Análisis detallado de amenaza de inundación de la corriente hídrica río negro en el casco urbano del municipio de Rionegro- Santander, utilizando modelación hidráulica bidimensional.

Jenny Fabiola Navarro Carrillo

Trabajo de Grado para Optar el título de Magister en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental

Director

Juan Carlos Forero Sarmiento

Ingeniero Civil, Magister en Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Maestría en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

*A **Dios** por su grandeza y misericordia, por ser mi guía y maestro,*

A mi hija Luciana por ser el motor de mi vida

A mi familia por su apoyo incondicional,

*A mi amigo **Miguel** por creer siempre en mí y apoyarme en este proceso*

*A mis amigos **Paolo, Silvia, Diana, Sebastián** y **Andrés**, sin ustedes esta experiencia no hubiese sido la misma,*

A mis docentes, compañeros y finalmente a la Universidad Industrial de Santander.

Para ti Con todo mi ♥

4 *El **amor** es paciente, es bondadoso. El **amor** no es envidioso ni jactancioso ni orgulloso.*

5 *No se comporta con rudeza, no es egoísta, no se enoja fácilmente, no guarda rencor.*

6 *El **amor** no se deleita en la maldad, sino que se regocija con la verdad.*

7 *Todo lo disculpa, todo lo cree, todo lo espera, todo lo soporta.*

1 Corintios 13:4-7

Tabla de contenido

Introducción 14

1 Objetivos 17

1.1 Objetivo General 17

1.2 Objetivos Específicos 17

2 Marco Conceptual 18

2.1 Inundaciones 18

2.1.1 Tipos de inundaciones 18

2.1.2 Efectos de las inundaciones 19

2.2 Amenazas Naturales 20

2.2.1 Amenaza por inundación 20

2.2.2 Zonificación de la Amenaza por Inundación 21

2.3 Modelo Hidrológico 21

2.3.1 Modelo lluvia Escorrentía 22

2.4 Modelación Hidráulica 22

2.5 Modelo bidimensional (2d) del flujo en lámina libre en aguas poco profundas en Iber 23

2.6 Mapa de amenaza de inundación 25

2.7 Mapa de zonificación de amenaza por inundación 26

2.8 Áreas con condición de amenaza. 26

2.9 Áreas con condición de riesgo. 26

3 Estado del Arte 27

4 Metodología 31

4.1 Recopilación de información 31

4.2 Hidrológica 33

4.2.1 Caracterización de las subcuenca 34

4.2.2 Información hidrológica 38

4.2.3 Procesamiento estadístico de la información pluviométrica 41

4.2.4 Modelo lluvia-escorrentía 55

4.2.5 Modelo HEC-HMS 65

4.2.6 Estimación de caudales 66

4.2.7 Caudales extremos a partir de información hidrométrica. 68

4.2.8 Caudal adoptado 70

4.3 Hidraulica 75

4.4 Modelo geométrico y obtención del RTIN 76

4.5 Aforos 77

4.6 Condiciones de Contorno 78

4.6.1 Condiciones de entrada del modelo 79

4.6.2 Condiciones de salida del modelo 79

4.7 Condiciones Iniciales 79

4.8 Generación de la malla de cálculo 80

4.9 Coeficiente de Manning 81

4.9.1 Valores n de las planicies de inundación 84

4.10 Caudales 87

4.11 Resultados del modelo hidráulico 88

4.11.1 Verificación del modelo hidráulico 88

4.11.2 Profundidades de la lámina de agua y Velocidades de flujo 90

4.1 Mapa de zonificación de amenaza por inundación 94

5 Resultados y Discusiones 97

5.1 Áreas con condición de amenaza. 99

5.2 Áreas con condición de riesgo. 99

6 Conclusiones 101

7 Recomendaciones 106

Referencias Bibliográficas 108

Lista de tablas

Tabla 1. Información recopilada 32

Tabla 2. Caracterización morfométrica de la cuenca 38

Tabla 3. Localización de Estaciones Pluviométricas 39

Tabla 4. Estado de operatividad de las Estaciones Pluviométricas 41

Tabla 5. Valores Kn para la prueba de datos dudosos 42

Tabla 6. Prueba de datos dudoso precipitación máxima en 24 horas 43

Tabla 7.Valores estadísticos de referencia para la prueba Kolmogorov-Smirnov 46

Tabla 8. Prueba de bondad de ajuste precipitación máxima en 24 horas 46

Tabla 9. Valores extremos de precipitación máxima en 24 horas para diferentes periodos de retorno 47

