

MODELAMIENTO HIDROLÓGICO DE LAS MICROCUENCAS OLARTE Y TOBAL
PERTENECIENTES A LA CUENCA DEL LAGO DE TOTA

EUMELINA ALBERTO LÓPEZ

ENA ROCIO SANTOS ORTEGA



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SECCIONAL TUNJA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
TUNJA
2015

MODELAMIENTO HIDROLÓGICO DE LAS MICROCUENCAS OLARTE Y TOBAL
PERTENECIENTES A LA CUENCA DEL LAGO DE TOTA

EUMELINA ALBERTO LÓPEZ

ENA ROCIO SANTOS ORTEGA

TESIS DE GRADO

PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

DIRECTOR DEL PROYECTO

Ph.D CAMILO LESMES FABIÁN.
DOCENTE

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SECCIONAL TUNJA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
TUNJA
2015

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	2
2. JUSTIFICACIÓN.....	4
3. OBJETIVOS.....	6
3.1 OBJETIVO GENERAL	6
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..	6
4. ANTECEDENTES HISTÓRICOS Y ESTADO DEL ARTE	7
4.1 ESTADO DEL ARTE.....	7
4.1.1 Investigación a nivel internacional	7
4.1.2 Investigación a nivel de Colombia.....	8
4.1.3 Investigaciones en la zona de estudio	10
5. MARCO TEÓRICO	13
5.1 REVISIÓN DE CONCEPTOS RELACIONADOS CON LA CARACTERIZACIÓN DE CUENCAS	13
5.1.1 Área de la cuenca	13
5.1.2 Pendiente media de la cuenca.....	14
5.1.3 Orden de la cuenca.....	14
5.1.4 Indicadores de eficiencia de una cuenca	14
5.1.5 Tiempo de concentración (tc).....	15
5.1.6 Coeficiente de Gravelius o índice de compacidad	17
5.1.7 Factor de forma de una cuenca	18

	Pág.
5.1.8 Coeficiente de rugosidad de manning.....	19
5.1.8.1 Métodos para determinar el coeficiente de manning en ríos.....	20
5.1.9 Número de curva	21
5.2 REVISIÓN DE CONCEPTOS RELACIONADOS CON EL BALANCE HÍDRICO.....	22
5.2.1 Datos de precipitación	23
5.2.2 Métodos para el cálculo de evapotranspiración.....	24
5.2.3 Modelo de Thomas	25
5.3 REVISIÓN DE MODELOS HIDROLÓGICOS	28
5.3.1 Clasificación de los modelos.....	29
5.3.2 Revisión de modelos hidrológicos.....	29
5.4 PRINCIPALES HERRAMIENTAS UTILIZADAS EN LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA.....	31
5.4.1 SIG o GIS.....	31
5.4.2. Información topográfica con modelos digitales de elevaciones.....	32
5.4.3 Exportación del modelo hidrológico en Arcgis – (Hec-Geohms) a software Hec-Hms.....	32
5.4.4 Modelo hidrológico Hec-Hms	33
5.4.5 Modelo hidrológico Iber.....	34
6. METODOLOGÍA	35
6.1 Metodología para la caracterización morfométrica de la cuenca hidrográfica	35
6.2 Metodología para la elaboración del balance hídrico.....	36

6.3 Metodología para la obtención de los caudales con la Modelación en Hec-Hms.....	38
6.4 Metodología para la obtención de los posibles puntos de inundación por medio de la modelación en iber.....	39
7 ZONA DE ESTUDIO.....	40
7.1 GEOLOGÍA.....	40
7.2 GEOMORFOLOGÍA.....	42
7.3 ESTADO ACTUAL DE LA CUENCA DEL LAGO DE TOTA.....	42
7.3.1 Fuentes de abastecimiento y recarga	44
8. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	46
8.1 CARACTERIZACIÓN DE MICROCUENCAS	46
8.1.1 Descripción hidrográfica las microcuencas Olarte y Tobal.....	46
8.1.2 Inspección y revisión de la zona de estudio.....	46
8.1.2.1 Estudios de suelos.....	48
8.1.3 Denominación de las áreas de drenaje según su tamaño y orden de cuenca para Olarte y Tobal	50
8.1.4 Indicadores de eficiencia.....	51
8.1.5 Tiempo de concentración (tc).....	52
8.1.6 Coeficiente de compacidad.....	52
8.1.7 Factor de forma.....	52
8.1.8. Coeficiente manning	53
8.1.9. Asignación número de curva.....	53
8.2 BALANCE HÍDRICO.....	55

8.2.1 Evapotranspiración	57
8.2.2. Resultado del balance hídrico según el modelo de Thomas.....	57
8.3 Resultados de la modelación de los caudales.....	62
8.4 Resultados de los posibles puntos de inundación obtenidos a través de la modelación en iber	70
CONCLUSIONES	77
RECOMENDACIONES.....	79
BIBLIOGRAFÍA.....	80
ANEXOS.....	84

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Áreas de drenaje según su tamaño	13
Tabla 2. Clases de permeabilidad.....	15
Tabla 3. Propiedades físicas del suelo	15
Tabla 4. Revisión de los métodos para calcular el tiempo de concentración.....	15
Tabla 5. Revisión de los Métodos Coeficiente de Manning.	20
Tabla 6. Revisión de los métodos para la determinación de datos faltantes	23
Tabla 7. Revisión de los métodos para la determinación de evapotranspiración	25
Tabla 8. Clasificación de Modelos Hidrológicos.....	29
Tabla 9. Herramientas computacionales mediante sistemas dinámicos.....	30
Tabla 10. Metodología de la Caracterización Morfométrica de las microcuencas	35
Tabla 11. Planchas cartográficas de la zona de estudio.....	36
Tabla 12. Metodología Balance Hídrico	36
Tabla 13. Estaciones hidrometereologicas del Lago de Tota	37
Tabla 14. Características de Arc-gis	37
Tabla 15. Metodología modelación Hec-Hms	38
Tabla 16. Variables para modelación Hec-Hms.....	38
Tabla 17. Metodología modelación Iber.....	39
Tabla 18. Microcuencas Lago de Tota.....	44

Tabla 19. Etapas de trabajo de campo para la caracterización de la zona de estudio	48
Tabla 20. Ensayos de caracterización muestras de suelo	49
Tabla 21. Ensayos de granulometría	50
Tabla 22. Tiempo de concentración de las microcuencas Olarte y Tobal.....	52
Tabla 23. Resultados ensayos de caracterización.....	53
Tabla 24. Número de curva	54
Tabla 25. Características geométricas de las microcuencas Olarte y Tobal.....	55
Tabla 26. Estimación de datos estación Sisbaca.....	55
Tabla 27. Calculo del coeficiente de Correlación.	57
Tabla 28. Evapotranspiración Lago de Tota	57
Tabla 29. Datos de entra al método de Thomas para las microcuencas Olarte y Tobal	58
Tabla 30. Parámetros a, b, c, d y el coeficiente de determinación del R2	59
Tabla 31. Resultados del balance hídrico microcuenca Olarte por el modelo de Thomas.....	60
Tabla 32. Resultados del balance hídrico microcuenca Tobal por el modelo de Thomas.....	61
Tabla 33. Pasos de la modelación en Hec-Hms	62
Tabla 34. Resultados de entrada a la modelación con Hec-Hms en la microcuenca Olarte.....	67

Tabla 35. Resultados de la entrada a la modelación con Hec Hms en la microcuenca Tobal.....	67
Tabla 36.Datos Hidrograma de salida.....	68
para la microcuenca Olarte.	68
Tabla 37.Datos del hidrograma de salida	68
para la microcuenca Tobal.....	68
Tabla 38. Resultados de los histogramasobtenidos con el modelo Hec-Hms para los diferentes tiempos de retorno para las microcuencas	69
Tabla 39.Pasos modelación Iber.....	70
Tabla 40 Resultados de los hietogramas obtenidos en Iber para la microcuenca Olarte	72
Tabla 41. Simulación de un evento de precipitacion en la microcuenca Olarte para un tiempo de retorno de de 100 años	73
Tabla 42. Ubicación de los posibles puntos de inundacion obtenidos en la modelación en iber para la imagen h	75

LISTA DE IMÁGENES

	Pág.
Imagen 1. Localización de la zona de estudio	40
Imagen 2. Plancha geológica 192.....	41
Imagen 3. Inspección visual zona de estudio	47
Imagen 4. Esquema de microcuenca Olarte modelo Hec- Hms.	65
Imagen 5. Esquema de la microcuenca Tobal modelo Hec- Hms	65
Imagen 6. Régimen del comportamiento de la lámina de agua en función de la profundidad para la microcuenca Olarte.....	66
Imagen 7. Régimen del comportamiento de la lámina de agua en función de la profundidad para la microcuenca Tobal	66
Imagen 8. Hidrograma de salida para la microcuenca Olarte.	68
Imagen 9 Hidrograma de salida.....	68
para la microcuenca Tobal.....	68

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Grafica 1. Análisis consistencia para estación Potrerito.	56
Grafica 2. Análisis consistencia para estación Sisbaca.	56
Grafica 3. Análisis consistencia de las estaciones Potrerito, Pesca Vs promedio	56
Gráfica 4. Resultado del caudal observado vs caudal simulado microcuenca Olarte.	59
Gráfica. 5. Resultado del Caudal observado vs Caudal simulado microcuenca	
Tobal	60

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Completado de datos estaciones de estudio	84
Anexo 2 Estación caudal Desaguadero.	85
Anexo 3. Parámetros para determinar número de curva en cuencas.	86
Anexo 4. Análisis de consistencia.....	87
Anexo 5. Parámetros hidrológicos	88
Anexo 6. Precipitación Areal microcuenca Olarte.....	89
Anexo 8. Participaciones y Publicaciones.....	90

A Dios, por darme la oportunidad de vivir y por estar conmigo en cada paso que doy. A mis padres, Eumelina López y Alfonso Alberto, no hay un día en el que no le agradezca a Dios por la fortuna más grande de tenerlos conmigo y por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo. A mis hermanos por estar conmigo y apoyarme siempre, los quiero mucho.

EUMELINA ALBERTO LOPEZ

A mi Padre Eterno quien me bendice cada día con la vida y me da las ganas de seguir luchando por mis metas. Al ángel que desde el cielo vela y cuida cada uno de mis días. A quien le debo todo lo que soy y lo que seré con todo mi amor a mi padre Miguel Antonio Santos Morantes, A mi mamá "Conchita", a mi hermanita Anny a mi sobrino Juan David (mi pedacito de cielo) , ustedes hacen que mi vida valga la pena segundo a segundo. Gracias por existir y darme la oportunidad de cumplir mis metas.

Ena Rocío Santos Ortega

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a nuestro director y asesor de trabajo de grado el Doctor Camilo Lesmes Fabián por su valiosa guía y colaboración y dirección en el proyecto A los ingenieros de la facultad de ingeniería civil de la USTA Tunja por su ayuda comprensión y dedicación en nuestra formación como ingenieros civiles, gracias por ayudarnos a alcanzar nuestras metas.

Al profesor Julián Segura Peña por su enorme colaboración de la misma forma a la Profesora Sully Segura Peña gracias por su ayuda y consejo.

Queremos dar un gran agradecimiento al Doctor Hans Paul Sánchez Tueros. Docente del Instituto Flumen de la Universidad Politécnica de Cataluña y Profesor de Iberaula, quien nos brindó su valiosa colaboración, paciencia y entrega

A la corporación regional de Boyacá Corpoboyaca quienes nos dieron su ayuda en la consecución de la información.

Por ultimo a todas las personas que de una manera u otra aportaron un granito de arena en el desarrollo de este trabajo A nuestros amigos y compañeros que nos brindaron su ayuda desinteresada y sobre todo durante estos años su amistad.

Nota de aceptación

Firma del jurado

Tunja,

Firma del jurado

RESUMEN

Los recursos hídricos son parte fundamental en el desarrollo de la humanidad, puesto que su aprovechamiento genera un bienestar y calidad de vida. Colombia cuenta con el segundo lago natural más grande de Latinoamérica el cual es el Lago de Tota¹. Este lago abastece de agua a todos los municipios aledaños, para el uso doméstico, comercial, agrícola, piscícola e industrial, beneficiando a toda la población que hace uso de este recurso². El estudio de la oferta hídrica de la cuenca del lago de Tota tiene una gran importancia para los habitantes que hacen uso de este recurso. Sin embargo, en la cuenca existen investigaciones sobre la oferta hídrica pero con seriales de datos de décadas pasadas. Por consiguiente, se desconoce el estado y la disponibilidad actual de la fuente hídrica. Este trabajo de investigación tuvo como finalidad la caracterización morfométrica, la elaboración del balance hídrico, los caudales promedio y los posibles puntos de inundación, tomando como caso de estudio las microcuencas Olarte y Tobal, siendo estas las de mayor contribución a la cuenca del lago de Tota.

El estudio hidrológico inicia con el análisis morfométrico de las microcuencas Olarte y Tobal, que incluye: la delimitación de la cuenca, la medición del área y la longitud, índice de compacidad, factor de forma y la caracterización de la red de drenaje. Para la realización del balance hídrico de la cuenca, se utilizó el método **a,b,c,d** de *Thomas*, con los parámetros de precipitación areal y la evapotranspiración, los cuales se calculan a partir de datos medidos por estaciones hidroclimatológicas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Con la anterior metodología se analizó el comportamiento de las masas de agua. Además se estimaron los caudales promedios usando los programas Arcgis con su extensión Hec-Hms. Sin embargo, estos resultados fueron relevantes para la última etapa de la investigación, la cual consistió en la identificación de los puntos de posible inundación. En esta fase se implementó la modelación dinámica, que se llevó a cabo con el programa Iber, con cual se obtuvo los posibles puntos de inundación.

¹ DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACION, Manejo ambiental integral de la cuenca hidrográfica del Lago de Tota, Bogotá. 2014

² Ibid., p 60

ABSTRACT

The water resources are a very important part in the development of the human kind because its use generates a well-being and a life quality. Colombia has the second largest natural lake in Latin America, which is the Tota Lake. This lake is the source of water for the municipalities around the watershed and it is used in household, commercial, agricultural, piscicultural, and industrial activities, and therefore, it is a benefit for the population in the area. The study of the water supply of the Tota Lake watershed is of importance to the inhabitants that use this resource. However, there are studies about this watershed whose data is old. Therefore, the current state and the availability of the water is still unknown. This research work had as a goal, the morphometric characterization, the water balance, the average flows and the identification of the possible points of flooding, taking as study area the micro-watersheds Olarte and Tobal, which are the largest water contributors of the whole watershed.

The hydrological study starts with the morphometric analysis of the micro-watersheds Olarte and Tobal, including the delimitation of the watershed, the measurement of the area and the length, compactness index, form factor and the characterization of the drainage. For the water balance of the watershed, the Thomas a, b, c, d method was used with the parameters of areal precipitation and evapotranspiration, which were taken from the database of the Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies (IDEAM, Spanish abbreviation). With this methodology the behaviour of the water movements was studied. Besides, the average flows were estimated using the ArcGis program with its extension Hec-Hms. These results were relevant for the last phase of the research, which consisted of the identification of the possible flooding points. In this last phase, the dynamic modelling was used with the Iber program, which allowed to obtain the possible flooding points.

INTRODUCCIÓN

El agotamiento del recurso hídrico hoy en día es una de las mayores preocupaciones a nivel mundial, ya que este recurso es parte fundamental para el desarrollo, el bienestar y la calidad de vida de los seres vivos. Colombia cuenta con el segundo lago natural más grande de Latinoamérica que es el Lago de Tota, ubicado en el departamento de Boyacá. Este lago abastece a una población cercana a 250.000 habitantes de los municipios aledaños; además este recurso es utilizado por el sector industrial, comercial y actividades derivadas de la agricultura y el turismo.

El presente proyecto de investigación estudia los parámetros hidrológicos para realizar la caracterización morfométrica; la elaboración del balance hídrico; la estimación los caudales promedio y finalmente los posibles puntos de inundación. Es importante resaltar que en la zona de estudio se han realizado investigaciones sobre balance hídrico y caracterización morfológica. Sin embargo, no se encuentran con datos seriales actuales. Esta investigación busca evaluar el estado actual de las microcuencas y así sugerir recomendaciones para el cuidado y manejo del recurso hídrico.

Este proyecto se ejecuta en cuatro etapas fundamentales. La primera se comprende de la caracterización morfométrica; en la segunda etapa se determina el balance hídrico de las microcuencas Olarte y Tobal pertenecientes a la cuenca del Lago de Tota, a través del método *Thomas*. Para la tercera etapa se estiman los caudales promedios con la modelación en el programa Hec-Hms. Finalmente se identifican los posibles puntos de inundación con la utilización del programa Iber.

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Descripción de la problemática

El estudio de las cuencas hidrográficas ha sido un tema de gran interés para todas las comunidades, debido a que en épocas anteriores se consideraba el recurso hídrico como infinito. Sin embargo, en la actualidad el manejo y control de las fuentes de abastecimiento hídrico se ha convertido en el objetivo fundamental para muchas naciones, debido a que se ha demostrado que las actividades humanas han ocasionado deterioro a pasos agigantados de los ecosistemas y por ende afectando a todas las fuentes hídricas.

En el caso de nuestro país que es privilegiado en recursos hídricos y naturales, según la alusión hecha por la revista semana citando al diario The Economist³, Colombia es uno de los nueve países que en conjunto posee el 60 por ciento de este recurso y el cual está en riesgo. Hasta finales de los años noventa, el país era el cuarto país con mayor cantidad de agua dulce disponible por habitante. Sin embargo, el crecimiento de la población y la degradación de sus ecosistemas causaron que el país descendiera al puesto número 24.

La cuenca del Lago de Tota es importante a nivel departamental y nacional, debido a que es un cuerpo de agua natural, con una superficie cercana a los 55 km². Es el lago más grande de Colombia, tiene una capacidad de 1920 millones de metros cúbicos con profundidad máxima de 67 m y una profundidad media 34 m. De acuerdo al Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014, esta cuenca no solo tiene carácter de humedal sino que forma parte del ecosistema de páramo⁴.

Existe una problemática ambiental alrededor de la cuenca asociada a la demanda actual del recurso hídrico. El promedio del consumo mensual de agua del lago mediante la extracción por el canal de captación para la empresa Acerías Paz del Río es de 7.675 m³/día, lo que equivale a 89 l/s; del canal también se beneficia el acueducto de Nobsa (0,82 l/s) y Cementos Argos (2,71 l/s). La empresa Acerías Paz del Río, utiliza el agua proveniente del lago para sus procesos industriales como el enfriamiento del hierro, con un consumo de agua concesionado que es equivalente al que tendría una población de aproximadamente 51.000 habitantes⁵. Además de otros problemas ambientales como es la sobreproducción agrícola (cebolla, papa, arveja, etc.), la cebolla de rama larga cubre una demanda de producción del 80% del total que consume el país⁶. Estos

³ SIERRA, Juan. Pesadilla ambiental [En línea]: <http://www.semana.com/nacion/articulo/sequia-en-casanare-otros-conflictos-ambientales-en-colombia/381836-3>

⁴ DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACION, Manejo ambiental integral de la cuenca hidrográfica del Lago de Tota, Bogotá. 2014

⁵ ibid., p.69.

⁶ ibid., p.68.

procesos son los que afectan la demanda del recurso hídrico y participan en el deterioro de la cuenca.

Teniendo en cuenta lo anterior, es importante realizar un estudio hidrológico con datos de precipitación actualizados en la cuenca del lago de Tota que incluya la caracterización morfométrica, la evaluación del balance hídrico, la estimación de los caudales promedios y posibles puntos de inundación. Para abordar este estudio se tiene en cuenta las dos microcuencas de mayor aportación que hacen a la cuenca, las cuales son Olarte y Tobal.

2 JUSTIFICACIÓN

El principal problema identificado en el área de estudio es la inadecuada gestión ambiental y sectorial del territorio de la cuenca del Lago de Tota, lo cual no asegura un manejo sostenible de los recursos naturales. Uno de los aspectos centrales hace referencia al deterioro de los servicios eco-sistémicos que presta la cuenca del Lago de Tota, a causa de las intervenciones antrópicas no planificadas o descontroladas y de las consecuencias socioeconómicas que ello trae consigo. Igualmente, es de señalar las limitaciones de la información existente sobre los ecosistemas, recursos naturales, servicios suministrados por el sistema del Lago de Tota y su relación con la sociedad y la economía. Desde el punto de vista ambiental, la problemática en la afectación de la calidad del recurso hídrico es propiciada por la falta de educación ambiental que hace que las personas que habitan la cuenca contaminen el agua con sus vertimientos domésticos, dificultades en el control a estos y a la escorrentía agrícola. A su vez, existe incertidumbre sobre el impacto generado por la piscicultura, agricultura, ganadería y desconocimiento de la capacidad de carga del lago para desarrollar actividades económicas y ausencia de programas de educación ambiental que generen un sentido de apropiación del territorio por parte de sus habitantes

La cuenca del Lago de Tota, es una fuente natural que beneficia a todas los habitantes de la región a través de las diferentes actividades productivas como lo son: la agricultura, la zona industrial, hotelera, piscícola y pecuaria. Estas actividades ocasionan un desequilibrio de la fuente hídrica, aumentando la disminución de los caudales al lago. Debido a esto se hace necesaria la realización de un análisis completo de la disponibilidad del recurso por medio de calibración de modelos hidrológicos que den una aproximación detallada del proceso de agua. Por esta razón se implementa el método de Thomas el cual permite entregar resultados acerca de la distribución del recurso hídrico a nivel superficial, sub superficial y subterráneo a lo largo de las microcuencas Olarte y Tobal pertenecientes a la cuenca del lago de Tota.

La oferta hídrica de la cuenca del lago a través del tiempo ha sido estudiada pero muchos de estos estudios no están contextualizados con los problemas actuales de demanda del recurso. Por tal razón se realizó el estudio de parámetros hidrológicos y morfológicos de los microcuencas de Olarte y Tobal siendo estos las de mayor aportación a la cuenca del Lago de Tota. Se realiza una caracterización morfométrica de las microcuencas Olarte y Tobal, de manera manual y a través de herramientas computacionales, las cuales permitirán observar el comportamiento de los caudales en diferentes tiempos, simulando caudales de entrada y salida.

Los datos de precipitación corresponde a los años de 1998 al 2013 datos mensuales multianuales y análisis de datos de lluvia a 24 horas en un periodo de 5 años (2009-2013) de la cuenca del Lago de Tota.

Se caracteriza y se analiza mediante el balance hídrico la zona de estudio, para observar el comportamiento en diferentes periodos de retorno. La modelación permitirá la elaboración de mapas de inundación, útiles para la evaluación de riesgo

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar un estudio hidrológico de la cuenca del Lago de Tota que incluya la caracterización morfométrica, el balance hídrico, la estimación del comportamiento de los caudales y la identificación de los posibles eventos de inundación.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar la caracterización morfométrica de las microcuencas Olarte y Tobal pertenecientes a la cuenca del Lago de Tota que incluya los parámetros de orden de la cuenca, indicadores de eficiencia, factor de forma, índice de compacidad y el tiempo de concentración.
- Evaluar la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca hidrográfica del lago de Tota mediante la elaboración del balance hídrico en las microcuencas Olarte y Tobal teniendo en cuenta los diferentes parámetros hidrológicos, como la precipitación y la evapotranspiración.
- Estimar los caudales pico para diferentes periodos de retorno para evaluar el aporte al Lago y los posibles eventos de inundación en la zona de estudio, para prevenir situaciones de riesgo.
- Proporcionar una serie de recomendaciones con el fin de iniciar un programa de gestión del recurso hídrico para la zona de estudio, basado en las modelaciones hidrológicas.

4. ANTECEDENTES HISTÓRICOS Y ESTADO DEL ARTE

4.1 Estado del arte

Históricamente, se ha avanzado hacia el estudio y el desarrollo de modelos hidrológicos que han permitido analizar teóricamente aproximaciones de la distribución del recurso hídrico, con la implementación de herramientas tecnológicas computacionales a nivel mundial. Sin dejar de lado las herramientas que hacen mediciones in situ para los diferentes parámetros meteorológicos. A continuación se mostraran varias investigaciones a nivel internacional, nacional y en la zona de estudio que son de apoyo a esta investigación

4.1.1 Investigación a nivel internacional

La importancia de entender el comportamiento y la distribución de los recursos hídricos es crucial en la implementación de las políticas de gestión para su uso y aprovechamiento. A nivel mundial se han realizado diferentes estudios. A continuación se menciona los más relevantes:

a. *Caracterización de las cuencas hidrográficas (Aguirre, Juan, 1994)*⁷. En la Universidad Politécnica de Valencia España se caracterizaron las cuencas hidrográficas con el objeto de hacer una restauración hidrológico-forestal, mediante modelos hidrológicos. Este estudio muestra la importancia que tiene una correcta utilización de los modelos hidrológicos. Para el diagnóstico de la situación real, ya que las cuencas hidrográficas están sometidas a fenómenos torrenciales y con problemas para mantener y/o recuperar sus coberturas vegetales; por las cuales son necesarias para asegurar el equilibrio dinámico de dichas cuencas.

b. *Análisis morfométrico de la Laguna Victoria, (Cabrera. María. Bello. Carlos, 2005)*⁸. En Venezuela se llevó a cabo una investigación en la Laguna Victoria, ubicada en el Parque Nacional Sierra Nevada. Este trabajo analizó la morfometría de la cuenca, con el fin de relacionar los flujos de entrada y salida con los tiempos de retención de agua y el estado trófico.

c. *La modelación hidrológica en la cuenca Lempa Alto realizada en la Universidad de el Salvador (López, Lisandro y Delgado, Karen, 2009)*⁹, busca la elaboración de un modelo hidrológico espacialmente distribuido y empírico, haciendo de este una herramienta muy importante para la toma de decisiones el cuidado y manejo integral de

⁷ MINTEGUI AGUIRRE, Juan Ángel; ROBREDO SÁNCHEZ, José Carlos. Caracterización de las cuencas hidrográficas, objeto de restauración higrológico-forestal, mediante modelos hidrológicos. Ingeniería del agua, [S.l.], v. 1, n. 2, jun. 1994. ISSN 1886-4996. Disponible en: <http://ojs.upv.es/index.php/IA/article/view/2637>.

⁸ CABRERA. María. BELLO. Carlos ANALISIS MORFOMÉTRICO DE LA LAGUNA VICTORIA, PARQUE NACIONAL SIERRA NEVADA, MÉRIDA, VENEZUELA.(2005)

⁹ LOPEZ, Lisandro y DELGADO, Karen. Modelación hidrológica de la microcuenca lempa alto. Santa Ana. 2009, 200p. trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad de el Salvador

las microcuencas de la zona de estudio. Esta investigación permitió verificar la disponibilidad hídrica de todas las microcuencas que conforman la cuenca, y trata de explicar el comportamiento hidrológico. La herramienta que se utilizó en esta investigación fue una ecuación muy versátil para evaluar la disponibilidad hídrica o para la toma de decisiones, al contar con la información que esta necesita.

d. *La modelación hidrológica de cuencas pluviales, hoya hidrográfica del Río Maule en Chile (Universidad de Chile, 2010)*¹⁰. Esta investigación logró calibrar y validar dos modelos de simulación hidrológica en cuencas pluviales de la hoya hidrográfica del Río Maule y analizar comparativamente los resultados entregados, en la calibración de los modelos y la obtención de los parámetros iniciales.

e. *Estudio de la utilidad de la lluvia estimada de satélite en la modelación hidrológica distribuida (Ramos, Lía, 2013)*¹¹. En Valencia, España se hizo un estudio de la utilidad de la lluvia estimada por medio de un satélite en la cuenca del río Júcar (cuenca mediterránea extra tropical). Esta modelación hidrológica distribuida busco evaluar la utilidad de los productos de lluvia estimada por satélite a través de un modelo hidrológico distribuido para ser una alternativa de estimación de la precipitación en aquellas regiones donde no existen herramientas de medición hidrometeorológicas. Los resultados de esta modelación permitieron estimar la cantidad de lluvia efectiva que recibe la cuenca.

