un lapso de tiempo posterior. Esta trayectoria es ampliada bajo el supuesto de que las emisiones serán constantes luego del año 2100 pero las concentraciones lo serán a partir de 2250.

#### 5.4 Escenarios de cambio climático establecidos para Colombia en la tercera comunicación nacional ante la convención: Marco de las naciones unidas sobre cambio climático

Para la creación de escenarios de cambio climático específicos para Colombia se utilizó como clima de referencia para las variables de precipitación y temperatura media la información registrada en los años 1976-2005; debido a que en la base de datos de modelos globales presentes en el proyecto CMIP5<sup>1</sup> también se hizo para este período de tiempo para así poder hacer comparaciones, ajustes y ver la habilidad de cada uno de los modelos en representar el clima propio de Colombia [9].

<sup>1</sup> Coupled Modeling Inter Comparison Project 5. En este proyecto se realiza la inter-comparación de los modelos climatológicos globales donde incluye simulaciones a largo plazo para el clima del siglo XX, XXI y hasta el XXII, también cuenta con simulaciones a corto plazo de las últimas décadas.

Para la generación de los escenarios para Colombia se utilizaron 20 de los modelos climáticos globales que contaban con información de temperatura media, máxima, mínima y precipitación para el período de tiempo nombrado anteriormente; se evaluaron 333, 306, 2976 y 1072 estaciones respectivamente [9]. De los 20 modelos utilizados solo 15 de ellos contaban con la información completa de las cuatros variables.

#### 5.4.1 Método de ensamble

En Colombia se procedió a realizar un método de ensamble para obtener resultados más confiables, parecidos y unánimes respecto a lo resultado de cada MCG para cada RCP evaluado. El método de ensamble utilizado fue: *Promedio de Fiabilidad Conjunta* (REA, por sus siglas en ingles).

Este método de ensamble se basa en la evaluación de dos criterios propios de los modelos evaluados. El primero es un criterio de **desempeño**, el cual indica la capacidad que tiene cada modelo para representar las condiciones de clima actual. El siguiente criterio es conocido como de **convergencia**, está basado en los cambios simulados entre los modelos para un mismo RCP, es decir, que a mayor convergencia entre los modelos, la señal encontrada es mayor. Con este método es posible calcular el promedio, el rango de incertidumbre y la fiabilidad<sup>2</sup> en conjunto de las proyecciones de escenarios climáticos de las diferentes simulaciones realizadas por varios MCG [9].

A continuación, se hace una descripción matemática del funcionamiento y variables evaluadas en el método de ensamble utilizado en Colombia para la generación de los escenarios de cambio climático:

Inicialmente, se debe tener en cuenta que el cambio promedio ( $\widetilde{\Delta T}$ ) resultante del método es calculado bajo el promedio ponderado de los modelos, de la siguiente forma:

$$\widetilde{\Delta T} = \tilde{A} * (\Delta T) = \frac{\sum_i R_i \Delta T_i}{\sum_i R_i}$$

Dónde R es el factor de fiabilidad de cada modelo calculado bajo la siguiente ecuación:

$$R_i = [(R_{B,i})^m * (R_{D,i})^n]^{1/(m*n)}$$

Dónde:

$R_{B,i}$ : Es el factor de **fiabilidad** de cada modelo con una función de sesgo del mismo o del desempeño que tiene para representar el clima presente.

$R_{D,i}$ : Factor que mide la **habilidad** del modelo en términos de la distancia del cambio calculado para un modelo dado con respecto al cambio promedio de todos los modelos evaluados (cuando sea mayor la distancia la fiabilidad será menor).

<sup>2</sup> Se refiere a la probabilidad del buen funcionamiento de algo.

El criterio de desempeño es representado por  $R_{B,i}$  y el de convergencia por  $R_{D,i}$ . Los valores de m y n son los pesos asignados a cada uno de los criterios.

La incertidumbre dada en el cambio promedio obtenido del método del ensamble está dada por:

$$\tilde{\delta}_{\Delta T} = [\tilde{A}(\Delta T_i - \tilde{\Delta T})^2]^{1/2} = \left[ \frac{\sum_i R_i (\Delta T_i - \tilde{\Delta T})^2}{\sum_i R_i} \right]^{1/2}$$

Expresando los límites de la incertidumbre de la siguiente forma:

$$\Delta T_+ = \tilde{\Delta T} + \tilde{\delta}_{\Delta T}; \Delta T_- = \tilde{\Delta T} - \tilde{\delta}_{\Delta T}$$

Se debe tener en cuenta que la correlación entre los criterios en los que método REA se basa no tienen una correlación alta, es decir, la presencia de datos atípicos en una modelación no futura no siempre significan una mala modelación de clima actual, puesto que esto depende directamente del peso asignado a cada uno de los factores m y n, los cuales están basados en la relación que se desee evaluar o que se tenga mayor conocimiento [11].

## 5.5 Modelación hidrológica

La modelación hidrológica tiene como objetivo principal representar los procesos de la naturaleza y así predecir estos mismos en situaciones extremas. Lo realiza a partir de formulaciones matemáticas y físicas que demuestren los procesos hidrológicos presentados en la realidad [12].

Existen dos tipos de modelos hidrológicos diferenciados por el tipo de ecuaciones que utilizan; los primeros son de tipo **Probabilísticos** que se valen por leyes al azar o probabilidad; estos se dividen en dos tipos: **Estáticos** y **Estocásticos**. Los primeros se basan en ejemplos ya observados mientras que los estocásticos lo hacen con la estructura del azar observada en series temporales. Los modelos probabilísticos necesitan de manera irremplazable el uso y manejo de serie de datos [13].

Además de los probabilísticos existen los modelos **Determinísticos** los cuales se basan en formulaciones físicas y/o procesos químicos expresados en ecuaciones diferenciales. Es formulado en términos de un grupo de ecuaciones y parámetros que se relacionan directamente ecuaciones que dependen de estos. La característica principal de estos modelos radica en ser de relación causa-efecto, es decir, los parámetros elegidos inicialmente son los causantes directos de los resultados obtenidos [13].

Como subgrupos del modelo determinístico existen los modelos: empíricos, conceptuales y físicos.

Los modelos **empíricos**, son los más simples debido a que solo demuestran la relación directa entre un grupo de variables, más no representa la física del proceso hidrológico. Por lo tanto, sus parámetros iniciales son tan solo descriptores de la forma en que se relacionan las variables y no como tal la forma del proceso [14].

Los modelos **conceptuales**, intentan simular el comportamiento de una cuenca mediante balances hídricos y procesos de transferencia entre distintos almacenamientos. Representan la cuenca como depósitos interconectados entre sí, comportándose individualmente de forma dinámica. Los valores de los parámetros se obtienen por calibración de los datos observados [14].

Los modelos **físicos**, se basan en la resolución de ecuaciones físicas que describen el movimiento de flujo y la generación de sustancias, sedimentos, y demás asociadas a una cuenca. Los parámetros necesarios para este tipo de modelos generalmente son medibles y conocidos; debido a la cantidad de parámetros involucrados y la heterogeneidad entre las características del medio, normalmente se deben realizar calibraciones a partir de datos observados [14].

## **5.6 Modelos hidrológicos distribuidos**

Los modelos hidrológicos distribuidos hacen referencia a aquellos modelos donde los parámetros de entrada varían especialmente dentro de la cuenca, dando como resultado no solo la respuesta de la cuenca en general sino de las subcuencas individuales existentes [13].

El detalle en con el que pueden realizarse modelos distribuidos permite la interacción de características más detalladas y especiales como abstracciones de lluvia que varían especialmente alrededor de la cuenca. No obstante, para el buen funcionamiento de este tipo de modelos se requiere de una cantidad y calidad de datos necesarios deben tener el mismo detalle que los resultados esperados [13].

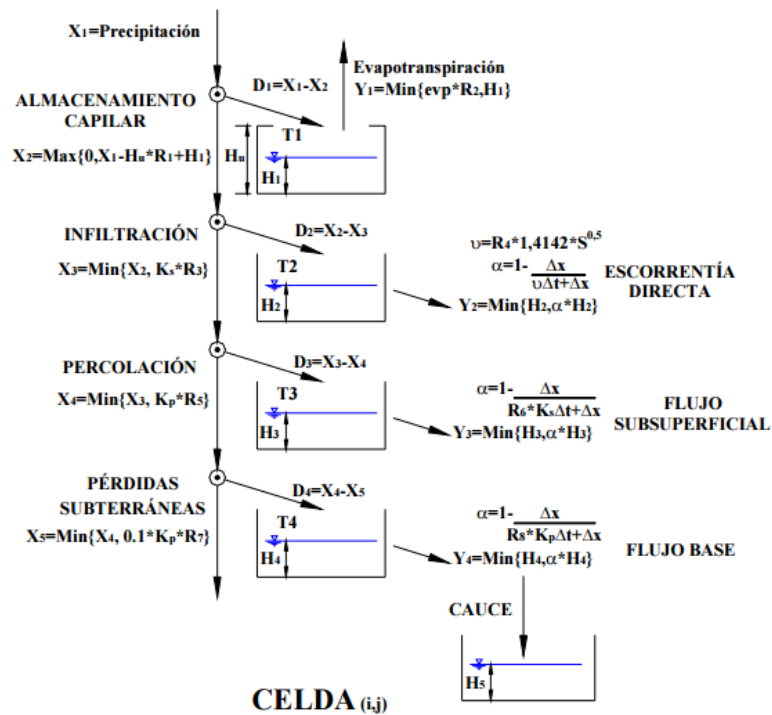
Dentro de la gran variedad de modelos hidrológicos distribuidos, aquellos que son de tipo conceptual han tenido gran acogida debido a que por su estructura permiten la correcta simulación de crecidas; debido a que tienen cuenta la variabilidad espacial y temporal de las diferentes variables involucradas dentro del ciclo hidrológico. En esta categoría se encuentra el modelo TETIS, el cual tiene como características principales el tener en cuenta los atributos geomorfológicos propios de cada cuenca, considera no lineal la relación lluvia-escorrentía e identifica la dependencia entre la velocidad de flujo y la cantidad de esta [15].

### **5.6.1 TETIS**

#### **5.6.1.1 Funcionamiento en tanques de TETIS**

El modelo hidrológico TETIS, es de tipo distribuido conceptual como se había nombrado anteriormente. Divide la cuenca en celdas rectangulares de igual tamaño que se encuentran interconectadas entre sí, siguiendo de esta forma la red de drenajes; en cada una de las celdas se modela el proceso lluvia-escorrentía mediante la interacción de cinco tanques, los cuales serán explicados a continuación.

**Figura 2.** Esquema conceptual del modelo hidrológico TETIS.



Fuente: [16]

Como se puede observar en la Figura 2, en cada uno de los tanques descritos existen diferentes ecuaciones donde en cada una interfieren diferentes  $R$ 's consecutivos relacionados al almacenamiento en que se encuentre.

Los  $R$ 's o también conocidos como FC, hacen referencia a los Factores Correctores del modelo. Los cuales afectan la producción de escorrentía dentro del modelo de la siguiente forma:  $R_1$  al almacenamiento estático,  $R_2$  la evapotranspiración,  $R_3$  la infiltración,  $R_4$  la escorrentía directa,  $R_5$  la percolación,  $R_6$  el flujo subsuperficial,  $R_7$  las pérdidas subterráneas y  $R_8$  el flujo base. El aumento o disminución de cada uno de los factores correctores involucra un cambio directamente en su variable de relación (nombradas anteriormente).

- **TANQUE 1: Almacenamiento Estático**

El primer tanque, se conoce como Almacenamiento Estático o capilar,  $T_1$ . Representa el agua que entra y transita dentro de la cuenca pero que solo sale de esta en forma de evapotranspiración  $Y_1$ , por lo cual no hace parte de la escorrentía. Dentro de este almacenamiento se representa la interceptación de la precipitación, almacenamiento en charcos y el agua retenida en el suelo por fuerzas capilares [16].

la precipitación  $X_1$ , entra al primer conducto donde se deriva una cantidad de agua  $D_1$ , que entra al primer tanque. Este tanque tiene una capacidad igual a la

suma de la capacidad de almacenamiento de agua útil en el suelo y la capacidad de la cobertura de la superficie por almacenar agua [16].

La cantidad de agua que se deriva del primer tanque  $X_1$ , depende directamente del contenido de humedad en el suelo  $H_1$ , de las características propias del suelo  $H_u$  y de la precipitación caída en la zona  $X_1$ .

- **TANQUE 2: Almacenamiento de Flujo Superficial**

El segundo tanque simula el agua que es susceptible de infiltrarse a nivel inferior o de escurrirse directamente sobre la superficie. La cantidad derivada por escorrentía depende directamente de la capacidad del suelo para dejar pasar el agua gravitacional y del estado de almacenamiento de la capa superior [16].

La capacidad del suelo para dejar pasar el agua gravitacional es asociada directamente con la conductividad hidráulica del suelo, pero cabe recordar que una parte del agua introducida ya ha sido derivada para el almacenamiento estático por lo tanto se hablará de que la conductividad del suelo es la misma conductividad hidráulica saturada  $K_s$  [16].

Como se muestra en la figura anterior, la cantidad de agua que sigue al tercer tanque  $X_3$ , está directamente relacionada con la capacidad de agua de dejar pasar agua gravitacional  $K_s$  y con el flujo excedente del almacenamiento capilar [16].

Para el flujo superficial, se considera dentro de cada una de las celdas a la ladera como un canal que se encuentra en función de las características propias de cobertura y morfología. Debido a esta suposición, se aplica la ecuación de continuidad en el entendido de que no hay controles aguas abajo por lo tanto la velocidad de flujo está en función de la pendiente (S) [16].

- **TANQUE 3: Almacenamiento de agua gravitacional en la superficie del suelo**

Este almacenamiento representa el agua almacenada en la capa superior del suelo mientras fluye hacia la red de drenajes, parte de esta cantidad pasa al nivel inferior por percolación y otra parte produce flujo subsuperficial [16].

En un determinado intervalo de tiempo, se simula una cantidad de agua gravitacional  $X_3$  que se mueve de manera vertical hacia el interior del suelo y de la cual una parte  $X_4$ , podrá percolar o seguir hacia la zona inferior del suelo, mientras el resto del agua pasa a ser parte del almacenamiento superior del suelo para convertirse en escorrentía subsuperficial [16].

Como se puede evidenciar en la Figura No. XX la cantidad de agua que puede percolar a la parte inferior del suelo  $X_4$ , es asociada directamente con el flujo excedente  $X_3$  y la conductividad hidráulica del suelo la cual depende de las características geológicas y geomorfológicas propias de la zona, en condiciones de saturación que se conocen como capacidad de percolación  $K_p$ .

- **TANQUE 4: Almacenamiento subterráneo**

El último tanque representa el flujo subterráneo dentro del modelo, en donde se considera que el flujo gravitacional dentro de la parte inferior del suelo hacia la red de drenajes o lo considerado como acuíferos, para luego hacer parte del flujo base [16].

El volumen de agua que ingresa por percolación  $X_4$ , tiene dos posibilidades; una de ellas es seguir hacia las pérdidas subterráneas  $X_5$  y que el resto  $Y_4$  podría ser derivado al almacenamiento subterráneo  $T_4$ [16].

En la figura 2 se puede ver una especie de quinto tanque, el cual hace referencia a la llegada del flujo  $Y_4$  al cauce como flujo base, como fue explicado anteriormente.

- **Existencia de embalses**

Dentro del funcionamiento del modelo TETIS en la parte hidrológica se tiene en cuenta la existencia de embalses, puesto que son considerados como un punto de control dentro de la hidrograma del cauce.

Para la simulación de embalses existen diferentes métodos los cuales dependen directamente de la información de entrada, a continuación se hace una breve descripción de cada uno de ellos.

- ✓ *Balance Estricto*: TETIS utiliza este método cuando cuenta con información de niveles o volúmenes (S) y de caudales de salida (Q), por lo cual el hidrograma de entrada al embalse (I) se realiza con la siguiente ecuación:

$$S_f(t) = S_o(t) + I(t) - Q(t)$$

En donde el volumen de entrada y salida del embalse en cada intervalo de tiempo es calculado mediante la interpolación de la curva de embalse, comparando de esta forma el hidrograma calculado con el generado por TETIS [17].

- ✓ *Método Plus Modificado*: TETIS utiliza el Método Plus Modificado en caso de no tener conocimiento tanto de los niveles y/o volúmenes como de los caudales de salida. Este método radica en simular la laminación del embalse para lo cual si es necesario conocer los caudales de entrada [17].

El efecto de laminación se encuentra expresado por la siguiente ecuación:

$$\frac{2S_{j+1}}{\Delta t} + Q_{j+1} = I_j + I_{j+1} + \frac{2S_j}{\Delta t} - Q_j$$

Donde:

$\Delta t$  → Intervalo de tiempo,  $S_j$  y  $S_{j+1}$  → Volúmenes en el tiempo,  $J$  y  $j+1$  → Intervalo de tiempo,  $Q_j$  y  $Q_{j+1}$  → Caudales de salida del embalse,  $I_j$  e  $I_{j+1}$  → Caudales de entrada del embalse

- **Sub-modelo de sedimentos**

El sub-modelo de sedimentos que maneja TETIS es una versión desarrollada del modelo CASC2D-SED. Este último simula los procesos en ladera bidimensional mientras que en canales es unidimensional; para el modelo TETIS en ambos tipos de procesos se considera unidimensional [17].

El modelo TETIS identifica tres tipos de partículas con sus respectivos tamaños de diámetro expresados en mm; la velocidad en que estas partículas se mueven a través del flujo depende directamente del tamaño, puesto que para tamaños pequeños como de limo y/o arcilla la velocidad será menor. Mientras que para partículas como de arena y grava u velocidad de transporte será mayor.