Tabla 10. Valores medios de precipitación máxima en 24 horas por microcuenca. 48

Tabla 11. Valores de precipitación máxima promedio anual en 24h a nivel multianual. 50

Tabla 12. Valores medios anuales de precipitación máxima de 24 horas representativos por microcuenca. 51

Tabla 13. Factores de reducción espacial 53

Tabla 14. Valores medios anuales de precipitación máxima de 24 horas representativos por microcuenca con reducción espacial. 53

Tabla 15. Valores de los coeficientes a, b, c y d para el cálculo de las curvas de intensidad-duración-frecuencia, IDF, para el área de estudio de las Subcuenca de Rionegro. 54

Tabla 16. Tipos de suelo en el Departamento de Santander a escala 1:100.000. IGAC.2002 56

Tabla 17.Grupos Hidrológicos 57

Tabla 18.Porcentaje de Grupos Hidrológicos – Textura de Suelos adoptadas 57

Tabla 19.Porcentaje de Ocupación de Unidades de Uso y Cobertura adoptadas..... 59

Tabla 20. Relación de las precipitaciones registradas respecto a los valores extremos de precipitación máxima en 24 horas. 60

Tabla 21. Valores totales diarios de precipitación registrados en días con eventos de inundación reportados. 61

Tabla 22. Precipitaciones totales diarias registradas en días previos al reporte de inundaciones en la ribera del río Negro. 61

Tabla 23 Condiciones de humedad antecedente en la subcuenca de Rio Negro. 62

Tabla 24. Valores de número de curva por Microcuenca 63

Tabla 25. Valor de Tiempo de Retardo SCS..... 64

Tabla 26. Valor de Tiempo de Retardo Snyder..... 64

Tabla 27. Coeficiente de Almacenamiento 64

Tabla 28. Caudales Máximos por periodo de retorno de la Salida Total de la subcuenca del Rio Negro (CN-CAH (I)) 66

Tabla 29. Caudales Máximos por periodo de retorno de la Salida Total de la subcuenca del Rio Negro (CN-CAH (II)) 66

Tabla 30. Caudales Máximos por periodo de retorno de la Salida 1 de la subcuenca del Rio Negro (CN-CAH (I)) 67

Tabla 31. Caudales Máximos por periodo de retorno de la Salida 1 de la subcuenca del Rio Negro (CN-CAH (II))..... 67

Tabla 32. Prueba de bondad de ajuste Caudales máximos Estación Puente Sardinas. .. 70

Tabla 33. Caudales máximos para diferentes periodos de retorno de la estación hidrométrica Puente Sardinas – Quebrada Santa Cruz 70

Tabla 34. Caudales máximos para diferentes periodos de retorno Microcuenca Santa Cruz –Transposición de datos de caudal de la estación Puente Sardinas. 72

Tabla 35 Caudales Máximos por periodo de retorno de la Salida de la Microcuenca Santa Cruz (CN-CAH (I)) Modelos hidrogramas unitarios. 73

Tabla 36. Caudales Máximos adoptados por periodo de retorno subcuenca del Rio Negro. 74

Tabla 37. Caudales Máximos Adoptados por periodo de retorno de la salida total de la subcuenca del Rio Negro..... 74

Tabla 38. Caudales Máximos Adoptados por periodo de retorno de la Salida 1 de la subcuenca del Rio Negro..... 74

Tabla 39. Ubicación de sección de aforos 77

Tabla 40. Tabla de aforos..... 77

Tabla 41.Valores para el cálculo del coeficiente de rugosidad mediante la ecuación de Cowan. 83

Tabla 42. Valores para el cálculo del coeficiente de rugosidad mediante la ecuación de Cowan a lo largo del cauce canal del Rio Negro. 84

. Tabla 43. Valores para el cálculo del coeficiente de rugosidad mediante la ecuación de Cowan en la planicie de inundación. 85

Tabla 44. Valores para el cálculo del coeficiente de rugosidad, librería de usos de suelo IBER..... 85

Tabla 45. Valores pico de caudales por periodo de retorno de la Salida 1 de la subcuenca del Rio Negro..... 88