Las investigaciones realizadas a nivel internacional realizan un gran aporte para la realización de esta investigación, debido a que la información citada sirve como apoyo a la fundamentación teórica planteada más adelante.

4.1.2 Investigación a nivel de Colombia

En Colombia, a mediados de la década del ochenta se comenzó a implementar la modelación hidrológica con programas como el linear *perturbation model*¹². Más tarde, a finales de la década del noventa, se realizaron diferentes trabajos como los citados a continuación:

a. *Estudio del modelo de simulación de caudales medios mensuales aplicado a una cuenca hidrológica (Lizarazo, Alfonso, 2006)*¹³. Este estudio consistió en la modelación hidrológica continúa para el cálculo de caudales medios. Sin embargo, la experiencia demuestra que los resultados no fueron los mejores, debido al mal cálculo de las

¹⁰ DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS Y PLANIFICACION Y UNIVERSIDAD DE CHILE (Chile)

¹¹ RAMOS, Lía. "Estudio de la utilidad de la lluvia estimada de satélite en la modelación hidrológica distribuida." PhD diss., Editorial Universitat Politècnica de València, 2013

¹² CARVAJAL, Yesid. Estimación de caudales promedios mensuales por microcuencas hidrológicas. Cali, 2006, 16p.

¹³ LIZARAZO, A. Estudio del modelo de simulación de caudales medios mensuales aplicado a una cuenca hidrológica. Cúcuta: Universidad Francisco de Paula Santander. Citado por: CARVAJAL, Yesid. Estimación de caudales promedios mensuales por microcuencas hidrológicas. Cali, 2006, 16p.

variables de entrada que requerían los modelos y además, por el desconocimiento de la formulación matemática de éstos.

b. *Estimación de caudales promedios mensuales por microcuencas hidrológicas (Carvajal, Yesid.2006)*¹⁴. En la cuenca del río Yumbo en el Valle del Cauca se estimaron de caudales promedios, mensuales por microcuencas hidrológicas mediante la modelación con Hec-hms, aplicado a partir de los datos de lluvia, información morfométrica de suelos, que dió como resultado la calibración del modelo. Este usualmente gira en torno a la distribución temporal de la lluvia y los parámetros de abstracción de humedad, que son los que definen la forma del hidrograma unitario.

c. *Modelación hidrológica del humedal de Jaboque (Bogotá, 2013)*¹⁵. En los resultados de la modelación hidrológica del humedal; se permite detectar una fuerte relación entre los montos y la estimación de distribución de la precipitación de la cuenca aferente y los procesos hidrológicos del humedal, demostrando como la modelación hidrológica se pueden correlacionar múltiples variables.

d. *Análisis de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo en la Cuenca Alta del río Bogotá (Vera. Daniel, 2015)*¹⁶. Elaboración del proyecto piloto con el objeto de identificar las zonas de riesgo por inundación a causa de la ola invernal presentada en el año 2012 en el municipio de Villapinzón, Cundinamarca donde se presentaron grandes pérdidas materiales. Como resultado de esta investigación se estableció la vulnerabilidad de los predios que se encuentran a la rivera de la cuenca y los mapas de inundación a través de programas computacionales.

De la misma manera que las investigaciones hechas a nivel internacional, las realizadas en nuestro país dan un referente importante de información puesto que muestran de manera clara los avances sobre la temática a desarrollar.

4.1.3 Investigaciones en la zona de estudio

a. *Estudio de Manejo y Conservación del Lago Tota y su cuenca (Hidroestudios, 1978)*¹⁷. La firma consultora Hidroestudios realizó una evaluación integrada de la cuenca del lago de Tota que permitió caracterizarla hidroclimatológicamente, además de desarrollar un balance hídrico de la zona, con datos de oferta y demanda proyectados. Por otra parte, este estudio llevo a cabo un análisis geológico y geomorfológico de la región que define la estratigrafía del suelo. Sin embargo esta

¹⁴ CARVAJAL, Yesid. Estimación de caudales promedios mensuales por microcuencas hidrológicas. Cali, 2006, 10p.

¹⁵ BELTRAN, Julio. Modelación hidrológica del humedal de jaboque. Bogotá, 2013, 81p. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad de Ciencias.

¹⁶ VERA, Daniel. Análisis de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo en la Cuenca Alta del río Bogotá. Bogotá, 2015, 150p. Trabajo de grado (Maestría Ingeniería Civil). Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Facultad Ingeniería Civil.

¹⁷ HIDROESTUDIOS, Estudio de Manejo y Conservación del Lago Tota y su cuenca, Citado por CORPOBOYACA. Plan Ordenación Manejo de la cuenca Lago de Tota. Tunja, 2004, p.8

investigación si bien es un referente importante, los datos no son actuales debido a la época de los estudios y los cambios topográficos en las últimas décadas.

b. Investigación Hidrogeológica de la Cuenca del Lago Tota (Vergara, Buitrago y Rodríguez, 1992)¹⁸. Este Estudio indica que el balance hídrico del lago arroja una pérdida del orden de 0.5 m³/s, los cuales deben presentarse por infiltración ya que el lago no sobrepasa la presa durante gran parte del año. Además, señalan la existencia de flujos subsuperficiales importantes en la cuenca que drenan hacia el lago en forma de manantiales que tienen como origen el agua precipitada en las zonas de recarga durante estaciones anteriores. Sin embargo, debido a la fecha de realización del estudio, los resultados de la investigación están apartados del contexto actual de la cuenca del Lago de Tota. No obstante, no se niega la importancia de este estudio para la década de los noventa y las conclusiones a las que se llegaron en el momento, por lo que se hace pertinente volver a desarrollar esta clase de investigación para entender el estado actual de la cuenca.

c. Implementación de SIG en la cuenca del Lago de Tota. (Laserna, 1996)¹⁹. En este estudio se relata históricamente el manejo de las aguas en la cuenca del lago de Tota, desde la construcción del túnel de Cuítiva (1928) pasando por la construcción del túnel que lleva las aguas a Paz del Río (1952), hasta el año de 1998. Cabe resaltar dentro de este relato los descensos dramáticos de niveles del lago, que se presentaron en 1988 y 1998, a pesar de las regulaciones hechas por las entidades encargadas del control hechas a partir de 1988. En esta investigación, se hace un análisis de oferta y demanda (balance hídrico). Esta investigación determina estimativos de consumo de agua de los acueductos, Acerías Paz del Río y de los consumos agrícolas. Además, presenta datos de calidad de agua del lago de Tota, en términos de pH, sólidos suspendidos, dureza total, sólidos disueltos y contenido de óxidos, hierro y cloro.

d. Desarrollo del Modelo Hidrogeológico Conceptual del Lago de Tota (Veloza y Rodríguez, 2001)²⁰. En este estudio se definen las estructuras geológicas que subyacen la cuenca. Se hace una explicación completa de la formación de la cuenca y del lago y se expone las variaciones geológicas de la cuenca durante períodos históricos subsiguientes. Además, ilustra de manera clara todos los aspectos relevantes que influyen en la circulación del agua. Con respecto a la hidrogeología, en esta investigación se clasifican las formaciones existentes según su permeabilidad, identificando la existencia de muy buenos acuíferos en los municipios de Iza, Aquitania y en los alrededores de Cuítiva, así como también en el sector de los Arrayanes, Olarte y el Desaguadero.

¹⁸ VERGARA Y BUITRAGO. Investigación Hidrogeológica de la Cuenca del Lago Tota, Citado por CORPOBOYACA. Plan Ordenación Manejo de la cuenca Lago de Tota. Tunja 2004, p.9

¹⁹LASERNA. Implementación de SIG en la cuenca del Lago de Tota, Citado por CORPOBOYACA. Plan Ordenación Manejo de la cuenca Lago de Tota. Tunja, 2004, p.9

²⁰ VELOZA Y RODRÍGUEZ. Desarrollo del Modelo Hidrogeológico Conceptual del Lago de Tota, Citado por CORPOBOYACA. Plan Ordenación Manejo de la cuenca Lago de Tota. Tunja 2004, p.9

e. *Balance Hidrológico del Lago Tota y Estudio Preliminar del Comportamiento Hidráulico en Lagos. (Cañón y Rodríguez, 2001)*²¹. Para esta investigación se revisaron los estudios previos existentes y se analizó la información hidroclimatológica disponible. Además se llevó a cabo una campaña de recolección mensual de muestras de aguas para análisis isotópicos. Basados en esta información, se desarrollaron dos metodologías para el modelo del balance hídrico: una mediante el cálculo convencional del ciclo hidrológico a nivel mensual y la otra por medio de la teoría de balance isotópico. Por último, se utilizó la existencia de dos batimetrías hechas en dos épocas diferentes (1978 y 1998) para la evaluación del aporte de sedimentos al lago de Tota. Como resultado se encontró el ciclo hidrológico de la cuenca, a nivel mensual.

f. *Reglamentación de las aguas derivadas del Lago de Tota a través del túnel de Cuítiva (Pedraza, 2005)*²². En este trabajo se observan aspectos relacionados con los antecedentes en el manejo de la cuenca del Lago de Tota. Este estudio hidrológico permitió establecer la oferta hídrica histórica teniendo en cuenta estudios hidrogeológicos, morfométricos, climatológicos e hidrográficos y se establecieron algunas recomendaciones. Como aspecto importante, se incluye el inventario, organización y análisis de las concesiones de agua otorgadas por elINDERENA, y la Corporación Autónoma Regional De Boyacá (CORPOBOYACA) evaluando esta información frente a la oferta y demanda hídrica encontrada en la actualidad.

g. *Estudio Preliminar del Estado de la Sub Cuenca los Pozos y su posible efecto en un sector de la Laguna de Tota* (Noriega, 2013)²³. Esta investigación encontró el impacto que tiene la condición de la quebrada los pozos en un sector de la laguna. Se establecieron cinco estaciones (tres en la quebrada y dos en la laguna) donde se tomaron muestras para el análisis de seis componentes: suelo, calidad fisicoquímica de la quebrada y de la laguna, fitoplancton y zooplancton. Los resultados obtenidos en esta investigación evidencian que el Lago de Tota al parecer no presentó altos niveles de contaminación en las estaciones muestreadas. Fue posible evidenciar algunos efectos nocivos que a corto y mediano plazo podrían incrementarse en la región tales como: los vertimientos de las áreas de cultivo y aguas negras de los municipios aledaños.

De acuerdo a lo anteriormente citado, sobre las investigaciones realizadas en la zona de estudio, estas sirven de referente para muchas investigaciones más incluyendo el presente proyecto. Y si bien se realizaron grandes aportes para la regulación y ordenamiento de la cuenca del Lago de Tota es vital seguir adelantando diferentes estudios para entender el comportamiento actual de la cuenca y poder proyectar el cuidado y su conservación a futuro.

²¹ CAÑÓN Y RODRÍGUEZ. Balance Hidrológico del Lago Tota y Estudio Preliminar del Comportamiento Hidráulico en Lagos, Citado por CORPOBOYACA. Plan Ordenación Manejo de la cuenca Lago de Tota. Tunja 2004, p.10

²²PEDRAZA Reglamentación de las aguas derivadas del lago de Tota a través del túnel de Cuítiva Citado por CORPOBOYACA. Plan Ordenación Manejo de la cuenca Lago de Tota. Tunja 2004, p.10

²³ Noriega, Jorge. "Estudio preliminar del Estado de la sub cuenca de Los Pozos y su Posible efecto en el sector Laguna de Tota, Boyacá-Colombia. la ONU." En: Rev. Tecnol 9.2.

5. MARCO TEÓRICO

A continuación se definen y se revisan algunos conceptos y parámetros que son de utilidad para desarrollo de esta investigación.

3.1 REVISIÓN DE CONCEPTOS RELACIONADOS CON LA CARACTERIZACIÓN DE CUENCAS

Las características físicas de una cuenca son elementos que tienen una gran importancia debido a que establecen el comportamiento hidrológico de la misma. Dichas características físicas se clasifican en dos tipos según su impacto en el drenaje: las que condicionan el volumen de escurrimiento como el área y el tipo de suelo de la cuenca y las que condicionan de la velocidad de respuesta como el orden de corriente, la pendiente, la sección transversal, área de la cuenca; divisoria de aguas tipo y uso del suelo; forma de la cuenca; pendiente de la cuenca; elevación media y mediana, red de drenaje y orden de las corrientes

5.1.1 Área de la cuenca

El área de una cuenca está determinada por una línea imaginaria que une los puntos más altos y encierran el área de confluencia, aunque encuentren picos aislados más altos. A continuación se presenta la denominación de las áreas de drenaje según su tamaño

Tabla 1. Áreas de drenaje según su tamaño²⁴.

Área (km ²)	Nombre
<5	Unidad
5-20	Sector
20-100	Microcuenca
100-300	subcuenca
>300	Cuenca

Fuente: Hernán Materón M

5.1.2 Pendiente media de la cuenca

Este parámetro mide la pendiente media en dos ejes principales (x , y) y a partir de estos valores se determina la pendiente media de la cuenca, definida como la

²⁴ MATERON. Hernán. En Apuntes de clase. Universidad del Valle. 2010. p9.

inclinación o declive promedio de su topografía²⁵. El método de mayor aplicación es Horton. Para estimar la pendiente media en la cuenca de análisis se traza una malla cuyo eje principal (**x**) siga aproximadamente el sentido del cauce principal. A partir de la malla, se mide la longitud de cada línea de la malla comprendida dentro de la cuenca y se cuentan las intersecciones y tangencias de cada línea con las curvas de nivel.

3.1.3 Orden de la cuenca

Refleja el grado de ramificaciones o bifurcaciones dentro de una cuenca.

- Primer orden: pequeños canales que no tiene tributarios.
- Segundo orden: cuando dos corrientes de primer orden se unen.
- Tercer orden: cuando dos corrientes de segundo orden se unen
- n+1 orden: cuando dos corrientes de n orden se unen.

3.1.4 Indicadores de eficiencia de una cuenca

Densidad de corrientes "**DS**"²⁶

En las densidades de corrientes se presentan en velocidades altas o bajas. Las densidades altas: se describe la rápida respuesta ante una tormenta, esto ocurre donde los suelos se erosionan fácilmente. Son suelos relativamente impermeables y con pendientes altas y cobertura vegetal escasa. Las densidades bajas: ocurren donde los suelos son muy resistentes a la erosión o son muy permeables. A continuación se presentan las tablas 2 y 3 donde se describe las clases de permeabilidad y las propiedades físicas del suelo.

DS >> número de corrientes (**ns**) perenes e intermitentes por unidad de área (**a**).

$$Ds = \frac{Ns}{A} \quad (Ds \text{ alto} \gg 3,5) \quad (\text{Ecu.1})$$

Densidad de drenajes "**Dd**"²⁷ y longitud de corrientes (**ls**) por unidad de área.

$$Dd = \frac{Ls}{A} \quad (\text{Ecu.2})$$

Tabla 2. Clases de permeabilidad.

²⁵ BREÑA. Augustin. JACOBO. Marco. Principios y fundamentos de hidrología superficial. Universidad Autónoma y Metropolitana .México 2006 p36

²⁶ Chow, V. M. (1988). Applied Hydrology. New York, EE.UU: McGraw Hill.

²⁷ Ibid.,p67

Clase	(cm/hora)	(m/día)	Clasificación Hidrológica
Muy lenta	< 0.1	< 0.03	D
Lenta	0.1 - 0.5	0.03 - 0.12	D-C
Moderadamente lenta	0.5 - 2.0	0.12 - 0.50	C
Moderada	2.0 - 6.0	0.50 - 1.50	B
Moderadamente rápida	6.0 - 12.0	1.50 - 3.00	B
Rápida	12.0 - 18.0	3.00 - 4.50	A
Muy rápida	> 18.0	> 4.50	A

Fuente: Materón Hernán 2010

Tabla 3. Propiedades físicas del suelo.

Textura	Filtración y Permeabilidad (cm/ hora)	Símbolo	Clasificación Hidrológica
Arenoso	5 (2.5-25.5)	A	A-B
Franco Arenoso	2.5 (1.3-7.6)	FA	B
Franco	1.3 (0.8-2.0)	FA	C
Franco Arcilloso	0.8 (0.25-1.5)	F Ar	C
Arcillo Arenoso	0.25 (0.03-0.5)	Ar A	C-D
Arcilloso	(0.01-0.1)	Ar	D

Fuente: Materón Hernán 2010

3.1.5 Tiempo de concentración (t_c)

El tiempo de concentración mide el tiempo que se necesita para que toda la hoya contribuya con escorrentía superficial en una sección considerada. Se mide en minutos u horas²⁸. A continuación se encuentran algunas revisiones de los métodos para determinar el tiempo de concentración y la descripción de cada ecuación.

²⁸ Monsalve Sáenz, G. (1999). Hidrología en la Ingeniería. Santa fe de Bogotá D.C., Colombia: Escuela Colombia de Ingeniería.

Tabla 4. Revisión de los métodos para calcular el tiempo de concentración

Autor	Descripción	Ecuación
Bransby-Williams	T_c : tiempo de concentración de la hoya hidrográfica, en min. l : longitud del curso de agua más largo o cauce principal, en km. a : área de la cuenca, en km ² . s : pendiente promedio del cauce principal, en (m/m).	$T_c = 14.6 L A^{-0.1} S^{-0.2}$ (Ecu.3.a)
California Culvert Practice	T_c : tiempo de concentración de la hoya hidrográfica, en min. l : longitud del cauce principal, en km. h : es la diferencia de nivel entre la divisoria de aguas y la salida, en m.	$T_c = 60 \left(\frac{0.87075 L^3}{H} \right)^{0.385}$ (Ec.3.b)
Clark	T_c : en horas. a : área principal, en km ² . s : pendiente en (m/m).	$T_c = 0.335 \left(\frac{A}{S^{0.5}} \right)^{0.593}$ (Ecu.3.c)
Guaire	T_c : en horas l : en km s : en m/km a : área: en km ²	$T_c = 0.355 * \left(\frac{A}{\sqrt{s}} \right)^{0.595}$ (Ecu.3.d)
Bureau of Reclamation	T_c : en horas l : en km h : desnivel en m.	$T_c = 1.666 * t_l$ (Ecu.3.e)
Giandotti	T_c : en horas. a : área de la cuenca, en km ² . l : en km. s : en m/m.	$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{25.3\sqrt{SL}}$ (Ecu.3.f)
Kerby – Hathaway	T_c : tiempo de concentración de la hoya hidrográfica, en min. n : coeficiente de rugosidad del cauce. l : longitud del curso de aguas más largo, en pies. s : pendiente total del cauce principal, igual a la caída total entre la longitud del cauce principal, en m/m	$T_c = \left[\frac{0.67n L}{\sqrt{S}} \right]^{0.467}$ (Ecu.3.g)
Soil Conservation Service de los Estados Unidos de América S.C.S.	T_c : tiempo de concentración, en horas. t_f : tiempo de retardo, en horas. s = máximo potencial de humedad, en pulgadas. y = pendiente media del cauce principal, en %. l = longitud del canal, en pies	$T_c = \frac{L^{0.8} * (S + 1)^{0.7}}{1900 * Y^{0.5}}$ (Ecu.3.h)

Continuación Tabla 4. Revisión de los métodos para calcular el tiempo de concentración.

Autor	Descripción	Ecuación
Kirpich	T_c : tiempo de concentración, en minutos. l : longitud del cauce principal, en m. δh : diferencia de altura entre puntos extremos, en m. s : pendiente del cauce principal, en m/m.	$k = \frac{L}{\sqrt{S}} \quad S = \Delta H / L$ $T_c = 0.0195 * k^{0.77}$ (Ecu.3.i)
Método Racional Generalizado	T_c : tiempo de concentración de la hoya hidrográfica, en hr. n : es el coeficiente de rugosidad del cauce. l : longitud del curso de aguas más largo, en km. h : es la diferencia de nivel entre la divisoria de aguas y la salida, en m.	$T_c = \left[\frac{60 n L}{H^{0.3}} \right]^{0.467}$ (Ecu.3.j)
V.t. chow	T_c : tiempo de concentración de la hoya hidrográfica, en hr. l : longitud del cauce principal, en km. s : pendiente total del cauce principal, igual a la caída total entre la longitud del cauce principal, en m/m.	$T_c = 0.273 \left(\frac{L}{S^{0.5}} \right)^{0.64}$ (Ecu.3.k)
Ventura-Heras	T_c : tiempo de concentración de la hoya hidrográfica, en horas. a : área de la cuenca, en km². α : parámetro que depende de la pendiente, igual a $\alpha = L \sqrt{A}$ s : pendiente total del cauce principal, igual a la caída total entre la longitud del cauce principal, en m/m. l : longitud del cauce principal, en km.	$T_c = \alpha \frac{A^{0.5}}{S}$ $0.04 \leq \alpha \leq 0.13$ (Ecu.3.l)
Temez	T_c : tiempo de concentración de la hoya hidrográfica, en hr. l : longitud del curso de aguas más largo, en km. s : pendiente promedio del cauce principal, en (m/m).	$T_c = 0.30 \left(\frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.76}$ (Ecu.3.m)

Fuente: Salgado and Güitrón 2012²⁹

Los resultados de la estimación del tiempo de concentración son muy diferentes entre sí, puesto que cada autor estima su ecuación para una cuenca con características muy particulares, por lo que debe tener cuidado para la selección del valor más adecuado del tiempo de concentración³⁰. Una práctica común en hidrología aplicada es utilizar el

²⁹ SALGADO, Jorge. Aplicabilidad de los modelos hidrológicos distribuidos En: XXII Congreso Nacional de Hidráulica. (2° :2012 Acapulco, Guerrero, México). 5p

³⁰ Velez, J. B. (2010). Estimación del Tiempo de Concentración y Tiempo de Rezago en la Cuenca Experimental Urbana de la Quebrada San Luis. Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

valor medio eliminando los valores extremos, teniendo en cuenta la desviación estándar³¹.

5.1.6 Coeficiente de Gravelius o índice de compacidad

El coeficiente de Gravelius relaciona el perímetro de la cuenca con un perímetro teórico circular para una misma superficie³². A continuación se presenta la ecuación 4 donde se describe.

$$k_c = 0.28 * \frac{P}{A^{1/2}} \quad (\text{Ecu.4})$$

Dónde:

p: perímetro de la cuenca, en km

A: superficie de la cuenca, en km².

En cualquier caso el coeficiente será mayor que 1, tendiendo a la unidad cuando la cuenca se aproxima a la forma circular, y alcanzando valores próximos a 3 en cuencas muy alargadas. Los valores de irregularidad permiten clasificar a una cuenca como:

- **cg** = 1,00-1,25 redonda
- **cg** = 1,25-1,50 ovalada
- **cg** = 1.50 - 3,00 ovalada -irregular

3.1.7 Factor de forma de una cuenca

Horton en 1932, sugirió un factor adimensional de forma como índice de la forma de una cuenca. La ecuación no implica una suposición especial de la forma de la cuenca. Generalmente para un círculo **kf** ≥ 0,79; para un cuadrado, con la salida en el punto medio **kf** ≥ 1; y para el cuadrado con la salida en una esquina **kf** ≥ 0,5. un valor de **kf** superior a la unidad indicará el grado de achatamiento del área o un curso principal corto, y por consecuencia con tendencia a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa formando grandes crecidas.

Una cuenca estrecha y larga, con **kf** bajo, presenta menor posibilidad de ocurrencia de lluvias intensas cubriendo simultáneamente toda su extensión y por consiguiente menor posibilidad de que se generen grandes crecidas. De acuerdo con la magnitud del factor

³¹ Chow, V. M. (1988). Applied Hydrology. New York, EE.UU: McGraw Hill.

³² LONDOÑO, Carlos (2001). Cuencas hidrográficas(bases conceptuales), Ibagué Colombia: Universidad del Tolima.

de forma, las cuencas se clasifican en tres: bajas, medias y altas susceptibilidades a las inundaciones con factor de bajo, medio y alto respectivamente.

$$Kf = \frac{A}{L^2} \quad (\text{Ecu.5})$$

Dónde:

A: área de drenaje, en km²; **L:** longitud axial de la cuenca, en km.

3.1.8 Coeficiente de rugosidad de manning

El coeficiente de rugosidad Manning y Chezy en 1889 Robert manning presentó la ecuación (6) durante la lectura de un artículo en el Institute of Civil Engineers de Irlanda se presentó de forma complicada y luego fue simplificada y comparada con siete ecuaciones diferentes basadas en datos experimentales de Bazin y verificadas mediante observaciones. Al aplicar las ecuaciones estas generan mayor dificultad para el cálculo del coeficiente de rugosidad ya que el conocimiento que se requiere es muy poco implicando pronosticar o estimar³³.

$$V = C \times R^{2/3} \times S \frac{1}{2} \quad (\text{Ecu.6})$$

Dónde:

v: Es la velocidad media
 $C = R^{1/3} \frac{1}{n}$: Es el factor de resistencia al flujo
 r: Es el radio hidráulico

De acuerdo con el libro de hidrología aplicada de Ven te Chow se sugiere una guía para la determinación del coeficiente de manning teniendo en cuenta los siguientes enfoques:

- 1) Identificar los factores que afectan el coeficiente de rugosidad para tener un grado de seguridad o incertidumbre.
- 2) La revisión de datos comúnmente utilizados en canales abiertos en general.
- 3) La inspección de canales utilizados comúnmente, cuyos coeficientes se conozcan.
- 4) La determinación del coeficiente de forma analítica teniendo en cuenta la distribución de las velocidades en la sección.

³³ GUTIERREZ SILVA, Juan. Calculo del Coeficiente de Rugosidad de Manning. Santa fe de Bogotá, 2009, 81 p, Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad de la Salle, Facultad de Ingeniería Civil.

Métodos para determinar el coeficiente de manning en ríos

Para determinar el coeficiente de rugosidad de manning a través de la granulometría de los lecho del río se encuentran diferentes métodos los cuales se observan en la tabla 5 donde está el autor, la ecuación y una descripción de cada uno de los métodos.

Tabla 5. Revisión de los Métodos Coeficiente de Manning

Autor	Ecuación	Descripción
Strickler (1923), según R. j. Garde y k. G. Raju, (1985):	$n = \frac{D^{1/6}}{K_{ST}} \quad (\text{Ecu.7.a})$ D = diámetro de la arena de granos uniformes. [d en (m), $k_{st}=21,1$]	Se obtuvo de investigaciones realizadas en canales de laboratorio utilizando arenas de granos de tamaños uniformes, por lo que no se pueden utilizar para los ríos donde se tienen materiales no uniformes.
E. Meyer – Peter y R. Müller (1948):	$n = \frac{D_{90}^{1/6}}{26} \quad (\text{Ecu.7.b})$ D_{90} = diámetro del sedimento para el cual el 90% del material es más fino, en (m).	Fondo del río está constituido por arenas no uniformes.
H. a. Einstein y n. Barbarossa (1952):	$n = \frac{(D_{66})^{1/6}}{24} \quad (\text{Ecu.7.c})$ D_{65} = diámetro del sedimento para el cual el 65% del material es más fino, en (m).	Material no uniforme.
Lane y Carlson (1953), seg. R. j. Garde y k. g. Raju, (1985):	$n = \frac{D_{75}^{1/6}}{39} \quad (\text{Ecu.7.d})$ D_{75} = diámetro de sedimento para el cual el 75% del material es más fino, en (pulgada.).	Estudios realizados en cauces del “San - Valley” 21
J.w. Kamphuis (1974):	$n = \frac{1}{24} (2D_{90})^{1/6} \quad (\text{Ecu.7.e})$ D_{90} = diámetro de sedimento para el cual el 90% del material es más fino, en (m).	Investigaciones realizadas en ríos con lechos de gravas
Kampbell (1979), seg. R. j. Garde y k. g. rajú, (1985):	$n = \frac{(4.5D_{90})^{1/6}}{24} \quad (\text{Ecu.7.f})$ D_{90} = diámetro de sedimento para el cual el 50% del material es más fino, en (m).	

Fuente: IMTA

Continuación Tabla 5. Revisión de los Métodos Coeficiente de Manning

Autor	Formula	Descripción
R. d. Hey (1979):	$n = \frac{(3.5D_{84})^{1/6}}{24} \quad (\text{Ecu.7.g})$ D84= diámetro de sedimento para el cual el 84% del material es más fino, en (m).	Investigaciones realizadas en ríos con lecho de gravas.
A. j. a. maza (1986):	$n = \frac{D_m^{1/8}}{16.27} \quad (\text{Ecu.7.h})$ Dm = diámetro medio del material del lecho en (m).	