TETIS cuenta con dos tipos de transporte y deposición de sedimentos:

- ✓ Procesos de ladera
- ✓ Procesos de cárcavas y cauces

### **5.6.2 Modelo de erosión WEPP (Water Erosion Prediction Project)**

El modelo de erosión Water Erosion Prediction Project (WEPP por sus siglas en inglés), es un modelo de tipo distribuido y de simulación continua, que permite realizar la distinción entre una simulación para cuencas o tipos de ladera. Es decir que funciona de manera espacial considerando la totalidad de la cuenca en general y la singularidad de las subcuencas pertenecientes. Respecto a la simulación continua, esta hace referencia a que el modelo simula un número de años que tienen un conjunto de datos climáticos diferentes en cada evento; por ejemplo, un evento diario puede que cause o no la generación de escorrentía para el día o evento siguiente [18].

WEPP cuenta con nueve diferentes componentes conceptuales: Generación climática, procesos de invierno, irrigación, hidrología, suelos, crecimiento de las plantas, descomposición de residuos, la erosión y procesos hidráulicos de flujo superficial. A continuación se realiza una breve descripción de los componentes más relevantes para la modelación en WEPP.

- **Componente hidrológico**

Dentro del componente hidrológico, WEPP simula variables como la infiltración, la escorrentía, evaporación, transpiración de la planta, percolación del agua del suelo, entre otras variables.

- ✓ **Balance hídrico (modelo SWRRB)**

El balance hídrico diario realizado dentro del modelo tiene la misma base teórica utilizada en el modelo SWRRB (por sus siglas en inglés, Simulation for

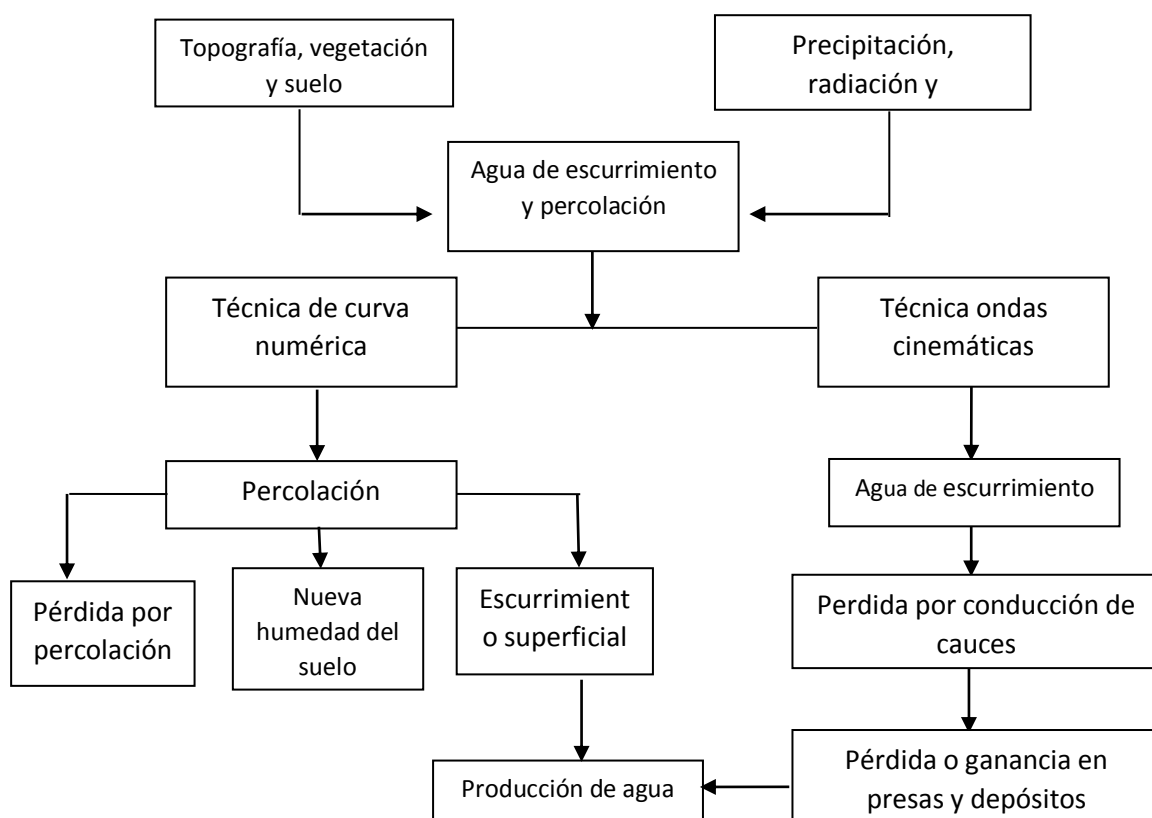
Water Resources in Rural Basins) bajo una leve modificación propia de WEPP [18].

El modelo SWRRB, fue desarrollado con el objetivo de simular procesos hidrológicos en cuencas rurales bajo información de suelo, clima, uso del suelo y topografía, para aplicarlo en cuencas grandes y complejas [19]. Este modelo, estudia bajo la influencia de diferentes conceptos varios procesos como: la evaporación, infiltración, percolación, entre otros dando como resultado principalmente: la producción de agua, percolación y evapotranspiración [20].

Para el cálculo del escurrimiento utiliza la ecuación modificada de Williams y Laseur (1976) a la técnica de número de curva; teniendo en cuenta las condiciones de humedad del suelo simulando un rango continuo de humedad haciendo así una estimación más realista del número de curva [20].

La figura No. 3 es una breve descripción del balance hídrico utilizado por el modelo SWRRB, del cual WEPP realizó varias modificaciones, una de ellas es el cambio de la forma de cálculo de la escorrentía utilizando las ecuaciones de ondas cinemáticas y el cálculo de la infiltración por medio de la ecuación de Green-Ampt; ambas mejoras serán descritas posteriormente.

**Figura 3.** Diagrama de proceso hídrico del modelo SWRRB



**Fuente:** [20]

- **Infiltración**

La infiltración dentro del modelo es calculada a partir de la ecuación mejorada de Green-Ampt [18], la cual es una modificación del modelo de infiltración de vertical de Richards. Se basa en las siguientes hipótesis iniciales [7]:

- a) Suelo encharcado con una lámina de agua  $h_0$  somera desde el principio ( $t \geq 0$ )
- b) Suelo profundo y homogéneo, con contenido de humedad igual a la profundidad de  $\theta_i$
- c) En el momento que se da un incremento en el contenido de agua del suelo, el modelo considera el movimiento del agua que se infiltra como un frente de desplazamiento tipo pistón.

En el modelo de Green y Ampt, considera un volumen de suelo mojado de profundidad  $L$ , que en el momento de inicio de infiltración el suelo tiene un contenido de humedad  $\theta_i$ , que luego de incrementar el proceso de penetración del agua toma un valor de  $\theta_s$ . Considerando que la porosidad,  $n$ , es aquel espacio que se llena de agua de tal forma que a medida que el agua se infiltra en el perfil de suelo el contenido de humedad va desde  $\theta_i$  hasta  $n$  [7].

El contenido de humedad,  $\theta$ , es la relación entre el volumen de agua y el volumen total dentro de la superficie de control. El incremento de agua que es almacenada en el volumen de suelo de control a partir de la infiltración es  $L(n - \theta_i)$  [7].

$$V_i(t) = L * (\Delta\theta)$$

Dónde:  $\Delta\theta = n - \theta_i$

Teniendo en cuenta los conceptos anteriores y la Ley de Darçy, la ecuación de Green y Ampt toma una modificación para la lámina de infiltración acumulada [7]:

$$K(t) = V_i(t) - \varphi * \Delta\theta * \ln\left(1 + \frac{V_i(t)}{\varphi * \Delta\theta}\right)$$

Donde  $\varphi$  es la cabeza de succión del suelo en el frente mojado

$K(t)$  es la conductividad hidráulica de suelo no saturado.

La conductividad hidráulica de un suelo no saturado varía directamente con el contenido de humedad en el suelo. A medida que se infiltra el agua en el suelo con el paso del tiempo se llega a condiciones de saturación constante de  $K$ ; siendo este utilizado en la ecuación de Darçy para medios permeables saturados [7].

Es decir,  $t \rightarrow \infty, V_i(t) \rightarrow K$ .

Para un suelo saturado, la ecuación sería:

$$V_i(t) = K * \left(\frac{\varphi * \Delta\theta}{V_i(t)} + 1\right)$$

La aplicación de la ecuación de Green y Ampt necesita parámetros de suelo específicos como: tipo de suelo, porosidad, porosidad efectiva, cabeza de succión del suelo el frente mojado y la conductividad hidráulica.

- **Escorrentía**

La escorrentía o escurrimiento calculada por el modelo WEPP se basa en las ecuaciones de ondas cinemáticas o una aproximación de dichas ecuaciones bajo una gama de distribuciones de la intensidad de lluvia, rugosidad hidráulica y valores de parámetros de infiltración [18]. Las simplificaciones de las ondas cinemáticas son iguales a las de los hidrogramas unitarios basados en la precipitación uniforme sobre la subcuenca, en las cuales no se considera el efecto de remanso en los canales y ni flujo a presión, ya que las ecuaciones de ondas cinemáticas no tienen en cuenta la atenuación normalmente dada por las tuberías [7]. Por lo dicho anteriormente no se recomienda utilizar el modelo de ondas cinemáticas para tuberías.

Para la construcción de modelos de lluvia-escorrentía, supone que el movimiento del agua ocurre en forma continua formando una lámina de agua que cubre toda el área de ladera. En la mayoría de veces, los datos tomados en campo confirman que dicha lámina de agua se mantiene por cortos períodos de tiempo y casi nunca cubren toda el área precipitada; pero el relieve propio de la zona la mayoría de veces genera riachuelos o charcos dentro del área precipitada [21].

Las ecuaciones de onda cinemática hacen una aproximación al modelo de flujo bidimensional en ladera, despreciando las fuerzas iniciales, derivadas espaciales de la profundidad del agua y el efecto dinámico de la lluvia. El sistema de ecuaciones tiene la siguiente estructura [21]:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = \varepsilon$$

$$\frac{\partial n}{\partial x} = F_x; \frac{\partial n}{\partial y} = F_y$$

Dónde:

**h** = Profundidad de la lámina de agua; **q<sub>x</sub>** = Caudal elemental en dirección x; **q<sub>y</sub>** = Caudal elemental en dirección y; **ε** = Intensidad de los aportes (Precipitaciones netas);  $\frac{\partial n}{\partial x}$  = Pendiente hidráulica en dirección x;  $\frac{\partial n}{\partial y}$  = Pendiente hidráulica en dirección y; **F<sub>x</sub>** = Componente de las fuerzas de fricción en sentido x; **F<sub>y</sub>** = Componente de las fuerzas en fricción en sentido y.

- **Componente de erosión**

El componente de erosión del modelo WEPP se presenta en dos formas: Erosión laminar (intersurcos) y la erosión en surcos. La primera, se da en función de la intensidad de la lluvia y el escurrimiento laminar, también intervienen la pendiente de la zona, la rugosidad del suelo y la erosionabilidad de este. Mientras que la segunda forma de erosión se encuentra en función de

la capacidad de separación y transporte de partículas de suelo por parte del flujo en los surcos de erosión, así como la propia carga de sedimentos presente en él [22].

WEPP se basa en la ecuación de continuidad para describir el transporte de sedimentos en surcos, la cual se expresa de la siguiente forma [23]:

$$\frac{\partial G}{\partial x} = Df + Di$$

Dónde:

**G** = La carga de sedimentos ( $\text{Kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ); **X** = Distancia sobre la pendiente en metros (m); **Di** = Separación y entrega de sedimentos de origen laminar a los surcos ( $\text{Kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ); **Df** = Tasa de erosión en los surcos ( $\text{Kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ).

La separación y entrega de sedimentos de origen laminar a los surcos (*Di*) se calcula de la siguiente forma:

$$Di = K_{iadj} * I_e * \sigma_{ir} * SDR_{RR} * F_{nozzle} * \left(\frac{R_s}{w}\right)$$

Dónde:

**K<sub>iadj</sub>** = Erosionabilidad laminar ajustada ( $\text{Kg} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-4}$ ); **I<sub>e</sub>** = Intensidad efectiva de la lluvia (m/s); **σ<sub>ir</sub>** = Tasa de escurrimiento laminar (m/s); **SDR<sub>RR</sub>** = Relación de entrega de sedimentos de origen laminar; **F<sub>nozzle</sub>** = Factor de energía de la aspersión; **R<sub>s</sub>** = Espacio entre surcos de erosión (m); **w** = ancho de los surcos de erosión (m).

La tasa de erosión en los surcos (*Df*), se calcula en aquellos casos en que la fricción hidráulica del flujo supera la resistencia crítica del suelo a la fricción y también cuando la carga de sedimentos es inferior a la capacidad de transporte [23]:

$$Df = K_{radj} * (\tau_f - \tau_{cadj}) * \left(1 - \frac{G}{T_c}\right)$$

Dónde:

**G** = Carga de sedimentos ( $\text{Kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ); **T<sub>c</sub>** = Capacidad de transporte de sedimentos en el surco ( $\text{Kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ); **K<sub>radj</sub>** = Parámetro de erosionabilidad del surco (s/m); **τ<sub>f</sub>** = Fricción hidráulica del flujo (Pa); **τ<sub>cadj</sub>** = Resistencia crítica del suelo a la fricción hidráulica (Pa).

Los parámetros de erosionabilidad del surco y la resistencia crítica del suelo a la fricción hidráulica o en caso de no hacerlo, el modelo calcula dichos parámetros.

La capacidad de transporte de sedimentos en el surco puede ser calculada a partir de la siguiente ecuación [23]:

$$T_c = K_{tr} * q_w * S$$

Dónde:

$K_{tr}$  = Constante de erosionabilidad del surco;  $q_w$  = Descarga de flujo por unidad de ancho ( $m^2/s$ );  $S$  = Pendiente (%)

Teniendo en cuenta las ecuaciones descritas anteriormente, la ecuación de deposición se da de la siguiente forma [23]:

$$\frac{\partial G}{\partial x} = \frac{\beta_r * V_f}{q_w} (T_c - G) + D_i$$

Dónde:

$V_f$  = Velocidad efectiva de la caída del sedimento (m/s);  $\beta_r$  = Coeficiente de turbulencia inducida por las gotas de lluvia (0-1)

## 6 MARCO METODOLOGICO

La figura No. 4 es un diagrama de flujo donde se describe de manera sencilla el proceso metodológico que se llevó a cabo para el desarrollo del presente proyecto de grado. Los números en rojo hacen referencia a la actividad metodológica a realizar, las cuales serán descritas con mayor detalle a continuación:

### FASE 1: REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

La primera fase del marco metodológico hace referencia a la revisión bibliográfica respecto a los modelos de TETIS y WEPP basada en tesis doctorales, artículos científicos y los manuales usuarios de los respectivos modelos.

Dentro de la revisión se tuvieron en cuenta aspectos importantes, como la funcionalidad y eficiencia de los modelos en condiciones parecidas a las de Colombia y específico en cuencas grandes como las del Neusa; además de la resolución espacial y temporal de la información climatológica.

### FASE 2: RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN Y PRE-PROCESAMIENTO DE DATOS

La recolección de información va ligada directamente con la revisión bibliográfica de los modelos donde se especifica los datos de entrada directamente, los cuales son descritos a continuación con los requerimientos propios de cada modelo.