Tabla 46. Niveles de severidad de la Inundación. 95

Tabla 47.Áreas de ocupación de las categorías de amenaza por inundación..... 97

Tabla 48.Áreas de ocupación de las categorías de condición de amenaza y condición de riesgo por inundación..... 100

Lista de figuras

Figura 1. Área de estudio Subcuenca Rio Negro 37

Figura 2. Localización de Estaciones Pluviométricas. 40

Figura 3. Distribución espacial de Valores Medios Anuales de precipitación máxima en 24 H. 50

Figura 4. Modelo Hidrológico Subcuenca Rio Negro 65

Figura 5. Estación Limnigrafica Puente Sardinas, Corriente Quebrada Santa Cruz 68

Figura 6. Área de drenaje al punto de salida de la Estación Limnigráfica Puente Sardinas 69

Figura 7. Modelo Digital de Elevaciones / TIN 76

Figura 8. Malla de cálculo -RTIN 81

Figura 9. Usos del suelo ingresados en el modelo Iber 86

Figura 10. Usos del suelo integrados en la malla de cálculo 86

Figura 11. Hidrogramas ingresados en el modelo Iber 88

Figura 13. Sección de calado para un Q: 7.73 $m3s$ 89

Figura 14.Viviendas afectadas por ola invernal 2010-2011 90

Figura 15.Viviendas afectadas por ola invernal 2010-2011 91

Figura 16.Registro fotográfico Sector Puente vehicular sobre el cauce del rio Negro . 92

Figura 17. Profundidades de la lámina de agua para periodo de retorno de 25 años en el sector Puente vehicular sobre el cauce del rio Negro 92

Figura 18.Efectos de *represamiento causados en el sector del Puente vehicular sobre el cauce para periodo de retorno de 100 años*..... 93

Figura 17. Gráfica obtención de niveles de severidad en inundación 96

Figura 18. Categorización de niveles de amenaza 96

Figura 30. Distribución espacial de los parámetros de vuelco y deslizamiento 97

Figura 19. Distribución espacial de las categorías de amenaza por inundación 98

Figura 20. Distribución espacial de las zonificación de condición de amenaza y condición de riesgo por inundación 100

Resumen

Título: Análisis detallado de amenaza de inundación de la corriente hídrica río negro en el casco urbano del municipio de Rionegro- Santander, utilizando modelación hidráulica bidimensional.[*1]

Autor: Jenny Fabiola Navarro Carrillo **

Palabras Claves: Inundaciones, análisis hidrológico, modelación hidráulica, amenaza por inundación, condición de amenaza y condición de riesgo.

Descripción: Las inundación generan consecuencias negativas en el paisaje, en los ecosistemas, infraestructuras y seres humanos. En Colombia las fuertes anomalías de precipitación acompañadas de la mala planeación del desarrollo urbanístico, el crecimiento demográfico y el mal uso del suelo, impactan a las comunidades y a los sectores productivos.

El propósito principal fue desarrollar a través de Sistemas de Información Geográfica y software libre de modelamiento hidráulico bidimensional, un mapa para el análisis de tipo predictivo de la amenaza por inundación para el casco urbano del municipio de Rionegro que sirva como herramienta orientativa para una óptima Planeación del Ordenamiento Territorial.

El análisis detallado de amenaza de inundación se basó en criterios históricos, geomorfológicos, hidrológicos e hidráulicos de acuerdo a lo establecido en el Articulo 16 del Decreto 1807 de 2014 compilado en el Decreto 1077 de 2015 , mediante el desarrollo de cuatro etapas; un análisis hidrológico con el fin de determinar los caudales máximos instantáneos de crecientes para diferentes periodos de retorno (10, 25, 50,100 y 500 años) de la subcuenca de Río Negro, una modelación hidráulica bidimensional de la corriente hídrica del Río Negro que colinda con el casco urbano del municipio de Rionegro a fin de determinar la extensión de la inundación, profundidades de la lámina de agua y velocidades de flujo usando el Software libre IBER, para la determinación y categorización de la amenaza por inundación y finalmente la zonificación de las áreas en condición de amenaza y condición de riesgo a las que se encuentra expuesto el casco urbano del municipio de Rionegro asociadas a las crecientes de la corriente hídrica objeto de estudio.