Fuente: IMTA³⁴

3.1.9 Número de curva.

El Método del Número de Curva, o de los Complejos Hidrológicos, es un modelo conceptual de pérdidas de precipitación, cuyo objetivo es calcular la precipitación neta o escorrentía generada por un aguacero en una cuenca de pequeñas dimensiones³⁵. Este ha sido desarrollado por el Soil Conservación Service (**SCS**) llamado desde 1994 National Resources Conservation Service (NRCS) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), para cuencas no aforadas en las que se deseen estimar los caudales circulantes por métodos hidrometeorológicos. A continuación se presentan los parámetros para el cálculo del número de curva.

a. Permeabilidad del suelo: Sin importar la clase de uso del suelo, las medidas de conservación adoptadas y el manejo realizado en la explotación un aspecto primordial en la producción de escorrentía, lógicamente es la naturaleza del suelo su mayor o menor permeabilidad bajo el nombre de “grupo hidrológico de suelo”, situamos el suelo en una de las cuatro clases de permeabilidad en atención a su profundidad y textura.

Grupo a Es el que ofrece menor escorrentía. Incluye los suelos que presentan mayor permeabilidad incluso cuando están saturados comprenden los terrenos profundos sueltos con predominio de arena o grava y con muy poco limo o arcilla.

³⁴ GARCIA, José., Procesos Erosivos en Tercer Seminario Tecnología del Agua.[En línea] http://imta.gob.mx/potamologia/images/stories/ponencias_tercer_seminario/dr_jose_garcia_procesos_erosivos/transporte_sedimentos.pdf

³⁵ López Alonso, R. 2001. Consideraciones acerca de los límites de aplicación del método del número de curva del Soil Conservation Service. Montes, 66, 92-97.

- Grupo b** Incluye los suelos de moderada permeabilidad cuando están saturados comprendido en los terrenos arenosos menos profundos de los del grupo a, otros de textura franco arenosa de mediana profundidad y los francos profundos.
- Grupo c** Incluye los suelos que ofrecen poca permeabilidad cuando están saturados por presentar un estrato impermeable que dificulta la infiltración o porque en conjunto su textura es franco arcilloso o arcilloso.
- Grupo d** Es el que ofrece mayor escorrentía. Incluye los suelos que presentan gran permeabilidad, tales como los terrenos muy arcillosos profundos con alto grado de tumefacción, los terrenos que presentan en la superficie o cerca de la misma capa de arcilla muy impermeable y otros con subsuelo muy impermeable próximo a la superficie.

b. La profundidad efectiva de precipitación: es una función de la profundidad total de precipitación, y de un parámetro de pérdidas referido al número de curva de escorrentía ó **cn**, el cual varía de 1 a 100, y es función de las siguientes propiedades que tiene la hoya hidrográfica que se estudia, teniendo en cuenta³⁶, tipo de suelo hidrológico, utilización y tratamiento del suelo, condiciones de la superficie del terreno y condición de humedad antecedente del suelo. Por tanto, al estudiar los resultados obtenidos para muchas cuencas experimentales pequeñas, se desarrolló una relación empírica:

$$Pe = \frac{(P - 0.20S)^2}{P + 0.80S} \quad (\text{Ecu.8})$$

$$S = \frac{1000}{CN} - 10.0 \quad (\text{Ecu.9})$$

Dónde:

Pe: precipitación efectiva, que causa escorrentía, pulgadas

p: precipitación total del evento, pulgadas.

S: infiltración potencial o retención potencial máxima, pulgadas.

Cn: curva número.

5.2 REVISIÓN DE CONCEPTOS RELACIONADOS CON EL BALANCE HÍDRICO

El estudio del balance hídrico en hidrología se basa en la aplicación del principio de conservación de masas, también conocido como la ecuación de continuidad. Esta establece que, para cualquier volumen arbitrario y durante cualquier período de tiempo, la diferencia entre las entradas y salidas estará condicionada por la variación del volumen de agua almacenada. En general, la técnica del balance hídrico implica mediciones de ambos aspectos, almacenamientos y flujos del agua; sin embargo,

³⁶ Monsalve Sáenz, G. (1999). Hidrología en la Ingeniería. Santa fe de Bogotá D.C., Colombia: Escuela Colombia de Ingeniería.

algunas mediciones se eliminan en función del volumen y período de tiempo utilizados para el cálculo del balance³⁷.

La ecuación del balance hídrico, para cualquier zona o cuenca natural (tal como la cuenca de un río) o cualquier masa de agua, indica los valores relativos de entrada y salida del flujo y la variación del volumen de agua almacenada en la zona o masa de agua. En general, en la ecuación del balance hídrico, las entradas comprenden principalmente la precipitación (**p**), en forma de lluvia o nieve, realmente recibida en la superficie del suelo; y las aguas superficiales y subterráneas recibidas dentro de la cuenca o masa de agua desde el subsuelo (**qsi** y **qui**). Las salidas en la ecuación incluyen la evapotranspiración desde la superficie de la masa de agua (**etp**), y la salida de corrientes de agua superficial y subterránea desde la cuenca o masa de agua considerada (**qso** y **quo**).

Cuando las entradas superan a las salidas el volumen de agua almacenada (**δs**) aumenta y cuando ocurre lo contrario disminuye. Todos los componentes del balance hídrico están sujetos a errores de medida o estimación, y la ecuación del balance deberá incluir, por tanto, un término residual o de diferencia (**v**). Por tanto, el balance hídrico para cualquier masa de agua y cualquier intervalo de tiempo, en su forma más general, vendrá representado por la ecuación 10³⁸:

$$P + Q_{SI} + Q_{UI} - E - Q_{SO} - Q_{UO} - \Delta S - v = 0 \quad (\text{Ecu.10})$$

5.2.1 Datos de precipitación.

Los datos de precipitación y caudal son básicos para el cálculo de los componentes del balance hídrico de las cuencas fluviales en periodos largos. Estos datos suelen publicarse en memorias anuales, tanto hidrológicas como meteorológicos, boletines, etc. En general, las series históricas climatológicas contienen información fragmentada, de ahí la necesidad de completar dicha información faltante³⁹.

La precipitación es, normalmente, la única fuente de humedad que tiene el suelo y por eso conviene que su medida y cálculo se hagan con gran precisión, pues de ello depende, en gran manera, la exactitud de todos los cálculos del balance hídrico⁴⁰. Por tanto, la cantidad media de precipitación en una cuenca fluvial, o en cualquier otra zona, se obtiene a partir de los datos de pluviómetros, pluviógrafos o totalizadores instalados en la zona en estudio. En la tabla 4 se observa los diferentes métodos para hallar los

³⁷ HERAS, Rafael. Métodos del cálculo del balance hídrico. Madrid: Unesco, 1981. 18p. ISBN 92.3.301227.1

³⁸ Ibid., 63p.

³⁹ Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Bogotá, 2014

⁴⁰ Ibid., p. 25.

datos faltantes de las cartas de precipitación y caudales, donde se encuentra el método, la descripción y la ecuación.

Tabla 6. Revisión de los métodos para la determinación de datos faltantes.

Nombre	Descripción	Ecuación
Promedio Aritmético	Cuando la precipitación normal de las estaciones índices no varíe más del 10% y para estimar el dato faltante únicamente se calcula la “media aritmética” de las estaciones índices obteniéndose así el dato buscado las estaciones a, b y c se les llama índices ya que con ellos se va a calcular el dato faltante x . Se calcula el modulo pluviométrico de cada estación (precipitación media anual n_a, n_b, n_c, n_x) ⁴¹ .	$\left \frac{N_A - N_X}{N_X} \right < 0.10 \quad \left \frac{N_B - N_X}{N_X} \right < 0.10 \quad \left \frac{N_C - N_X}{N_X} \right < 0.10$ $P_X = \left(\frac{P_A + P_B + P_C}{3} \right)$ (Ecu.11.a)
Método Promedio Aritmético	Solamente se aplica a 4 estaciones con una estación sin datos. Si algún valor es >0.10 no se usa este método sino el método de proporción normal ⁴² .	$P_X = \left(\frac{P_A + P_B + P_C}{3} \right)$ (Ecu.11.b)
Método Proporción Normal	En este método, se ponderan las precipitaciones de las estaciones índices con las proporciones de la precipitación anual normal de la estación en estudio con cada una de las estaciones usadas como referencia ⁴³ .	$P_X = \frac{1}{n} \left[\frac{N_X}{N_A} * P_A + \frac{N_X}{N_B} * P_B + \frac{N_X}{N_C} * P_C \right]$ (Ecu.11.c)

Fuente: Autor

Para los datos faltantes de precipitación y caudales se deben probar la consistencia de ellos, es decir, si tienen errores sistemáticos, que en la mayoría de los casos son causados por, cambio de lugar de la estación, cambio en las mediciones del aparato registrador, o nuevas construcciones.

3.2.2 Métodos para el cálculo de evapotranspiración

La evapotranspiración es el conjunto de las pérdidas de agua en forma de vapor que pasan a la atmósfera y que son la suma de la transpiración de las plantas y de la evaporación del agua de la superficie del suelo. Los métodos más empleados para hallar la evapotranspiración dentro de un balance hídrico son los siguientes:

⁴¹ Monsalve Sáenz, G. (1999). Hidrología en la Ingeniería. Santa fe de Bogotá D.C., Colombia: Escuela Colombia de Ingeniería.

⁴² Ibid., p 45

⁴³ Ibid., p 46.

Tabla 7. Revisión de los métodos para la determinación de evapotranspiración

Método	Descripción
Método de cálculo de evaporación por balance energético	Determina la evaporación por unidad de superficie, y segundo, en función de la radiación neta que entra, de la densidad del agua, y del calor latente de evaporación ⁴⁴ (calor necesario para que una sustancia cambie de estado).
Método de Jensen-Haise	Basado en radiación solar y corregido por temperatura, pero hace énfasis y mayor importancia en el primero. Sin embargo, se recomienda su uso en zonas no tropicales, ya que en estas zonas se equipara el peso de la radiación y la temperatura.
Método de Blaney Criddle	El método original (Blaney y Criddle, 1950) se basó en estudios de correlación entre la temperatura y el uso del agua en el oeste de EE.UU., con el fin de definir mejor los efectos de clima sobre la evapotranspiración.
Método de Christiansen	En 1966, Christiansen derivó una fórmula empírica para el cálculo de la evapotranspiración potencial con base en datos climáticos.
Método de Thornthwaite	En 1948 Thornthwaite derivó una fórmula para el cálculo de la evapotranspiración potencial. Este método se desarrolló correlacionando datos de evapotranspiración potencial con datos de temperatura media mensual y longitud del día:
Método de Thornthwaite	Dónde: ETP: la evapotranspiración potencial mensual del mes i, mm/mes. T_a: la temperatura media del mes i, °C. L: duración del día (hs) N: número de días en un mes. I: el índice de calor, igual a la sumatoria de los índices mensuales j. $I = \sum_{j=1}^{12} J_i \quad (\text{Ecu.13})$ Donde el índice térmico mensual está dado por: $J_i = \left(\frac{t_i}{5}\right)^{1.514} \quad (\text{Ecu.14})$ a es una ecuación cúbica de la forma $a = 0.675 \times 10^{-6} * I^{-3} - 0.771 \times 10^{-4} * I^2 + 1.792 \times 10^{-2} * I + 0.49239 \quad (\text{Ecu.15})$

5.2.3 Modelo de Thomas⁴⁵

El modelo de Thomas fue desarrollado como su nombre lo indica por Thomas en 1987, este modelo de balance hídrico de carácter agregado establece mediante la determinación de cuatro parámetros el caudal afluente de una cuenca. Para la

⁴⁴ Monsalve Sáenz, G. (1999). Hidrología en la Ingeniería. Santa fe de Bogotá D.C., Colombia: Escuela Colombia de Ingeniería.

⁴⁵ CARO CAMARGO, Carlos y FLECHAS, Franklin. Análisis del balance hídrico de la sabana de Bogotá, mediante el método de Thomas. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana. 2003, p. 140.

explicación del modelo de *Thomas* se tiene que tener en cuenta que el suelo está dividido en tres zonas.

Thomas es un método hidrológico agregado el cual está basado en la teoría de la conservación de la masa. Este modelo da parámetros del balance hídrico mes a mes, el cual tiene como datos de entrada dos variables como son precipitación areal y evapotranspiración areal. Además tiene cuatro (4) parámetros “**a,b,c,d**” de calibración los cuales deben tener un proceso de iteración para llegar a simular los caudales observados según los datos tomados de una estación limnigráfica a la salida de la cuenca de estudio⁴⁶. El uso de este modelo hidrológico tiene grandes ventajas, debido que a partir del análisis de los datos de salida se pueden determinar parámetros teóricamente sin necesidad de medirlos directamente en la zona.

Una primera parte donde se presenta todo lo relacionado al almacenamiento superficial y es representado como **Sc**; Para la segunda zona que es la no saturada **Sw** se puede asimilar la recarga que experimenta el acuífero **Rg** a la infiltración **I**, debido a que el caudal subsuperficial **Qs** es despreciado por el modelo por ser en comparación con la precipitación muy pequeño. La última zona que es la zona saturada presenta un almacenamiento **Sg**⁴⁷.

Para el desarrollo del modelo de *Thomas*, inicialmente es aplicada la ecuación de continuidad a un volumen de control el cual cuenta con un almacenamiento **Sw+Sc**, cuando se aplica la ecuación de continuidad se obtiene que.

$$Pi - ET_i - I_i - RO_i = \Delta SW = SW_i - SW_{i-1} \quad (\text{Ecu.16})$$

$$Pi - ET_i - Rg_i - RO_i = \frac{\Delta SW}{\Delta t} = SW_i - SW_{i-1} \quad (\text{Ecu.17})$$

Dónde:

- **Pi** = lluvia al final del periodo i-ésimo
- **ETi** = Evapotranspiración real al final del periodo i-ésimo
- **Ii** = Infiltración al final del periodo.
- **ROi** = Escorrentía directa la final del periodo
- **Rgi** = Recarga del acuífero al final del periodo
- **ΔSW** = variación en el almacenamiento del suelo
- **SWi** = Humedad del suelo al final del periodo

Si partimos de la ecuación 17 y 18 se agrupan los términos y se tiene

⁴⁶ CARO CAMARGO, Carlos y FLECHAS. OpCit.,p140

⁴⁷ CARO, Carlos, FLECHAS, Franklin. Análisis del balance hídrico de la sabana de Bogotá, mediante el método de Thomas. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, 2003, 140p.

$$(P_i + SW_{i-1}) - (ET_i + SW_i) = RO_i + I_i \quad (\text{Ecu.18})$$

Al igualar y juntar términos,

$$Wi = Pi + SW_{i-1} \quad (\text{Ecu.19})$$

$$Yi = ET_i + SW_i \quad (\text{Ecu.20})$$

Luego,

$$(Wi - Yi) = RO_i + I_i \quad (\text{Ecu.21})$$

Asumiendo como humedad inicial al comienzo de cada intervalo Yi y por métodos empíricos.

$$SW_i = Y_i \times e^{-ETPi/b} \quad (\text{Ecu.22})$$

Lo que demuestra un decaimiento exponencial en cada intervalo de tiempo. Se define la variable Yi como una función no lineal donde aparecen los parámetros a y b en el modelo.

$$Y_i = \frac{(Wi + b)}{2a} - \left\{ \left[\frac{Wi + b}{2a} \right]^2 - \frac{Wib}{a} \right\}^{0.5} \quad (\text{Ecu.23})$$

Al sustituir las ecuaciones 22y 23 en la ecuación 24

$$(Wi - Yi) = RO_i + I_i \quad (\text{Ecu.24})$$

Asumiendo un coeficiente de reparto c al momento de diferenciar la esorrentía directa (RO) de la recarga ($Rg \pm I$)

$$RO_i = (1 - c)(Wi - Yi) \quad (\text{Ecu.25})$$

$$Rg_i = c(Wi - Yi) \quad (\text{Ecu.26})$$

El modelo de *Thomas* relaciona la fricción del caudal que se origina en el almacenamiento subterráneo

$$Qg_i = d \times Sg_i \quad (\text{Ecu.27})$$

d representa el parámetro de almacenamiento del acuífero

Así como se aplicó la ecuación de continuidad al volumen del control con almacenamiento $Sw+Sc$, se realiza lo mismo para la zona saturada.

$$Rg_i - Qg_i = \Delta Sg = Sgi - Sg_{i-1} \quad (\text{Ecu.28})$$

Sustituyendo las ecuaciones 18 y 19

$$Sg_i = \frac{Rg_i + Sg_{i-1}}{d + 1} \quad (\text{Ecu.29})$$

Finalmente el caudal total simulado al final del periodo i .

$$QSi = ROi + Qgi \quad (\text{Ecu.30})$$

Con relación a los parámetros **a, b, c, d** que aparecen en las ecuaciones descritas anteriormente, **a** que varía entre un rango de $0 \leq 1$ expresa la tendencia ante la presencia de un suelo que se encuentre completamente saturado que la escorrentía ocurra; **b** representa el límite superior a la suma de la evapotranspiración real y a la humedad; **c** hace referencia a esa fracción que se encuentra en el almacenamiento subterráneo que se incluye en la escorrentía, aunque no siempre se relaciona a esta fracción debido que no siempre toda la recarga se convierte en escorrentía superficial durante el intervalo de tiempo que se considere; **d** es el recíproco del tiempo de resistencia del agua subterránea, pero teniendo en cuenta que ese tiempo puede relacionarse con todo el acuífero, con la porción de esto más cercana al río, o simplemente con recorridos superficiales más rápidos. Los valores que se le asignen a estas variables dependerán de la zona en donde se esté realizando el estudio.

El modelo de *Thomas* entrega como resultado valores mes a mes del balance hídrico⁴⁸ como:

Infiltración (Ii):	La cantidad de agua que es capaz de incorporarse al suelo permaneciendo en la zona subsuperficial del mismo.
Evapotranspiración real (ETP):	Es la cantidad de agua del balance hídrico que se evapora debido a la temperatura de la zona
Flujo subterráneo (QRg):	Es la cantidad de flujo que se infiltra al suelo y es capaz de fluir por la zona subterránea del terreno.
Escorrentía superficial (QRoi):	Es considerado como la cantidad de agua que fluye por la zona superficial, la cual no tiene la capacidad de infiltrarse debido a la saturación del terreno o la impermeabilidad.

⁴⁸ Ibid., p140.

5.3 REVISIÓN DE MODELOS HIDROLÓGICOS

La modelación hidrológica se ha convertido en un componente importante para llevar a cabo el manejo integral de los recursos hídricos y ambientales. La mayoría de los modelos hidrológicos están integrados con sistemas de información geográfica para hacer el manejo de la información más eficiente. La simulación hidrológica permite simular el comportamiento de un sistema real (prototipo) y obtener mediante la operación del mismo, las respuestas o salidas a un número dado de incógnitas.

La modelación de los fenómenos hidrológicos es compleja, cuando se consideran fuentes de variación como: aleatoriedad, las tres dimensiones espaciales y el tiempo. La modelación hidrológica se ha realizado sólo para algunos pocos casos idealizados. Existen varios modelos hidrológicos que han sido desarrollados para analizar alternativas en torno a la gestión del agua. Estos se clasifican en estocásticos y determinísticos. Estos últimos se clasifican a su vez, en modelos empíricos, modelos conceptuales agregados y modelos distribuidos de base física⁴⁹. En hidrología se usan modelos: físicos, analógicos y matemáticos.

5.4.1. Clasificación de los modelos.

En la tabla 8 se presenta la revisión de la clasificación de los modelos y su descripción.

Tabla 8. Clasificación de Modelos Hidrológicos

Modelo	Descripción
Los modelos determinísticos	Son aquellos en los que las funciones que relacionan parámetros de entradas y salidas; definen el comportamiento y no tienen en cuenta la ley o distribución de la probabilidad. Estos modelos determinísticos se dividen en lineales y no lineales.
Los modelos empíricos	Son aquellos que pueden tener cálculos de tipo conceptual pero, en general, se definen como “caja negra” ⁵⁰ , debido a que están basados en expresiones empíricas o funciones matemáticas que producen resultados semejantes al del proceso físico, pero que no se expone físicamente ⁵¹ .
Modelación por eventos discretos	Son considerados eventos aislados porque solo simulan escorrentía directa, en períodos discretos donde se produce algún evento.
Modelación por eventos continua	Estos modelos tienen en cuenta el balance hídrico del perfil del suelo, es decir, simulan las condiciones de sequía en períodos de no lluvia. Simulan el flujo base y todos los componentes del hidrograma de escorrentía.

Fuente: Heras Rafael

⁴⁹ HERAS, Rafael. Métodos del cálculo del balance hídrico. Madrid: Unesco, 1981. 28p. ISBN 92.3.301227.1

⁵⁰ FATTORELLI, Sergio y FERNANDEZ, Pedro. Diseño Hidrológico. Buenos Aires: Wasa-Gn, 2011. 273 p. ISBN: 978-987-05-2738-2

⁵¹ Ibid. 24p.

5.3.2 Revisión de modelos hidrológicos

Los modelos hidrológicos tienen dentro de su formulación características que afectan o no la respuesta a un modelo. En la tabla 9 se presenta la revisión de los modelos implementados para la simulación dinámica de eventos hidrológicos, utilizados en la actualidad, donde se describe las características, las ventajas y las desventajas.

Tabla 9. Herramientas computacionales mediante sistemas dinámicos

Modelo	Institución Creadora	Ventajas	Desventajas
Mikebasin /Mike she	Danish Hydraulic Institute	Esta herramienta cuenta con un sistema modular en el que es posible sólo aplicar el módulo donde se aplica el modelo lluvia escurrimiento (mike11), es posible agregarle más módulos de acuerdo a los requerimientos de la problemática en la cuenca.	La principal desventaja es el costo que asciende a varios miles de dólares dependiendo del módulo. Es también un sistema cerrado en donde no se tiene opciones para desarrollar nuevos algoritmos.
Hydrotel	Institute National de la Recherche Scientifique (Inrs ete)	Es un modelo abierto que permite integrarle algoritmos desarrollados de manera externa. Tiene una capacidad alta de definición de micro-cuencas. El área de las microcuencas puede precisarse hasta $3km^2$. Su costo es reducido.	No tiene algoritmos suficientemente desarrollados para el funcionamiento de vasos. Se requiere de la preparación de una gran cantidad de archivos para la preparación de datos.
Vic	Washington University	Es un modelo de uso libre, tiene archivos de datos simplificados disponibles para la mayor parte de la república mexicana. Está ligado a un modelo de pronóstico de lluvia en tiempo real. Cuenta con un algoritmo de auto calibración.	La definición de la malla no tiene una precisión suficiente hasta $1/8$ de grado ($182.25 km^2$)
Swat	Soil and water assessment tool de agricultural research service y soil and water research lab, tx. Eua	El modelo está constituido por una serie de sub modelos o módulos, los cuales se emplean para simular distintos procesos hidrológicos. Tiene la capacidad para agregarle otro tipo de modelos como el modflow. Es de uso libre.	Representa con mayor precisión el proceso físico, del flujo de agua, sólo en cuencas pequeñas.
Watflood	University of waterloo (uwo)	Es un modelo capaz de acoplarse fácilmente con otros modelos. Es de uso libre.	Esta herramienta fue desarrollada principalmente para acoplarla a un modelo atmosférico y los principales problemas se dan en el manejo la de datos.

Fuente: Salgado and Güitrón 2012

Continuación Tabla 9. Herramientas computacionales mediante sistemas dinámicos

Modelo	Institución Creadora	Ventajas	Desventajas
Hec-Hms	Hydrologic modeling system de hydrologic engineering center, us army corps of engineers.	El grado de discretización de la malla depende de la capacidad de cómputo que se tenga. Se cree que se tiene una rápida respuesta en cuanto a soporte técnico.	No se tiene suficiente precisión en los resultados en cuencas grandes, de varios miles de km ² . Poca capacidad de acoplamiento con otros modelos.
Topmodel	Lancaster University	El modelo requiere de pocos parámetros en la cuenca. El código del modelo está abierto para posibles modificaciones. Se ha aplicado en cuencas grandes de varios cientos de miles de kilómetros el modelo es de uso libre para fines académicos y de investigación.	Presenta dificultades en zonas con clima semi-árido o seco, con largos periodos de sequía. No es aplicable en cuencas excesivamente largas con pendientes moderadas, la localización de zonas inundadas ocasiona dificultades en la modelación.
Iber	Instituto Flumen de la Universidad Politécnica de Cataluña (upc), y Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería	Es un modelo matemático bidimensional para la simulación del flujo y procesos de transporte de sólidos y sedimentos, suspensión en ríos y estuarios, simulación de rotura de presas; evaluación de zonas inundables, y el flujo de marea en estuarios.	En la modelación se requiere que los datos de precipitación estén a intervalos muy cortos.

Fuente: Salgado and Güitrón 2012⁵²

5.4 PRINCIPALES HERRAMIENTAS UTILIZADAS EN LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Para la modelación hidrológica es necesaria la utilización de herramientas computacionales de sistemas información geográfica, SIG, denominado *Geographic Information System*, *GIS*, por sus siglas en inglés, el cual es un sistema especializado en la captura, manejo y análisis de información geográfica geoespacial⁵³.

5.4.1 SIG o GIS.

Son un conjunto de equipos, aplicativos y de personal capacitado para el manejo de datos geográficos. Hoy en día se han convertido en herramientas para el análisis y soporte de toma de decisiones en la solución de problemas complejos, debido a que el

⁵² SALGADO, Jorge. Aplicabilidad de los modelos hidrológicos distribuidos En: XXII Congreso Nacional de Hidráulica. (2°:2012 Acapulco, Guerrero, México). 5p.

⁵³ Centro de estudios Hidráulicos, C.E. (2008). Curso taller de sistemas de información Geográficos Aplicados. Bogotá D.C.:ECI

manejo de la información se realiza de forma espacial y dinámica, permitiendo representar de forma esquemática muy próxima a la realidad, el ambiente natural y el entorno construido. Igualmente los SIG permiten interactuar eficientemente con otro tipo de información no geográfica y su incorporación para diferentes aplicaciones⁵⁴.

La gran diferencia que existe entre un aplicativo SIG y otros paquetes de software gráfico radica en que el aplicativo SIG es esencialmente una base de datos espacial, lo que otorga una cualidad incomparable en el desarrollo de análisis enfocados a resolver problemas reales que afectan el espacio geográfico estudiado. Es por ello, que para el análisis hidrológico se ha considerado la herramienta computacional Arcgis⁵⁵, el cual es un software, que sirve para crear, visualizar y analizar datos geospaciales, a continuación se presentan las diferentes extensiones:

- Arcgis, fue desarrollado por *Environmental Systems Research Institute (ESRI)* de Redlands, california, consta de tres componentes principales: *Arcmap*, *Arccatalog* y *Arctoolbox*.
- Arcmap: se usa para la visualización de los datos espaciales, realizar análisis espacial, y para la creación de mapas que sirven para mostrar los resultados del trabajo realizado.
- Arccatalog: se utiliza para la búsqueda de mapas y datos espaciales, la exploración de datos espaciales y la visualización y la creación de metadatos.
- Arctoolbox: es una interfaz para el acceso a la conversión de datos y funciones de análisis que vienen con Arcgis

5.4.2. Información topográfica con modelos digitales de elevaciones.

Los modelos digitales de elevación son una herramienta que tienen diferentes nombres en función de la técnica utilizada para el levantamiento o de la variable a representar. Las técnicas utilizadas varían desde la utilización de modelos de triangulación (comunes en geodesia) a la realización de matrices cuadrangulares aportando un valor de *z* a cada celda. Una de las ventajas de estos modelos es la posibilidad de obtener perfiles o cortes, también podemos realizar con ellos análisis de visibilidad (muy útiles para las declaraciones de impacto ambiental), de insolación (planificación agronómica.), etc⁵⁶. Para la obtención de la topografía o el modelo de terreno, se utilizan dos herramientas importantes para la obtención de la información, otra fuente de información fue por la página del servicio web de la nasa, verb.echo.nasa.gov, la cual es una aplicación especializada en la generación de metadatos, desarrollada utilizando

⁵⁴ Ibid. Pg 234.