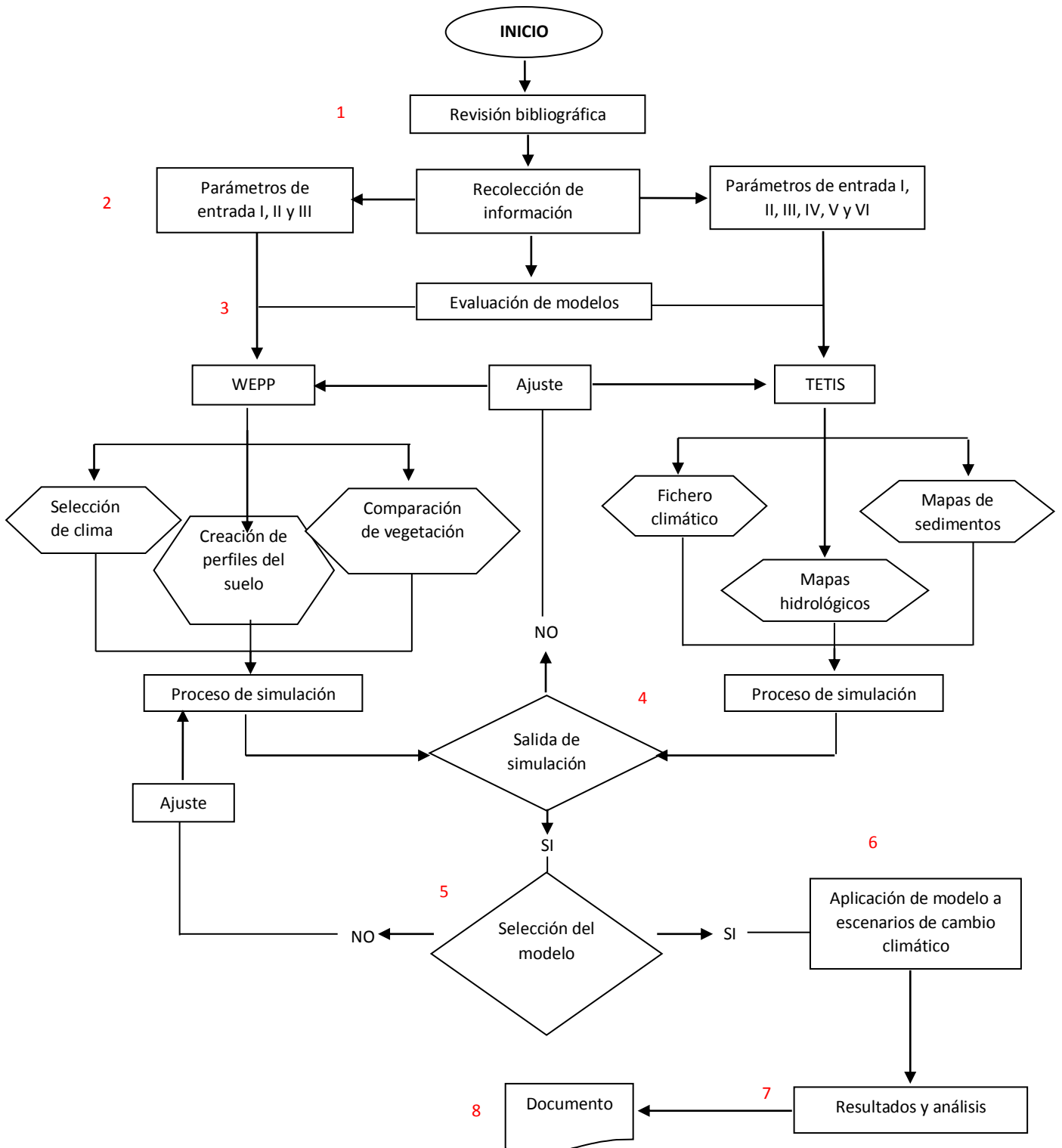
- **DEM**<sup>I</sup>: Modelo digital de elevación, es requerido por ambos modelos (TETIS y WEPP), para el correcto funcionamiento de cada uno la resolución del DEM es diferente. Para TETIS se utilizó una resolución más detallada 30x30 y para WEPP una de 90x90.
- **Edafología**<sup>II</sup>: Los dos modelos requieren información edafológica la cual contiene características físicas a partir de los perfiles de suelo, tales como: textura, % de grava, profundidad, % de arena, limo y arcilla.

En cuanto a las características químicas se encontró principalmente variables como % de materia orgánica y salinidad. Para el modelo TETIS en específicamente se realizó el cálculo de las variables de: Capacidad de campo (CC), punto de marchitez (CPM), conductividad hidráulica, contenido de humedad del suelo; a partir del programa Soil and Water Characteristics.

Se utilizó un mapa de edafología de escala 1:50.000 obtenido del Instituto Agustin Codazzi.

- **Clima** <sup>III</sup>: Para la modelación climática de la zona en ambos modelos fue necesario la utilización de información diaria de las siguientes variables: Precipitación, temperatura máxima y mínima. Más adelante se realizará una descripción más detallada dependiendo del modelo a utilizar.

**Figura 4. Diagrama de flujo del proceso metodológico**



**Fuente:** Elaboración propia

- **Uso de suelo** <sup>IV</sup>: Respecto a la información de uso de suelo, ambos modelos requieren el tipo de cobertura encontrado en la zona. Por ejemplo, para el modelo TETIS es necesario contar con datos de profundidad de raíces dependiendo a la cobertura existente.  
Se utilizó el mapa de cobertura vegetal a escala 1:100.000 con leyenda de CORINE Land Cover adaptada para Colombia.
- **Geología** <sup>V</sup>: La información geológica perteneciente a la subcuenca del Río Neusa fue requerida solamente para la generación de mapas iniciales necesarios para el funcionamiento del modelo TETIS.  
Se utilizó el mapa geológico para Cundinamarca escala 1:50.000 que contiene parámetros de formación geológica y tipo de roca asociada.
- **Hidrología** <sup>VI</sup>: Se utilizaron datos de caudales diarios registrados en el período de 2010-2011 para la utilización del modelo TETIS puesto que es un parámetro de entrada importante en la generación del fichero del evento inicial. Para WEPP no fue necesario este tipo de información.

### **FASE 3: EVALUACIÓN DEL MODELO SEGÚN LA CANTIDAD Y PRE-PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN**

La fase 3 hace referencia a la primera evaluación de los modelos basada en el criterio de cantidad y procesamiento necesario para cada uno de los datos de entrada necesarios por cada uno de los modelos.

Dentro del pre-procesamiento de datos para la correcta simulación, existen diferencias entre los dos modelos por lo tanto a continuación se realizará una descripción de cada uno:

#### ➤ **WEPP**

- \* **Selección del clima:** La información climática fue seleccionada a partir de las estaciones climatológicas que estuviesen dentro de la cuenca y un buen volumen de datos registrados, teniendo en cuenta que la selección se encontrase dentro de las estaciones evaluadas en la tercera comunicación sobre el cambio climático del IDEAM. En conclusión a lo anterior se utilizó la estación 2120540 ubicada en el municipio de Checua haciendo uso de los datos diarios de precipitación, temperatura mínima y máxima registrada en el período de 2000-2015.  
El archivo climatológico requerido por WEPP puede ser generado desde su propio software de generación climática CLINGEN o puede ser introducido por el usuario en formato .txt.
- \* **Creación de perfiles de suelo:** Debido a que WEPP funciona bajo una base de información de suelo fundado por el tipo y características propias de los suelos existentes en todos y cada uno de los estados de

Estados Unidos; se debe realizar una creación de propios perfiles de suelo, para esto se tuvo en cuenta diferentes características como: profundidad del suelo, % arena, % de limo, % de materia orgánica y conductividad hidráulica.

En total para la subcuenca del Neusa se generaron 24 perfiles de suelo nuevos.

- \* **Comparación de vegetación:** WEPP cuenta de igual forma con una base de cobertura vegetal relacionada con los tipos de uso del suelo existentes en Estados Unidos, por lo tanto se realizó una aproximación de los tipos de cobertura de la subcuenca del río Neusa hacia la de los Estados Unidos y así utilizar la información ya cargada por defecto en WEPP y descritas en su manual.

#### ➤ **TETIS**

- \* **Fichero climático (evento):** El fichero del evento climatológico para TETIS tiene la posibilidad de ingresar diferentes parámetros como precipitación, temperatura, fusión de nieve, caudales, puntos de no aforo entre otros. Tiene una restricción y es la resolución temporal, la cual no puede ser mayor a 24 horas, es decir, TETIS no lee promedios mensuales de información climática.

- \* **Mapas hidrológicos:** El modelo TETIS requiere 13 parámetros de entrada para la simulación hidrológica, estos deben ser ingresados en formatos .ASCII lo que quiere decir que fueron realizados 13 mapas diferentes dentro de los cuales 5 hacen referencia a los derivados del DEM (DEM, pendientes, velocidad de ladera, dirección y acumulación de flujo).

Otros 6 ficheros hacen referencia a los parámetros del suelo que necesitan de forma primordial la información descrita en el paso 2, a continuación se hace una breve descripción de los parámetros:

**Hu:** Almacenamiento capilar del suelo. Depende directamente del almacenamiento en charcos, el contenido óptimo de agua en el suelo (Capacidad de campo y Punto de marchitez) y la profundidad de raíces.

**Ks:** Conductividad hidráulica del suelo. Depende de la compactación, fracturación, textura y tipo de material del suelo. Es uno de los parámetros obtenidos directamente del software Soil and Water Characteristics (conductividad hidráulica del suelo).

**Kp:** Capacidad de percolación del sustrato rocoso. Depende directamente del tipo de suelo presente en la zona.

**Kss, Ksa, Kps:** Conocidos como: Conductividad hidráulica de interfolio, conductividad hidráulica del acuífero y capacidad de pérdidas del acuífero, respetivamente. Debido a que la falta de información de cada uno de estos parámetros se hizo la siguiente suposición:  $K_s = K_{ss}$ ,  $K_p = K_{sa}$  y  $K_{ps} = 0.1K_p$ .

Los otros dos parámetros faltantes hacen referencia a códigos de cobertura vegetal y el contenido óptimo de humedad.

- \* **Mapas de sedimentos:** La información requerida para la ejecución del sub modelo de sedimentos son 6 mapas en formatos .ASCII que hacen referencia a: % de arena, limo y arcilla, además de los factores C, K y P de la USLE necesarios para la solución de la ecuación de pérdida de suelo.

#### **FASE 4: MODELACIÓN EN CONDICIONES ACTUALES Y SELECCIÓN DEL MODELO**

Luego de tener los datos de entrada necesarios para cada uno de los modelos se realizó la debida simulación para los diferentes períodos de tiempo, ambos con datos diarios climatológicos actuales de las variables de: Precipitación, temperatura y para TETIS se agregó información de caudales. TETIS fue modelado en un período de 2010-2011 y WEPP en el período de 2000-2014.

La modelación de condiciones actuales se realizó con los dos modelos para decidir cuál se adaptaba mejor a las condiciones de la zona y la información disponible para esta. Dentro de este paso se obtuvo resultados por parte de ambos modelos.

Luego de obtener resultados en condiciones climáticas actuales para ambos modelos se procedió a seleccionar uno de ellos para continuar con las modelaciones de clima futuro. Para esto se tuvo en cuenta la calidad y la aproximación de los resultados frente a las condiciones reales del área de estudio, además de los parámetros de entrada.

#### **FASE 5: APLICACIÓN DEL MODELO ESCOGIDO A CONDICIONES DE CLIMA FUTURAS**

A partir de la obtención del resultado aceptable de la ecuación de la raíz del error cuadrático medio aplicado a los resultados obtenidos en el modelo seleccionado, se procedió a realizar las modelaciones para los escenarios de cambio climático RCP 2.6 y RCP 8.5. Se utilizaron estos dos escenarios de los cuatro establecidos para Colombia; debido a que son los caminos representativos donde las emisiones de gases efecto invernadero toman valores extremos dando como resultado menor o mayor forzamiento rotativo para años futuros.

Se realiza la modelación para los 3 períodos de tiempo establecidos en los escenarios de cambio climático en Colombia: 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100. Es decir, se realizaron 6 modelaciones más aparte de la realizada anteriormente para condiciones actuales.

Para determinar el cambio en el clima, se aplicó la tasa de cambio para cada RCP y período de tiempo correspondiente a la serie de datos diarios con las que se trabajó en el escenario actual y de esta forma obtener un valor más aproximado a la realidad actual.

## FASE 6: ANALISIS DE RESULTADOS

El análisis de resultados se basa principalmente en la identificación de la tasa de cambio y la dinámica de sedimentos dentro del área de estudio directamente con lo relacionado al embalse del Neusa; con el término “dinámica” se hace referencia a la cantidad de suelo que se pierde por erosión, cuanto de esto se sedimenta y cuanto se deposita en laderas y cauces.

Adicionalmente, para el análisis de resultados se realizó la proyección poblacional para los municipios de Chía, Cajicá y el 30% de Bogotá puesto que esta es la población que abastece la planta de Tibitóc. Esto con el objetivo de identificar la afectación social debido a la disminución del volumen útil del embalse. Se realizó un promedio de las proyecciones obtenidas de tres métodos diferentes; la descripción de los métodos utilizados en la proyección se describe en la tabla No. 4, presentada a continuación.

**Tabla 4.** Descripción de los métodos utilizados en la proyección poblacional.

MÉTODO	ECUACIÓN	DEFINICIÓN
<b>Método aritmético</b>	$P_f = P_{uc} + \frac{P_{uc} - P_{ci}}{T_{uc} - T_{ci}} * (T_f - T_{uc})$	Supone un cambio de crecimiento vegetativo balanceado por la mortalidad e inmigración [24].
<b>Método Geométrico</b>	$P_f = P_{uc}(1 + r)^{T_f - T_{uc}}$	Es útil para poblaciones que demuestran gran desarrollo económico y expansión [24].
<b>Método exponencial</b>	$P_f = P_{ci} * e^{k(T_f - T_{uc})}$	Se aplica para poblaciones con gran desarrollo y abundantes área de expansión [24].

**Fuente:** Elaboración propia.

Dónde:

$P_f$  = Población final;  $P_{uc}$  = Población de la proyección del DANE;  $P_{ci}$  = Población del censo con información;  $T_{uc}$  = Año de la proyección del DANE;  $T_{ci}$  = Año correspondiente al censo con información;  $T_f$  = Año a proyectar;  $r$  = Tasa de crecimiento anual;  $k$  = Tasa de crecimiento poblacional.

## 7 ANALISIS Y RESULTADOS

### 7.1 SELECCIÓN DEL MODELO

#### 7.1.1 TETIS

Para la modelación en TETIS se utilizaron 6 estaciones de precipitación, una de temperatura y una de caudales. En la tabla No. 5 presentada a continuación, se hace una breve descripción de estas.

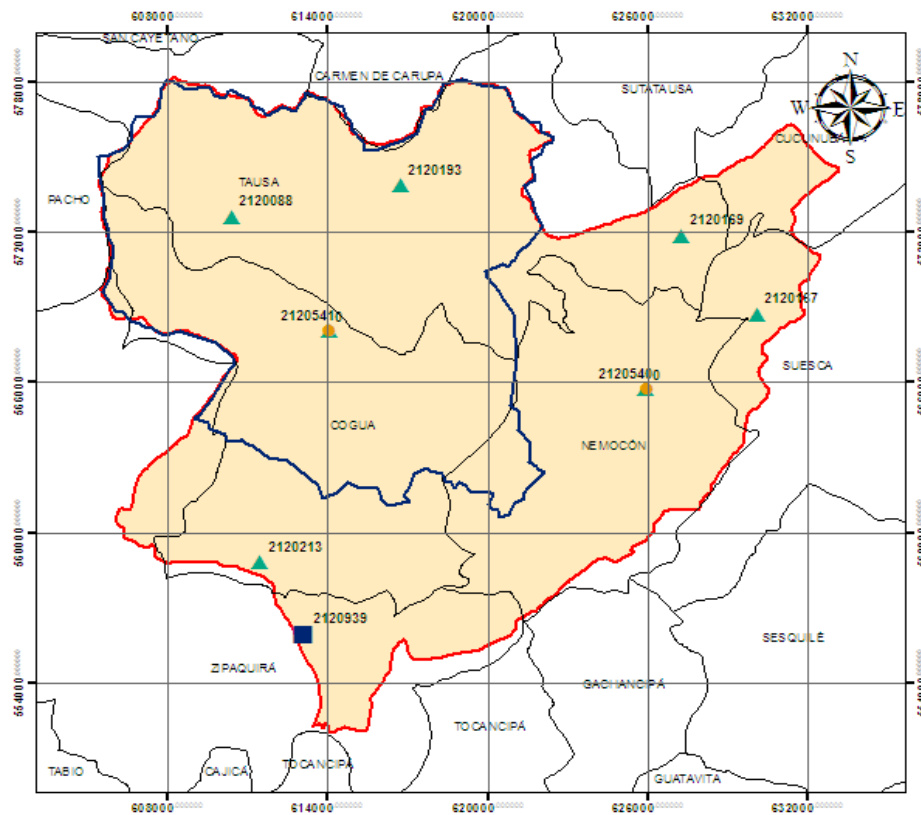
**Tabla 5.** Descripción de las estaciones utilizadas en la modelación con TETIS.

	ESTACIONES	COORDENADAS UTM	
		X	Y
TETIS	PRECIPITACIÓN		
	2120540	626206	565703
	2120169	627272	571847
	2120193	616739	573825
	2120213	611467	558769
	2120167	630111	568689
	2120088	610398	572587
	TEMPERATURA		
	2120540	626206	565703
	CAUDALES		
2120939	613112	555894	

**Fuente:** Elaboración propia.

En el mapa No. 8, se evidencia la posición geográfica y espacial de dichas estaciones utilizadas para la modelación en el software TETIS.