---

[*]Trabajo de grado

[**]Facultad de Ingeniería Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Maestría en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental. Director: MSc. Juan Carlos Forero Sarmiento

Abstract

Título: Análisis detallado de amenaza de inundación de la corriente hídrica río negro en el casco urbano del municipio de Rionegro- Santander, utilizando modelación hidráulica bidimensional.[*2]

Autor: Jenny Fabiola Navarro Carrillo **

Keywords: Floods, hydrological analysis, hydraulic modeling, flood hazard, hazard condition and risk condition.

Description: Floods generate negative consequences on the landscape, ecosystems, infrastructures and human beings. In Colombia, strong rainfall anomalies accompanied by poor planning of urban development, demographic growth and poor land use, impact communities and productive sectors.

The main purpose was to develop, through Geographic Information Systems and two-dimensional hydraulic modeling free software, a map for the predictive analysis of the threat of flooding for the urban area of the municipality of Rionegro that serves as an orientation tool for optimal Planning. of the Territorial Order.

The detailed flood threat analysis was based on historical, geomorphological, hydrological and hydraulic criteria in accordance with the provisions of Article 16 of Decree 1807 of 2014 compiled in Decree 1077 of 2015, through the development of four stages; a hydrological analysis in order to determine the maximum instantaneous flows of floodwaters for different return periods (10, 25, 50,100 and 500 years) of the sub-basin of Río Negro, a two-dimensional hydraulic modeling of the hydric current of the Río Negro that borders with the urban area of the municipality of Rionegro in order to determine the extent of the flood, depths of the water surface and flow velocities using IBER Free Software, for the determination and categorization of the flood threat and finally the zoning of the areas in a condition of threat and a condition of risk to which the urban area of the municipality of Rionegro is exposed, associated with the rising waters of the water flow under study.

[*]Trabajo de grado

[**]Facultad de Ingeniería Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Maestría en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental. Director: MSc. Juan Carlos Forero Sarmiento

Introducción

Los recursos hídricos son parte fundamental para el desarrollo de los seres vivos, sin embargo su deterioro es una constante en aumento a causa de las acciones antrópicas que han desarrollado alteraciones en las funciones geomorfológicas, ecológicas y bioclimáticas que directamente o indirectamente influyen en los sistemas fluviales.

Los procesos hidrológicos han venido desarrollando anomalías, representadas tanto en precipitaciones intensas que forman crecientes, como en sequías prolongadas. Tanto las crecientes como las sequías tienen efectos desfavorables y conllevan generalmente a importantes consecuencias socioeconómicas y medioambientales, entre los cuales se encuentran pérdidas de vidas y bienes, migración de humanos y animales, la degradación del medio ambiente, escasez de alimentos, energía y agua potable, propagación de pestes y enfermedades y dificultades para satisfacer otras necesidades básicas. Es así que la estimación hidrológica e hidráulica de las crecientes es necesaria en la planeación y el desarrollo de ciudades, en el diseño, construcción y operación de obras hidráulicas, así como en el manejo de las planicies de inundación (Ruiz Vera, 2015).

Según datos de la Organización Meteorológica Mundial aproximadamente el 70 % de los desastres en el mundo está relacionado con fenómenos hidrometeorológicos y las inundaciones representan uno de los mayores peligros naturales para el desarrollo sostenible (Organización Meteorológica Mundial, 2009). Colombia es un país altamente propenso a los desastres, donde las inundaciones son el evento más frecuentemente observado(ONU et al., 2007).

Las olas invernales que han acontecido en Colombia han sido especialmente destructivas en el departamento de Santander, Los municipios que conforman este departamento, han venido siendo afectados de manera importante por motivos de inundaciones, pues esto ha generado daños y pérdidas tanto materiales como de vidas de seres humanos. Lo anterior se debe a la presión existente sobre las rondas de aislamiento de las corrientes hídricas debido a la presencia de barrios asentados en dichas zonas, que incrementan la vulnerabilidad de la infraestructura de las mismas.