⁵⁵ ArcGIS Resource. Introducción a ArcGIS [en línea].

<<http://resources.arcgis.com/es/help/gettingstarted/articles/026n00000014000000.htm> >

⁵⁶ Comas, David; Ruiz, Ernest. 1993. Fundamentos de los sistemas de información geográfica. 2001. Universidad de Valencia.

tecnologías modernas de desarrollo web, y que cuenta con una interface para el desarrollo de datos de la tierra.

5.4.3 Exportación del modelo hidrológico en Arcgis – (Hec-Geohms) a software Hec-Hms

Para definir la estructura de las cuencas, el programa considera los siguientes elementos⁵⁷. Microcuencas (subbasins), tramos de tránsito (routing reach), uniones (junctions), embalses (reservoirs), fuentes (sources), sumideros (sinks). Con estos componentes se define la cuenca en forma de redes con un orden o secuencia lógica para realizar los cálculos⁵⁸. El programa trabaja con tres módulos básicos que definen en su conjunto el proyecto de simulación de la cuenca:

a) *Módulo de precipitación*: Permite seleccionar uno de seis patrones de precipitación (tipos de hietogramas) del evento de tormenta que más se ajuste a las posibles condiciones de la cuenca, incluyendo la introducción manual de los datos de la lluvia de diseño⁵⁹.

b) *Módulo de la cuenca*: Permite la representación del sistema físico con los elementos de la estructura de la cuenca, y la inclusión de las características morfométricas y de condición del suelo para cada uno de ellos. Así, cada componente incluye la información necesaria para construir la hidrógrafa total de salida.

c) *Módulo de control*: Incluye las fechas de inicio y culminación de los datos de lluvia y caudal para la simulación y los intervalos de tiempo para realizar los cálculos⁶⁰.

5.4.4. Modelo hidrológico Hec-Hms:

El desarrollo de los sistemas de información geográfica (SIG), permiten la integración de los resultados de la modelación hidrológica y diferentes características físico – geográficas de las cuencas a un modelo hidráulico para la siguiente generación de mapas de inundaciones para su pronóstico y toma de decisiones⁶¹. Así entonces los SIG componen un instrumento adecuado para el manejo de la información hidrológica sobre una distribución espacial y para el cual existan series transitorias de precipitación.

En la actualidad se ha desarrollado la interface geoespacial Hec-Hms (Geospatial Hydrologic Modelling System), desarrollado por el cuerpo de ingenieros del ejército de los EE.UU, integrada al software Arcgis como un aplicativo o extensión, el cual permite generar la información que caracteriza una determinada cuenca y los parámetros

⁵⁷ U.S. Army Corps of Engineers. (2008).HEC-HMS, Hydrology Engineering Center - Hydrology Modeling System. Estados Unidos: Copyright Haestad Methods, Inc. V. 3.5.

⁵⁸ VERA, Op.cit., p32

⁵⁹ BASTIDAS, Camilo. Manual para el uso del modelo hidrológico HEC–HMS. Tomado Departamento Ingeniería Hidrometeorológica. Facultad de ingeniería ucv.

⁶⁰ Ibid .,p.20.

⁶¹ FATTORELLI.Op.cit.,p 286

hidrológicos de entrada al modelo Hec-Hms, generalmente el más utilizado por ser un modelo gratuito y de amplia aceptación internacional para el estudio de crecientes⁶².

Este programa posee una gran variedad de opciones para la simulación de modelos lluvia – escorrentía y tránsito de caudales, implementados en la estimación de hidrogramas de escorrentía directa, generados por las precipitaciones en una cuenca durante un periodo especificado⁶³.

5.4.5 Modelo hidrológico Iber:

Es un modelo matemático bidimensional para la simulación del flujo y procesos de transporte sólido y en suspensión en ríos y estuarios, desarrollado por el grupo de ingeniería del agua y del medio ambiente (GEAMA) de la Universidad de a Coruña, (UDC), el Instituto Flumen de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), y Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, (CIMNE), en colaboración con el centro de estudios experimentales en obras públicas (CEDEX) del ministerio de fomento de España⁶⁴.

Iber, es un modelo numérico de simulación de flujo turbulento en lámina libre en régimen no permanente, y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial. El rango de aplicación de Iber abarca la hidrodinámica fluvial, la simulación de rotura de presas, la evaluación de zonas inundables, el cálculo de transporte de sedimentos y el flujo de marea en estuarios. (Manual referencia hidráulica, Iber 2014)⁶⁵. El modelo Iber consta actualmente de 3 módulos de cálculo principales: un módulo hidrodinámico; un módulo de turbulencia, un módulo de transporte de sedimentos.

Iber modela el cálculo de flujo en ríos, definición de zonas inundables, evaluación de zonas hidrológicas, de riesgo, delimitación de vías de intenso desagüe, supuestos donde el flujo es bidireccional, rotura de presas, son algunas de sus aplicaciones hidráulicas, utilizando este mismo algoritmo calcula los procesos de transformación lluvia escorrentía en una cuenca. Es un modelo distribuido donde se obtienen valores de hidrogramas en cada punto de la red⁶⁶.

Todos los módulos trabajan sobre una malla no estructurada de volúmenes finitos formada por elementos triangulares o cuadriláteros. En el módulo hidrodinámico, que constituye la base de iber, se resuelven las ecuaciones de aguas someras bidimensionales promediadas en profundidad (ecuaciones *de st. Venant 2d*).

⁶² U.S. Army Corps of Engineers. (2008). HEC-HMS, Hydrology Engineering Center - Hydrology Modeling System. Estados Unidos: Copyright Haestad Methods, Inc. V. 3.5.

⁶³ BASTIDAS, Camilo. Manual para el uso del modelo hidrológico HEC-HMS. Caracas, 2013. Universidad Central de Venezuela. Departamento de ingeniería hidrometeorológica

⁶⁴ UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA, Iberaula [En línea]. <http://www.iberaula.es/web/index.php>

⁶⁵ Ibíd., iberaula.

⁶⁶ Ibíd., iberaula

6. METODOLOGÍA

Este proyecto plantea una investigación con enfoque cuantitativo y sigue una secuencia de los pasos que se realizaron para llegar al objetivo general del proyecto, partiendo de la revisión bibliográfica, el planteamiento del problema, la recolección de datos, la caracterización morfométrica, la elaboración del balance hídrico por el método de Thomas y la implementación de la modelación dinámica de las microcuencas Olarte y Tobal a través de herramientas computacionales como lo son *Hec-Hms* e *Iber*.

4.1 METODOLOGÍA PARA LA CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA.

En la tabla 10 se realiza una descripción de la metodología a seguir para la caracterización morfométrica de las microcuencas en la zona de estudio.

Tabla10. Metodología de la Caracterización morfométrica de las microcuencas.

Objetivo	Actividad	Descripción
Caracterización Morfométrica	Identificación de la zona de estudio	Para el desarrollo de esta fase se realizó una investigación sobre las principales fuentes ríos y quebradas que hacen su aporte de caudal para el Lago de Tota.
	Recopilación de la información existente	Esta actividad va dirigida a la recopilación de la información, la cual se ha obtenido del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC, del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, y de la Corporación Autónoma Regional de Boyacá; CORPOBOYACA.
	Inspección visual de la zona de estudio	A través de la realización de visitas de campo para la toma muestras del suelo y dar inicio a la parte experimental donde se caracteriza y se determina la capacidad de del suelo. Y obtener los parámetros necesarios del balance hídrico. Se realizaron ensayos que se centran en cuatro grupos: caracterización: límites y granulometría; gravedad específica, permeabilidad constante, humedad y coeficiente de Manning.
	Caracterización de la zona de estudio.	Para realizar la caracterización se tiene en cuenta los diferentes atributos mencionados dentro del referente teórico citado anterior mente, dentro de los parámetros que se hallaron se tienen: el área de las microcuencas, pendiente, orden de la cuenca, tiempo de concentración, factor de forma, índice de compacidad, entre otros.

Fuente: Autor

Para la identificación de la zona de estudio se utilizó la información del IGAC, correspondiente a planchas cartográficas y mapas de coberturas para el municipio de Aquitania. En la tabla 11 se hace una relación del año por plancha y su respectiva escala.

Tabla 11. Planchas cartográficas de la zona de estudio.

Año	Plancha	Escala
1998	192 ^a	1:100000
1998	192iiiA1	1:100000
1998	192iC4	1:100000

Fuente IGAC

6.2 METODOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO.

En la tabla 12 se realiza una descripción de los requerimientos para la elaboración del balance hídrico

Tabla 12. Metodología Balance Hídrico.

Objetivo	Fase	Descripción
Balance Hídrico	Consulta de las Cartas hidroclimatológicas del IDEAM	El proyecto de investigación requiere el uso de cartas hidroclimatológicas del instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales de Colombia (IDEAM), que muestren datos medidos de parámetros principalmente como: precipitación y temperatura. En la tabla 14 se relaciona las estaciones hidrometeorológica que hacen seguimiento a la cuenca.
	Aplicación del programa Arcgis con la extensión Arc Hydro olos 9	En el desarrollo del proyecto se usó Arcgis 10.1. Este software da múltiples herramientas que determinan parámetros como se observa en la tabla 13. Este software se utiliza para la elaboración de las curvas de nivel, la determinación del área de estudio, la ubicación y la georeferenciación de las estaciones hidrometeorológicas en la zona y la generación de isovalores para cada mes de las microcuencas.
	Modelación por Thomas	Para la realización del balance hídrico por el método de Thomas se utiliza la hoja de cálculo elaborada por Caro (2012) ⁶⁷ , con parámetros de entrada de precipitación areal que se realizaron a través del programa Arcgis y de evapotranspiración por el método de Thornthwaite.

Fuente: Autor

⁶⁷ CARO Carlos, Hoja de cálculo modelo (a, b, c, d) de Thomas. En: clase 21.2012. Tunja

En la tabla 13 se relaciona el tipo, el nombre de la estación, hidrometereologica el código, la corriente y los años de registro; la elevación y el municipio que pertenece la corriente.

Tabla 13. Estaciones hidrometereologicas del Lago de Tota

Tipo	Nombre de la estación	Código	Corriente	Año de instalación	Años registro	Elevación (m.s.n.m)	Municipio
Pluviográfica	Potrerito	35090010	Olarte	1964	49	3047	Aquitania
Climatológica ordinaria	Túnel	35095030	Lago de Tota	1971	44	3000	Cuítiva
Climatológica principal	Aquitania	35095010	Olarte	2004	11	3021	Aquitania
Limnigráfica	Desaguadero	35097010	Olarte	1964	49	3007	Aquitania
Limnimétrica	Hato laguna	35097030	Las Cintas	1970	45	3020	Aquitania
Limnimétrica	Criadero	35097050	Quebrada los pozos	1971	44	3025	Aquitania
Limnimétrica	Escaleras	35097070	Lago de Tota	1971	44	3002	Tota
Pluviográfica	Las cintas	35190010	Quebrada las cintas	1971	44	3400	Sogamoso

Fuente: IDEAM

El Software Argis permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica. Es la plataforma líder mundial para crear y utilizar sistemas de información geográfica (SIG)⁶⁸. En la tabla 14, se muestran las características principales para el manejo del programa, junto con los parámetros necesarios para la obtención de la topografía de la zona de estudio.

Tabla 14. Características de Arc-gis

Características de Arc-Gis	Parámetros	Definición
- Crear, compartir y utilizar mapas inteligentes. - Compilar información geográfica. - Crear y administrar bases de datos geográficas. - Resolver problemas con el análisis espacial.	Localización geográfica	En donde se ubicó las coordenadas planas de todas las estaciones hidroclimatológicas del IDEAM localizadas dentro de la cuenca.
	Dimensiones de la cuenca	En donde se determinó las áreas de las microcuencas y longitudes de las corrientes principales y las curvas de nivel de la cuenca.
	Líneas isovalores	Se usó Arc Toolbox, se determinó la precipitación areal y temperatura areal.

Fuente: Arcgis- Resource

⁶⁸ArcGIS Resource. Introducción a ArcGIS [en línea].

<<http://resources.arcgis.com/es/help/gettingstarted/articles/026n00000014000000.htm> >

6.3 METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE LOS CAUDALES CON LA MODELACIÓN EN HEC-HMS.

En la tabla 15 se obtiene una descripción de los procesos para la realización de la modelación mediante Hec-Hms.

Tabla 15. Metodología modelación Hec-Hms.

Objetivo	Fase	Descripción
Modelación dinámica en Hec-hHms para estimar los posibles caudales promedio	Implementación del SIG	Para la determinación de los caudales promedios instantáneos de creciente, para diferentes periodos de retorno en el área de estudio. Los caudales máximos instantáneos de crecientes, se estimó a partir de programas de sistemas de información geográfica, SIG (Arcgis) y modelación hidrológica (Hec-Hms), que son de uso común.
	Exportación del modelo hidrológico desde plataforma Arcgis – (Hec-Geo Hms) a software Hec-Hms	Teniendo las características de las microcuencas, área, longitud cauce, pendiente; los tiempos de concentración y los valores de CN ponderados, e ingresados al modelo hidrológico realizado hasta ahora en la plataforma Arcgis, extensión Hec-Geohms, es necesario conocer los elementos que hacen parte de la esquematización del software Hec-Hms, para su importación al programa.
	Verificación de variables	Para realizar el paso a paso se requiere los del área (en km ²) son tres 3 y se mencionan en la tabla 16 en la cual se enumeran las variables necesarias para el montaje del modelo.

Fuente: Autor

Tabla 16. Variables para modelación Hec-Hms.

N°	Función	Descripción	Elección
1	Función de infiltración	a. (scs) curve number. b. green y ampt. c. inicial / constante. d.inicial/déficit.derivaciones (diversions) e. no hay pérdida.	Para el presente trabajo, se utilizó en todas las modelaciones, el método del SCS para las pérdidas.
2.	Función del hidrograma unitario	a. scs. b. snyder. c. clark. d. clark modificado. e. onda cinemática. f. definido por el usuario	Para el presente trabajo, se utilizará la función del hidrograma unitario para SCS.
3	Función flujo base	a. flujo constante mensual. b. no hay flujo base. c. reservorio lineal. d. recesión	Para el presente trabajo, se utilizó en todas las modelaciones un flujo base, igual a 0.71m ³ /s, correspondiente al valor medio mensual multianual del registro histórico de la estación limnimétrica desaguadero

Fuente: Autor

6.4 METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE LOS POSIBLES PUNTOS DE INUNDACIÓN POR MEDIO DE LA MODELACIÓN EN IBER

En la tabla 17 se observa el proceso metodológico para llevar a cabo la modelación mediante el programa computacional Iber y así obtener el mapa con los posibles puntos de inundación.

Tabla 17. Metodología en la modelación de Iber

Objetivo	Actividad	Descripción
Modelación dinámica en Iber para estimar posibles puntos de inundación	Parámetros de entrada al programa	Rugosidad de manning Datos de intensidad de lluvia Creación del hietograma Determinar las pérdidas Asignar el número de curva
	Tipo de malla	El tipo de malla que se empleara en la modelación será de tipo combinada (triangular y cuadrada), este tipo de malla permitió mejorar definición al modelo de elevación
	El proceso metodológico de Iber para esta investigación está sujeto a diferentes pasos.	• <i>Creación de la geometría y obtención de la Rtin</i>: Se tiene en cuenta la capacidad del equipo de cómputo a utilizar, la cual debe ser relativamente buena ya que de lo contrario el tiempo de simulación puede llegar a ser extenso conllevando a grandes demoras, en el anexo 7 se presenta la creación de la geometría Rtin. • <i>Condiciones iniciales del modelo Iber</i>: Se tiene en cuenta las condiciones iniciales que en Hec-Hms; la segunda parte consiste en la asignación al hidrográma de entrada un caudal base, correspondiente al caudal inicial, incluyendo un tramo inicial de flujo permanente en el hidrograma lo suficientemente largo como para asegurar que antes de la llegada del hidrograma el caudal circulante en el cauce corresponda al inicial. en el caso de flujo permanente consiste en la suma del caudal pico más el flujo base. • <i>Definición de las condiciones de contorno</i>: En esta parte del montaje del modelo se tiene en cuenta las condiciones de entrada y salida del modelo. • <i>Generación de la malla de cálculo</i>: La geometría se genera a partir de la librería Rtin, por lo que se crea una malla no estructurada, se debe especificar entonces que cada superficie no sea dividida, sino que por el contrario se genere un elemento correspondiente a cada superficie de la geometría. • Asignación de los usos del suelo y definición de la rugosidad del río.

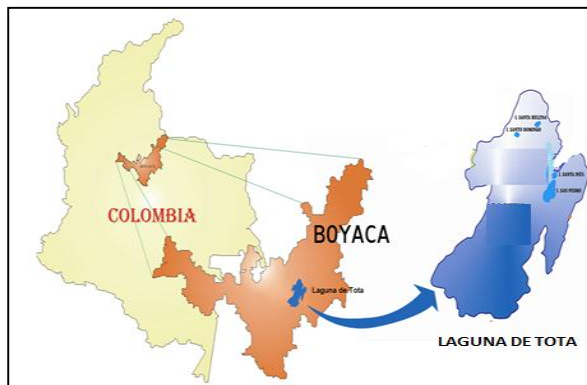
Fuente: Autor

7. ZONA DE ESTUDIO

La cuenca del Lago de Tota se localiza en el departamento de Boyacá y hace parte geográficamente de los municipios de Aquitania, Tota y Cuítiva. Está situada entre los paralelos 5° 25' y 5° 39' latitud norte y meridianos 72° 54'y 73°00' longitud oeste. Está situado en el límite superior de la zona térmica fría, con una temperatura media mensual que oscila entre 9,9 °C y 11.7 °C⁶⁹.

La cuenca del lago dentro de un contexto espacial - socioeconómico se ubica en los bordes de la meseta cundiboyacense, que se extiende a través de la sabana de Bogotá y la parte norte del departamento de Cundinamarca, y se prolonga hacia Boyacá hasta el valle de Sogamoso⁷⁰. Dentro de las relaciones estratégicas que se configuran regionalmente en el corredor Paipa- Duitama- Sogamoso, este tiene importancia relevante para el turismo nacional e internacional extendiendo su influencia hasta el Lago de Tota.

Imagen 1. Localización de la zona de estudio



Fuente: Autor

7.1. GEOLOGÍA.

En la zona confluyen diferentes formaciones geológicas las cuales dan las propiedades características de los suelos de la región. Dentro de estas formaciones se tienen: Formación lutitas de Macanal (kilm); Arenisca de las juntas (kiaj) y Fómeque (kif).

Dentro de la caracterización de la zona se hace necesaria la geología⁷¹, ya que esta muestra un enfoque más amplio sobre el tipo de suelos que se encuentran en el Lago de Tota. Se localiza en el flanco en la cordillera oriental, en alturas comprendidas aproximadamente entre los 3.010 m.s.n.m. El área forma parte de la cobertura plegada

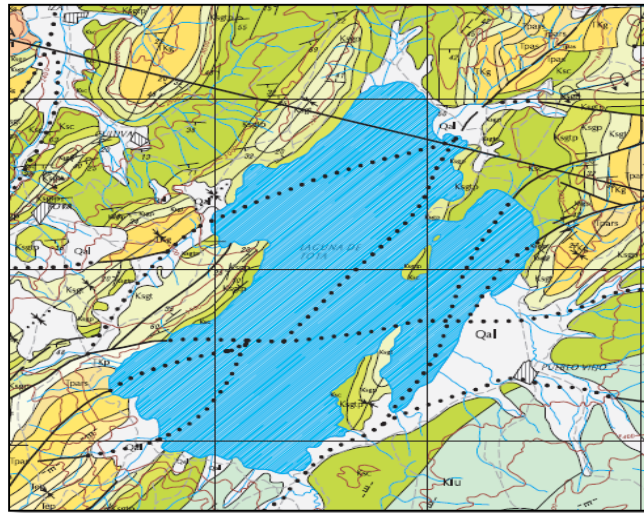
⁶⁹ ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD

⁷⁰ AMAPOLA AZUL., Reserva parque natural Lago de Tota. [en línea]. < <http://lagodetota.org/el-lago-de-tota#b2> >

⁷¹ Plan de Ordenación y Manejo de la cuenca del Lago de Tota en convenio con CORPOBOYACA.

constituida por la serie neocretácica terciaria, donde sobresalen una serie de formaciones de composición de rocas sedimentarias controladas estructuralmente⁷².

Imagen 2 plancha geológica 192⁷³



Fuente: Ingeominas

Las formaciones geológicas son: Fómeque; Une, Conejo, Ermitaño, Guaduas, Socha Inferior Y Superior, Picacho; concentración, interestratificadas y con alternancia estratigráfica entre dos eras geológicas (cretácico y terciario), esto refleja eventos de plegamiento como sinclinales y anticlinales, sobresaliendo la extensión de estos últimos. Esta disposición de estratos se ve enmascarada por depósitos cuaternarios de origen variado, consistentes en cenizas volcánicas provenientes de la cordillera central, por la ocurrencia de eventos fluvio-glaciares y acumulaciones de estratos con espesores considerables en sectores más próximos al espejo de agua, consistentes en depósitos lacustres y antiguos coluviones que han logrado cierto grado de compactación⁷⁴.

7.2 GEOMORFOLOGÍA.

Las manifestaciones morfológicas de la cuenca del Lago de Tota están condicionadas por eventos hidrometeorológicos, paleoclimáticos y geodinámicos a partir del momento del levantamiento de los andes colombianos, especialmente desde finales del terciario (últimos 3,5 millones de años) y con una fuerte afectación en el cuaternario por sucesivos eventos de glaciaciones. A partir del pleistoceno (1,8 millones de años) la estructura geomorfológica es la que en el momento se registra los eventos dinámicos

⁷² ETAYO et al (1968). En mapa Geológico de Colombia, Memoria explicativa. INGEOMINAS

⁷³ SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO(INGEOMINAS)., plancha Geológica 192

⁷⁴ PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA DEL LAGO DE TOTA EN CONVENIO CON CORPOBOYACA. Zonificación de amenazas, Vulnerabilidad y Riesgos.

que actúan dejando evidencias importantes. Son claras las manifestaciones del último periodo glacial en los depósitos morrénicos y los limos típicos presentes en todo el perímetro del Lago de Tota, especialmente en los sectores donde se presentan cultivos de cebolla, en el municipio de Aquitania⁷⁵.

En la cuenca hidrográfica del Lago de Tota, se muestran evidencias morfológicas que indican una evolución compleja del lago durante el cuaternario, a juzgar por los cambios ocurridos en el sector del desaguadero. Se observa el cono de deyección del río Olarte causante del represamiento de las aguas y responsable de la estabilidad del sistema fluvial del desaguadero (pleistoceno inferior – 1,4 millones de años). El nivel de las aguas del lago alcanza los 30 m sobre el nivel actual y se mantiene por largo tiempo (todo el pleistoceno) con aumentos temporales debidos a la actividad de los glaciares.

En el tardiglacial la actividad erosiva del río desaguadero causa el descenso de las aguas del lago a dos niveles sucesivos: uno de + 5 m y otro de + 2 m sobre el nivel actual. La acción tectónica ha controlado el modelamiento de esta cuenca, ya que son numerosos los pliegues y las fallas presentes. La serie de fallamientos normales que ha originado una fosa y el cabeceo de los ejes de plegamientos hacia el Lago de Tota, comenzaron a dar entonces un cambio geomorfológico, que si se le agrega un veloz represamiento por la depositación del desaguadero, transforma definitivamente la situación morfológica de fluvial a lacustre, y de una fase activa erosión a un proceso lento en la sedimentación.

7.3 ESTADO ACTUAL DE LA CUENCA DEL LAGO DE TOTA

Según el departamento de planeación nacional los ríos y quebradas que más le aportan hacen al Lago de Tota son: las quebradas La Mugre, Agua Blanca y Los Pozos y en los ríos Tobal y Olarte. En estas zonas se evidencia incidencia de mineralización contaminación orgánica, turbiedad y eutrofización, aportados principalmente por la escorrentía de los cultivos.

También se encuentran niveles de coliformes totales y fecales en las quebradas la mugre, los pozos y agua blanca, que reflejan vertimientos domésticos, escorrentía de suelos con gallinaza y posiblemente aguas de escorrentía de zonas de ganadería⁷⁶.

En cuanto a la cantidad del recurso hídrico, debido a la falta de una adecuada red hidrometeorológica, se desconoce la variación temporal y espacial de los caudales que aportan sus aguas al Lago de Tota, lo que deriva en un desconocimiento de los valores reales de la oferta hídrica total y disponible. No obstante, se ha identificado reducción

⁷⁵ ETAYO et al (1968). En mapa Geológico de Colombia, Memoria explicativa. INGEOMINAS

⁷⁶ DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN 2014

de cauces tributarios entre 1978 y 2000 del 59% y que en época de verano se disminuyen los caudales entre el 80 y 95%⁷⁷.

En relación a amenazas por inundación o sequía el Lago de Tota presenta niveles e inundaciones más altos entre los meses de abril y octubre. Los aportes del río Olarte al Lago de Tota son indispensables para que este no pierda sus niveles de operación y se puedan compensar las salidas y entradas al lago. En época de verano los niveles descienden en promedio 0,56 m aunque se han presentado años con descensos de 0,93 m y 1,5 m. Así mismo, en la época de invierno el lago ha ascendido en promedio 0,55 m. Sin embargo, se han presentado incrementos del nivel hasta de 1,46 m.

El comportamiento general en el lago muestra una disminución permanente de sus niveles de agua. El ajuste menos conservador apunta a una tasa aproximada de 1 cm cada 2 años y el más favorable a 1 cm cada 3 años. De acuerdo con esta tendencia, desde 1954 el nivel del lago ha disminuido entre 18 y 27 cm, lo que puede traducirse en una disminución en la disponibilidad de agua que varía entre 10,8 mm y 16,2 mm.

El principal problema identificado es la inadecuada gestión ambiental y sectorial del territorio de la cuenca del Lago de Tota, lo cual no asegura un manejo sostenible de los recursos naturales. Uno de los aspectos centrales hace referencia al deterioro de los servicios eco-sistémicos que presta la cuenca del Lago de Tota, a causa de las intervenciones antrópicas no planificadas o descontroladas y de las consecuencias socioeconómicas que ello trae consigo. Igualmente, es de señalar las limitaciones de la información existente sobre los ecosistemas, recursos naturales, servicios suministrados por el sistema del Lago de Tota y su relación con la sociedad y la economía. Desde el punto de vista ambiental, la problemática en la afectación de la calidad del recurso hídrico es propiciada por la falta de educación ambiental que hace que las personas que habitan la cuenca contaminen el agua con sus vertimientos domésticos, dificultades en el control a estos y a la escorrentía agrícola. A su vez, existe incertidumbre sobre el impacto generado por la piscicultura, agricultura, ganadería y desconocimiento de la capacidad de carga del lago para desarrollar actividades económicas y ausencia de programas de educación ambiental que generen un sentido de apropiación del territorio por parte de sus habitantes⁷⁸.

⁷⁷ VALDERRAMA, Jairo. Cómo preservar la cantidad y la calidad del agua en la cuenca del Lago de Tota. Bogotá, 2013

⁷⁸ Ibid., 14p

7.3.1 Fuentes de abastecimiento y recarga

La cuenca del Lago de Tota cuenta con seis microcuencas que aportan caudal al Lago, con los siguientes valores aproximados⁷⁹. Los valores de los caudales se muestran en la tabla 18:

Tabla 18. Microcuencas Lago de Tota

Fuente hídrica	Aporte (m ³ /s)
Rio Olarte	2.08
Rio Tobal	1.59
Hato Laguna	0.58
Los Pozos	0.25
El Mugre	0.12
El Manzano	0.01

Fuente: Cámara Colombo- Alemana, 2000⁸⁰

La cuenca que aporta el mayor volumen de agua es la del río Olarte, la cual cuenta con un canal de desagüe, con el fin de regular el agua que entra en el lago de acuerdo con la precipitación. De esta manera la precipitación es baja, el agua del río Olarte se vierte en el lago y si esta es alta, sigue hacia el río Upía⁸¹.