**Mapa 8.** Ubicación geográfica de las estaciones utilizadas en la modelación en TETIS.



**Leyenda**

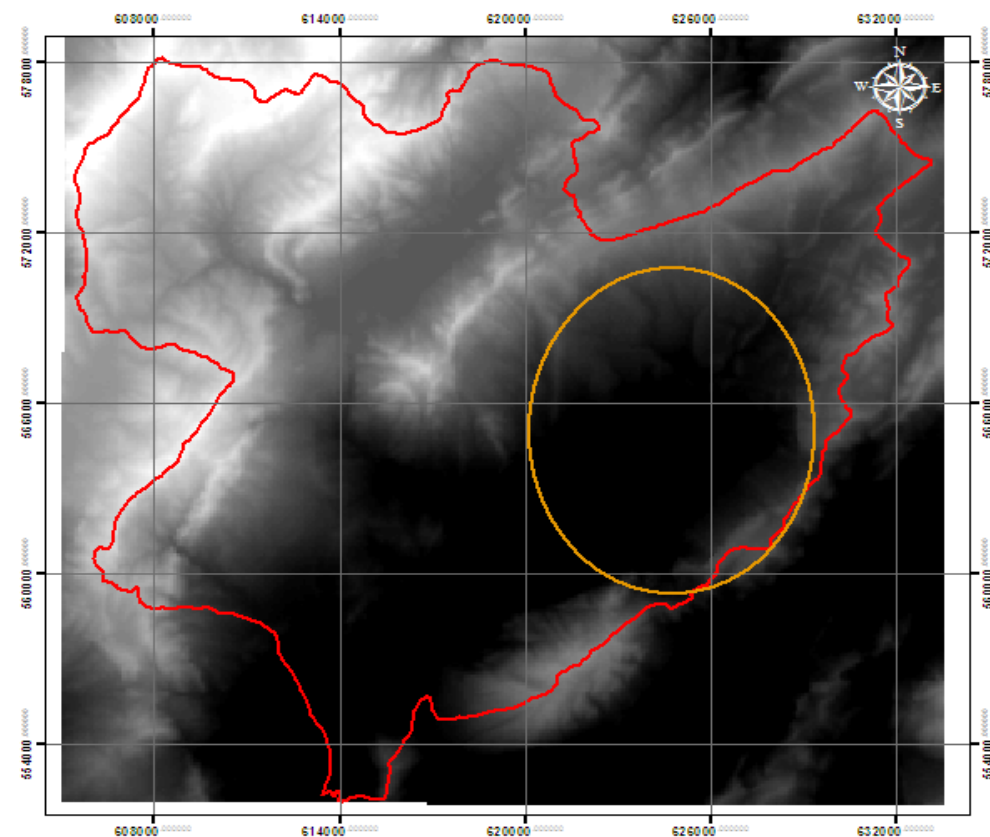
**Parametro**

- |  |  |
|--|--|
| <span style="color: blue;">■</span> Caudal         | <span style="border: 1px solid blue; padding: 2px;"> </span> Area de estudio |
| <span style="color: green;">▲</span> Precipitacion | <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> </span> Municipios     |
| <span style="color: yellow;">●</span> Temperatura  | <span style="border: 1px solid red; padding: 2px;"> </span> Cuenca del Neusa |

**Fuente:** Elaboración propia.

El software TETIS funciona principalmente bajo la correcta lectura de la información descrita en el modelo digital de elevación, donde supone que las celdas con menores valores de elevación corresponden a una celda de acumulación de flujo. En el caso del DEM utilizado para la modelación ocurría lo contrario puesto que en la parte oriental de la cuenca existe la presencia de un valle como puede ser observado en el mapa No. 9 presentado a continuación, generando así celdas bajas sin acumulación de flujo y celdas con mayor elevación que presentaban acumulación, ocasionando así inconsistencias para la correcta lectura por TETIS.

**Mapa 9.** Modelo Digital de Elevación (DEM), resolución 30x30 utilizado en la modelación con el software TETIS.



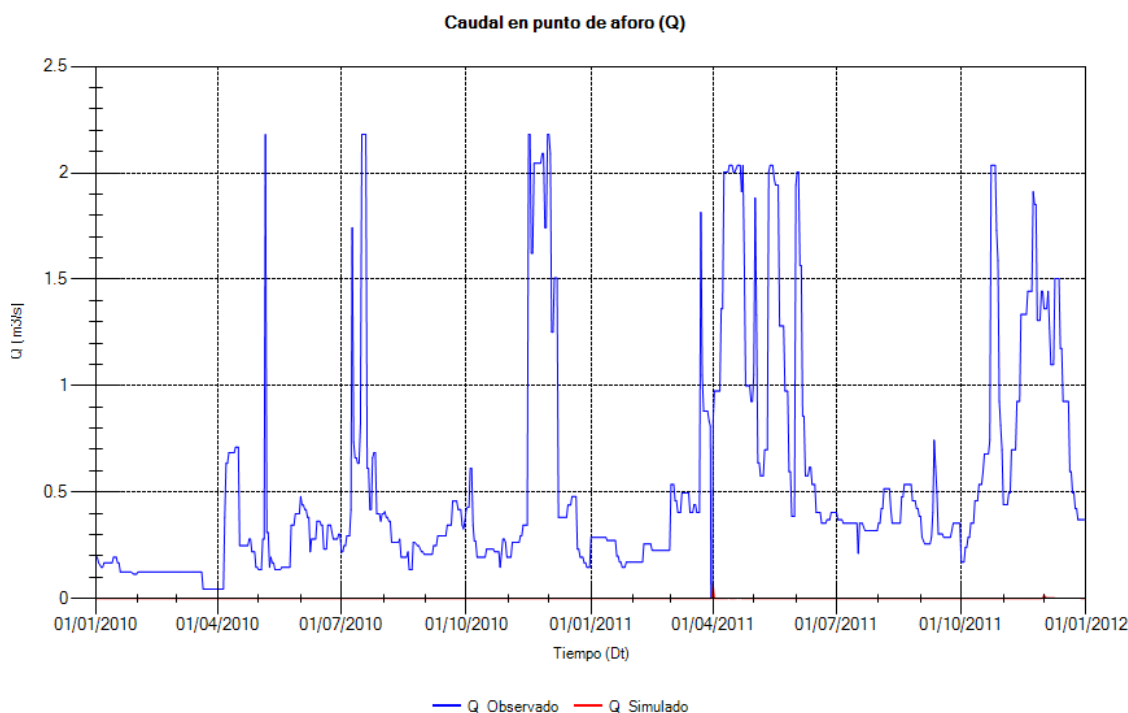
**Fuente:** Elaboración propia.

La lectura errónea del modelo de elevación es el inicial generador de errores en el software, por lo cual se realizó un tratamiento previo a la modelación, donde se pretendía corregir el modelo de tal forma que la celdas de menor elevación presentarán una acumulación, además de tener como última opción el cambio de resolución del DEM pero a pesar de lo anterior los resultados seguían siendo erróneos y poco aproximados a la realidad del área de estudio.

A demás del tratamiento nombrado anteriormente se realizó un ajuste a los parámetros de entrada como por ejemplo, volver a calcular los parámetros de entrada principales bajo nuevas ecuaciones recomendadas por varios expertos en el manejo de TETIS. Este procedimiento es explicado de mejor manera en: “Guía metodológica para el pre-procesamiento de datos y ejecución del modelo hidrológico TETIS” (Anexo 2).

Dentro de los resultados arrojados por TETIS se obtuvo como relevante el siguiente histograma donde se compara la serie de caudales diarios introducidos vs. Los caudales simulados por el programa.

**Gráfica 4.** Caudales observados vs. Caudales simulados, generados por TETIS.



**Fuente:** Elaboración propia.

En la gráfica anterior, se puede observar la gran diferencia en la simulación de caudales. Adicionalmente, como resultado, TETIS arroja información sobre variables estadísticas como el Índice de Nash-Sutcliffe y el porcentaje de error, aparte de variables propias de la actividad hidrológica de la cuenca como el volumen en Hm<sup>3</sup> y el área calculada. Los parámetros nombrados anteriormente se evidencian en la tabla No. 6.

**Tabla 6.** Parámetros estadísticos y propios de la cuenca, calculados por TETIS.

PARAMETRO	VALOR
Caudal máximo Observado (m <sup>3</sup> /s)	2.181
Caudal máximo simulado (m <sup>3</sup> /s)	0.063
RMSE	0
Volumen Observado (Hm <sup>3</sup> )	34.21
Volumen Simulado (Hm <sup>3</sup> )	0.01
Error en Volumen (%)	-99.97
Índice de Nash y Sutcliffe	-1.031
Área Acumulada (Km <sup>2</sup> )	0.031

**Fuente:** Elaboración propia.

En la tabla No. 6, se evidencian los valores resultantes de la modelación. La diferencia en los caudales observados y simulados, es el primer inconveniente puesto que como se puede ver en la gráfica anterior los caudales simulados son extremadamente pequeños comparados con los observados.

Adicional a esto, la raíz del error medio cuadrado (RMSE) resultó con un valor de 0, indicando que la eficiencia del modelo respecto a la información introducida no es confiable debido a que no hay correlación entre los caudales observados y los simulados. De igual forma, el valor del Índice de Nash y Sutcliffe (-1.031) indica que el ajuste del modelo no es bueno, debido a su valor negativo.

Uno de los criterios más importantes para decidir que TETIS no funcionaba de manera correcta para la modelación hidrológica de la cuenca del Neusa fue el cálculo del área de influencia que dio como resultado de 0.031 Km<sup>2</sup> siendo esto incorrecto debido a que este parámetro es calculado desde el punto de aforo (la estación 2120930), ubicada en la parte baja de la cuenca indicando así que el área aproximada debería ser mayor de la mitad del área total.

El modelo TETIS cuenta con un componente de calibración automática, con la ayuda de este se realizó una calibración para los parámetros de entrada con el objetivo de disminuir el valor del Índice de Nash y Sutcliffe y el % de error en volumen. Se realizaron varias calibraciones, donde el mejor resultado que se logró fue una reducción en el porcentaje de 0.1 aproximadamente y un valor resultante del Índice de Nash de -1.028.

### **7.1.2 WEPP**

La modelación en WEPP solo requirió una estación, identificada con el código: 2110541 (su ubicación se puede observar en el mapa No. 8) la cual contaba con los datos diarios de precipitación, temperatura máxima y mínima.

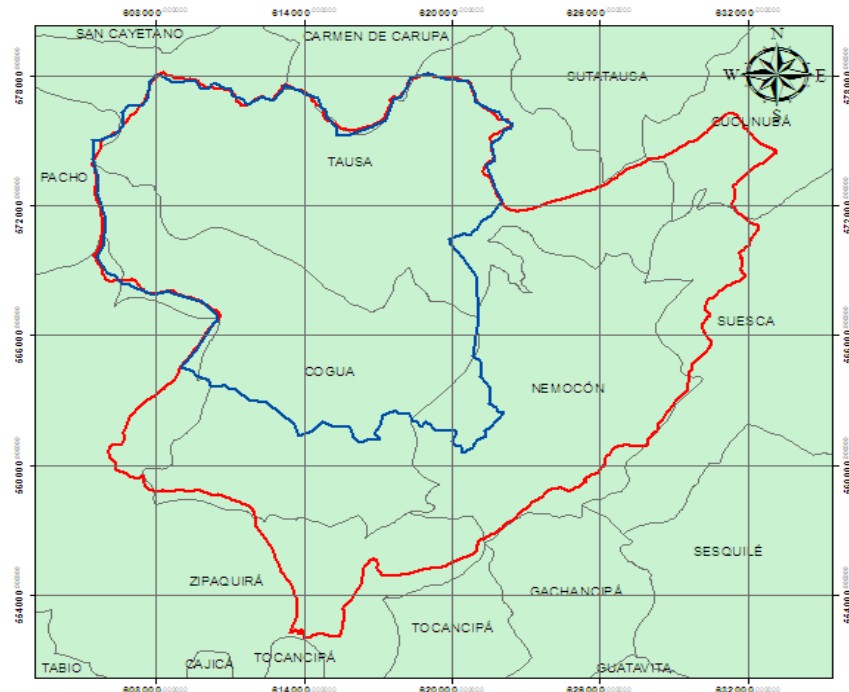
En la primera simulación con WEPP se generaron errores en el modelo debido a:

- El tamaño de celda del modelo digital de elevación de 30x30 es muy pequeño generando para toda la cuenca un total de más de 200.000 pixeles que es el límite máximo del modelo WEPP.
- La planicie de la cuenca ubicada en la zona suroriental de la cuenca, cuenta con valores mínimos de altura en celdas que no corresponden a celdas de acumulación.

Debido a lo anterior, se realizó la modelación de la cuenca en cuatro secciones diferentes. La parte nororiental, noroccidental, suroriental y suroccidental con el fin de encontrar cuál de estas generaba el error presentado en la modelación de la cuenca completa. Se identificó que las subcuencas que el modelo no podía simular hacen referencia a la planicie ubicada en la parte oriental de la cuenca, por lo tanto se procedió a modelar la parte noroccidental de la cuenca partiendo del hecho de que la zona imposible de modelar no cuenta con erosión representativa según información sobre la pérdida de suelo de la CAR POMCA, además las vertientes de dicha zona no alimentan al embalse, por lo tanto este no se encontraría afectado por la mínima erosión de la zona.

En el mapa No. 10, se muestra la zona de estudio seleccionada para la modelación en WEPP.

**Mapa 10.** Zona de estudio escogida para la modelación en WEPP



### Leyenda

Área de estudio Cuenca del Neusa Municipios

Debido a que el modelo seleccionado fue WEPP, los resultados obtenidos bajo condiciones actuales y condiciones de clima futuro se muestran de forma específica en los siguientes apartados.

## 7.2 CAMBIO EN EL CLIMA EN LA ZONA DE ESTUDIO

El primero de los resultados obtenidos dentro del presente proyecto va encaminado en los cambios climatológicos vistos en cada una de las variables evaluadas en la actualidad y registros históricos (período de tiempo de 200-2014) y la tasa de cambio establecida por cada uno de los escenarios de cambio climático aplicada en cada período de tiempo (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100).

Se debe tener en cuenta que la tasa de cambio para cada RCP y su correspondiente período de tiempo fue aplicada al período de tiempo utilizado como los datos actuales con el objetivo de poder compararlos de alguna forma; además se utilizó el valor establecido por el IDEAM para la región hidroclimática del Magdalena medio. El cambio dado para las temperaturas (mínima y máxima) se encuentra en °C, es decir, es directamente la cantidad de grados de temperatura que probablemente aumentarán o disminuirán en el futuro. En otro caso, la variación de la precipitación se da en porcentaje (%) de cambio, por lo tanto para este caso en específico se aplicó ese % a la serie de datos actuales y se restó o sumó dependiendo de la tasa como tal.

La Tabla No. 7, muestra las tasas de cambio aplicadas en las variables climáticas para los diferentes períodos de tiempo y RCP's utilizados.

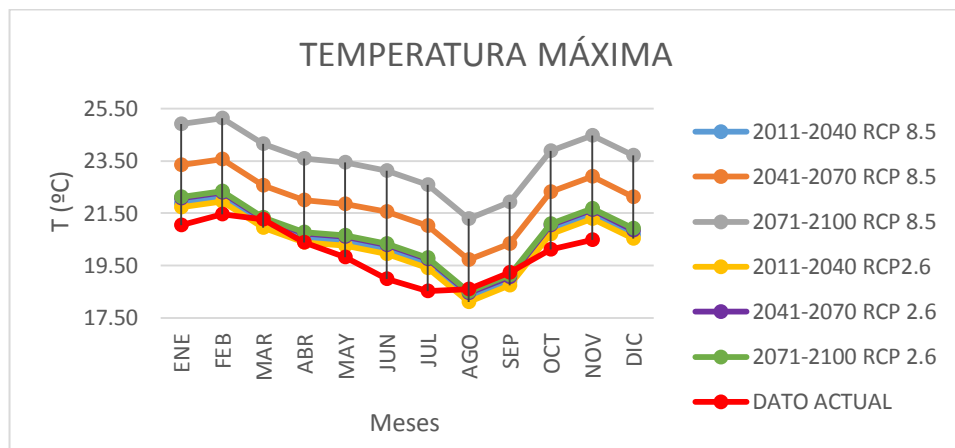
**Tabla 7.** Tasas de cambio aplicadas a cada una de las variables climatológicas según el período de tiempo y RCP utilizado.

	TEMPERATURA MÍNIMA			TEMPERATURA MÁXIMA			PRECIPITACIÓN		
	2011-2040	2041-2070	2071-2100	2011-2040	2041-2070	2071-2100	2011-2040	2041-2070	2071-2100
2.6	0.88	1.26	1.25	1.01	1.35	1.4	2.3	3.4	7.2
8.5	1	2.31	3.72	1.16	2.62	4.19	4.6	7.3	8.1

Fuente: [9]

Las siguientes tres gráficas, evidencian el cambio temporal de la temperatura máxima, mínima y de la precipitación en las condiciones actuales (línea roja) frente a cada uno de los escenarios evaluados.

**Gráfica 5.** Cambio de la temperatura máxima respectiva a cada escenario de cambio climático comparados con los valores registrados en el período de 2000-2014.



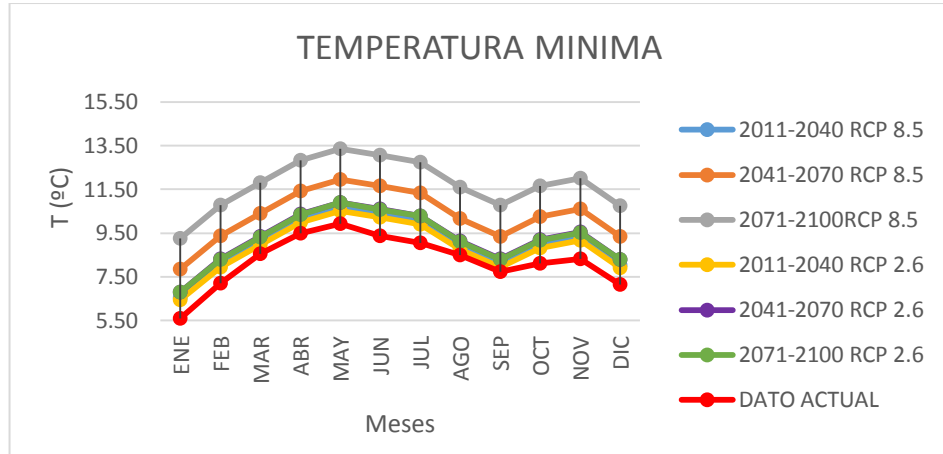
Fuente: Elaboración propia.

La grafica anterior muestra el comportamiento de la temperatura máxima media mensual multianual en los diferentes períodos de tiempo evaluados a los cuales se les aplicó la tasa de cambio descrita anteriormente. Se puede observar que en los meses de enero, febrero, noviembre y diciembre registran los valores más altos de temperatura siendo este comportamiento igual para los RCP's aplicados y los diferentes períodos evaluados. También es válido mencionar que los meses agosto y septiembre se evidencia uno de los menores picos de temperatura máxima en el año.

En la gráfica No. 5 se evidencia que los cambios de temperatura máxima en el transcurso del año no muestran pendientes abruptas ni cambios fuertes debido a que se obtuvo a partir de los registros de los datos diarios; mientras que las líneas referentes a los RCP's aplicados se comportan de forma parecida y la

pendiente observada mes a mes es más fuerte debido a que los mismos datos registrados se les da una tasa de cambio específica.