En la ola invernal que aconteció en el 2005 se afectaron 23 municipios en el departamento de Santander: Bucaramanga, Girón, Lebrija, Barrancabermeja, Betulia, Bolívar, Cimitarra, El Carmen, El Cerrito, El Playón, Floridablanca, Guacamayo, Landázuri, Piedecuesta, Puerto Parra, Puerto Wilches, Rionegro, Sabana de Torres, San Vicente de Chucurí, Santa Helena del Opon, Simacota, Socorro y Zapatoca. El número de familias damnificadas censadas en los municipios mencionados anteriormente, fueron aproximadamente 8798, el número de muertos 44 y la morbilidad hospitalaria 2594 (Observatorio de Salud Pública de Santander, 2005), teniendo en cuenta que el número de hogares censados en el departamento de Santander es de 799079 y que el promedio de personas por hogar es de 3.97 según el Censo 2005 (Departamento Administrativo Nacional de Estadística-DANE, 2005), se puede concluir que aproximadamente el 1.10% de las familias Santandereanas fueron damnificadas.

En el municipio de Rionegro fueron aproximadamente 85 familias damnificadas (Observatorio de Salud Pública de Santander, 2005) . La cabecera municipal del de Rionegro cuenta con 1457 hogares censados y en el área rural es de 5120, el promedio de personas por hogar en Rionegro es de 4.1 según el Censo 2005 (Departamento Administrativo Nacional

de Estadística-DANE, 2005), así las cosas se podría concluir que aproximadamente el 1.29 % de la familias del municipio de Rionegro fueron damnificadas.

Por su parte la ola invernal que aconteció en Colombia durante el segundo semestre de 2010 y los primeros meses de 2011 afecto a más de 3.3 millones de personas, 1 millón de hectáreas de cultivo, 448 personas muertas, 12.908 viviendas destruidas y 441.579 viviendas averiadas(Departamento Nacional de Planeación-DNP, 2011). Según el Centro de Información para el Reporte de Emergencias –CIRE el 20 de Diciembre de 2010 se presentó inundaciones causadas por la creciente del caudal de Río Negro en los sectores ribereños del casco urbano del municipio de Rionegro y sobre la vía Bucaramanga- Rionegro en los sectores conocidos como Barcelona, Grama y Puerto Arturo. Asimismo se presentó deslizamiento de lodos sobre vía Bucaramanga – Rionegro a causa del desbordamiento del Río Negro, provocando caída de la banca cerca al sector conocido como Sardinas y en la zona aledaña a la vereda Puerto Arturo(Centro de Información para el Reporte de Emergencias-CIRE, 2010).

En razón de lo anterior el municipio de Rionegro se ve en la necesidad de comprender el funcionamiento de sus sistemas fluviales principalmente el afluente Río Negro y su impacto en el área del casco urbano, a fin de aplicar modelos que sirvan como herramientas de predicción y estimación de crecientes y llanuras de inundación que orienten la toma de decisiones con el objetivo de prevenir, mitigar o reducir los riesgos provocados por el asentamiento de las comunidades en cercanías de la ribera del río con el ánimo de orientar en la planeación de atención de desastres y emergencias de tipo natural o antrópicas.

1 Objetivos

1.1 Objetivo General

Desarrollar a través de Sistemas de Información Geográfica y software de modelamiento hidráulico bidimensional, un análisis detallado de amenaza de inundación de la corriente hídrica del río Negro en el casco urbano del municipio de Rionegro.

1.2 Objetivos Específicos

Realizar análisis hidrológico con el fin de determinar los caudales máximos instantáneos de creciente para diferentes periodos de retorno (10, 25, 50,100 y 500 años) de la subcuenca de Río Negro.

Realizar la modelación hidráulica bidimensional de la corriente hídrica del río Negro en el casco urbano del municipio de Rionegro, a fin de determinar la extension de la inundación, profundidades de la lámina de agua y velocidades de flujo, utilizando la herramienta computacional ÍBER.

Generar los mapas de zonificación de amenaza, condición de amenaza y condición de riesgo por inundación por desbordamiento del río Negro en el sector del casco urbano del municipio de Rionegro a partir de la modelación hidrológica e hidráulica a escala 1:1000.

2 Marco Conceptual

Para efectos del siguiente trabajo es importante definir algunos conceptos fundamentales, que servirán como guía para la comprensión del presente trabajo de aplicación;

2.1 Inundaciones

Las inundaciones son fenómenos naturales que hacen parte de la dinámica de una corriente, provocadas por la persistencia de las lluvias en una región determinada, generando el aumento progresivo del nivel de las aguas contenidas dentro de un cauce, superando la altura de las orillas naturales o artificiales, ocasionando desbordamiento y dispersión del agua sobre la llanura de inundación y las zonas aledañas a los cursos del agua normalmente no sumergidos.(Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia-IDEAM, 2012).