Los aportes del Río Olarte al Lago de Tota son indispensables para que este no pierda sus niveles de operación y se puedan compensar las salidas y entradas al lago. En época de verano los niveles descienden en promedio 0,56 m aunque se han presentado años con descensos de 0,93 m y 1,5 m. Así mismo, en la época de invierno el lago ha ascendido en promedio 0,55 m. Sin embargo, se han presentado incrementos del nivel hasta de 1,46 m⁸².

⁷⁹ CONSEJO NACIONAL DE POLÍTICA ECONÓMICA Y SOCIAL REPÚBLICA DE COLOMBIA. Manejo ambiental integral de la cuenca hidrográfica del Lago de Tota. Bogotá, 2014.

⁸⁰ CÁMARA COLOMBO ALEMANA. Bogotá, 2000. Subproyecto Plan maestro de desarrollo sostenible para la región del Lago de Tota

⁸¹ CÁMARA COLOMBO ALEMANA. Bogotá, 2000. Subproyecto Plan maestro de desarrollo sostenible para la región del Lago de Tota

⁸² CORPOBOYACA – UPTC, 2007.

8. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados de la investigación planteada teniendo en cuenta el marco conceptual y metodológico. Esta sección está estructurada en la siguientes partes: Caracterización morfométrica; el balance hídrico; la determinación de los caudales promedio y por último la obtención de los posibles puntos de inundación.

8.1 Caracterización de microcuencas:

A continuación se presentan los resultados de la inspección de la zona de estudio, caracterización de las microcuencas a evaluar y demás parámetros necesarios para determinar la forma, el orden, los indicadores de eficiencia y demás características geométricas que permitirán hacer la evaluación de las microcuencas Olarte y Tobal.

8.1.1 Descripción hidrográfica las microcuencas Olarte y Tobal.

Hidrográficamente, la cuenca de estudio corresponde a la cuenca del Lago de Tota, que está comprendida entre los municipios de Aquitania, Cuítiva, Sogamoso y Tota. La cuenca ocupa una extensión de 201 km² y una longitud de 11.8 km. Este afluente abastece más de 300 mil personas de los municipios aledaños, y es fundamental en los procesos industriales como Acerías Paz Del Río, Holcim, entre otras. En cuanto a vertimientos en la cuenca de la Laguna de Tota, el municipio de Aquitania presenta problemas operativos ya que no cuenta con sistema de alcantarillado pluvial y en época de invierno la PTAR se colmata y genera descargas de aguas residuales sin ningún tipo de tratamiento, Cuítiva y Tota realizan la descarga de sus aguas residuales directamente a las quebradas que entregan sus aguas al Lago de Tota, con los impactos ambientales y en salud pública que ello conlleva⁸³. La investigación se adelantó en las microcuencas Olarte y Tobal, debido a que estas son las que hacen mayor aportación a la cuenca del Lago de Tota, de acuerdo al informe de manejo ambiental integral de la cuenca hidrográfica del lago de tota (CONPES, 2014), ver tabla 19.

⁸³ Op.Cit .DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACION, pág 28

8.1.2 Inspección y revisión de la zona de estudio

Para la elaboración de este estudio, fue necesaria la inspección correspondiente al sector urbano y rural del municipio de Aquitania. El recorrido se inició desde aguas arriba hasta aguas abajo como se observa en la imagen 3, donde el río Olarte desemboca al Lago de Tota y hay pequeños caseríos, fincas de producción ganadera y agrícola.

Imagen 3. Inspección visual zona de estudio.



Fuente: Autor

Para realizar el estudio de suelos en el sector del río Olarte, perteneciente al municipio de Aquitania, fue necesaria la recolección de muestras por medio de una perforación a 3 metros de profundidad, con el equipo de perforación del laboratorio de suelos de la Universidad Santo Tomás.

Estas actividades permitieron realizar la identificación plena del tipo de suelos presentes en la zona de estudio, posibilitando así la correlación de los resultados de los parámetros de suelo, con los obtenidos en la modelación debido a que la información obtenida en los parámetros de caracterización de los suelos mostrarán de manera más clara el porqué de algunos de los resultados obtenidos por modelación.

A continuación en la tabla 19 se describen las diferentes etapas para la plena identificación y caracterización de suelos en la zona de estudio con las respectivas imágenes del trabajo de campo.

Tabla 19. Etapas de trabajo de campo para la caracterización de la zona de estudio

Etapa	Imagen	Descripción
Recorrido y reconocimiento de la zona de estudio.	Imagen 4. Recorrido Olarte y Tobal 	En la imagen 4 se observan los cauces principales de los ríos Olarte y Tobal. a. Corriente Rio Olarte antes de la compuerta. b. y c. Recorrido Rio Olarte antes de la desembocadura al Lago de Tota. d. Estado actual Rio Tobal.
Toma de muestras.	Imagen 5. Compuerta Rio Olarte 	En la imagen 5 se observa la compuerta que tiene el rio Olarte y el proceso de la perforación que se llevó a cabo para determinar las propiedades del suelo en la zona de estudio.
Ensayos de laboratorio.	Imagen 6. Ensayos de suelos 	En la imagen 6 se hace la recolección del material del lecho de los Ríos Olarte y Tobal. Las muestras fueron llevadas al laboratorio de materiales de la Universidad Santo Tomás Seccional Tunja.

Fuente: Autor

6.1.2.1 Estudios de suelos: A continuación en la tabla 20 se muestran los resultados de los ensayos de la caracterización de los suelos de la zona de estudio.

Tabla 20. Ensayos de caracterización muestras de suelo

Muestra	Resumen		Gráfica
Caracterización	Limite Liquido (%)	58,53	LIMITE LIQUIDO
	Limite Plástico (%)	33,79	
	Índice de Plasticidad (%)	24,74	
	Análisis		
	Clasificación según S.U.C.S		
	Carta de Casagrande: mh-oh		
	Limos de baja plasticidad - suelos orgánicos de baja plasticidad.		
Shelby #1	Limite liquido (%)	29,18	LIMITE LIQUIDO
	Limite plástico (%)	33,79	
	Índice de Plasticidad (%)	4,61	
	Análisis		
	Clasificación según S.U.C.S		
	Carta de Casagrande: cl-ml		
	Limos de baja plasticidad - arcillas de baja plasticidad.		
Shelby #2	Limite liquido (%)	39,66	LIMITE LIQUIDO
	Limite plástico (%)	33,79	
	Índice de Plasticidad (%)	5,87	
	Análisis		
	Clasificación según S.U.C.S		
	Carta de casagrande: ml-ol		
	Limos de baja plasticidad - suelos orgánicos de baja plasticidad		
Shelby .#3	Limite liquido (%)	73,21	LIMITE LIQUIDO
	Limite plástico (%)	37,36	
	Índice de Plasticidad (%)	35,85	
	Análisis		
	Clasificación según S.U.C.S		
	Carta de Casagrande: mh-oh		
	Arcilla de baja plasticidad		

Fuente: Autor

En la tabla 20 se presentan los resultados del laboratorio hechos a las muestras obtenidas de la perforación, donde se establecieron las propiedades de físicas del suelo. Los ensayos se realizaron de acuerdo a lo establecido por la norma INVIAS (INV E125 y 126/07), donde se determinó que el tipo de suelo es limo arcilloso. Esto indica que el suelo presenta un nivel muy bajo de infiltración, por esta razón no se tuvo en cuenta la infiltración para los datos de entrada a los modelos de simulación. A continuación en la tabla 21 se muestran los resultados del ensayo de granulometría. Para estos ensayos las muestras fueron tomadas del lecho de los ríos Olarte y Tobal. Donde se determinó el coeficiente de rugosidad de manning.

Tabla 21. Ensayos de granulometría

Muestra	Resumen	Gráfica
Rio Olarte	Clasificación del Suelo	
	GW: gravas bien graduadas	
	mezclas de grava con finos	
Rio Tobal	Clasificación del Suelo	
	GW: gravas bien graduadas	
	mezclas de grava	
	arena con pocos finos o sin ellos	

Fuente: Autor

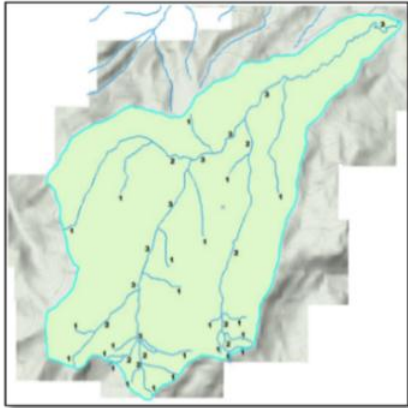
8.1.3 Denominación de las áreas de drenaje según su tamaño y orden de cuenca para Olarte y Tobal

Teniendo en cuenta la información de la tabla 1 sobre la denominación que han de tener las hoyas hidrográficas de acuerdo al tamaño de las áreas de drenaje. Para la zona de estudio se tendrá que Olarte con una área de 24.5 km² y Tobal con una área de 21.9 km². Serán consideradas como microcuencas ya que se encuentran dentro del rango de 20 a 100 km².

El orden indica el grado de ramificación, dando como resultado que las microcuencas son de orden 3, esto ocurre cuando dos corrientes de segundo orden se unen, indicando la forma directa de ramificación de la red de drenaje formando así una de

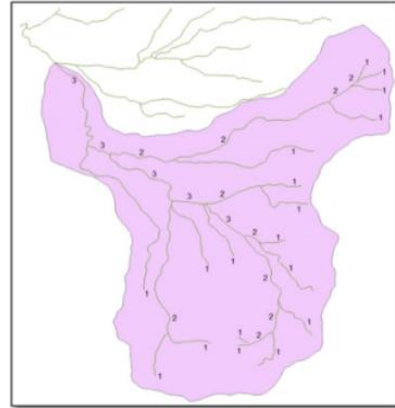
tercero. En la imagen 7 se observa la delimitación de las microcuencas y la ramificación de cada uno de los cauces que abastecen la cuenca Lago de Tota.

Imagen 7. Delimitación y Orden de las microcuencas



a. Microcuenca de Olarte

24.5 km²



b. Microcuenca de Tobal

21.9 km²

8.1.4 Indicadores de eficiencia

Los indicadores de eficiencia se determinaron de acuerdo con las ecuaciones 1 y 2, anteriormente citadas en el marco teórico. Los cálculos se presentan a continuación

Densidad de corrientes "**Ds**":

Microcuenca Olarte
$$Ds = \frac{23}{24,575 \text{ km}^2} = 0,93$$

Microcuenca Tobal.
$$Ds = \frac{18}{1,794 \text{ km}^2} = 10.03$$

Densidad de drenajes "**Dd**":

Microcuenca Olarte
$$Dd = \frac{10,88 \text{ km}}{24,58 \text{ km}^2} = 0,44 \text{ km}$$

Microcuenca Tobal.
$$Dd = \frac{7,69 \text{ km}}{1,79 \text{ km}^2} = 4,29 \text{ km}$$

La microcuencas Olarte tiene una densidad baja. Esto indica que los suelos son muy resistentes a la erosión y son muy permeables, ante un evento de precipitación. La microcuenca va a tener velocidad de escurrimiento muy lenta. Sin embargo, en la microcuenca Tobal pasa todo lo contrario debido a que tiene densidades altas con rápida respuesta ante una tormenta. Esto ocasiona que los suelos se erosionan con facilidad, son suelos relativamente impermeables y presentan pendientes altas y cobertura vegetal escasa.

8.1.5 Tiempo de concentración (t_c)

En la tabla 22 se observan los resultados del tiempo de concentración de las microcuencas a partir del método de *kirpich* con los datos de longitud del cauce principal, diferencia de altura entre puntos extremos y calculados como se mencionó en la tabla 4 y en la ecuación (3.i).

Tabla 22. Tiempo de concentración de las microcuencas Olarte y Tobal

Microcuenca Olarte		Microcuenca Tobal	
Longitud del cauce (m)	10880,45	Longitud del cauce (m)	7687,45
Tramos	50	Tramos	40
Pendiente (m/m)	0,0341	Pendiente (m/m)	0,0413
Tiempo de concentración(min)	91,87	Tiempo de Concentración(min)	65,28

Fuente: Autor

8.1.6 Coeficiente de compacidad

El cálculo del coeficiente de compacidad se hace de acuerdo a la ecuación 4 enunciada en el marco teórico

$$\text{Microcuenca Olarte} \quad kc = 0.28 * \frac{24,5596 \text{ km}}{(24,575 \text{ km}^2)^{1/2}} = 3.32$$

$$\text{Microcuenca Tobal.} \quad kc = 0.28 * \frac{22,444 \text{ km}}{(17,94 \text{ km}^2)^{1/2}} = 5.30$$

El coeficiente de compacidad indica la relación del perímetro de la cuenca con un perímetro teórico circular para una misma superficie. Estos valores indican que la microcuenca Olarte es muy alargada y la microcuenca Tobal es ovalada irregular.

8.1.7 Factor de forma

El cálculo del factor de forma se hace de acuerdo a la ecuación (5) mencionada en el marco teórico.

$$\text{Microcuenca Olarte} \quad Kf = \frac{24,575 \text{ km}^2}{7,687^2} = 0.42 \text{ km}$$

$$\text{Microcuenca Tobal.} \quad Kf = \frac{17,94 \text{ km}^2}{10,881^2} = 0.15 \text{ km}$$

Las microcuencas Olarte y Tobal se clasifican con un factor bajo respectivamente, de acuerdo con la magnitud del factor de forma.

8.1.8. Coeficiente manning

El coeficiente de manning se determinó según a la ecuación (7.c), con los datos del ensayo de granulometría obtenidos del lecho de los ríos Olarte y Tobal. Los resultados presentan una diferencia de (0.012) entre los ríos Olarte y Tobal, lo cual indica que esta en un rango óptimo.

$$\text{Microcuenca Olarte} \quad n = \frac{0.51^{1/6}}{24} = 0.037$$

$$\text{Microcuenca Tobal.} \quad n = \frac{0.049^{1/6}}{24} = 0.025$$

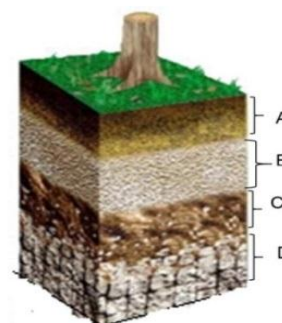
8.1.9. Asignación número de curva

Para esta investigación se realizó la asignación de la grilla de número de curva (**Cn**), para las microcuencas generadas en el modelo hidrológico Hec-Hms, se utilizaron las coberturas vegetales de toda la zona de estudio, las cuales fueron suministradas por la Corporación Autónoma Regional de Boyacá, CORPOBOYACA, en formato shape, denominado "Coberturas_Vegetales.shp", el cual fue importado al software Arcgis. Teniendo dichas coberturas se realizó la extensión de Arcmap del software Arcgis se procedió a la asignación de los valores de número de curva (**Cn**), para cada clasificación de suelo.

Tabla 22. Resultados ensayos de caracterización

Horizonte	Profundidad	Tipo suelo	Descripción
A	0.90m	orgánico	capa vegetal
B	0.70m	Cl	arcillas baja plasticidad
C	1m	MI-OI	arcilla baja plasticidad
D	0.40m	Mh-Oh	arcilla baja plasticidad

Imagen 8. Perfiles de suelo



Fuente: Autor

En la tabla 22 se presentan los resultados de la caracterización de suelos con los siguientes datos: la profundidad, el tipo de suelo y su respectiva descripción. El perfil del suelo se describió en cuatro fases y de esta manera se establecen los valores del número de curva.

El Número de curva (**Cn**), se determinó con el manual técnico de Hec-Hms (anexo 3 Tabla 52), donde se utilizaron los diferentes tipos de suelos que tiene la zona de estudio. En la tabla 23 se observa el tipo de suelo hidrológico, al cual corresponde es **b** y el número de curva corresponde a 70.5. Este valor fue el que se empleó para la modelación en Hec-Hms.

Tabla 23. Número de curva

Descripción	Manual técnico Hec-Hms	Tipo	Condición	Número de curva (Cn)
Áreas agrícolas heterogéneas	Row crops +cebolla	B	Bueno	86
Astos	Pasture	B	Bueno	69
Pastos mixtos	Brush mixture	B	Bueno	67
Arbustos	Brush	B	Regulares	60

Fuente: Autor

La permeabilidad del suelo, se calculó con las ecuaciones 8 y 9 mencionadas anteriormente, teniendo en cuenta el tipo de suelo hidrológico y la profundidad efectiva de precipitación.

$$S = \frac{1000}{70.5} - 10.0 = 4.18 \text{ in} = 10.62 \text{ cm}$$

$$Pe = \frac{(0.0743 - 0.20(4.18))^2}{0.0743 + 0.80(4.18)} = 0.17 \text{ in} = 0.43 \text{ cm}$$

En la tabla 24 se hace un resumen de los resultados de las características morfométricas de las microcuencas hidrográficas definidas para esta investigación que son: área de las microcuencas, longitud del cauce principal, pendiente total del cauce, rugosidad y número de curva.

Tabla 24. Características geométricas de las microcuencas Olarte y Tobal

Microcuenca	Nombre	Área (km ²)	Longitud de cauce (m)	Pendiente del cauce (m/m)	Elevación superior del cauce (m.s.n.m)	Elevación inferior del cauce (m.s.n.m)	Rugosidad	Numero de curva
1	Olarte	24.9	10880,5	0,0341	3704	3017	0.025	70.5
2	Tobal	21.5	7687,45	0,0413	3722	3035	0.025	70.5

Fuente: Autor

8.2 BALANCE HÍDRICO

El balance hídrico se determinó con la información obtenida en el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), el cálculo de la evapotranspiración, precipitación areal, caudales observados. La calibración se realizó a través del método "**a, b, c, d**" de Thomas. A continuación se presentan los resultados necesarios para la obtención del balance hídrico

a. Estimación y consistencia de la información.

Las series de datos fueron tomadas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), respecto a las series totales mensuales y de 24 horas. Se estimaron los datos faltantes para las estaciones de la zona de estudio usando el método proporcional normal según la ecuación 11.c. Los resultados se observan en la tabla 25 con los datos de la estación de Sisbaca y para las demás estaciones en los anexos 1, tablas 50 y 51. Además de las cartas hidroclimatológicas mensuales

multianuales se tomó desde el año 1998 al 2013. También fue necesaria la información de las cartas de valores totales diarios de precipitación para los años 2009 a 2013.

Tabla 25. Estimación de datos estación Sisbaca

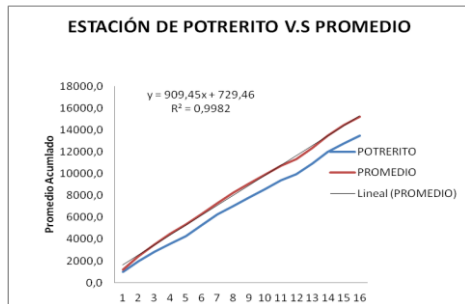
SISBACA													
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	Anual corregido
1998	3,2	16	71,1	162,8	304,1	322,4	368,8	136,9	175,2	121,4	73,1	48,6	1803,6
1999	37,5	67,8	63	214,8	178,3	204,5	313	145,7	236,4	170,8	119,8	52,5	1804,1
2000	37,4	48,2	83,3	62,4	225,5	158,6	215,2	259,6	177,5	199,9	84,8	91,9	1644,3
2001	7,2	47,7	50,6	60,2	205	203	194,5	213,9	185,6	167,4	126,7	26	1487,8
2002	7	8,4	54	150,4	163	270,4	148,6	240,4	159,2	47,2	31,2	23,6	1303,4
2003	1,2	7,2	54,1	179,7	157,1	210,5	166,5	201,9	133,3	57	4,2	2,9	1175,6
2004	0	0,1	0,8	18,4	316,1	73,2	133,5	325	151,5	99,5	57	9,9	1185,0
2005	17,7	60,5	7	170,2	220,5	218,5	156,1	243,3	160,3	191,5	93,9	5,4	1544,9
2006	21,8	8,8	65,6	116,7	153,6	106,4	79,7	145,7	64,7	129,4	32,1	54,1	978,6
2007	66,3	61,4	138,7	62,5	104,4	147,3	104	217,2	133	127,4	99,1	17	1278,3
2008	8,8	13,7	30,4	62,4	135,3	185,7	105,1	114,7	117,8	117,0	250,7	15,3	1156,9
2009	18,6	51,9	89,2	66,7	127,1	178,8	144,3	75,8	69,9	7,9	29,6	2,6	862,4
2010	6,6	17,4	61,5	101,8	169	191,2	268,1	214,9	173	172,9	54,3	23,4	1454,1
2011	6,5	28,6	112	203,5	114,4	114	123,9	106	86,3	150,5	116,7	77,9	1240,3
2012	42	26,2	102,2	206,5	158,9	131	151,9	232,7	146,8	96,6	33,3	41	1369,1
2013	3	0	11,8	31,4	115,8	182,5	141,8	129,1	162,6	68,5	81,4	54	981,9
													1329,4
PROM MESES	17,8	29,0	62,2	116,9	178,0	181,1	175,9	187,7	145,8	120,3	80,5	34,1	

Fuente: Autor

Se realizó un ajuste de la información de las estaciones hidrometeorológicas de Potrerito, Sisbaca y Pesca, como se puede observar en las gráficas 11 a 13. Se pudo identificar que no todas las estaciones de la zona de estudio se encuentran funcionando en la actualidad. En la tabla 26 se presenta la correlación de cada una de estas gráficas. Este análisis permitió establecer que los datos faltantes hallados de las estaciones hidrometeorológicas son adecuados y establecen el grado de confiabilidad de los datos de precipitación obtenidos, debido a que la correlación fue de 0.99 dando validez a los cálculos y un alto grado de confiabilidad.

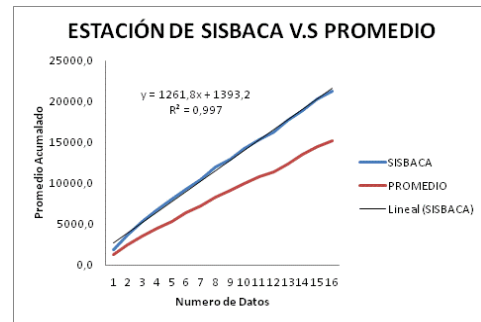
Tabla 26. Calculo del coeficiente de Correlaci

Grafica 11. Análisis consistencia para estación Potrerito



Fuente: Autor

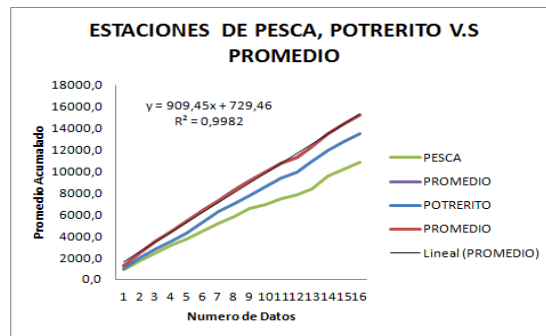
Grafica 12. Análisis consistencia para estación Sisbaca



Autor

Fuente:

Grafica 13. Análisis consistencia de las estaciones Potrerito, Pesca Vs promedio



Fuente: Autor

Coeficiente r ²		
0,999	0,999	0,998
Potrerito	Sisbaca	Pesca

Fuente: Autor

8.2.1 Evapotranspiración

En la tabla 27 se observan los resultados de la evapotranspiración calculada con la ecuación 13 a partir del promedio de la temperatura mínima media y máxima media para cada mes, la cual fue determinada con el método de Thornthwaite. Estos resultados indican que la evapotranspiración está en un rango entre 54 - 59 mm/mes. El mes de abril presenta el nivel más alto con 59.26 mm/mes con respecto a los demás meses.

Tabla 27. Evapotranspiración Lago de Tota

Mes	Temperatura Mínima Media (°C)	Temperatura Máxima Media (°C)	Promedio	Temperatura Media	I	It	a	ETP (mm/mes)
Enero	3,4	22,7	13,1	13,9	4,71	58,5	1,41E+00	54,30
Febrero	4,3	22,7	13,5	14,2	4,88	58,5	1,41107911	56,15
Marzo	5,9	22,4	14,2	14,6	5,05	58,5	1,41107911	57,96
Abril	7,5	21,5	14,5	14,8	5,17	58,5	1,41107911	59,26
Mayo	7,6	21,0	14,3	14,6	5,07	58,5	1,41107911	58,17
Junio	6,7	20,4	13,6	14,2	4,86	58,5	1,41107911	55,92
Julio	5,9	20,0	12,9	13,9	4,68	58,5	1,41107911	54,01
Agosto	5,9	20,0	13,0	13,8	4,67	58,5	1,41107911	53,88
Septiembre	5,6	20,5	13,0	13,9	4,69	58,5	1,41107911	54,11
Octubre	6,7	20,9	13,8	14,2	4,88	58,5	1,41107911	56,11
Noviembre	7,2	21,4	14,3	14,6	5,04	58,5	1,41107911	57,86
Diciembre	5,0	22,0	13,5	14,1	4,83	58,5	1,41107911	55,59

Fuente: Autor

8.2.2. Resultado del balance hídrico según el modelo de Thomas

La calibración del modelo hidrológico se realizó con el método de Thomas con datos de entrada, presentados anteriormente, para las dos microcuencas de estudio lo cual permitió identificar las zonas que presentaron calibraciones óptimas en donde se pudo ajustar adecuadamente el caudal medido por la estación hidroclimatológica y el caudal simulado por el modelo. El modelo de Thomas describió el balance hídrico, teniendo en cuenta los flujos sub-superficiales y subterráneos, que de una u otra forma contribuyeron a los caudales de las corrientes principales en la microcuencas estudiadas.

En la tabla 28 se observan los datos de entrada al modelo de Thomas como son la precipitación areal (mm), la evapotranspiración (mm), el caudal medio y el área de la microcuencas Olarte y Tobal, para los doce meses del año con el fin de calcular el balance hídrico. La información de caudales medios mensuales proviene de la microcuenca de Olarte en la estación de Desaguadero, con un periodo de 15 años

desde el año 1998 al 2013. La evapotranspiración es calculada a través del método de Thornthwaite, que considera únicamente los valores medios de temperatura. Asimismo, la temperatura es un conjunto de datos que proviene de una estación de Sogamoso, cercano al lago de Tota, y válida para la cuenca por su similitud de topografía y de altura sobre el nivel del mar. Se manejó un máximo de 58 mm y un mínimo de 53,9 mm.

Tabla 28 Datos de entrada al método de Thomas para las microcuencas Olarte y Tobal.

Sub cuenca Olarte			Q OBSERVADO (mm)	
MES	P (mm)	ETP (mm)	m³/s	mm/mes
1	11,83	54,2	0,133	14,028
2	24,99114	56,147	0,109	11,497
3	51,57814	57,959	0,117	12,340
4	104,3829	59,260	0,263	27,740
5	126,1652	58,172	0,733	77,312
6	112,1437	55,917	1,069	112,751
7	112,7159	54,011	1,523	160,636
8	103,1887	53,879	1,871	197,341
9	90,62709	54,106	1,196	126,146
10	90,15388	56,109	0,622	65,604
11	71,5493	57,862	0,592	62,440
12	27,2604	55,592	0,277	29,216
Área para balance hídrico			2457490,9	m²

Sub cuenca Tobal			Q OBSERVADO (mm)	
MES	P (mm)	ETP (mm)	m³/s	mm/mes
1	15,72296	54,296	0,1266	18,292
2	28,47609	56,147	0,0906	13,099
3	56,44827	57,959	0,0934	13,505
4	102,7542	59,260	0,1890	27,306
5	115,9684	58,172	0,4919	71,063
6	103,7413	55,917	0,7220	104,303
7	107,4442	54,011	1,0599	153,123
8	96,47461	53,879	1,2771	184,500
9	86,62204	54,106	0,8346	120,571
10	93,92633	56,109	0,4731	68,349
11	78,61134	57,862	0,4748	68,603
12	26,78685	55,592	0,1987	28,708
Área para balance hídrico			1794235,6	m²

En el modelo se tiene en cuenta cuatro parámetros, a continuación se describe la significancia física d^{84} .