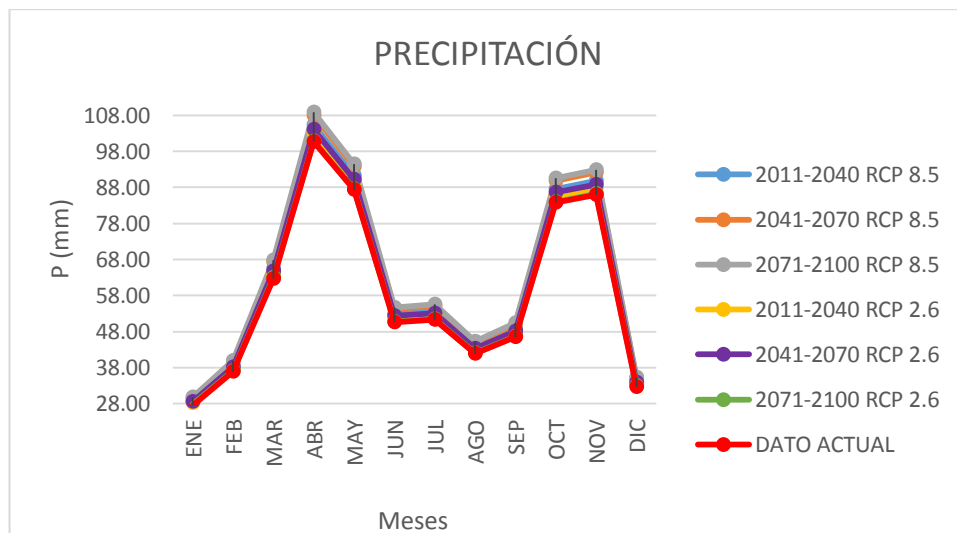
**Gráfica 6.** Cambio de la temperatura mínima respectiva a cada escenario de cambio climático comparado con los valores registrados en el período de 2000-2014.



**Fuente:** Elaboración propia.

La grafica No. 6 hace referencia al cambio de temperatura mínima mensual multianual donde se puede observar que el pico más alto se presenta en los meses de mayo, junio y julio; mientras que los picos más bajos se dan en los meses de enero y diciembre. Siendo este comportamiento inverso al de la temperatura máxima evidenciado en la gráfica No. 5.

**Gráfica 7.** Cambio de la precipitación respectiva a cada escenario de cambio climático comparados con los valores registrados en el período de 2000-2014.



**Fuente:** Elaboración propia.

La grafica anterior describe el comportamiento de la precipitación en los diferentes períodos de tiempo evaluados para cada RCP. Los picos más altos de precipitación se dan en los meses de abril, mayo y octubre, noviembre. Los

picos de menor precipitación se registran en los meses de enero, agosto y diciembre.

El cambio que se presenta en la gráfica no es tan evidente como en lo es en las gráficas de temperatura máxima y mínima; debido a que el rango de variabilidad de la precipitación es mucho mayor que el de la temperatura, haciendo que el porcentaje de cambio no sea tan grande como se evidencia en los demás parámetros.

### 7.3 RESULTADOS GENERALES DEL MODELO WEPP RESPECTO A LADERAS Y DRENAJES

Teniendo en cuenta que el modelo WEPP genera diferentes laderas según la relación de los atributos de tipo de suelo y cobertura vegetal pertenecientes a la zona de estudio, a continuación se presenta la clasificación de laderas con sus respectivas características las cuales son de importancia para la modelación y el análisis de resultados de pérdida de suelo y tasa de sedimentación.

**Tabla 8.** Clasificación de laderas con sus respectivas características de tipo de suelo y cobertura vegetal.

LADERA	TIPO DE SUELO	COBERTURA	ÁREA (Ha)
22	CC 205 CC 2051 AC 55	Pastos Limpios	108.5
23	CC 205 CC 2051 AC 55	Pastos limpios - Mosaico de pastos con espacios naturales y pastos limpios	76.4
32	CC 205 CC 2051 AC 55, AC 34 AC 33 CU 111, B124 AC90 J17A	Pastos limpios, Arbustal	331.7
33	CC 205 CC 2051 AC 55, AC34 AC 33 CU 111, PS177 CC226 CU75 CC228, CC94 MU23	Arbustal, Pastos limpios, Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	1533.3
43	B124 AC90 J17A	Mosaico de cultivos y pastos. Pastos limpios, arbustal	389
41	CC307 CU79 CC308	Arbustales y herbazal	16.5
42	B124 AC90 J17A, MU 8 MU 24, CC307 CU79 CC308	Pastos limpios, herbazal, arbustal, tubérculos, mosaicos de pastos limpios y cultivos.	318.6
53	MU 8 MU 23, CC 307 CU 79 CC 308	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, Arbustal y pastos limpios	305.6
52	MU 8 MU 23, CC 307 CU 79 CC 308	Mosaicos de cultivos y pastos, pastos limpios y arbustal	185.8

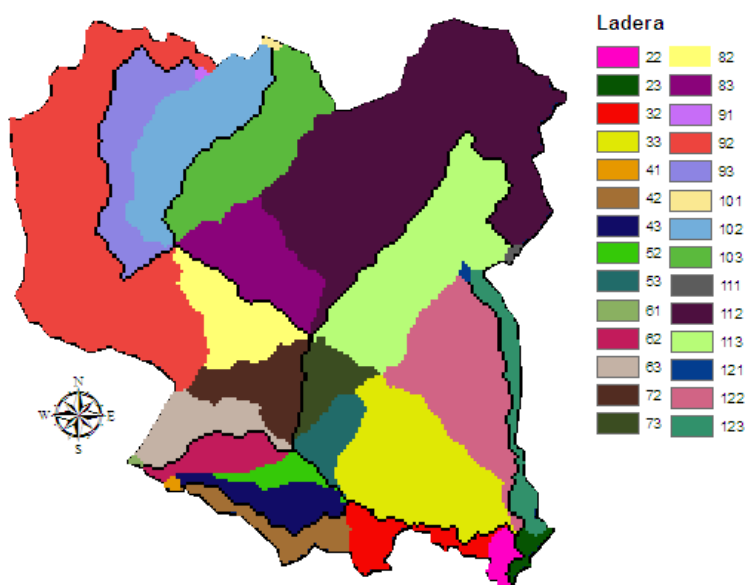
63	CU 149 CU 126 CC 210, CC94 MU 23, PS 177 CC226 CU75 CC227	Herbazal, pastos limpios, Mosaico de pastos con espacios naturales, Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales.	486.2
62	CU 149 CU 126 CC 210, CC94 MU 23, PS 177 CC226 CU75 CC228, CC 284 MU 11 MU 12	Herbazal, arbustal y pastos limpios	332.5
61	CU 149 CU 126 CC 210	Herbazal	10.4
73	PS 117 CC 226 CU 75 CC 228, CC 94 MU 23	Pastos limpios y plantación forestal, arbustal.	331.7
72	MU 8 MU 24, CC 2084 MU 11 MU 12	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, arbustal, pastos limpios y plantación forestal.	548.7
83	CU 149 CU 126 CC 210, CC 284 MU11 MU 12, MU9 N16 CC 3106, Cuerpos de agua (embalse)	Herbazal, arbustal, mosaico de pastos y cultivos, mosaico de pastos con espacios naturales y cuerpos de agua (embalse)	850
82	CU 149 CU 126 CC 210, CC 284 MU11 MU 12, MU 8 MU 24	Pastos limpios, plantación forestal y Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, cuerpos de agua (embalse)	669.4
92	CU 132 EB 23 EB 24, CC 284 MU 12 MU 11, CU 149 CU 126 CC 210, CU 152 CU 135, cuerpo de agua (laguna)	Arbustal, tubérculos, mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	3229.9
93	CU 152 CU 135, CU 149 CU 126 CC 210, CC284 MU 11 MU 12	Arbustal, herbazal, tubérculos y mosaico de pastos con espacios naturales	792.7
91	CU152 CU135	Herbazal	13
101	CU 132 EB 23 EB 24	Herbazal	15.6
102	CU 132 EB 23 EB 24, CU 149 CU 126 CC 210	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, bosque de galería y ripario, tubérculos, arbustal y herbazal.	1118.3
103	CU 132 EB 23 EB 24, CU 149 CU 126 CC 210	Mosaico de pastos con espacios naturales, tubérculos, Mosaico de pastos y cultivos, arbustal, herbazal y bosque de galería y ripario.	1140

112	Cuerpos de agua, MU9 N16 CC 306, CU 132 EB 23 EB 24, CC 284 MU 11 MU 12	Arbustal, herbazal, Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, plantación forestal, Pastos limpios, lagunas, lagos y ciénagas naturales	3822
113	Cuerpos de agua, MU9 N16 CC 306, CC 94 MU 23	Arbustal, herbazal, tubérculos, pastos limpios y mosaico de pastos y cultivos	1702.6
111	CC 307 CU 79 CC 308	Mosaico de pastos y cultivos	15.6
121	CC 94 MU 23	Arbustal y herbazal	16.5
123	CC 307 CU 79 CC308, CU 123 CU 171 CC 205	Arbustal, cultivos confinados, mosaico de pastos y cultivos, mosaico de pastos con espacios naturales	330.8
122	CU 94 MU 23, CC 307 CU 79 CC308, AC 69 AC 70, AC 8 CT 4 AC 18 CT 14, CU 132 CU 171 CC 255	Arbustal, herbazal y mosaico de pastos con espacios naturales	1354.5

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5, se muestra la distribución espacial dentro del área de estudio de las laderas generadas por el modelo, donde cada ladera tiene las condiciones de cobertura vegetal y uso de suelos descritos en la tabla anterior.

**Figura 5.** Distribución espacial de las laderas generadas por WEPP dentro del área de estudio.

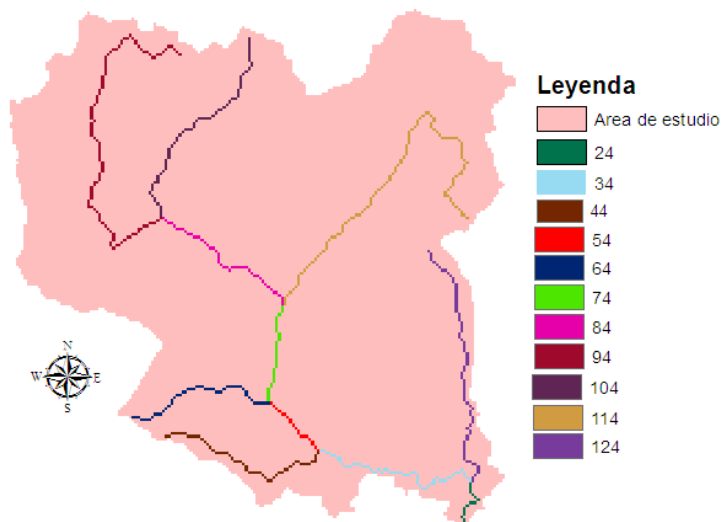


Fuente: Elaboración propia

Aparte de la obtención de las laderas, a partir del modelo digital de elevación (DEM) WEPP genera la red de drenajes de la cuenca para poder realizar la modelación frente a los procesos de erosión y sedimentación dentro de estos. Para eso, el modelo nombra los drenajes de forma aleatoria teniendo en cuenta la ubicación espacial de estos; como se puede evidenciar en la figura 6. Donde

los drenajes de menor valor son aquellos que se encuentran al final de la cuenca y aquellos de valores más altos están en la parte alta de esta.

**Figura 6.** Ubicación espacial de los drenajes generados por WEPP en el área de estudio.



**Fuente:** Elaboración propia.

Es importante contar con el conocimiento y descripción de las laderas generadas por WEPP como se evidencia en la Tabla No. 8, debido a que sus características propias de cobertura y tipo de suelo son de real importancia para las conclusiones del proyecto. Además del conocimiento y orden de los cauces dentro de la cuenca como se describió anteriormente, de este orden se parte para tener en cuenta deposición y cantidad de sedimentos en los cauces.

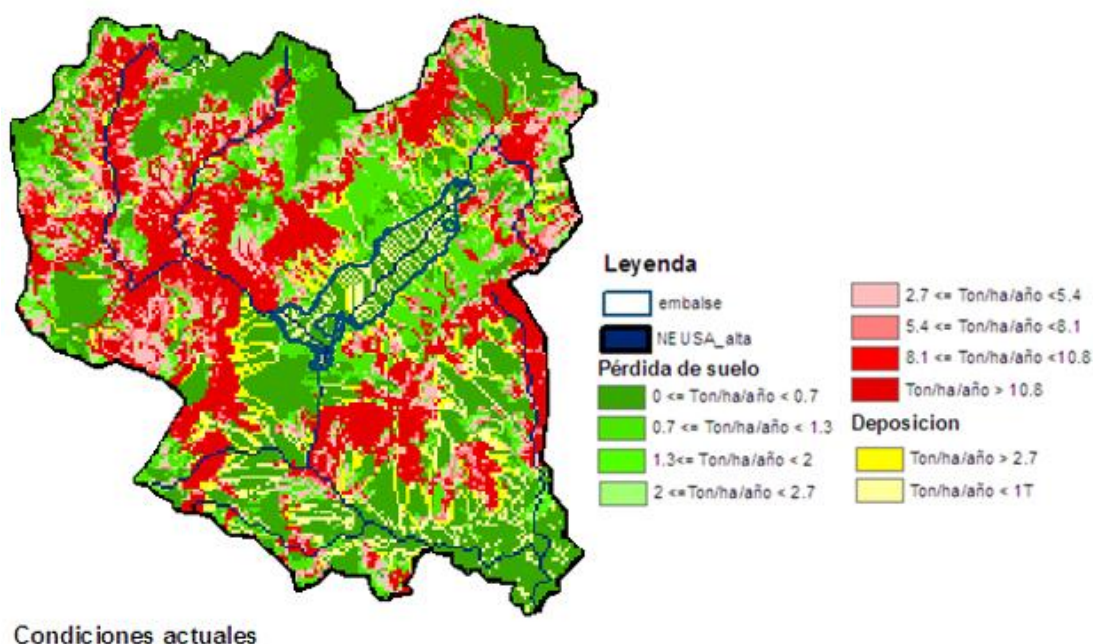
## **7.4 PÉRDIDA DE SUELO Y TASA DE SEDIMENTACIÓN SEGÚN ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO.**

### **7.4.1 CONDICIONES ACTUALES**

El período de tiempo simulado en las condiciones de clima actual fue del año 2000 al 2014, con datos diarios de precipitación, temperatura máxima y mínima para la estación 2120540 que se encuentra dentro de la cuenca.

En la figura No. 7 se evidencia la pérdida de suelo y la deposición de esta de manera espacial dentro de la cuenca.

**Figura 7.** Pérdida de suelo en condiciones climáticas actuales



**Fuente:** Elaboración propia.

En la Tabla 9, se muestra la pérdida de suelo y tasa de sedimentación resultantes en las laderas descritas anteriormente para este primer escenario de condiciones actuales.

**Tabla 9.** Pérdida de suelo y tasa de sedimentación en laderas para condiciones de clima actual.

Ladera	Área (ha)	Tasa de sedimentación (Ton/año)	Pérdida de suelo (Ton/ha/año)
22	108.5	0	0
23	76.4	0	0
33	1533.3	9.1	0
32	331.7	0	0
43	389.0	5.7	0
41	16.5	2.3	0.1
42	318.6	40.4	0.1
53	305.6	2336.5	7.6
52	185.8	866.3	4.7
63	486.2	6.9	0.1
62	332.5	11.8	0
61	10.4	4.2	0.4
73	331.7	36.6	0.1
72	548.7	4.9	0
83	850	6059.4	7.1
82	669	63.2	0.1
92	3229.9	3908.2	1.2
93	792.7	106.6	0.1

91	13	0.3	0
101	15.6	0.5	0
102	1118.3	268	0.2
103	1140	134.9	0.1
112	3822	20025.7	5.2
113	1702.6	387.7	0.2
111	15.6	91.7	5.9
121	16.5	0.4	0
123	330.8	63.7	0.3
122	1354.5	12.3	0

**Fuente:** Elaboración propia.

En la tabla 10. Se puede evidenciar los resultados obtenidos para condiciones actuales de clima; la casilla de “Canal” hace referencia a la ubicación de los drenajes dentro de la cuenca (puede ser corroborada espacialmente en la figura 6), siendo el número 1 el ubicado en la parte más alta de la cuenca y el número 11 el ubicado en la desembocadura de esta.

**Tabla 10.** Variación temporal de la tasa de sedimentación y pérdida de suelo en los drenajes bajo la influencia del clima actual.

Canal	Descarga en volumen (m <sup>3</sup> /año)	Tasa de sedimentación (Ton/año)	Pérdida de suelo (Ton/año)
1	141967.3	931.5	855.01
2	1636153.7	7667.5	18.96
3	802658.7	3021.4	2938.33
4	570538.6	7999.5	4113.01
5	1772808.1	12400.9	6823.57
6	3419072.3	19164.7	2372.3
7	96072.4	1257.1	1201.9
8	3566716	24464	6754.1
9	70635.4	990.2	941.2
10	3648217.8	32551.1	11382.6
11	3789188.7	40180.5	11906.6

**Fuente:** Elaboración propia.

El canal con mayor tasa de sedimentación al año es el canal número 10 con un valor de 32551.1 Ton/año; siendo este valor coherente ya que se encuentra ubicado en el final de la cuenca (ver figura 6), por lo tanto parte de los sedimentos generados aguas arriba del canal son arrastrados hasta este punto.