2.1.1 Tipos de inundaciones

En general existen tres tipos de inundaciones: Naturales, Inducidas y Antrópicas. Las inundaciones naturales son básicamente de dos tipos: terrestres, las cuales se presentan cuando las aguas dulces anegan territorios del interior de los continentes; y litorales o costeras, en las que las aguas marinas invaden los sectores limítrofes con el dominio terrestre (Instituto de Hidrología y Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM & Centro Nacional de Modelamiento-CNM, 2017).

El origen de las inundaciones terrestres se debe al desbordamiento de corrientes fluviales o bien por el encharcamiento de zonas planas o endorreicas sin vinculación con la red fluvial, tanto por represamientos de la precipitación sin que circule sobre la superficie terrestre (precipitación in situ, sobrealimentación de un lago) como de origen hidrogeológico asociado a la elevación de la superficie freática sobre la superficie del terreno(Instituto de Hidrología

y Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM & Centro Nacional de Modelamiento-CNM, 2017).

2.1.2 Efectos de las inundaciones

Las inundaciones, en especial la energía que movilizan pueden hacer variaciones en el paisaje, son esenciales en los ciclos vitales de los ecosistemas fluviales y de ribera, y favorecen la productividad de las llanuras de inundación, también pueden ocasionar daños sobre la infraestructura, los bienes y las personas. A continuación se presentan algunas de las consecuencias(Sedano Cruz, 2013).

- En el paisaje: Las inundaciones tienen un alto poder de variar el paisaje, tanto en el mismo cauce, como en las áreas potencialmente inundables (terrazas fluviales, abanicos aluviales, llanos de inundación, deltas, humedales, depresiones, endorreicas, depresiones kársticas). La capacidad de alteración del paisaje, depende tanto de las características de la cuenca, la velocidad del flujo, la pendiente, la concentración de sedimentos y el nivel del agua, etc. Es usual que se presente formación de cárcavas, desviaciones de curso, deslizamientos, etc.
- En los ecosistemas tienen efectos sobre el crecimiento y muerte de muchas especies en las riberas, tras una inundación se renueva el ambiente fluvial y los hábitats, se incrementa la fertilidad del suelo, se limpian los cauces, se renuevan aguas estancadas y se recargan los acuíferos.
- En la infraestructura: El desarrollo de infraestructura en zonas propensas a inundación incrementa el riesgo de daños parciales o totales sobre vías, sistemas de telecomunicaciones, viviendas, industrias, cultivos, puentes, presas, estaciones de aforo, bocatomas, redes de agua potable, tuberías, embalses, canales , etc.

- En las personas: Como consecuencia de las inundaciones se produce una paralización de actividades productivas con las respectivas pérdidas económicas directas e indirectas, detrimento de la calidad de vida, ralentización del desarrollo económico y del bienestar, conflictos sobre la propiedad, migraciones y desplazamiento, efectos sobre la salud pública, propagación de epidemias y pérdidas de vidas humanas.

2.2 Amenazas Naturales

Son entendidas como aquellos elementos del ambiente biofísico que son peligrosos al hombre y que están causados por fuerzas extrañas a él. Diferentes estudios revisados acogen y trabajan el concepto de amenazas naturales como a todos los fenómenos atmosféricos (granizo, huracanes, incendios, tornados y tormentas tropicales), hidrológicos (inundaciones, desertificaciones, salinización, sequias, desbordamiento de ríos, erosiones sedimentación), geológicos (especialmente sísmicos y volcánicos) y a los incendios que por su ubicación, severidad y frecuencia, tienen el potencial de afectar adversamente al ser humano, a sus estructuras y a sus actividades. Según el contexto, se puede considerar que una amenaza actúa sola o en sinergia con otras, tanto en lo que la origina como en los impactos que genera(Chardon & González, 2002).