- El parámetro “**a**” ($0 < a < 1$) refleja la tendencia de la escorrentía a producirse antes de que el suelo esté totalmente saturado.
- El parámetro “**b**” es el límite superior de la suma de la evapotranspiración real **Et** y el almacenamiento de humedad en el suelo. Presumiblemente este parámetro depende de la habilidad de la cuenca de mantener agua en el horizonte o layer superior del volumen de control.
- El parámetro “**c**” es igual a la fracción de flujo que surge de la descarga subterránea.
- El parámetro “**d**” indica la fracción del almacenamiento subterráneo que se incluye como flujo base.

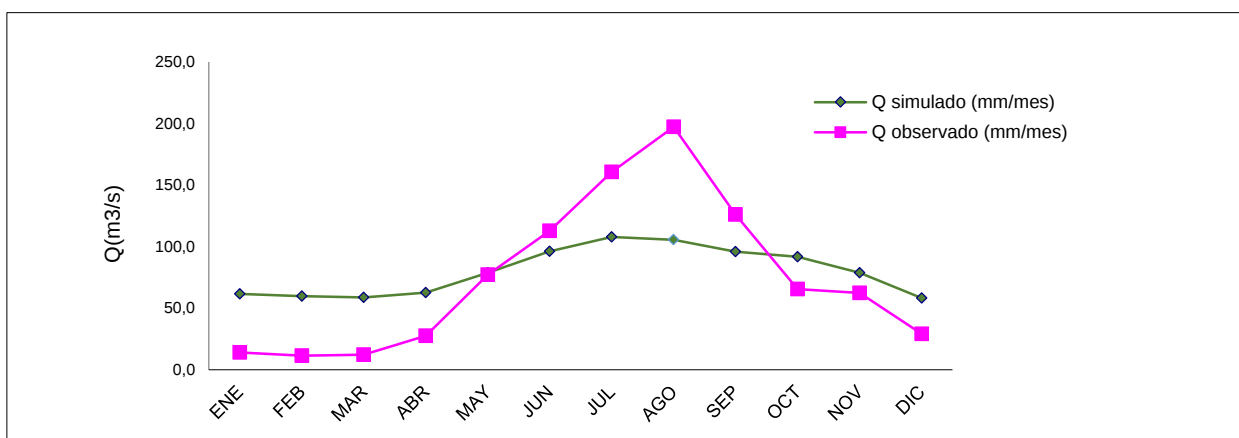
⁸⁴ CARO.Carlos.,Op.Cit.p140

Tabla 29. Parámetros **a**, **b**, **c**, **d** y el coeficiente de determinación del **R²**

Microcuenca Olarte	a	b	c	d	St-1	Gt-1	Factor R ²
	0,979	366,9	0,0008	0,035	111,9	1761	0,89
Microcuenca Tobal	a	b	c	d	St-1	Gt-1	Factor R ²
	0,977	366,92	0,0007	0,035	111,75	1934	0,86

La microcuenca Olarte posee un valor de correlación de 0,89, frente a un valor de 0,86 para la microcuenca Tobal, haciendo una diferencia muy pequeña entre los modelos. En la tabla 29 se observa que la correlación en la microcuenca de Tobal es menor, ya que algunos de sus aportes de caudal son mayores y otros menores de acuerdo a cada mes del año, si se compara con los aportes de la microcuenca de Olarte.

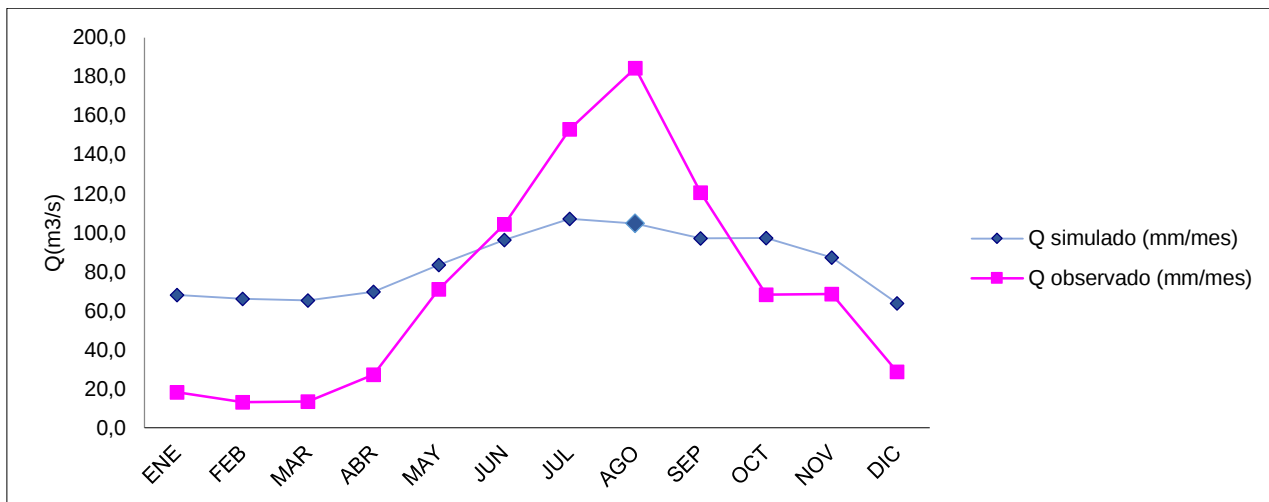
Gráfica 14. Resultado del caudal observado vs caudal simulado microcuenca Olarte



Fuente: Autor.

En la gráfica 14 se observa el resultado obtenido por el modelo de Thomas donde se hace la comparación del caudal simulado por el modelo con el caudal observado por la estación de caudales Desaguadero en la microcuenca Olarte. El caudal medio máximo registrado se encuentra en agosto, en el orden de los 190 mm/mes, a pesar de que la precipitación máxima dentro de los 12 meses del año se presente en mayo, con 120 mm, comparados con los 100 mm llovidos en agosto.

Gráfica. 15. Resultado del Caudal observado vs Caudal simulado microcuenca Tobal



Fuente: Autor.

La correlación de los dos modelos con los valores observados, plantea una tendencia de aumento de los caudales en la temporada intermedia del año. En la gráfica 15 se observa la comparación del caudal simulado en la microcuenca Tobal.

Tabla 30. Resultados del balance hídrico microcuenca Olarte por el modelo de Thomas.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Oct	Noviembre	Diciembre
Wi(mm)	123,7351	130,6308	162,449	240,9519	324,2045271	366,4730852	388,3	387,546	374,86	370,14	348,349	293,9
Yi(mm)	122,489	129,2051	159,94	232,7538	298,0258516	320,956747	329,46	329,197	324,48	322,54	312,1878	276,677
Swi(mm)	105,6397	110,8711	136,569	198,0393	254,3293369	275,5861592	284,36	284,237	279,99	276,8	266,6399	237,776
ET actual	16,8493	18,33402	23,3711	34,71453	43,69651468	45,37058779	45,099	44,9605	44,49	45,739	45,54788	38,9004
Ro(mm)	1,24515	1,424583	2,50713	8,191509	26,15773261	45,4799251	58,799	58,3025	50,344	47,567	36,13231	17,2098
Gt(mm)	1700,514	1642,105	1585,7	1531,244	1478,668622	1427,914129	1378,9	1331,6	1285,9	1241,8	1199,14	1157,97
d*Gt(mm)	60,48727	58,40968	56,4035	54,46635	52,59624287	50,79090557	49,048	47,3648	45,739	44,17	42,65341	41,1888
Qt(mm)	61,73242	59,83426	58,9106	62,65785	78,75397548	96,27083067	107,85	105,667	96,083	91,737	78,78572	58,3986

Fuente: Autor.

Con respecto a la amplia diferencia entre oferta de agua a lo largo del año, se puede concluir que en los primeros meses del año se presenta sequía y lluvias frecuentes en la temporada intermedia. Sin embargo, los registros de temperatura máximos pueden ser la causa inicial, pues en los valores máximos medios de temperatura se destacan diciembre, enero, febrero y marzo con los cuatro valores más altos del año.

Tabla 31. Resultados del balance hídrico microcuenca Tobal por el modelo de *Thomas*.

	Enero	Feb	Marzo	Abril	Mayo	Jun	Julio	Ago	Sept	Oct	Novi	Dic
Wi(mm)	127,473	137,1514	172,629	247,401305	318,204208	353,4401045	376,22	375,4036	365,37	368,87	353,3658	294,11229
Yi(mm)	126,0078	135,3914	169,399	237,683806	292,597243	313,024753	323,16	322,8406	318,63	320,15	312,9877	275,61683
Swi(mm)	108,6754	116,1805	144,647	202,235762	249,698828	268,7776683	278,93	278,7505	274,95	274,75	267,3254	236,86744
ET actual	17,33247	19,21088	24,7521	35,4480443	42,8984148	44,2470848	44,235	44,09006	43,686	45,398	45,6623	38,749394
Ro(mm)	1,465129	1,760018	3,22961	9,71749874	25,606965	40,41535144	53,058	52,56297	46,74	48,72	40,37807	18,495459
Gt(mm)	1867,318	1802,935	1740,77	1680,7526	1622,80233	1566,850112	1512,8	1460,667	1410,3	1361,7	1314,73	1269,3998
d*Gt(mm)	66,68193	64,38282	62,163	60,0196754	57,9502712	55,95221749	54,023	52,16041	50,362	48,626	46,94901	45,330268
Qt(mm)	68,14706	66,14284	65,3926	69,7371741	83,5572362	96,36756893	107,08	104,7234	97,102	97,346	87,32708	63,825727

Fuente Autor

En la tablas 30 y 31 uno de los parámetros que más se considera es el almacenamiento subterráneo **Gt-1**, el cual es del orden de 1800 mm, pues este parámetro de entrada resultante, sugiere que las cuencas poseen reservorios subterráneos de agua, que posiblemente se haya infiltrado desde el lago y haya ascendido capilarmente. Otro punto de vista indica que la superficie del lago alguna vez estuvo en un nivel más alto, lo que habría saturado el almacenamiento subterráneo de las cuencas desde entonces.

No obstante, en las tablas 30 y 31 la infiltración (**It**) en las dos microcuencas es de cero, siendo una infiltración desde la superficie de la cuenca hasta sus capas subterráneas, pero el enunciado anterior se refiere a una infiltración lateral. Esta variable provoca el retraso del caudal máximo a raíz de la precipitación máxima con 3 meses de diferencia.

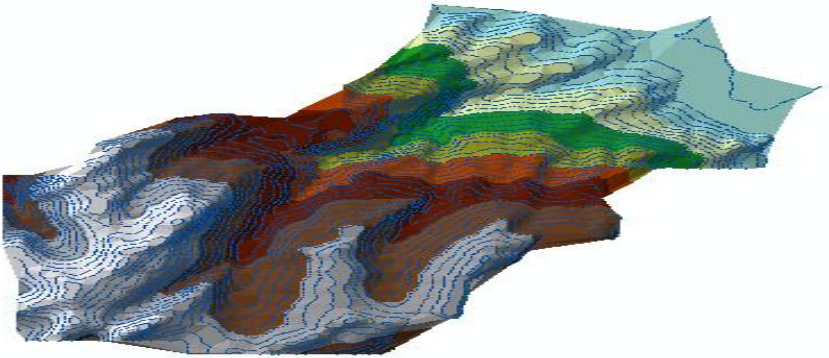
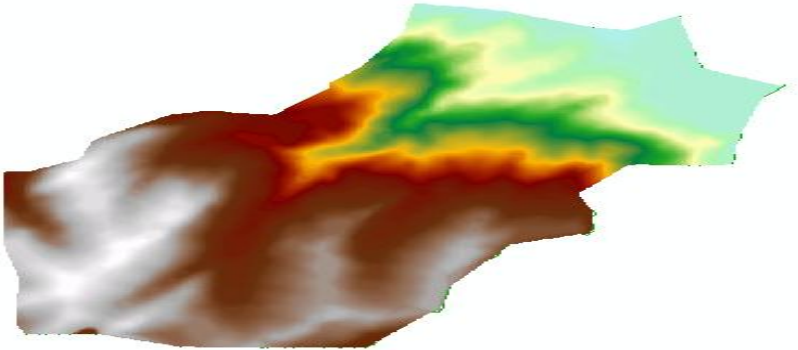
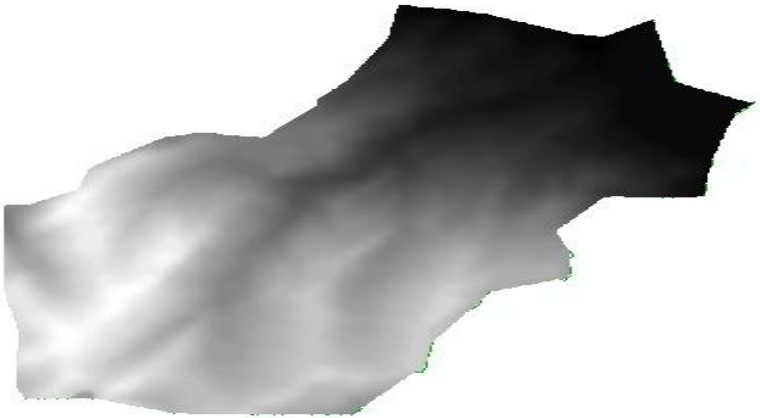
Para garantizar la continuidad del flujo en las microcuencas, se obtuvo un parámetro **Gt-1** (almacenamiento superficial) bastante alto, pero con un factor **d** tan bajo, dando como flujo base un resultado que trata de emparejarse con los datos registrados. La microcuenca de Olarte posee un valor de 1761mm, y la de Tobal con 1934 mm, siendo esta última una microcuenca más pequeña y con más reserva de agua subterránea.

8.3 Resultados de la Modelación de los caudales.

En esta parte se presentan los resultados obtenidos mediante la modelación dinámica de procesos hidrológicos aplicando la de simulación el programa Hec-Hms mediante la cual se obtuvo los caudales pico que se podrían presentar ante un evento de lluvia de gran magnitud.

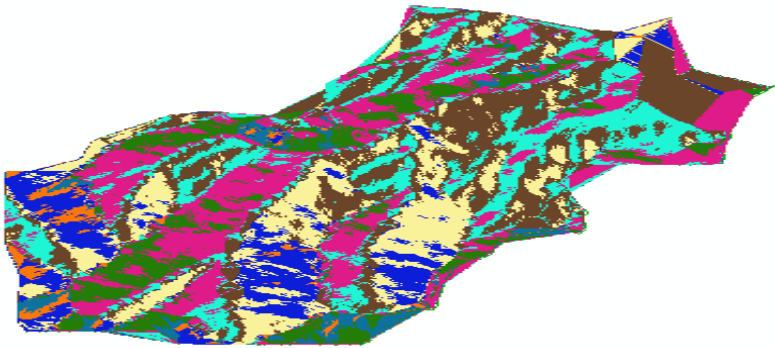
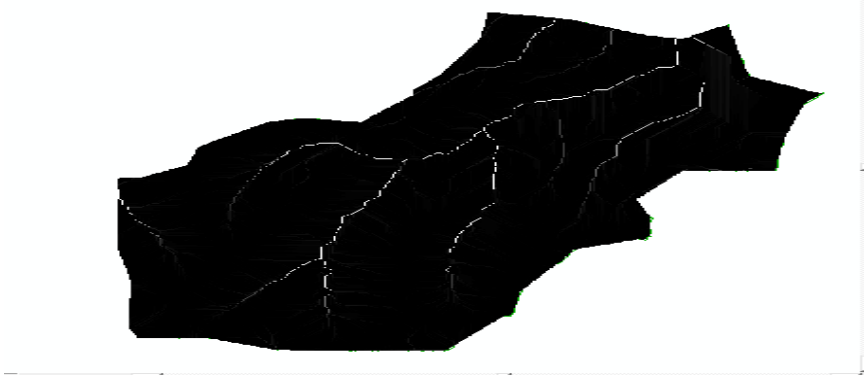
La modelación se realizo para un tiempo de retorno de 10, 20, 50 y 100 años de la microcuenca de Olarte y Tobal, utilizando Hec-Hms. Donde se obtuvieron los valores de caudal pico. A continuación se presenta la tabla 32 con las diferentes etapas de la modelación.

Tabla 32. Pasos de la modelación en Hec-Hms

Etapa	Imagen
Preparación de la información topográfica Convertir los archivos shp en un raster en formato tin	
Convertir el tin en raster (se trabajará solamente con el raster)	
Preparar las cuencas con la herramienta "arc hydro tools 9" Pre -procesamiento del terreno / manipulación dem / llenado sumideros (llenar)	

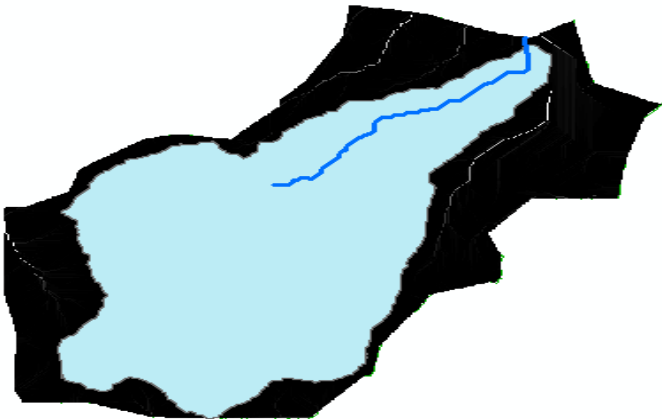
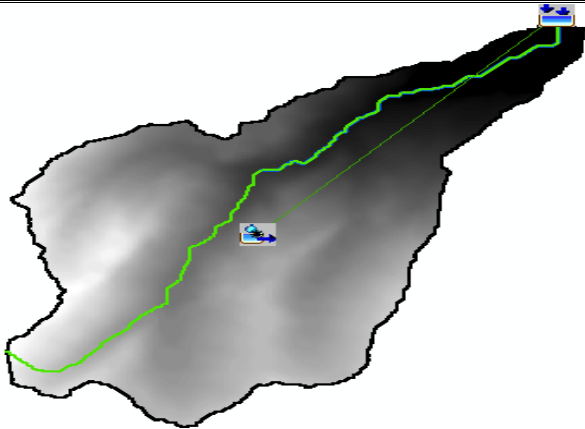
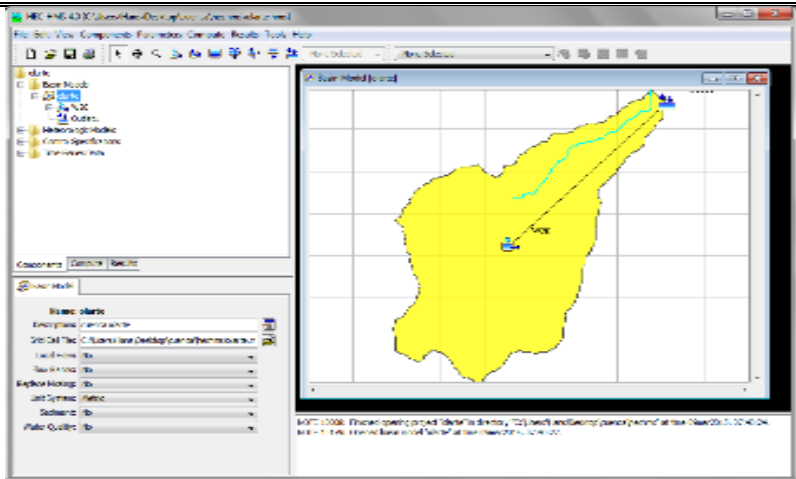
Fuente: Autor.

Continuación Tabla 32. Pasos de la modelación en Hec-Hms

Etapa	Imagen
Pre-procesamiento del Terreno / flujo directo (fdr)	
Pre-procesamiento del Terreno / acumulación de flujo (fac) Pr- procesamiento terreno definición / arroyo (str) pre procesamiento terreno / segmentación de corriente (strink)	
Pre-procesamiento Terreno / delineación rejilla de captación (cat) Pre procesamiento terreno / procesamiento polígono de captación (cuenca)	

Fuente: Autor.

Continuación Tabla 32. Pasos de la modelación en Hec-Hms

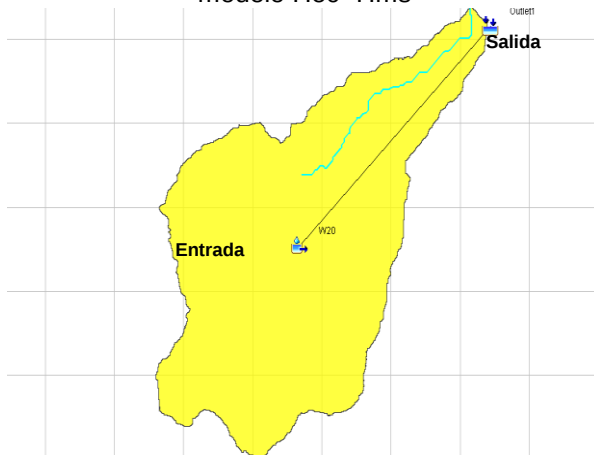
Etapa	Imagen
Pre procesamiento Terreno / procesamiento de la línea de drenaje (línea de drenaje)	
Definir el proyecto con la herramienta "Hec-Hms main view 9"terrain" Pre procesamiento / procesamiento de captación adjunto (captación adjunto)	
Abrir el proyecto en Hec- Hms Se abre el proyecto en Hec-Hms y se completa la información faltante, se simula los datos del proyecto y se obtiene la información hidrológica.	

Fuente: Autor

a) Esquema de las microcuencas según el modelo Hec-Hms.

En las imagen 4 y 5 se observan los esquema de la microcuencas Olarte y Tobal identificando la entrada y salida del modelo con los parámetros establecidos anteriormente.

Imagen 4. Esquema de microcuenca Olarte
modelo Hec- Hms



Fuente: Autor.

Imagen 5. Esquema de la microcuenca Tobal
modelo Hec- Hms



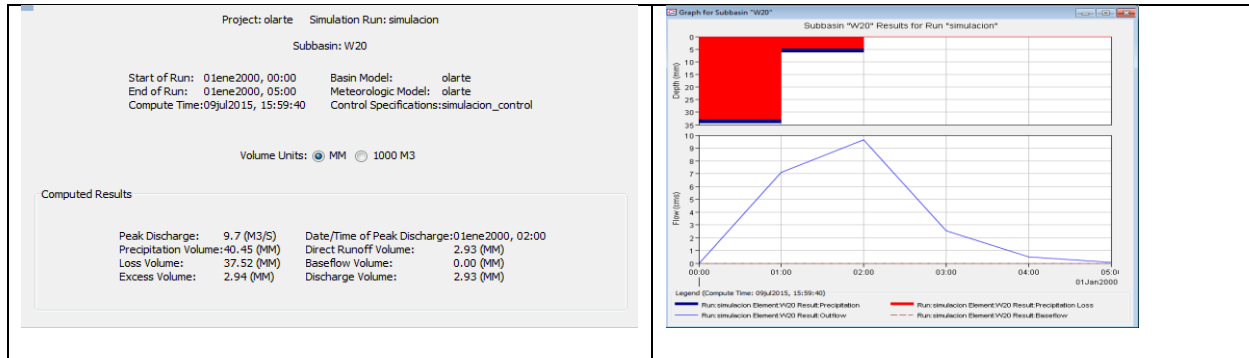
Fuente: Autor.

b) Resultados del hidrograma de entrada de la simulación de las microcuencas.

En la imagen 6 se observa el reporte de la simulación y el régimen del comportamiento de la lámina de agua en función de la profundidad en la entrada de la microcuenca con una simulación de 5 horas y con intervalos de 60 minutos. Los resultados de la entrada de la modelación se indican en la tabla 44 donde se observan los valores: de lámina de escorrentía, los excesos de precipitación, la infiltración, el flujo de base y el flujo total.

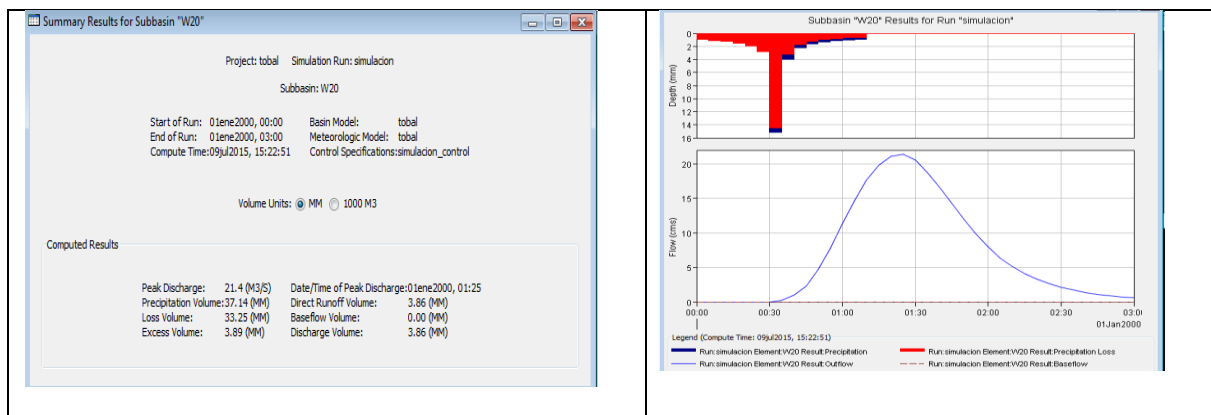
En la imagen 7 se observa el reporte de la simulación y el régimen del comportamiento de la lámina de agua en función de la profundidad en la entrada de la microcuenca con una simulación de 3 horas con intervalos cada 5 minutos. Los resultados de la entrada de la modelación se indica en la tabla 45 donde se observan los valores de lámina de escorrentía, los excesos de precipitación, la infiltración, el flujo de base y el flujo total.

Imagen 6. Régimen del comportamiento de la lámina de agua en función de la profundidad para la microcuenca Olarte.



Fuente: Autor

Imagen 7. Régimen del comportamiento de la lámina de agua en función de la profundidad para la microcuenca Tobal.



Fuente: Autor

c) Resultados de la entrada de la modelación en Hec-Hms de las microcuencas.

En la tabla 33 se observa que en entre la primera y segunda hora de la simulación se presenta el mayor evento de precipitación con excesos en la condición de humedad del suelo e infiltración. También se observa que en todo el tiempo de la simulación el flujo base de la microcuenca es cero y el mayor flujo total se presentó en la segunda hora con un caudal de 9.7 m³/s. Sin embargo, el flujo total a medida que va pasando el tiempo va disminuyendo el caudal durante el resto de tiempo de la simulación; Finalizando la simulación a las 5 horas se presenta un caudal de 0.1 m³/s. En la tabla 34 se describe el comportamiento de la microcuenca que se obtuvo en la simulación por Hec-Hms. De cero a 30 minutos se presenta un caudal de 0 m³/s, a una hora de simulación se presenta un caudal de 11.3 m³/s, en 1:25 minutos se presenta el caudal pico con un valor de 21.4 m³/ s; En la segunda hora se disminuye el caudal a 8 m³/s y en la tercera hora el caudal final es de 0.6 m³/s.