En el POMCA de la subcuenca del Río Neusa realizado por la CAR en el año 2006, se presentan diferentes rangos de pérdida de suelo por erosión donde consideran que:

**Tabla 11.** Clasificación de la CAR para la pérdida de suelo por erosión.

TIPO DE EROSIÓN	RANGO (Ton/Ha/año)
SUELO SIN EROSIÓN	< 1 Ton/Ha/año
EROSIÓN LIGERA	1 -5 Ton/Ha/año
EROSIÓN MODERADA	5 – 10 Ton/Ha/año
EROSIÓN SEVERA	10 – 25 Ton/Ha/año
EROSIÓN MUY SEVERA	> 25 Ton/Ha/año

Fuente: [8]

Según la tabla anterior y el promedio obtenido de la pérdida de suelo en laderas para el período de tiempo actual es de 1.2 Ton/Ha/año considerándose de esta forma una cuenca de **erosión ligera**<sup>3</sup> promedio; se debe tener en cuenta que la erosión ser considerada y evaluada por laderas ya que estas depende de la cobertura y uso de suelo.

A pesar de ser una erosión ligera con un valor no tan alto dentro del rango, se deben tomar medidas para evitar el aumento con el paso del tiempo para evitar consecuencias como la pérdida de cobertura vegetal y fertilidad del suelo reduciendo así las áreas efectivas para el desarrollo de actividades agropecuarias.

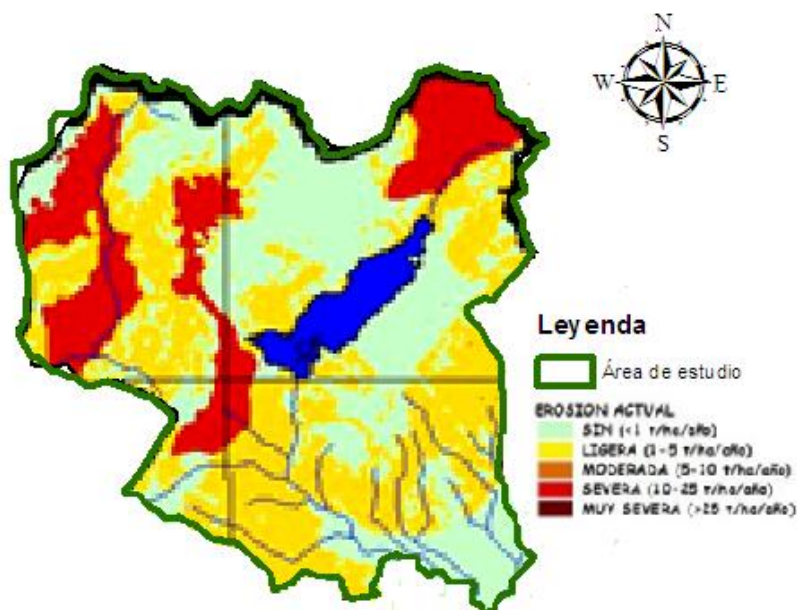
En la cuenca no existen registros de mediciones de sedimentos por lo cual no es posible realizar validación de los resultados del modelo. Por lo tanto se realizó un análisis cualitativo de acuerdo a los resultados obtenidos en el POMCA del Río Neusa [8].

La validación cualitativa consistió en comparar de manera espacial las categorías obtenidas de pérdida de suelo en el POMCA del Río Neusa [8] (ver figura No. 8) con los resultados obtenidos a partir del modelo WEPP para condiciones actuales (ver figura No. 7), donde se puede evidenciar que los rangos de las categorías presentan similitud entre sí.

---

<sup>3</sup> Hace referencia a las zonas donde las actividades pecuarias adquieren su mayor dimensión o donde se ha deforestado el suelo [8].

**Figura 8.** Distribución espacial de pérdida de suelo para la zona de estudio seleccionada.



Fuente: [8]

#### 7.4.2 RCP 2.6

Se realizaron modelaciones para los tres períodos establecidos por los escenarios de cambio climático para Colombia, específicamente con la tasa de cambio calculada para el RCP 2.6 para las variables climatológicas de temperatura máxima, mínima y precipitación.

En la tabla 12 se presentan los cambios temporales resultantes de la modelación de cada período de tiempo del RCP 2.6 con respecto a pérdida de suelo y tasa de sedimentación en laderas según las características propias de la zona de estudio.

**Tabla 12.** Variación temporal de la tasa de sedimentación y pérdida de suelo respecto al clima del escenario RCP 2.6 y los diferentes períodos de tiempo evaluados.

Ladera	2011-2014		2041-2070		2071-2100	
	Tasa de sedimentación (Ton/año)	Pérdida de suelo (Ton/ha/año)	Tasa de sedimentación (Ton/año)	Pérdida de suelo (Ton/ha/año)	Tasa de sedimentación (Ton/año)	Pérdida de suelo (Ton/ha/año)
22	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0
33	11.2	0	11.3	0	17.8	0
32	0	0	0	0	0	0
43	6.4	0	6.5	0	9.3	0
41	3.8	0.2	4.5	0.3	7.6	0.5
42	39.2	0.1	35.5	0.1	63.5	0.2
53	2174	7.1	2173.4	7.1	2465.9	8.1
52	776.6	4.2	800.7	4.3	1177.6	6.3

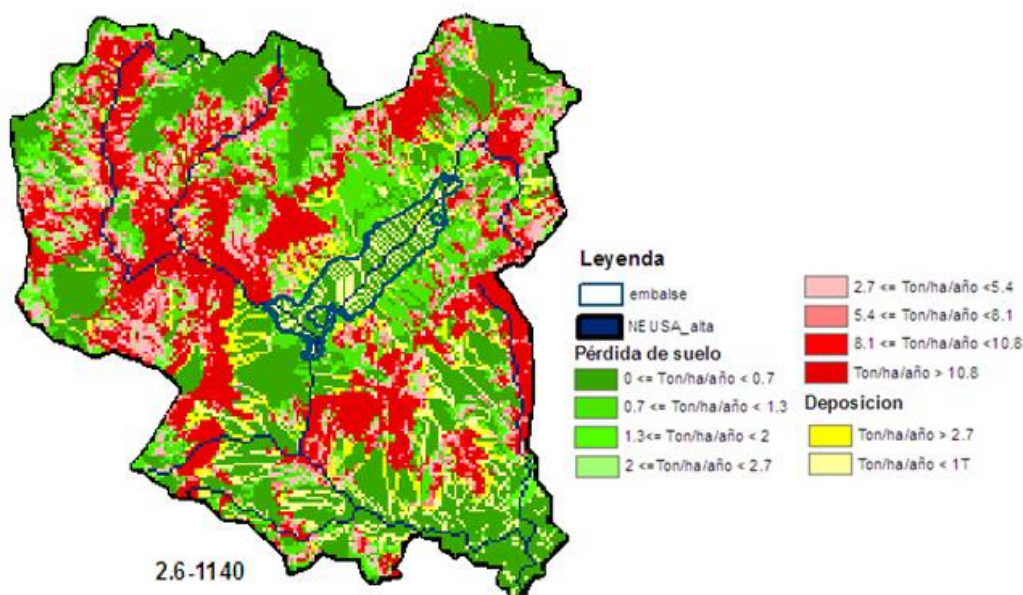
63	59.6	0.1	67.7	0.1	86.2	0.2
62	18.9	0.1	21.4	0.1	99.9	0.3
61	5.2	0.5	5.2	0.5	7.1	0.7
73	62.9	0.2	68.9	0.2	61.2	0.2
72	5.9	0	5.9	0	8.4	0
83	5781.4	6.8	6868.8	8.1	9154.5	10.8
82	59.6	0.1	58.5	0.1	78.8	0.1
92	1994.6	0.6	2261.7	0.7	4322	1.3
93	93.2	0.1	114.4	0.1	136	0.2
91	0.5	0	0.5	0	0.9	0.1
101	0.6	0	0.6	0	1.2	0.1
102	212.2	0.2	345	0.3	1017	0.9
103	130.2	0.1	141.3	0.1	193.6	0.2
112	21219.8	5.6	20431.3	5.3	30292.3	7.9
113	360	0.2	388	0.2	478.1	0.3
111	90.8	5.8	94.6	6.1	112.9	7.2
121	0.4	0	0.5	0	2.2	0.1
123	66.4	0.3	68.1	0.3	93.8	0.4
122	14.7	0	14.8	0	20.8	0

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se muestra la distribución espacial de la pérdida de suelo y deposición dentro del área de estudio para el escenario de cambio climático RCP 2.6 y los períodos evaluados, con relación a las condiciones actuales de clima.

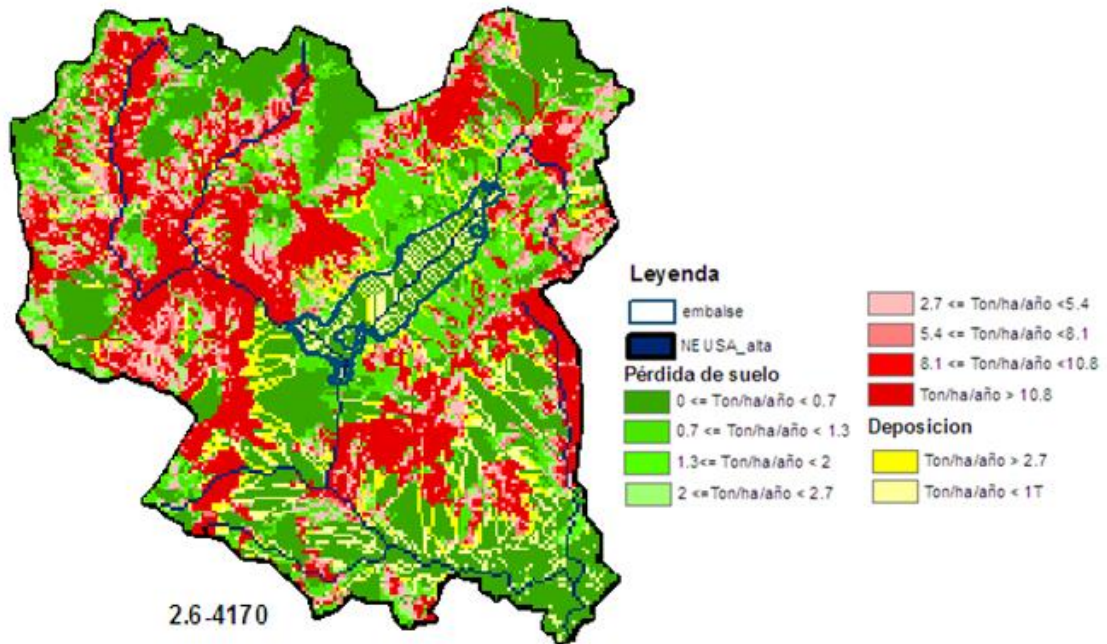
Las figuras 9, 10 y 11 hacen referencia a la distribución espacial de la pérdida del suelo y la deposición de este dentro del área de estudio. Al compararlas se puede evidenciar que la pérdida de suelo en algunas zonas es incrementada con el paso del tiempo de igual forma que la deposición existente.

**Figura 9.** Pérdida de suelo y deposición de sedimentos para el escenario de cambio climático RCP 2.6, período de tiempo 2011-2040



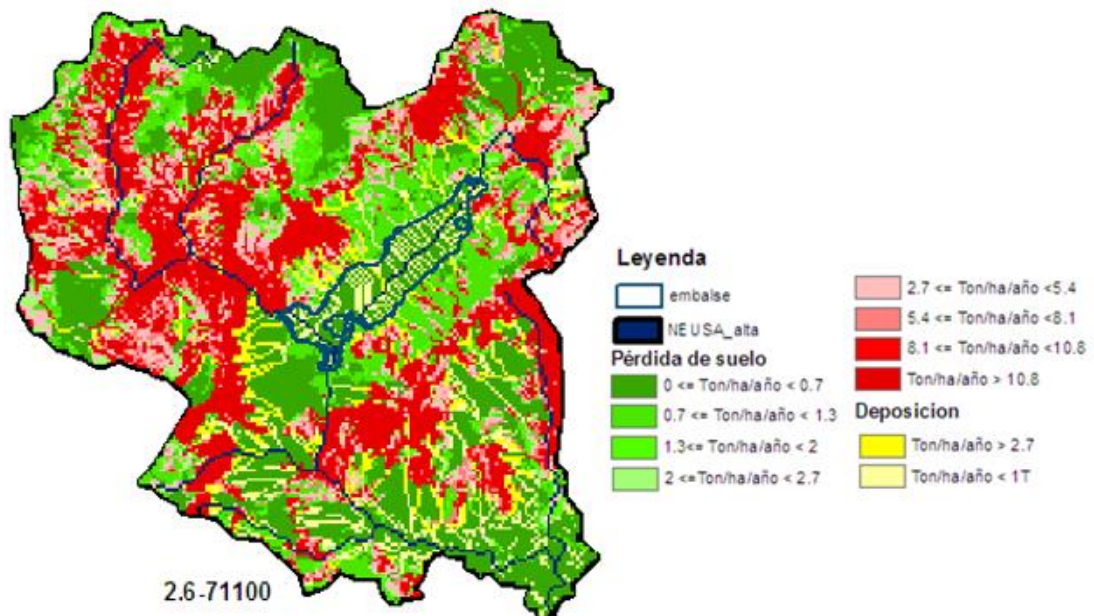
Fuente: Elaboración propia

Figura 10. Pérdida de suelo y deposición de sedimentos para el escenario de cambio climático RCP 2.6, período de tiempo 2041-2070



Fuente: Elaboración propia.

Figura 11. Pérdida de suelo y deposición de sedimentos para el escenario de cambio climático RCP 2.6, período de tiempo 2071-2100



Fuente: Elaboración propia

Según los resultados obtenidos en la simulación de pérdidas de suelo por ladera se puede observar que en donde más se produce pérdida es en la ladera número 112, la cual se encuentra asociada a un tipo de suelo con

características de: textura franco limosa y arcillosa entre los diferentes perfiles de suelo encontrados. Además de una cobertura vegetal con propiedades de arbustal, herbazal, mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, plantación forestal, pastos limpios, lagunas, lagos y ciénagas naturales.

Para las condiciones climáticas futuras comprendidas en los tres períodos de tiempo evaluado se dio una tasa de cambio representativa en la pérdida de suelo comparado con las condiciones de clima actuales.

La tasa de cambio para el período de tiempo comprendido entre 2011-2040 se fue de 2.46%. Para el período intermedio de las simulaciones se dio una tasa de cambio del 40% y para el último período de tiempo comprendido en los años de 2071-2100 se presentó un cambio del 13.4%, respecto a las condiciones actuales.

Para el período de 2011-2040 se obtuvo un promedio de 1.6 Ton/Ha/año, es decir, que para ese período se podría considerar que la cuenca **erosión ligera**. Para los períodos de 2041-2070 y 2071-2100 se considera la cuenca catalogada como de **erosión ligera**, con promedios de 1.01 Ton/Ha/año y 1.47 Ton/Ha/año, respectivamente.

La clasificación como una cuenca de **erosión ligera** indica que dentro de la zona de estudio seleccionada predomina la actividad pecuaria; lo cual genera una leve erosión dentro del rango establecido por la CAR demostrando de igual forma que en condiciones de clima, uso y tipo de suelo actuales la erosión no será mayor a 5 Ton/Ha/año.

Respecto a la simulación de sedimentos en drenajes, los resultados de los diferentes períodos de tiempo para el RCP 2.6 se encuentran en la tabla 13 en donde se muestra la descarga de volumen de agua (m<sup>3</sup>) a final de cada drenaje, tasa de sedimentación y pérdida de suelo dentro de estos. La columna denominada "canal" hace referencia al orden aleatorio que le asigna WEPP a cada uno de los drenajes; el drenaje con valor más alto indica su ubicación espacial en la parte alta de la cuenca; el de menor valor se encuentra al final de esta. Dentro de la información se encuentra la relación directa de la sedimentación y deposición dada en las laderas descritas anteriormente.

**Tabla 13.** Variación temporal de la tasa de sedimentación y pérdida de suelo en los drenajes respecto al clima del escenario RCP 2.6 y los diferentes períodos de tiempo evaluados.

Canal	2011-2040			2041-2070			2070-2100		
	Descarga en volumen (m³)	Tasa de sed (Ton/año)	Pérdida de suelo (Ton/año)	Descarga en volumen (m³)	Tasa de sed (Ton/año)	Pérdida de suelo (Ton/año)	Descarga en volumen (m³)	Tasa de sed. (Ton/año)	Pérdida de suelo (Ton/año)
124	151017	1052	970	151460	1084.9	1001	194843	1428	1311
114	1531376	7947	16	1629309	8264.9	23	1998962	12199	37
104	783571	3183	3033	812029	3083.3	2986	1041381	3666	3329
94	519603	5760	3678	564832	6369.3	4017	743490	8553	4897
84	1674612	10040	5368	1758450	11228.9	7112	2282584	12523	8104
74	3218602	17264	2334	3400896	18462.9	2351	4304686	23420	2486
64	71061	1126	1044	83407	1214.4	1182	119293	1375	1264
54	3336404	23270	10369	3535108	24049.4	8668	4488903	30063	5479
44	65329	882	832	66111	922.9	875	103310	1404	1322
34	3415760	29978	10077	3616045	31552.9	10477	4618787	36037	10203
24	3565738	36845	11227	3766478	38957.1	11514	4812674	42524	10415

**Fuente:** Elaboración propia.

Teniendo en cuenta la ubicación de los drenajes dentro de la cuenca (figura 6) se esperaría a simple vista que el canal 24 tuviese la mayor tasa de sedimentación debido a que en él desembocan los demás cauces, pero gracias a la baja de sedimentación en las laderas circundantes y el aumento de deposición en el cauce no. 34 (figura 6), por lo tanto el cauce final no cuenta con la mayor tasa de sedimentación. Por el contrario los drenajes con mayor tasa de sedimentación son aquellos que cuentan con grandes áreas de influencia respecto a las laderas que los rodean y altos índices de sedimentación de estas mismas. Además cuentan con tributarios que aportan parte de su sedimentación al cauce de mayor orden en la cuenca.

Adicionalmente, se ve una relación directa entre el volumen de descarga y la tasa de sedimentación; es decir que a mayor volumen mayor tasa de sedimentación, debido a que la descarga es medida en el punto final de cada cauce en donde el caudal correspondiente ha arrastrado los sedimentos que no han sido depositados en las zonas planas de la cuenca.

### 7.4.3 RCP 8.5

Para la implementación del clima establecido para el escenario de cambio climático RCP 8.5 se utilizaron los tres períodos implementados para Colombia, con el objetivo de tener en cuenta la tasa de cambio resultante en la dinámica de sedimentos de la cuenca a largo plazo.

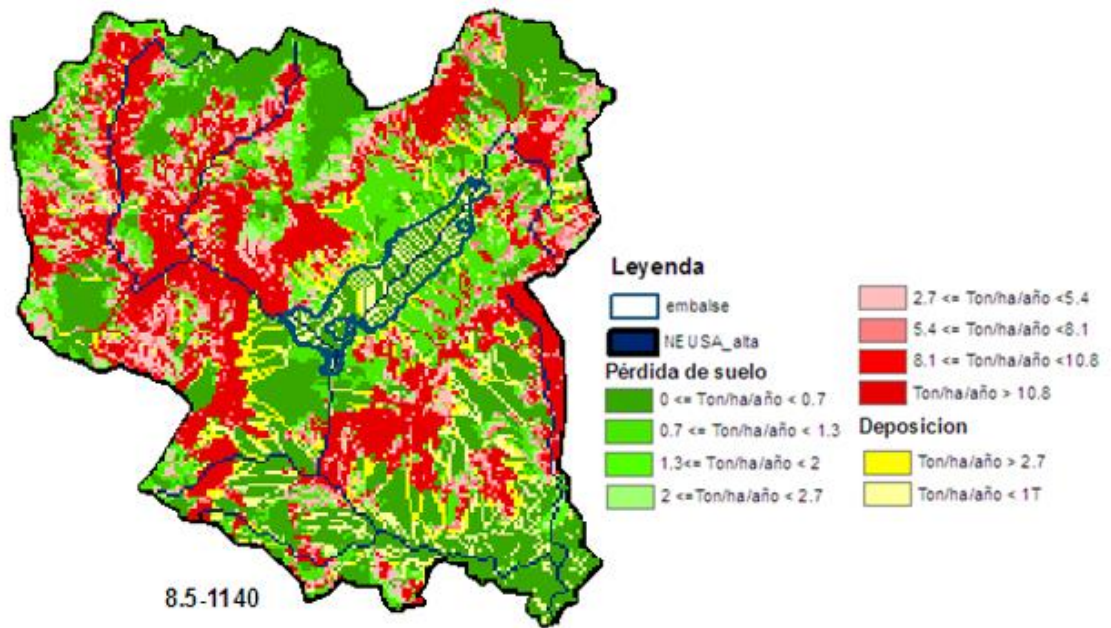
La tabla 15 muestra la variación en los diferentes períodos de tiempo y cada una de las laderas respecto a la tasa de sedimentación de unidades de ton/año y la pérdida de suelo por erosión en unidades de tonelada/Ha/año.

**Tabla 14.** Variación temporal de la tasa de sedimentación y pérdida de suelo respecto al clima del escenario RCP 8.5 y los diferentes períodos de tiempo evaluados.

Ladera	2011-2014		2041-2070		2071-2100	
	Tasa de sedimento (Ton/año)	Pérdida de suelo (Ton/ha/año)	Tasa de sedimento (Ton/año)	Pérdida de suelo (Ton/ha/año)	Tasa de sedimento (Ton/año)	Pérdida de suelo (Ton/ha/año)
22	0	0	6.4	0.1	6.2	0.1
23	0	0	9.1	0.1	8.9	0.1
33	14.7	0	509.9	0.3	453.6	0.3
32	0	0	53.7	0.2	52.1	0.2
43	7.3	0	100.9	0.3	91.8	0.2
41	4.7	0.3	56.1	3.4	58.1	3.5
42	40.5	0.1	147.3	0.5	145	0.5
53	2324.6	7.6	9322.1	30.5	8844.3	28.9
52	1091.7	5.9	3223.1	17.3	2911.5	15.7
63	71	0.1	172	0.4	172.9	0.4
62	35.9	0.1	1319	4	1245.7	3.7
61	5.3	0.5	12.9	1.2	11.7	1.1
73	113.9	0.3	2298.2	6.9	2228.6	6.7
72	7.3	0	151.5	0.3	135.9	0.2
83	6600.8	7.8	17303.1	20.4	16312.4	19.2
82	60.5	0.1	342.7	0.5	324.3	0.5
92	2680.4	0.8	8988.3	2.8	8736.7	2.7
93	131.9	0.2	429	0.5	432.1	0.5
91	0.5	0	9.3	0.7	8.3	0.6
101	0.9	0.1	13.1	0.8	12	0.8
102	460.9	0.4	7171.5	6.4	7032.1	6.3
103	149.1	0.1	509.6	0.4	487.5	0.4
112	21246.6	5.6	71441.2	18.7	66715.3	17.5
113	396	0.2	783.4	0.5	764.6	0.4
111	98.4	6.3	144.3	9.2	138	8.8
121	0.6	0	91.9	5.6	94.8	5.7
123	71.4	0.4	143.1	0.6	141.8	0.6
122	18.2	0	253.4	0.2	243.3	0.2

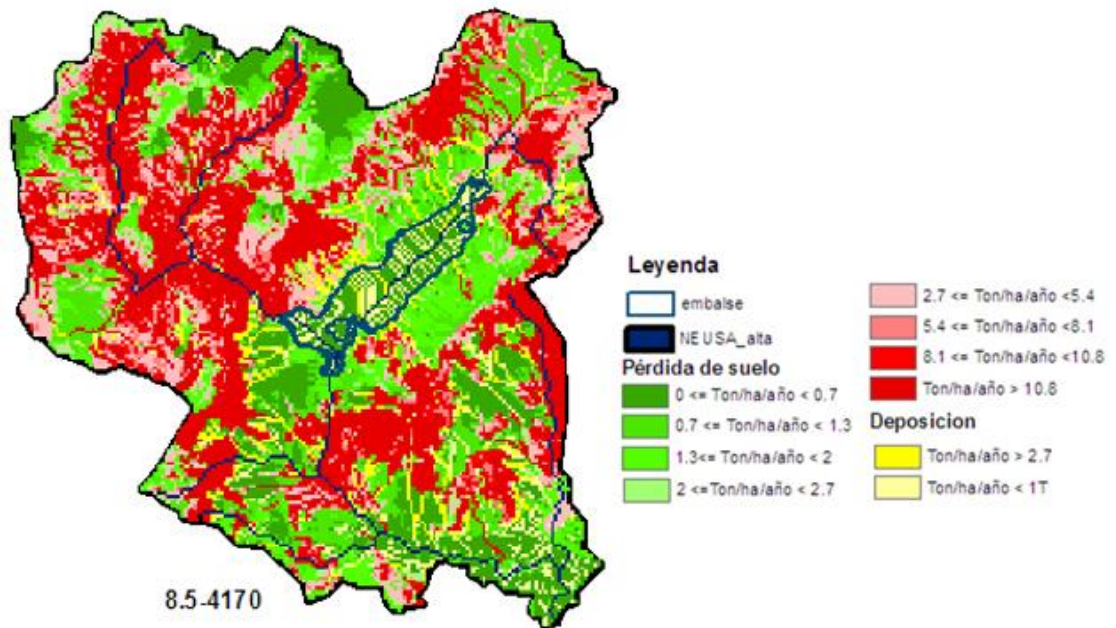
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 12.** Pérdida de suelo y deposición de sedimentos para el escenario de cambio climático RCP 8.5, período de tiempo 2011-2040



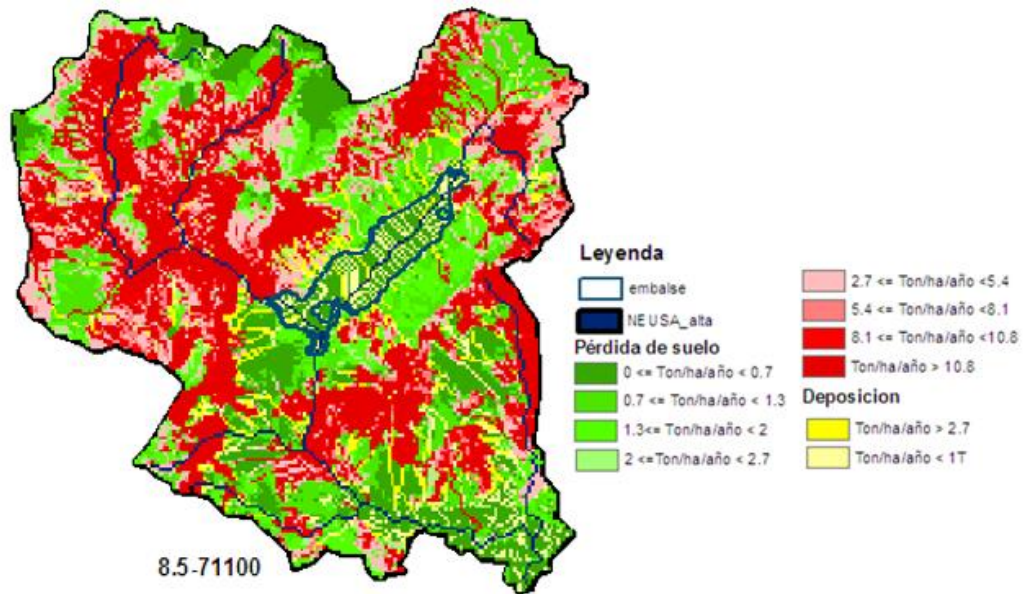
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 13.** Pérdida de suelo y deposición de sedimentos para el escenario de cambio climático RCP 8.5, período de tiempo 2041-2070.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 14.** Pérdida de suelo y deposición de sedimentos para el escenario de cambio climático RCP 8.5, período de tiempo 2071-2100.



**Fuente:** Elaboración propia.

Teniendo en cuenta los resultados mostrados anteriormente se puede evidenciar que la ladera con mayor pérdida de suelo en el escenario RCP 8.5 es la ladera No. 53 para los períodos de 2041-2070 y 2071-2100 con características de textura de suelo franco arcilloso y una cobertura vegetal con gran porcentaje de pastos, arbustales y herbazales. Para el período de tiempo comprendido entre 2011-2040 la ladera con mayor pérdida de suelo es la no. 83 que cuenta con propiedades de textura de suelo franco arcillosa y franco limoso relacionado con una cobertura vegetal con características propias de pastos, arbustales, herbazales y un pequeño porcentaje de cultivos.

Para las condiciones climáticas futuras del período de tiempo comprendido entre 2011-2040 se da una tasa de cambio de 4.44%, comparada con el promedio de pérdida de suelo para condiciones climáticas actuales. Para el período intermedio de las simulaciones se ve tasa de cambio significativa del 266.6%. En último período de tiempo evaluado (2071-2100) se evidenció una tasa de cambio de 245.3% respecto con el período de tiempo 2000-2014 evaluado bajo condiciones actuales.

La tasa de cambio resultantes en los períodos de 2041-2070 y 2071-2100 evaluados bajo condiciones de cambio climático establecidos para el escenario RCP 8.5, resultan superiores al 100% puesto que en el promedio de la pérdida de suelo para estos períodos se cuadriplica y triplica el promedio actual, respectivamente.

Teniendo en cuenta la clasificación propuesta por la CAR en el POMCA de la subcuenca del Río Neusa para categorizar la pérdida de suelo por erosión (Tabla 11). El área de estudio se encontraría en una clasificación de **erosión ligera** con un promedio de pérdida de suelo de 1.7 Ton/Ha/año para el período de tiempo 2011-2040. Los últimos dos períodos de tiempo evaluados se

encuentran en la categoría de **erosión moderada**<sup>4</sup> con un promedio de 6.2 y 5.8 Ton/Ha/año, respectivamente.

Cuando se habla de una cuenca categorizada como de **erosión moderada** esto tiene como principales características, por ejemplo la presencia de gran cantidad de zonas destinadas a la actividad pecuaria con cobertura de pastizales que a pesar de no generar desprendimiento de partículas de gran tamaño el desprendimiento de dichas partículas si es considerable. Teniendo en cuenta los promedios anteriores se podría asegurar que para condiciones de cobertura y tipo de suelo actuales sin importar el cambio de clima aplicado; la erosión no llegaría a ser mayor de 10 Ton/Ha/año.

El modelo WEPP no solo arroja información resultante de la modelación sobre las laderas pertenecientes en la cuenca sino también de pérdidas de suelo y tasa de sedimentación en cada uno de los drenajes presentes en el área de estudio generados a partir del modelo de elevación (DEM) utilizado a una resolución de 90x90.

A continuación se muestra la relación de la información obtenida propia de la dinámica de sedimentos presentes en los cauces vs. El período de tiempo. La columna denominada “canal” hace referencia al valor aleatorio que da WEPP a los drenajes generados, los canales de mayor número son aquellos que se encuentran en la parte alta de la cuenca, mientras que los que cuentan con valor menos están ubicados en la parte baja.

**Tabla 15.** Variación temporal de la tasa de sedimentación y pérdida de suelo en los drenajes respecto al clima del escenario RCP 8.5 y los diferentes períodos de tiempo evaluados

Canal	2011-2040			2041-2070			2070-2100		
	Descarga en volumen (m <sup>3</sup> )	Tasa de sed (Ton/año)	Pérdida de suelo (Ton/año)	Descarga en volumen (m <sup>3</sup> )	Tasa de sed (Ton/año)	Pérdida de suelo (Ton/año)	Descarga en volumen (m <sup>3</sup> )	Tasa de sed (Ton/año)	Pérdida de suelo (Ton/año)
124	162047.6	1192.7	1102.5	761147.3	3829.2	3644.6	743821.3	4287.1	4129.35
114	1668290.9	8646	27.51	4134950.2	38870.2	976.82	4037366.9	36088.9	1073.30
104	846905.4	3105.3	3004.01	2735485.1	7735	3445.23	2646539.7	7676.7	3410.33
94	589706.1	6875.9	4187.73	2593392.9	12209.6	7374.2	2559957.8	10560.3	6236.90
84	1840452.7	10490.5	5456.4	6504158.6	27100.5	4717.8	6374000	25681.3	5483.58
74	3525543.3	18451.8	2351.50	10957279.7	60006.7	4884.1	10718380.8	57037.8	4508.20
64	88841.5	1246.4	1220.29	507204.5	3068.4	1661.2	489863.1	2749.5	1608.62
54	3672466.9	24179.8	9028.5	11678248.6	51963	2607.0	11414877.6	47250.5	19750.6
44	73643.4	1042.6	989.38	430101.4	2102.8	2046.5	417442.9	1970.3	1998.97
34	3766531.6	31919.6	10545.2	12689062.6	79959.6	35620.64	12381881.6	55461.5	29789.48
24	3927578.2	39581.8	11762.3	13480518.2	95832.4	23764.93	13153644.8	65292.2	13311.67

**Fuente:** Elaboración propia.

En este caso el drenaje con mayor tasa de sedimentación es el No. 24 que se encuentra al final de la cuenca y recibe mayor volumen de agua y sedimentos

<sup>4</sup> Hace referencia a las zonas donde la pendiente excede el 50% y la cobertura vegetal es constituida por praderas, pastizales y cultivos limpios [3].

por parte de sus tributarios. Esto se debe al aumento de precipitación considerable en el RCP 8.5 que genera pérdida de suelo en algunas partes del área de estudio, donde antes la pérdida era mínima (parte baja, ver figura 6). Lo anterior está relacionado con el aumento de volumen de descarga de todos los cauces debido a la dependencia de estos a la precipitación dando como resultado un mayor caudal y mayor arrastre de sedimentos al final de la cuenca.

## 7.5 ANALISIS SOCIO-ECONOMICO

Inicialmente para identificar la influencia de la erosión futura en la población presente en la cuenca del Neusa y la beneficiada por el Embalse, se realizó el cálculo de la disminución del volumen de este en cada uno de los períodos de tiempo evaluados para cada RCP.

Para saber el volumen de sedimentos producidos por la cuenca y la cantidad que afectaba directamente al embalse se utilizó el promedio de la pérdida de suelo de las laderas que afectan a este (83,73,113 y 112) y se procedió a calcular la producción de sedimentos bajo el supuesto que la densidad de estos era de 1.5 Ton/m<sup>3</sup> teniendo en cuenta el estudio **“Establecimiento del volumen actual de los embalses del Sisga y Neusa, actualización de su capacidad de regulación y determinación de la tasa actual de sedimentación”** realizado por la CAR. Se utilizó como referencia debido a la especificidad frente al área de estudio del presente proyecto.

También se debe considerar que el volumen producido no llega completamente al embalse, por lo tanto, este debe ser multiplicado por “Sediment delivery ratio” arrojado dentro de los resultados por la modelación en WEPP. En cuencas de poca erosión este coeficiente no debe ser mayor a 0.5 [25]. Para cada caso de modelación dicho valor es diferente.