Tabla 33. Resultados de entrada a la modelación con Hec-Hms en la microcuenca Olarte

Tiempo	Precipitación (mm)	Lámina de escorrentía (mm)	Excesos (mm)	Infiltración (m³/s)	Flujo base(m³/s)	Flujo total (m³/s)
00:00				0	0	0
01:00	34.23	32.82	1.41	7.1	0	7.1
02:00	6.22	4.69	1.52	9.7	0	9.7
03:00	0	0	0	2.5	0	2.5
04:00	0	0	0	0.5	0	0.5
05:00	0	0	0	0.1	0	0.1

Fuente: Autor

Tabla 34. Resultados de la entrada a la modelación con Hec Hms en la microcuenca Tobal

Tiempo	Precipitación (mm)	Exceso (mm)	Flujo Directo (m³/s)	Flujo base (m³/s)	Flujo Total (m³/s)
00:00				0	0
00:05	0.97	0.97	0	0	0
00:10	1.09	1.09	0	0	0
00:15	1.26	1.26	0	0	0
00:20	1.5	1.5	0	0	0
00:25	1.91	1.91	0	0	0
00:30	2.83	2.83	0	0	0
00:35	15.14	14.49	0.65	0.2	0.2
00:40	4.02	3.24	0.79	1	1
00:45	2.26	1.7	0.56	2.3	2.3
00:50	1.67	1.21	0.46	4.6	4.6
00:55	1.36	0.96	0.41	7.8	7.8
01:00	1.17	0.8	0.37	11.3	11.3
01:05	1.03	0.69	0.34	14.7	14.7
01:10	0.92	0.61	0.32	17.7	17.7
01:15	0	0	0	19.8	19.8
01:20	0	0	0	21.1	21.1
01:25	0	0	0	21.4	21.4
01:30	0	0	0	20.5	20.5
01:35	0	0	0	18.8	18.8
01:40	0	0	0	16.6	16.6
01:45	0	0	0	14.3	14.3
01:50	0	0	0	12	12
01:55	0	0	0	9.9	9.9
02:00	0	0	0	8	8
02:05	0	0	0	6.3	6.3
02:10	0	0	0	5.1	5.1
02:15	0	0	0	4.1	4.1
02:20	0	0	0	3.3	3.3
02:25	0	0	0	2.7	2.7
02:30	0	0	0	2.1	2.1
02:35	0	0	0	1.7	1.7
02:40	0	0	0	1.4	1.4
02:45	0	0	0	1.1	1.1
02:50	0	0	0	0.9	0.9
02:55	0	0	0	0.7	0.7
03:00	0	0	0	0.6	0.6

Fuente: Autor.

d) Resultados del hidrograma por Hec-Hms para un tiempo de retorno de 100 años para las microcuencas.

En las imágenes 11 y 12 se observan los hidrogramas obtenidos mediante el modelo Hec-Hms para un tiempo de retorno de 100 años para las microcuencas. Para la microcuenca Olarte se presenta a cero horas un caudal de 0 m³/s, en la segunda hora se presenta el caudal pico con un valor de 9.7 m³/s, en la tercera hora el caudal disminuye a 2.5 m³/s y a cinco horas presenta un caudal final de 0.1 m³/s. En la microcuenca Tobal se presenta un caudal pico de 21.4 m³/s con un tiempo de ocurrencia de 1:20 minutos y un caudal final de 0.6 m³/s. A continuación se presenta las imágenes y las tablas 35 y 36 con los datos de los hidrogramas de salida de la simulación.

Imagen 11 Hidrograma de salida para la microcuenca Olarte

Sink "Outlet1" Results for Run "simulation"

Flow (m³/s)

Time (hr)

Legend (Compute Time: 09/02/2015, 15:59:40)

- Run simulation Element Outlet1 Result Outflow
- Run simulation Element VQ2 Result Outflow

Tabla 35. Datos Hidrograma de salida para la microcuenca Olarte.

Fecha	Tiempo	Caudal (m³/s)
01-ene-00	00:00	0
01-ene-00	01:00	7.1
01-ene-00	02:00	9.7
01-ene-00	03:00	2.5
01-ene-00	04:00	0.5
01-ene-00	05:00	0.1

Imagen 12 Hidrograma de salida para la microcuenca Tobal.

Sink "Outlet1" Results for Run "simulation"

Flow (m³/s)

Time (hr)

Tabla 36. Datos del hidrograma de salida para la microcuenca Tobal

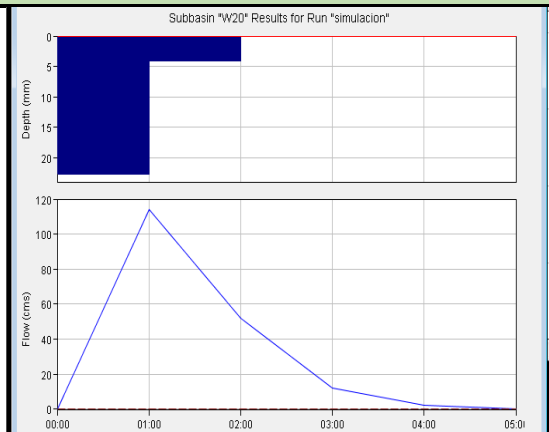
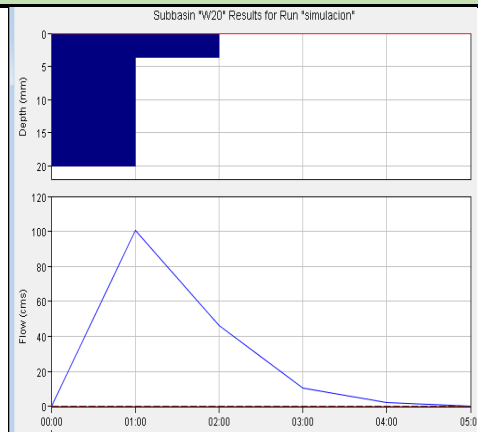
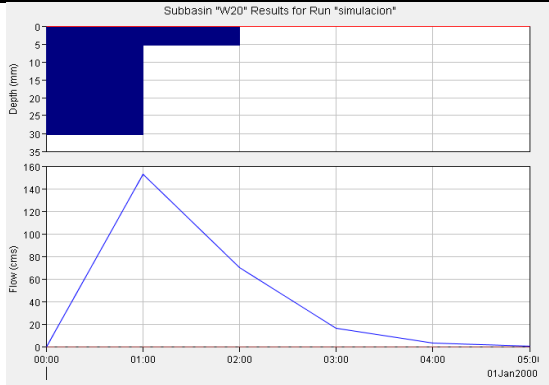
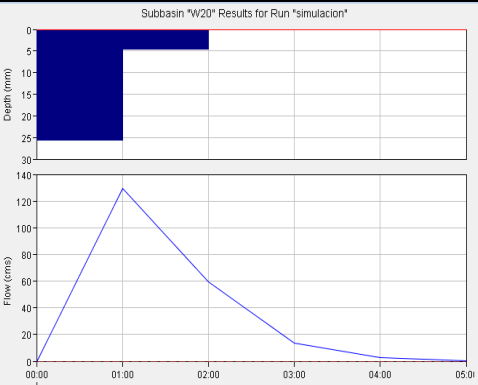
Tiempo	Outflow (m3/s)	Tiempo	Outflow (m3/s)
00:05	0	01:35	18.8
00:10	0	01:40	16.6
00:15	0	01:45	14.3
00:20	0	01:50	12
00:25	0	01:55	9.9
00:30	0	02:00	8
00:35	0.2	02:05	6.3
00:40	1	02:10	5.1
00:45	2.3	02:15	4.1
00:50	4.6	02:20	3.3
00:55	7.8	02:25	2.7
01:00	11.3	02:30	2.1
01:05	14.7	02:35	1.7
01:10	17.7	02:40	1.4
01:15	19.8	02:45	1.1
01:20	21.1	02:50	0.9
01:25	21.4	02:55	0.7
01:30	20.5	03:00	0.6

Fuente: Autor

e) Comparación de los hidrogramas de las microcuencas obtenidos por Hec-Hms.

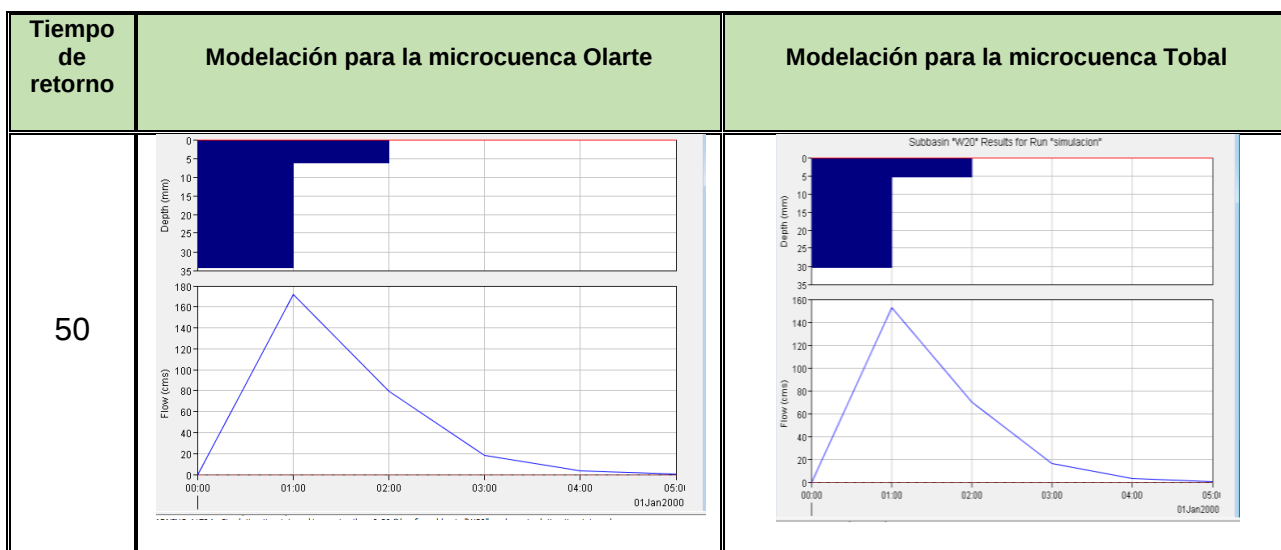
A continuación en la tabla 37 se presenta la comparación de los hidrogramas para las microcuencas con los tiempos de retorno de 10, 20 y 50 años obtenidas por Hec-Hms. Se observa que para los tiempos de retorno la microcuenca que mayor caudal presentó fue Olarte. Para un tiempo de de retorno 10 años la microcuenca Olarte presentó un caudal pico mayor de 10 m³/s con una profundidad de lámina de agua de 27mm. No obstante para los tiempos de retorno de 20 y 50 años la diferencia del caudal pico entre las microcuencas es de 20 m³/s con una lamina de agua de 5 mm de diferencia. Estos resultados son la base para la creación del Rtin necesario para hacer la modelación en Iber con lo que se generaron los pocibles puntos de inundación dentro de la zona,y de acuerdo a esto se generaron algunas recomendaciones de cuidado y manejo de las microcuencas.

Tabla 37. Resultados de los histogramasobtenidos con el modelo Hec-Hms para los diferentes tiempos de retorno para las microcuencas.

Tiempo de retorno	Modelación para la microcuenca Olarte	Modelación para la microcuenca Tobal
10		
20		

Fuente: Autor

Continuación Tabla 37. Resultados de los histogramas obtenidos con el modelo Hec-Hms para los diferentes tiempos de retorno para las microcuencas.



Fuente: Autor

8.4 Resultados de los posibles puntos de inundación obtenidos a través de la modelación en Iber

Los posibles puntos de inundación se encontraron mediante una modelación en Iber; La modelación se realizó para un tiempo de retorno de 2,5,10,20,50 y 100 años en la microcuenca de Olarte. Donde se obtuvieron los hietogramas de diseño y los posibles puntos de inundación de la microcuenca. A continuación se presenta la tabla 38 las diferentes etapas que se tuvieron presentes en la simulación.

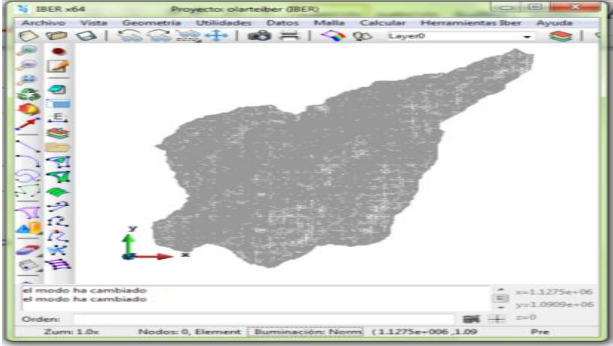
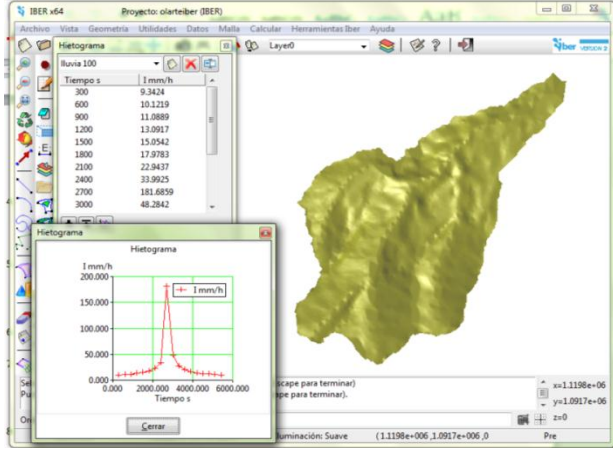
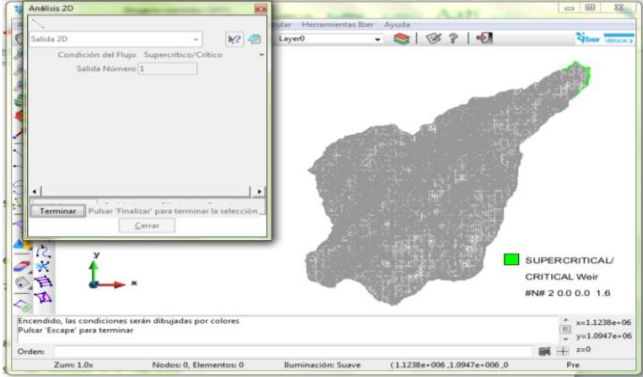
a) Pasos para la modelación en Iber

Tabla 38. Pasos de la modelación en Iber

Pasos	Descripción
Obtención del modelo digital del terreno a partir de las curvas de nivel	

Fuente: Autor

Continuación Tabla 38.Pasos de la modelación en Iber

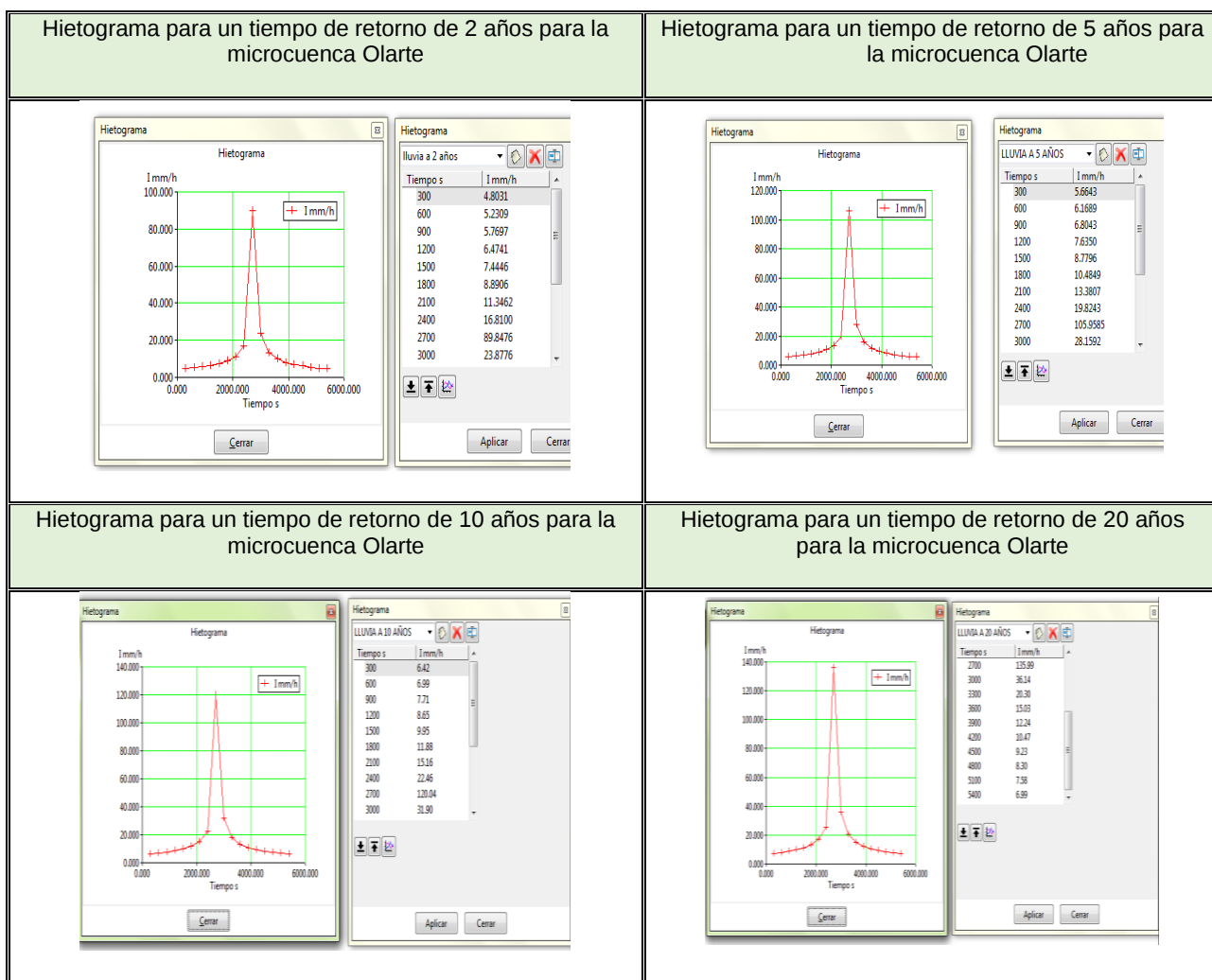
Pasos	Descripción
Generación de la malla combinada de Iber	
Asignación de la lluvia de cálculo Obtención del hidrograma de salida.	
Definición de las condiciones de salida. Asignación de los parámetros para la simulación. Resultados en el pos-proceso, de calado y velocidad.	

Fuente: Autor

b) Hietogramas obtenidos en Iber para los diferentes tiempos de retorno

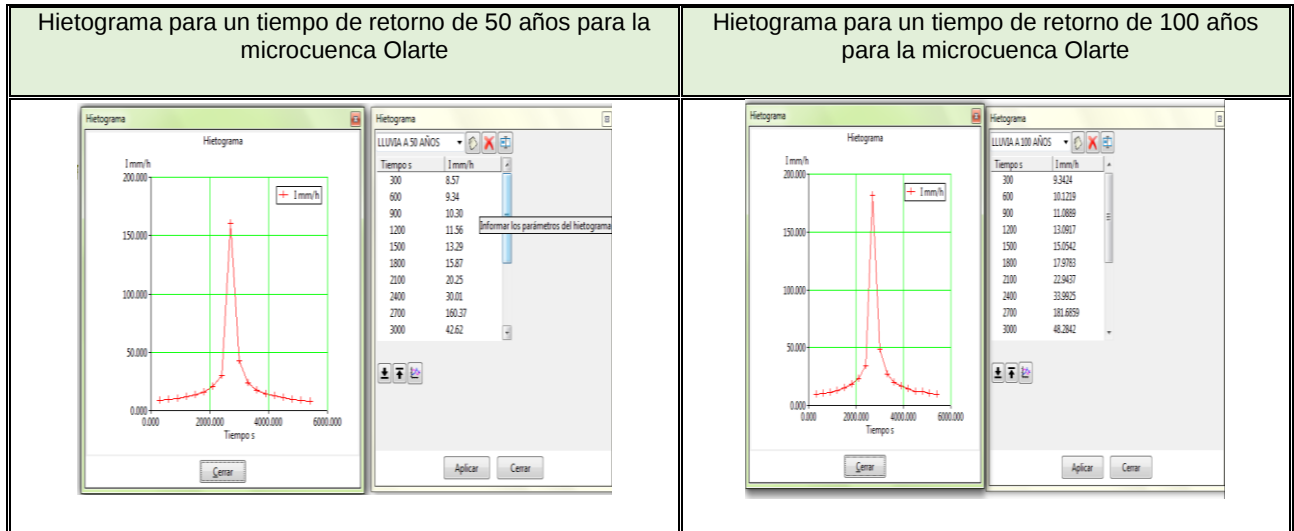
A continuación en la tabla 39 se presentan los resultados de los hietogramas obtenidos en Iber en la microcuenca Olarte para los tiempo de retorno de 2, 5, 10, 20,50 y 100 años. Mediante el análisis de los hietográfmas de tormentas asociadas a los distintos periodos de retorno;En estos hietogramas se logra apreciar mas objetivamente las variaciones de la intensidad durante la tormenta. La modelación a través de Iber puede llegar a ser más eficiente si se cuenta con un nivel alto en calidad y cantidad de la información hidrometeorológica necesaria.

Tabla 39 Resultados de los hietogramas obtenidos en Iber para la microcuenca Olarte.



Fuente: Autor

Continuación Tabla 39 Resultados de los hietogramas obtenidos en Iber para la microcuenca Olarte.

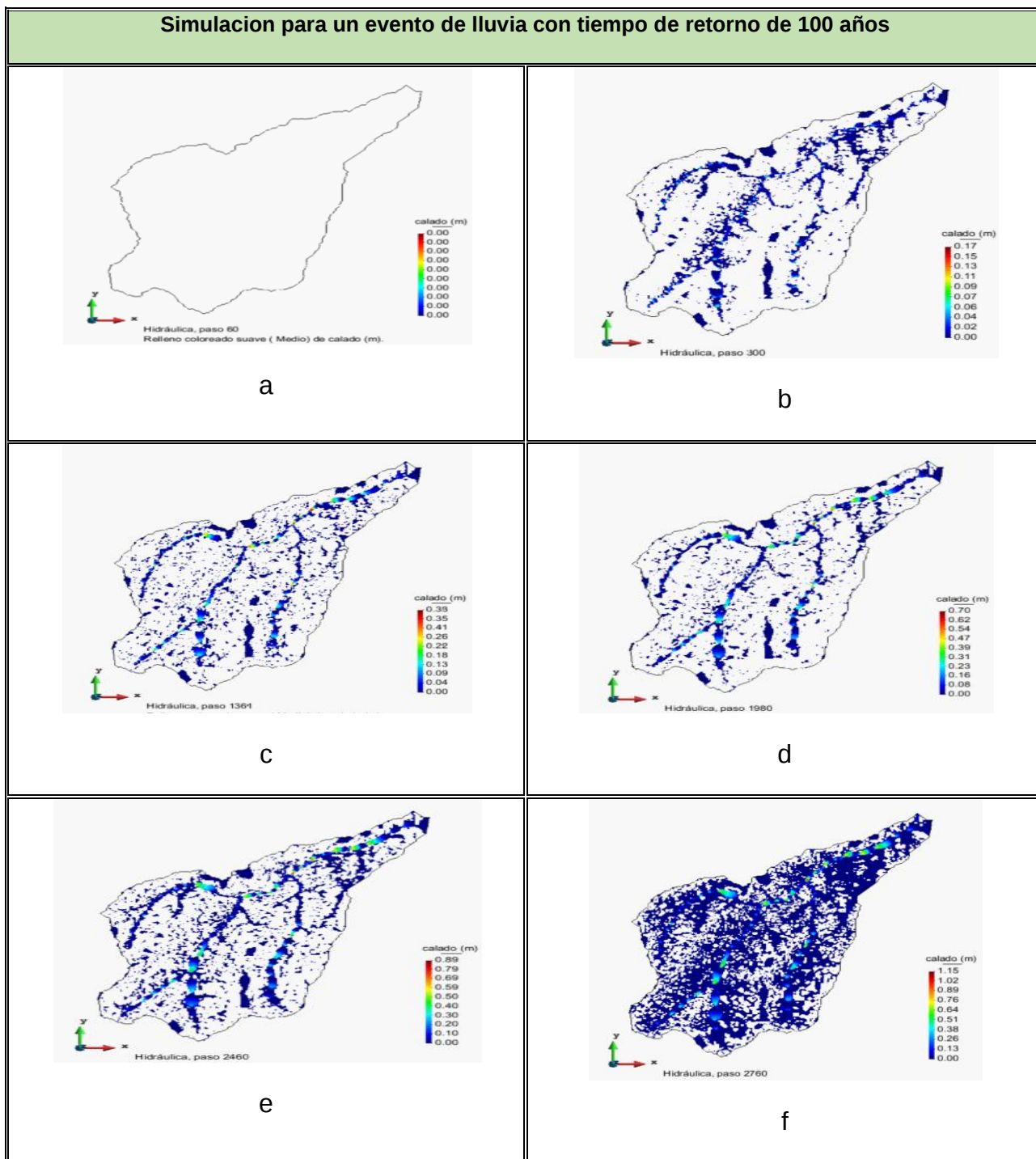


Fuente: Autor

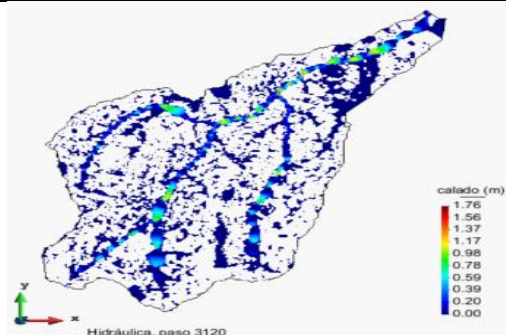
Acorde con los resultados de los hietogramas de diseño obtenidos por el modelo Iber se analizan las intensidades de los diferentes tiempos de retorno y de esta manera se elige el tiempo de retorno de 100 años ya que presentó los mayores niveles de intensidad en la microcuenca y de acuerdo a estos resultados se realizó la simulación. Sin embargo, no se pudo realizar la simulación en la microcuenca Tobal debido a la baja resolución de la topografía de esta zona. No obstante se consultó en el IGAG y en la página web de la NASA sin obtener con éxito la información.

Para la realización de la simulación se utilizó la malla combinada (cuadrada y triangular) debido a que es la que más se ajusta al modelo de elevación digital y permitió tener mayor precisión en la simulación. Para los parámetros de entrada al modelo no se tuvo en cuenta la infiltración debido a que los niveles son muy bajos cercanos a cero, de acuerdo a los resultados obtenidos en el modelo de Thomas y en el análisis de suelo, donde el suelo es arcilloso. Este tipo de suelos presentan una velocidad de infiltración muy baja de 8-10 mm/h, por lo que al momento de presentarse un evento de precipitación de gran magnitud los niveles infiltrados serán muy cercanos a cero y esto ocasiona posibles puntos de inundación en la microcuenca. En la tabla 40 donde se observa la secuencia del comportamiento de la microcuenca durante la simulación de una lluvia con una intensidad de 100 años.

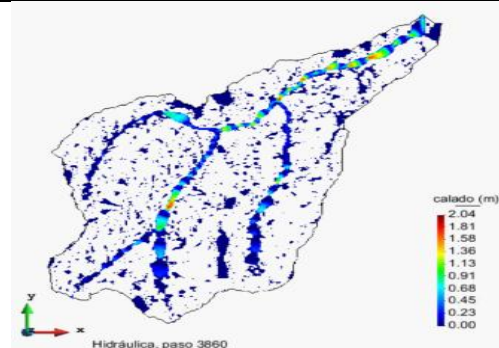
c) Simulación de un evento de precipitación en la microcuenca Olarte para un tiempo de retorno de de 100 años



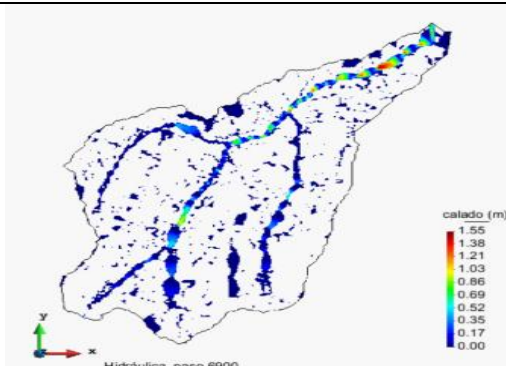
Continuacion Simulacion para un evento de lluvia con tiempo de retorno de 100 años



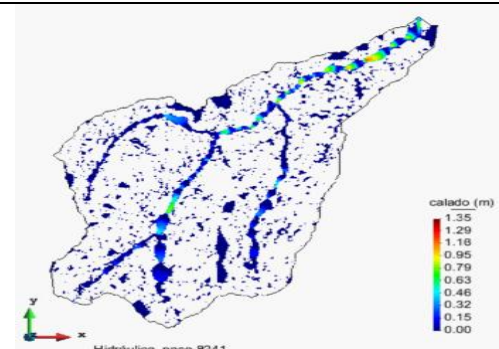
g



h



i



j

Fuente: Autor

De acuerdo a las imágenes anteriores se pudo determinar que en el transcurso del tiempo se aumenta las alturas de la lámina de agua en la microcuenca. En la gráfica **a** se observa un calado de 0 m. En la imagen **g** se observa el mayor incremento de la lámina de agua con un valor de 2.04 m. En la imagen **e** se muestra la mayor intensidad que se presentó en el evento de lluvia indicando una sobrecarga en la microcuenca. Al final de la simulación se observa que la lámina de agua disminuye a un valor de 1.35 m. esto hace referencia a que finalizado el periodo de lluvia. Además el indicador que aparece en cada grafica a la derecha muestra que el color rojo representa el nivel más alto de inundación.