Las ecuaciones utilizadas en cada paso, son descritas a continuación:

$$P.P.S \left( \frac{\text{Ton}}{\frac{\text{Ha}}{\text{año}}} \right) * A.L.E \text{ (Ha)} * \text{Tiempo (años)} = \text{Produc. de sedimentos (Ton)}$$

Dónde:

P.P.S → Promedio de pérdida de suelo; A.L.E → Área de laderas que influyen en el embalse.

Para el cálculo del volumen de sedimentos, se utilizó:

$$\text{Prod. de Sedimentos} \frac{(\text{Ton})}{\text{Densidad} \left( \frac{\text{ton}}{\text{m}^3} \right)} = \text{Volumen Sedimentos (m}^3\text{)}$$

Con el fin de saber el volumen de sedimentos que llega exactamente al embalse, se multiplicó el resultado obtenido por el “sediment delivery ratio”, como se había descrito anteriormente.

En la tabla No. 17 se muestran los resultados obtenidos sobre el volumen de sedimentos producidos, el volumen de reducción del embalse y el porcentaje de reducción de este.

**Tabla 16.** Porcentaje de reducción del volumen útil del embalse del Neusa

	Volumen de Sedimentos que llegan al embalse (m3)			Volumen reducido del embalse (Millones de m3)			% de reducción		
	2011-2040	2041-2070	2071-2100	2011-2040	2041-2070	2071-2100	2011-2040	2041-2070	2071-2100
<b>2.6</b>	154504.3	253445.8	343577.9	86.0	85.8	85.4	0.2	0.3	0.4
<b>8.5</b>	261953.7	809172.6	537316.6	85.9	85.1	84.6	0.3	0.9	0.6

Fuente: Elaboración propia.

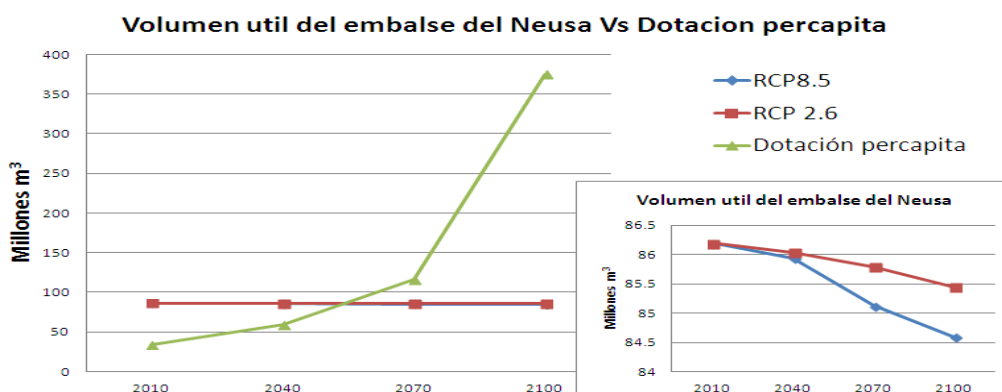
Según los resultados anteriores se puede evidenciar que la reducción en el volumen útil del embalse para ninguno de los RCP y los períodos de tiempo evaluados no es realmente significativa; se partió del hecho de que el volumen útil actual del embalse es de 86.2 millones de m<sup>3</sup>.

La disminución más alta se da en el RCP 8.5 para el período de tiempo de 2041-2070 con un porcentaje de aproximadamente de 1%, mientras que el mayor porcentaje de disminución obtenido en el RCP 2.6 se da en el período de tiempo de 2071-2100 con un 0.4% aproximadamente.

Lo anterior indica que la pérdida de suelo y producción de sedimentos generada en las laderas más cercanas al embalse y que pudiesen influenciar en este, no aumentan lo suficiente con el pasar del tiempo y el cambio en el clima evaluado para que el volumen útil del embalse se vea realmente afectado.

Para determinar la afectación de esto en la población, se hizo una proyección de la población a partir de los censos del 1993 y 2005 junto al estudio del 2010 realizada por el DANE en donde se utilizaron 3 métodos diferentes: El método aritmético, geométrico y exponencial para los años 2040, 2070 y 2100. En la gráfica No. 8 se evidencia el cambio que ejerce la producción de sedimentos en el volumen del embalse junto con el crecimiento del consumo de la población que es abastecida por el embalse del Neusa.

**Gráfica 8.** Crecimiento del consumo VS. Volumen útil disminuido



**Fuente:** Elaboración propia.

De la gráfica anterior se destaca la evidente disminución del volumen en cada RCP, principalmente en el 8.5 puesto sus condiciones climáticas son mucho más extremas que para el 2.6. Además el aumento del consumo según la proyección de la población realizada para los años 2040, 2070 y 2100.

Es importante resaltar que para el 2070 el consumo de la población sobrepasaría el volumen útil actual del embalse (86.2 millones de m<sup>3</sup>) puesto que en este año el crecimiento de la población es de forma exponencial. Por lo tanto, el embalse para el año 2070 con un crecimiento de la población exponencial no podría abastecer la población con la dotación necesaria requerida.

La principal actividad económica dentro de la cuenca del Río Neusa, es la actividad agropecuaria. Involucrando áreas con cobertura de pastizales para la ganadería de bovinos y porcinos que ocupan aproximadamente 17180.85 Ha. Como segunda actividad económica se encuentra la agricultura donde se cuenta con cobertura de cultivos como la papa, el maíz, hortalizas y un pequeño porcentaje de flores que constituyen la cobertura de Cultivos, haciendo so de 11882.43 Ha. Aunque el uso de suelo de plantaciones forestales no es considerado como una actividad económica relevante en la cuenca del Río Neusa, es importante resaltar el área que esta cobertura ocupa siendo de 9687.98 Ha [3].

Teniendo en cuenta lo anterior la población de la cuenca del río Neusa se vería afectada por la pérdida de suelo y sedimentación, debido a que las zonas más comprometidas son aquellas donde se realiza la actividad agropecuaria por su cobertura de pastizales, además de las consecuencias que genera la presencia de ganado bovino en las características físicas y químicas del suelo.

## 8 CONCLUSIONES

La pérdida de suelo por erosión del sistema hídrica de la cuenca del Neusa bajo condiciones de clima actual tiene como un resultado promedio de 1.2 Ton/Ha/año siendo caracterizada como una cuenca de **erosión ligera**. Debido a las condiciones presentes de cobertura de suelo, donde no se encuentran zonas de alta susceptibilidad a erosión como por ejemplo tierras desnudas y degradadas. Como forma de corroboración de los resultados obtenidos se obtuvo un RMSE de 0.60 indicando un ajuste aceptable entre el modelo y las condiciones climáticas actuales, uso y tipo de suelo propios de la cuenca del Río Neusa, considerándose de esta forma el modelo WEPP como apropiado para ser replicado en zonas similares a la estudiada.

Bajo condiciones climáticas futuras correspondientes a los escenarios RCP 2.6 – RCP 8.5 se evidenció un cambio en la dinámica de sedimentos directamente relacionado con el aumento de precipitación, debido que a mayor precipitación aumenta el volumen de agua escurrido generando así desprendimiento de las partículas del suelo y por lo tanto un aumento en la erosión. Se puede evidenciar que para los períodos de 2041-2070 y 2071-2100 los valores de precipitación en volumen, tasa de sedimentos, la pérdida de suelo en laderas y cauces, son superados de manera significativa por el RCP 8.5 respecto a las condiciones actuales y las simuladas para el escenario RCP 2.6. Esto se debe a que el escenario de cambio climático de RCP 8.5 está generado para condiciones de emisiones y concentraciones de GEI<sup>5</sup> extremas. Donde las emisiones se vuelven estables hasta después del año 2100, es decir, están aumentando durante los periodos evaluados; mientras las concentraciones pueden llegar a ser constantes hasta después del año 2150. Por lo tanto las condiciones climáticas para este último período de tiempo tienden a ser más extremas.

La pérdida de suelo evaluada bajo condiciones de cambio climático propias del escenario de RCP 8.5 para el período de tiempo más lejano comprendido dese 2071-2100 genera valores promedio de 5.9 Ton/ha/año catalogando la cuenca como de **moderada erosión**; siendo este valor menor al obtenido en el período de 2041-2070 bajo el mismo escenario. Esto se debe a que la diferencia en el aumento de precipitación con el período anterior no es tan grande. El valor de erosión más alto encontrado en la cuenca se presentó en el período 241-2070 bajo condiciones de cambio climático propias del escenario RCP con un valor promedio de 6.24 Ton/Ha/año, catalogando de igual forma como de **moderada erosión**.

El volumen útil del embalse del Neusa no se ve afectado por la producción de sedimentos en ninguno de los dos escenarios de cambio climático debido a que el embalse se encuentra ubicado en la parte alta de la cuenca donde la mayoría de afluentes de esta no depositarían los sedimentos en el embalse. La mayor disminución evaluada fue de aproximadamente 1% frente al volumen actual del embalse que es 86.2 millones de m<sup>3</sup>. Por lo tanto, la afectación al

---

<sup>5</sup> Gases de efecto invernadero.

sistema de acueducto y agua potable donde el embalse aporta 16 m<sup>3</sup>/s para la planta de Tibitóc no se ve comprometido teniendo en cuenta que la población se mantendría constante por los períodos de tiempo evaluados. En cuanto a la generación eléctrica de la represa tampoco se ve una afectación ya que el volumen mínimo para la generación de energía no sería perjudicado. Adicionalmente, la regulación del Río Bogotá tampoco se vería comprometida debido a que la disminución del volumen útil del embalse no se ve involucrado de manera significativa para que se produzcan posibles desbordamientos de la presa, considerando un comportamiento futuro del río Bogotá de igual forma presente.

Teniendo en cuenta la proyección poblacional para el abastecimiento de la planta de Tibitóc se evidencia que el embalse del Neusa podrá dotar de manera efectiva a los municipios de Cajicá, Chía y el 30% de Bogotá hasta el período de tiempo comprendido entre los años 2050 – 2060, debido a su crecimiento exponencial no se podría abastecer después de este período de tiempo; sin importar la reducción del volumen útil del embalse a partir de la sedimentación en este.

Se evidencia que las mayores tasas de pérdida de suelo por erosión concuerdan con laderas con mayor cantidad de pastos, herbazales y arbustales relacionados a perfiles con características de textura propias de suelos franco arcillosos y franco limosos, asociados directamente a la actividad económica pecuaria. Esto se da debido a que la profundidad de raíces de este tipo de cobertura no es lo suficientemente profunda para sostener el suelo en un evento de precipitación alta y en conjunto con el tamaño partícula propia de estos tipos de suelo se genera una susceptibilidad alta frente a la erosión.

A pesar de la eficiencia y buen funcionamiento de TETIS descrito en diferentes estudios realizados a nivel mundial. En el caso específico de este estudio, donde la información necesaria para el funcionamiento es de tipo secundaria TETIS no fue la mejor opción por su cantidad y especificidad de parámetros de entrada.

Los resultados obtenidos debe ser considerado una herramienta de apoyo a predicciones del futuro debido a que se basan en proyecciones de cambio de clima; por lo tanto se aconseja tomarlos como una base firme y definitiva para la toma de decisiones.

## 9 RECOMENDACIONES

Para disminuir la pérdida de suelo relacionada con el uso de suelo de pastos se recomienda introducir nuevas especies de vegetación que tengan mayor profundidad de raíces que puedan sostener y compactar el suelo de mejor manera, sobre todo en los casos que coincide con una pendiente alta.

En cuanto al uso de suelo, se evidencia que la mayor parte afectada por la sedimentación es aquella que se utiliza para el desarrollo de la actividad pecuaria con un porcentaje de área de 38.41%. Por lo tanto se recomienda que se realicen dos actividades económicas en el mismo territorio involucrando la ganadería y la agricultura con el objetivo de disminuir los impactos generados por los bovinos a corto y mediano plazo. En cuanto a una solución más duradera se recomienda realizar un programa de pagos de servicios ambientales enfocado al cuidado y reforestación de las áreas afectadas.

Como complemento al presente trabajo podría realizarse el cálculo de la eficiencia del modelo bajo características cuantitativas, a partir de mediciones en campo de pérdida de suelo y/o registrados en estudios gubernamentales y académicos.

Se recomienda realizar una mejor adaptación a los parámetros introducidos en el modelo WEPP para obtener de esta forma resultados con un mayor ajuste a la realidad actual y propia de la zona.

En caso dado de hacer uso del modelo hidrológico TETIS se aconseja contar de antemano con una base de datos primaria y confiable con el objetivo de disminuir la ocurrencia de errores en el momento de generar los parámetros de entrada.

Se invita a la continuación de este trabajo de grado encaminado directamente al cambio de uso de suelo y la afectación de este en la dinámica de sedimentos en la cuenca del Neusa; con el objetivo de comparar e identificar qué factor es más influyente, si el cambio en el clima o en la cobertura vegetal, frente a la pérdida de suelo por erosión.

## 10 BIBLIOGRAFÍA

- [1] IPCC, «Cambio Climático 2013: Bases Físicas,» Unidad de apoyo técnico del Grupo de trabajo I del IPCC, 2013.
- [2] G. Jorge, *Evaluación del impacto de la intensificación del uso de suelo sobre la erosión hídrica en sistemas agrícolas de Uruguay: Aplicación del modelo WEPP*, Montevideo, 2012.
- [3] CAR, «Elaboración del Diagnóstico, Prospectiva y Formulación de la Cuenca Hidrográfica del río Bogotá- Subcuenca Río Neusa.,» Bogotá, 2006.
- [4] D. M. Montoya Arenas y G. A. Reyes Torres, «Geología de la sabana de Bogotá,» Ministerio de minas y energía e INGEOMINAS, Bogotá, 2005.
- [5] INGEOMINAS, *Geología de la sabana de Bogotá*, Bogotá, 2005.
- [6] Instituto Agustín Codazzi, *Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Cundinamarca*, Bogotá, 2000.
- [7] S. Fattorelli y P. Fernandez, *Diseño Hidrológico*, Mendoza: Zeta Editores, 2007.
- [8] CAR, «Elaboración del Diagnóstico, Prospectiva y Formulación de la cuenca hidrográfica del Río Bogotá - Sub Cuenca del Río Neusa,» Bogotá D.C., 2006.
- [9] G. E. Armenta, J. Dorado, A. O. Rodríguez y J. F. Ruiz, «Escenarios de Cambio Climático para precipitación y temperaturas en Colombia,» Bogotá, 2015.
- [10] F. Breón, W. Collins, J. Fuglestedt, J. Huang, D. Koch, J. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza, T. Nakajima, A. Robock, G. Stephens, T. Takemura y H. Zhang, «Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: Climate change 2013: The physical Science Basis.,» Cambridge University Press, New York, 2013.
- [11] F. Giorgi y L. Mearns, «Calculation of Average, Uncertainty Range, and Reliability of Regional Climate Changes from AOGCM Simulations via the “Reliability Ensemble Averaging” (REA) Method,» *American Meteorological Society*, pp. 1141-1158, 2002.
- [12] J. M. G. Ruiz, *Modelo distribuido para la evaluación de recursos hídricos (modelo SIMPA).*, Madrid: CEDEX, 1999.

- [13] V. M. Ponce, *Engineering Hydrology. Principles and Practices*, Prentice Hall, 1989.
- [14] C. Aguilar, Cordoba: Universidad de Cordoba, 2006.
- [15] J. J. Velez, *Tesis Doctoral*, Valencia: Universidad Politecnica de Valencia, 2003.
- [16] J. Vélez, F. Francés y J. Vélez, «Modelo distribuido para la simulación hidrológica de crecidas en grandes cuencas.» de *Recursos Hídricos En La Comunidad Autónoma Del País Vasco Usando Modelación Distribuida Y Calibración Automática*, La Habana, 2003.
- [17] Grupo de Investigación de Modelación Hidrológica y Ambiental (GIMHA), «Descripción del modelo conceptual distribuido de simulación hidrológica TETIS v. 8,» Valencia, 2014.
- [18] USDA - U.S. Department of Agriculture, NSERL - National Soils Erosion Research Laboratory, 1995.
- [19] S. Finol y A. Barrios, «Validación del modelo SWRRB en la cuenca del río Guasare, Zulia-Venezuela,» Universidad de los Andes, Zulia.
- [20] O. A. Maldonado de León, O. L. Palacios Velez, R. Springall Galindo y D. Fernandez Reinoso, «Empleo del modelo SWRRB para generar alternativas de manejo en la cuenca Itzapa, Guatemala,» *Agrociencia*, pp. 335-345, 2001.
- [21] E. A. Dominguez, «Math Modelling,» Noviembre 2010. [En línea]. Available: <http://www.mathmodelling.org>.
- [22] O. Silva, Maracay: Universidad Central de Venezuela, 2002.
- [23] M. Pudassaini, S. Shrestha y S. Riley, Sydney: University of Western Sydney.
- [24] Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, *Reglamento técnico del sector de agua potable y Saneamiento básico - RAS : Título B: Sistema de Acueducto*, Bogotá, 2010.
- [25] CAR, «Establecimiento del volumen actual de los embalses del Sisga y Neusa, actualización de su capacidad de regulación y determinación de la tasa actual de sedimentación,» Bogotá.
- [26] IDEAM, «Leyenda Nacional de Coberturas de la tierra - Metodología CORINE LAND COVER adaptada para Colombia Escala 1:100.000,» Bogotá, 2010.

[27] D. M. Duran Santos y D. C. Suarez, *Perfil ambiental de la subcuenca del rio Neusa*, Bogota: Universidad de la Salle, 2011.

[28] IGAC.