En las imagen **h** se observan 6 puntos de posibles inundación con un rango de 20 cm a 60 cm en forma vertical como se indica en la cota de calado (altura de lamina de agua). A continuacion en la tabla 41 donde se indica la distancia de cada punto de posible inundacion estan localizado desde la parte de la salida de microcuenca el cual fue validado por el programa computacional.

Tabla 41. Ubicación de los posibles puntos de inundacion obtenidos en la modelación en iber para la imagen *h*

Puntos de posible inundación	Distancia (m)
1	524
2	930
3	3163
4	4782
5	5540
6	6853.7

6.4 GESTIÓN DEL RECURSO HÍDRICO PARA LA ZONA DE ESTUDIO BASADO EN LAS MODELACIONES HIDROLÓGICAS.

Las funciones de la gestión de los recursos hídricos son tareas muy complejas y pueden implicar muchas actividades llevadas a cabo por diferentes actores. La gestion del recurso hidrico esta enfocado en el cumplimiento de diferentes actividades que permiten la regulacion y mantenimiento de las fuentes hidricas estas giran en cuatro entornos.

1. Sostenibilidad recurso y socio-económica.
2. Biodiversidad y manejo ambiental.
3. Comunicación, Educación,e Investigación.
4. Gobernanza y participación social.

Este trabajo de investigación aporta al primer numeral con el estudio de cracterizacion de las microcuencas la elavoración del balance hidrico y la busqueda de caudales pico por medio de la modelacion en Hec.Hms. De acuerdo a los resultados encontrados el uso del recurso esta en riesgo de no ser sostenible debido a las crecientesactividades economicas alrededor de la cuenca.

La modelación en Iber permite localizar con precisión los potenciales puntos de inundación con los cuales se pueden tomar medidas de contingencia con la comunidad para disminuir el riesgo de pérdidas económicas derivadas de las inundaciones con el fin de proponer alternativas de manejo de agua lluvia ya sea con canales perimetrales y/o sistemas de alivio para la conducción de aguas lluvia. De igual manera, esta

modelación permite prevenir la ocurrencia de fenómenos de avenidas torrenciales y variabilidad climática que puedan ocurrir en la cuenca del lago de tota.

De acuerdo a los resultados del modelamiento hidrológico se recomienda crear mecanismos para asegurar que los resultados de las investigaciones sean fácilmente accesibles y entendibles tanto para tomadores de decisiones, como por las comunidades o cualquier persona interesada en la conservación de la cuenca del Lago de Tota con el propósito de proteger los recursos naturales y mitigar el efecto de fenómenos naturales extremos. De manera particular, se recomienda la reglamentación de zonas de protección aguas arriba de las microcuencas que permitan dar a los ciudadanos la reforestación de las riveras de los ríos y quebradas que conforman la microcuenca.

CONCLUSIONES

Las áreas de estudio Olarte y Tobal fueron caracterizadas morfométricamente encontrando que pertenecen a la categoría de microcuencas con un área de 24.9 km² y 21.5 km², respectivamente. Las microcuencas indican que el grado de ramificación es de orden 3. El coeficiente de compacidad indica que la microcuenca Olarte es muy alargada y la microcuenca Tobal es ovalada irregular. En cuanto al tipo de suelo, los ensayos permitieron concluir que el tipo de suelo es limo arcilloso. Esto indica que el suelo presenta un nivel muy bajo de infiltración, razón por la cual no se tuvo en cuenta la infiltración para los datos de entrada de los modelos de simulación.

El análisis del balance hídrico por el modelo de Thomas, se obtuvo la comparación del caudal simulado con el caudal simulado. La microcuenca Olarte obtuvo una correlación de 0,89, frente a un valor de 0,86 para la microcuenca de Tobal. El caudal medio máximo registrado se encuentra en agosto con un valor de 190 mm/mes.

En cuanto al análisis de los caudales pico por medio de la simulación obtenida por Hec-Hms en la microcuenca Olarte, se observó que en la primera y segunda hora se presenta el mayor evento de precipitación. También se observa que en todo el tiempo de simulación el flujo base de la microcuenca es 0 y el mayor flujo se presentó en la segunda hora con un caudal pico de 9.7 m³/s. Sin embargo el flujo total a medida que va pasando el tiempo va disminuyendo durante el resto de tiempo de la simulación. Finalizando la simulación a las 5 horas, se presenta un caudal de 0.1m³/s. En la microcuenca Tobal se obtuvo una simulación de cero a 30 minutos con un caudal de m³/s. En la primera hora se presenta un caudal de 11.3m³/s. En 1:25 minutos se presenta el caudal pico con un valor de 21.4m³/s. En la segunda hora se disminuye el caudal a 8m³/s y en la tercera hora el caudal final es de 6 m³/s.

Con la ayuda del sistema de información geográfica (ArcGis), los mismos parámetros fueron calculados y los resultados fueron similares. Sin embargo para la topografía de la microcuenca Tobal se presentaron dificultades para la modelación, debido a la mala topografía que impidió la realización de los posibles puntos de inundación.

Los posibles puntos de inundación de inundación fueron estimados para la microcuenca Olarte. El mayor incremento de la lámina de agua alcanza un valor de 2.04 m, punto en el cual se presenta una sobrecarga en la microcuenca. Al final de la simulación se observa que la lámina de agua disminuye a un valor de 1.35m, cuando finaliza el evento de lluvia.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda seguir realizando estudios hidrológicos en la cuenca con datos de precipitación de las microcuencas faltantes con la finalidad de obtener los puntos de inundación de la cuenca del Lago de Tota.
- Promover la implementación del software ArcGis en la modelación hidrológica debido a que es necesario contar con un modelo de elevación digital DEM del terreno de toda la cuenca, con el fin de obtener las características físicas de las microcuencas con alto nivel de precisión hasta el sitio de interés.
- Fomentar la elaboración de modelos hidrológicos de las cuencas con la finalidad de conocer mejor su comportamiento del recurso hídrico, especialmente en periodos de tiempos críticos como inundaciones y sequías.
- Para las modelaciones se recomienda usar información precisa de la topografía lo cual es necesario para la implementación de la modelación con Iber. En el caso de la modelación con Hec-Hms se debe garantizar una buena manipulación de la información en cuanto a los datos espaciales, ya que estos no son directos y deben ser coordinados con un sistema de información geográfica.

GLOSARIO

Aforo: es, determinar a través de mediciones el gasto de caudal que pasa por una sección dada

Agua freática: sinónimo de agua subterránea.

Agua subterránea: agua del suelo que se encuentra en la zona de saturación y que alimenta pozos, manantiales y escorrentía subterránea.

Año hidrológico: periodo de 12 meses que comprende un ciclo hidrológico completo, partiendo del mes en el que se observan los valores mínimos.

Área de la cuenca: se define como la superficie, en proyección horizontal, delimitada por el parteaguas.

Balance hídrico: balance de agua basado en el principio de que durante un cierto intervalo de tiempo el aporte total a una cuenca, masa de agua o región geográfica debe ser igual a la salida total del agua más la variación neta en el almacenamiento.

Caudal: volumen de agua que pasa a través de una sección transversal del río en la unidad de tiempo.

Corriente principal: de una cuenca es la corriente que pasa por la salida de la misma. Esta definición se aplica solamente a las cuencas exorreicas. las demás corrientes de una cuenca de este tipo se denominan corrientes tributarias.

Corriente perenne: corriente de agua que fluye constantemente durante todo el año.

Corriente intermitente: corriente que fluye sólo en respuesta directa a la precipitación o al flujo de una fuente intermitente.

Cuenca: es una zona de la superficie terrestre en donde (si fuera impermeable) las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo de salida.

Cuenca endorreica: el punto de salida está dentro de los límites de la cuenca y generalmente es un lago.

Cuenca exorreica: el punto de salida se encuentra en los límites de la cuenca y está en otra corriente o en el mar.

Curvas de altura de precipitación-área-duración: sirven para determinar el potencial de precipitación que existe en una zona dada.

Densidad de corriente: número de corrientes perenes e intermitentes por unidad de área.

Densidad de drenaje: definida como la longitud de corrientes por unidad de área.

Escurrecimiento: se define como el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca.

Estación limnigráfica: estación para la determinación de caudales por medio de registro gráfico continuo de los niveles de agua.

Estación limnimétrica: estación para la determinación de caudales por medio de las lecturas periódicas sobre una regla graduada llevadas a cabo por un observador. La frecuencia de las lecturas es de dos veces por día.

Evaporación: es el proceso por el cual el agua pasa del estado líquido en el que se encuentra en los almacenamientos, conducciones y en el suelo, en las capas cercanas a sus superficie, a estado gaseoso y se transfiere a la atmósfera.

Evapotranspiración: es la combinación de vaporación y transpiración.

BIBLIOGRAFÍA

ABELLA, G., Johanna, P., Martínez, C., & María, J. (2012). CONTRIBUCIÓN DE UN AFLUENTE TRIBUTARIO A LA EUTROFIZACIÓN DEL LAGO DE TOTA (BOYACÁ, COLOMBIA). En: Revista Colombiana. química.(Bogotá), 41(2), 243-262.

ASHAKAR, F., & T.B.M.J Ouarda, R. R. (1993). Robust Estimators in Hydrologic Frequency Analysis. C.Y., pp 347-352, Am. Soc. Civ. Eng.

ArcGIS Resource. Introducción a ArcGIS [en línea]. <http://resources.arcgis.com/es/help/gettingstarted/articles/026n00000014000000.htm>

AMAPOLA AZUL., Reserva parque natural Lago de Tota. [En línea]. < <http://lagodetota.org/el-lago-de-tota#b2> >.

BASTIDAS, Camilo. Manual para el uso del modelo hidrológico HEC–HMS. Tomado Departamento Ingeniería Hidrometeorológica. Facultad de ingeniería ucv.

BELTRAN, Julio. Modelación hidrológica del humedal de jaboque. Bogotá, 2013, 81p. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad de Ciencias.

CARVAJAL, Yesid. Estimación de caudales promedios mensuales por sub c

CARO CAMARGO, Carlos y FLECHAS, Franklin. Análisis del balance hídrico de la sabana de Bogotá, mediante el método de Thomas. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana. 2003, p. 140. uencas hidrológicas. Cali, 2006, 16p.

Centro de estudios Hidráulicos, C.E. (2008). Curso taller de sistemas de información Geográficos Aplicados. Bogotá D.C.:ECI

CÁMARA COLOMBO ALEMANA. Bogotá, 2000. Sub proyecto Plan maestro de desarrollo sostenible para la región del Lago de Tota

CHOW, V. M. (1988). Applied Hydrology. New York, EE.UU: McGraw Hill.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACION, Manejo ambiental integral de la cuenca hidrográfica del Lago de Tota, Bogotá. 2014.

DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS Y PLANIFICACION Y UNIVERSIDAD DE CHILE (Chile)

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN 2014

ETAYO et al (1968). En mapa Geológico de Colombia, Memoria explicativa. INGEOMINAS.

FATTORELLI, Sergio y FERNANDEZ, Pedro. Diseño Hidrológico. Buenos Aires: Wasa-Gn, 2011. 273 p. ISBN: 978-987-05-2738-2.

GUTIERREZ SILVA, Juan. Calculo del Coeficiente de Rugosidad de Manning. Santa fe de Bogotá, 2009, 81 p, Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad de la Salle, Facultad de Ingeniería Civil

GARCIA, José., Procesos Erosivos en Tercer Seminario Tecnología del Agua.[En línea]http://imta.gob.mx/potamologia/images/stories/ponencias_tercer_seminario/dr_jose_garcia_procesos_erosivos/transporte_sedimentos.pdf.

HERAS, Rafael. Métodos del cálculo del balance hídrico. Madrid: Unesco, 1981. 18p.ISBN 92.3.301227.1

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales(IDEAM), Bogotá,2014

LOPEZ, Lisandro y DELGADO, Karen. Modelación hidrológica de la microcuenca lempa alto. Santa Ana. 2009, 200p. trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad de el Salvador.

LÓPEZ Alonso, R. 2001. Consideraciones acerca de los límites de aplicación del método del número de curva del Soil Conservation Service. Montes, 66, 92-97.

LIZARAZO, A. Estudio del modelo de simulación de caudales medios mensuales aplicado a una cuenca hidrológica. Cúcuta: Universidad Francisco de Paula Santander. Citado por: CARVAJAL, Yesid. Estimación de caudales promedios mensuales por microcuencas hidrológicas. Cali, 2006, 16p.

MAIDMENT, D. (1993). Handbook of Hydrology. New York, EE.UU: McGraw-Hill Inc.

MONSALVE Sáenz, G. (1999). Hidrología en la Ingeniería. Santa fe de Bogotá D.C., Colombia: Escuela Colombia de Ingeniería.

NORIEGA, Jorge. "Estudio preliminar del Estado de la sub cuenca de Los Pozos y su Posible efecto en el sector Laguna de Tota, Boyacá-Colombia. la ONU." En: Rev. Tecnol 9.2.

Plan de Ordenación y Manejo de la cuenca del Lago de Tota en convenio con CORPOBOYACA.

PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA DEL LAGO DE TOTA EN CONVENIO CON CORPOBOYACA. Zonificación de amenazas, Vulnerabilidad y Riesgos.

SIERRA, Juan. Pesadilla ambiental [En línea]: <http://www.semana.com/nacion/articulo/sequia-en-casanare-otros-conflictos-ambientales-en-colombia/381836-3>.

SALGADO, Jorge. Aplicabilidad de los modelos hidrológicos distribuidos En: XXII Congreso Nacional de Hidráulica. (2° :2012 Acapulco, Guerrero, México). 5p.

Soporte Office. ¿qué es Excel? [en línea].<https://support.office.com/es-hn/article/%C2%BFQu%C3%A9-es-Excel-8373c3d7-bd64-4b7f-bdbd-1fa4b2007b09>

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO(INGEOMINAS)., plancha Geológica 192.

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA, Iberaula [En línea]. <http://www.iberaula.es/web/index.php>

U.S. Army Corps of Engineers. (2008). HEC-HMS, Hydrology Engineering Center - Hydrology Modeling System. Estados Unidos: Copyright Haestad Methods, Inc. V.

VARGAS, R. D. (1998). Curvas Sintéticas Regionalizadas de Intensidad - Duración - Frecuencia para Colombia. Santafe de Bogotá D.C., Colombia: Universidad de los Andes.

VALDERRAMA, Jairo. Cómo preservar la cantidad y la calidad del agua en la cuenca del Lago de Tota. Bogotá, 2013

VERA. Daniel. Análisis de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo en la Cuenca Alta del río Bogotá. Bogotá, 2015, 150p. Trabajo de grado (Maestría Ingeniería Civil). Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Facultad Ingeniería Civil.

VELEZ, J. B. (2010). Estimación del Tiempo de Concentración y Tiempo de Rezago en la Cuenca Experimental Urbana de la Quebrada San Luis. Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

ANEXOS

Anexo 1 Completado de datos estaciones de estudio

Complementación de datos estaciones de precipitación multianuales

Tabla 49. Completado de datos estación Potrerito

POTRERITO													
AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	Anual corregido
1998	2,3	12	59,3	68,6	157,5	152,2	209,1	92,6	88,4	79,2	40,9	50,4	1012,5
1999	32,1	72,2	51,1	131	93,3	114,3	113,7	55,3	135,2	62,6	61,9	33,7	956,4
2000	29,8	40,5	55,2	31,7	139	67,7	75,1	131,1	107,4	82,9	72,7	35,8	868,9
2001	3,2	51,5	24,9	43,6	101,7	73	26,2	83,7	107,9	69,3	51,5	60,3	696,8
2002	10,8	10	39,5	112,5	78,2	85,1	97,9	110,7	96,3	73,2	16,1	23,8	754,1
2003	0,4	6,3	148,5	143,2	91,2	109,2	136,7	32,5	113	104,5	66,4	40,3	992,2
2004	4,8	25,5	47,5	182,3	184,1	57,4	137,7	130,1	61,3	100,5	21,5	13	965,7
2005	24,8	44,9	7,5	92,1	100,7	82,8	53,8	107,2	70,6	137,8	69,1	5,7	797,1
2006	17,5	11	81,1	110,9	74,8	123,9	34,3	42	36,7	133,7	69,8	7	742,7
2007	0	0	19,6	48,5	82,1	148,4	95,6	185,2	89,6	53,7	45,1	5,2	773,0
2008	6,3	4	10,4	42,6	92,3	126,7	71,7	75,3	80,4	79,8	210,7	5,2	805,4
2009	12,7	7	63,4	55,3	95	140,3	67,4	83,9	37,2	5,4	20,2	0,5	588,3
2010	0	5,3	12,3	113,3	142,1	103,4	207	52,1	17,8	82,6	173,9	34,5	944,3
2011	1	44,5	98	193,1	270,6	48,7	78,1	36,3	121,8	88,6	48,5	53,2	1082,4
2012	20,6	7	44,6	222,7	26	82,3	63,2	63,1	61,8	110,3	60,3	15,6	777,5
2013	0	36	14,4	71,9	103	56,3	152,6	83,4	34,9	36	95,8	27,7	712,0
													841,8
PROMEDIO MESES	10,4	23,6	48,6	104,0	114,5	98,2	101,3	85,3	78,8	81,3	70,3	25,7	

Tabla 50. Completado de datos estación Pesca

PESCA													
AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	Anual corregido
1998	5	17,1	50,1	62	188,3	85,5	153,8	81,1	55,6	67,2	48,4	44,3	858,4
1999	18,4	105,5	43,2	66,4	82,3	93,9	69,9	38,7	148,3	79,5	70,9	46,2	863,2
2000	39,9	57,5	58,4	36,6	93,2	76,7	62,1	66,4	111,8	71,7	36,7	17,3	728,3
2001	0,2	32,4	76,2	15,2	120,7	49,6	58,6	37,3	75,6	109,2	68,3	52,9	696,2
2002	1	1,3	68,1	96	104	92,7	24,6	62,5	17	76	16,8	7	567,0
2003	0	6,5	19	141,2	69	37	82,3	5	98,2	208	94,2	19	779,4
2004	1,7	15,7	24,2	101,9	120,8	30,6	95	67,6	62,3	93,5	40,5	14,6	668,4
2005	19,7	11,6	31,2	98,5	123,1	48,2	30,5	52,3	34,4	126,7	64,6	16,7	657,5
2006	21,9	0,7	129	85,6	97	93,2	42,7	45	27	119,1	55,5	30,7	747,4
2007	15,1	0	19,6	28,1	62,9	36	13,7	54,9	30,6	61,4	38,8	5,7	366,9
2008	4,1	2,5	22,4	29,5	64,0	87,9	49,7	58,4	55,8	55,4	94,6	11,3	535,6
2009	8,8	15	43,1	35,1	63,1	91,2	8,1	47,5	29,3	3,7	14,0	0,8	359,8
2010	0	0	23,4	64,0	88,8	80,8	54,8	67,7	45,8	69,1	74,9	29,2	598,5
2011	5,7	81,9	114,9	180,9	175,3	65,6	64,2	52,9	88,7	123,4	117,7	49,8	1121,0
2012	11	16,3		187,5	43,2	70,9	81,8	52,4	23,3	106,1	59,5	29	681,0
2013	0	48,9	27,9	80,1	87	24,3	96,1	41,3	39,3	52	98,4	10,5	605,8
													677,1
PROMEDIO MESES	9,5	25,8	50,0	81,8	98,9	66,5	61,7	51,9	58,9	88,9	62,1	24,1	

Anexo 2 Estación caudal Desaguadero

Tabla 51 Estación de Caudal de Desaguadero

FECHA DE	PROCESO	16/07/2014	ESTACION :		35097010	DESAGUADERO							
LATITUD	529	N		TIPO	EST	LM		DEPTO	BOYACA	FECHA-INSTALACION			1964-FEB
LONGITUD	7256	W		ENTIDAD	01	IDEAM		MUNICIPIO	AQUITANIA	FECHA-SUSPENSION			
ELEVACION	3007	m.s.n.m		REGIONAL	06	BOYACA		CORRIENTE	OLARTE				

AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	
1998	0,09	0,05	0,06	0,18	1,300	2	4,870	2,240	1,400	0,22	0,16	0,07	1,05
1999	0,026	0,044	0,184	0,62	0,78	1	2,800	3,357	2,751	0,969	0,621	0,71	1,16
2000	0,13	0,102	0,073	0,073	0,657	0,87	1,207	1,856	1,887	1,242	1,541	0,229	0,82
2001	0,081	0,061	0,035	0,029	0,309	0,673	0,88	2,299	1,057				0,6
2002	0	0	0	0	0,1	2,000	0,8	2,000	1,200	0,5	0,2	0	0,57
2003				0,451	1,236	1,104	2,510	1,166	1,450	0,714	0,911	0,389	1,1
2004	0,201	0,171	0,124	0,459	1,537	1,624	1,458	3,946	1,511	0,565	0,624	0,215	1,04
2005	0,177	0,187	0,112	0,183	0,778	1,151	1,291	1,877	0,907	0,457	0,323	0,145	0,63
2006	0,1	0,094	0,112	0,224	0,343	1,139	2,050	1,483	0,474	0,71	0,756	0,287	0,65
2007	0,172	0,126	0,128	0,182	0,401	1,342	1,355	4,592	1,091	0,529	0,416	0,242	0,88
2008	0,219	0,189	0,086	0,059	0,838	0,35	0,232	0,187	0,185	0,142	0,193	0,092	0,23
2009	0,06	0,048	0,072	0,079	0,333	0,527	0,338	0,382	0,186	0,184	0,201	0,092	0,21
2010	0,078	0,074	0,078	0,163	0,301	0,33	0,84	0,195	0,214	0,192	0,706	0,272	0,29
2011	0,135	0,128	0,281	0,984	1	0,89	0,686	0,615	2,426	1,660	1,040	0,858	0,92
2012	0,392	0,248	0,296	*	*	*	*	*	*	*	*	*	0,31

MEDIOS	0,133	0,109	0,117	0,263	0,733	1,069	1,523	1,871	1,196	0,622	0,592	0,277	0,71
MAXIMOS	0,392	0,248	0,296	0,984	1,537	2,000	4,870	4,592	2,751	1,660	1,541	0,858	4,87
MINIMOS	0	0	0	0	0,1	0,33	0,232	0,187	0,185	0,142	0,16	0	0

Anexo 3. Parámetros para determinar número de curva en cuencas

Tabla 52. Parámetros para la asignación del número de curva

Cubierta del suelo			Número de curva Correspondientes a los grupos hidrológicos del suelo			
Clase	Laboreo	condiciones hidrológicas para la infiltración	a	b	c	d
Barbecho			77	86	91	94
Cultivos alineados	r	pobres	72	81	88	91
	r	buenas	67	78	85	89
	c	pobres	70	79	84	88
	c	buenas	65	75	82	86
	c-t	pobres	66	74	80	82
	c-t	buenas	62	71	78	81
Cultivos no alineados o con surcos pequeños mal definidos	r	pobres	65	76	84	88
	r	buenas	63	75	83	87
	c	pobres	63	74	82	85
	c	buenas	61	73	81	84
	c-t	pobres	61	72	79	82
	c-t	buenas	59	70	78	81
Cultivos densos de leguminosas o prados en alternativa	r	pobres	66	77	84	88
	r	buenas	58	72	81	85
	c	pobres	64	75	83	85
Pastizales	c	buenas	55	69	78	83
	c-t	pobres	63	73	80	83
	c-t	buenas	51	67	76	80
	.	pobres	68	79	86	89
	.	regulares	49	69	79	84
	.	buenas	39	61	74	80
	c	pobres	47	67	81	88
	c	regulares	25	59	75	83
	c	buenas	6	35	70	79
Prados, permanentes montes con pastos (ganadero-forestal)		.	30	58	71	78
		pobres	45	66	77	83
		regulares	36	60	73	79
		buenas	25	55	70	77
Bosques (forestales)		muy pobres	56	75	86	91
		pobres	46	68	78	84
		regulares	36	60	70	76
		buenas	26	52	63	69
		muy buenas	15	44	54	61
Caseríos			59	74	82	86
Caminos de tierra			72	82	87	89
Caminos en firme			74	84	90	92

Anexo 4 Análisis de consistencia

Tabla 53 Análisis de consistencia para la complementación de
Datos de las cartas de la zona de estudio.
(Cartas mensuales multianuales)

Anual				Acumulados			
potrerito	Sisbaca	pesca	promedio	potrerito	Sisbaca	pesca	promedio
1012,5	1803,6	858,4	1224,8	1012,5	1803,6	858,4	1224,8
956,4	1804,1	863,2	1207,9	1968,9	3607,7	1721,6	2432,7
868,9	1644,3	728,3	1080,5	2837,8	5252,0	2449,9	3513,2
696,8	1487,8	696,2	960,3	3534,6	6739,8	3146,1	4473,5
754,1	1303,4	567,0	874,8	4288,7	8043,2	3713,1	5348,3
992,2	1175,6	779,4	982,4	5280,9	9218,8	4492,5	6330,7
965,7	1185,0	668,4	939,7	6246,6	10403,8	5160,9	7270,4
797,1	1544,9	657,5	999,8	7043,6	11948,7	5818,4	8270,3
742,7	978,6	747,4	822,9	7786,3	12927,3	6565,8	9093,2
773,0	1278,3	366,9	806,1	8559,3	14205,6	6932,7	9899,2
805,4	1156,9	535,6	832,6	9364,7	15362,5	7468,3	10731,8
588,3	862,4	359,8	603,5	9953,0	16224,9	7828,1	11335,3
944,3	1454,1	598,5	999,0	10897,4	17679,0	8426,5	12334,3
1082,4	1240,3	1121,0	1147,9	11979,7	18919,4	9547,5	13482,2
777,5	1369,1	681,0	942,5	12757,2	20288,4	10228,5	14424,7
712,0	981,9	605,8	766,6	13469,2	21270,3	10834,3	15191,3

Fuente: Autor

Anexo 5. Parámetros hidrológicos

Tabla 54.
Estación limnimétrica desaguadero
Periodo (1998-2012)

Mes	Caudales medios m³/s
Enero	0,133
Febrero	0,109
Marzo	0,117
Abril	0,263
Mayo	0,733
Junio	1,069
Julio	1,523
Agosto	1,871
Septiembre	1,196
Octubre	0,622
Noviembre	0,592
Diciembre	0,277
Anual	0,71

Anexo 6 Precipitación Areal microcuenca Olarte

Tabla 59 Precipitación areal Microcuenca Olarte

PRECIPITACION AREAL OLARTE mm	
Enero	12,1
Febrero	25,0
Marzo	51,6
Abril	104,4
Mayo	126,2
Junio	112,1
Julio	112,7
Agosto	103,2
Septiembre	90,6
Octubre	90,2
Noviembre	71,5
Diciembre	27,3

Anexo 8 Participaciones y publicaciones

Participación en:

- Red colsi nodo boyacá “los semilleros de investigación, un estilo de vida” mayo 7, 8 y 9 de 2014 universidad pedagógica y tecnológica de colombia sede tunja.
- xvii encuentro nacional y xi internacional de semilleros de investigación redcolsi octubre 9 al 12 de 2014 universidad santo tomas seccional tunja.
- 1ra feria de la ciencia realizada el día 25 de septiembre de 2014 en la sede central de la universidad a santo tomas, tunja.
- 1ra feria de la ciencia realizada el día 25 de septiembre de 2014 en la sede central de la universidad a santo tomas, tunja.