2.2.1 Amenaza por inundación

La amenaza por inundación se manifiesta por anomalías de precipitación que conducen al incremento periódico de la lámina de agua en los ríos, ocasionando que el caudal exceda la capacidad del cauce y generando efectos negativos cuando existe ocupación indiscriminada de las áreas ribereñas de los principales efluentes de agua e intervenciones en las márgenes

de estos drenajes(Instituto de Hidrología y Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM & Centro Nacional de Modelamiento-CNM, 2017).

2.2.2 Zonificación de la Amenaza por Inundación

En la gran mayoría de las clasificaciones de la zonificación de la amenaza por inundación que se presentan a nivel nacional e internacional está basada en análisis de profundidad de lámina de agua y velocidad de flujo; no obstante los valores que se indican son referencias que deben ser analizados para cada caso en particular bajo consideraciones que permitan conocer la forma en que se presenta los procesos de inundación (Instituto de Hidrología y Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM & Centro Nacional de Modelamiento-CNM, 2017).

2.3 Modelo Hidrológico

Se define como una representación simplificada de un sistema real complejo llamado prototipo, bajo forma física o matemática. De manera matemática, el sistema real está representado por una expresión analítica. En un modelo hidrológico, el sistema físico real que generalmente se representa es la “cuenca hidrográfica” y cada uno de los componentes del ciclo hidrológico. De esta manera un modelo matemático nos ayudará a predecir resultados en materia de hidrológica, por lo que es necesario tener conocimiento de entradas (inputs) al sistema y salidas (outputs) a partir del sistema, para verificar si el modelo es representativo del prototipo. La salida de los modelos hidrológicos varía dependiendo de las metas y objetivos del modelo. Algunos modelos se utilizan para predecir los totales mensuales de escorrentía, mientras que otros están diseñados para ver a las tormentas individuales. El resultado más común es el hidrograma de escurrimiento (Instituto de Hidrología y Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM., 2014).

2.3.1 Modelo lluvia Escorrentía

Los modelos de trasformación lluvia en escorrentía se utilizan cuando no existe la posibilidad de tener registros de caudales de drenaje en la cuenca hidrográfica de interés. Dichos modelos calculan la escorrentía superficial a partir de datos históricos de lluvias de corta duración existentes en el área de estudio, en función de sus características geométricas, de suelo, vegetación y usos de suelo.

Se pueden utilizar métodos tales como, método racional, método de hidrograma escorrentía superficial o modelos computacionales como el HEC-HMS. Cuando las área de drenaje en una cuenca son superiores a 20 Km^2, se sugiere subdividirla en subcuencas y aplicar modelos computacionales, para tener en cuenta el hidrograma de creciente producido por cada una de las subcuencas y su tránsito a través del canal principal de la misma y así obtener el hidrograma resultante en el punto de interés, del cual se extrae el caudal pico para determinado período de retorno. Por tanto el hidrograma total resultante es la suma de las ordenadas de los diversos hidrogramas para cada valor constante de tiempo.(Instituto de Hidrología y Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM & Centro Nacional de Modelamiento-CNM, 2017).

2.4 Modelación Hidráulica

La modelación hidráulica parte de diferentes aproximidades al flujo de agua en la naturaleza (unifásico, bifásico, unidimensional, bidimensional, tridimensional, permanente, no permanente), que simplifican las ecuaciones físicas que lo modelan, cuya resolución permite estimar parámetros tales como extensión de la inundación, profundidad del agua, velocidades, energía cinética e hidrogramas de caudal. En un modelo se necesita la esquematización (resolución espacial y temporal, esquematización de las edificaciones y

otras infraestructuras tales como puentes, etc.) y los procesos tenidos en cuenta (afectación de los vientos, evaporación, etc.) (Instituto de Hidrología y Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM & Centro Nacional de Modelamiento-CNM, 2017).

2.5 Modelo bidimensional (2d) del flujo en lámina libre en aguas poco profundas en Iber

Iber es un modelo numérico (software libre) de simulación de flujo en lámina libre en régimen no permanente, y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial. El modelo Iber consta actualmente de 3 módulos de cálculo principal un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos. Todos los módulos trabajan sobre una malla no estructurada de volúmenes finitos formados por triángulos o cuadriláteros. 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 (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino et al., 2010).

El modulo hidrodinámico resuelve las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad también conocidas como 2D Shallow Water Equations (2D –SWE) o ecuaciones de St. Venant bidimensionales. Estas asumen una distribución de presión hidrostática y una distribución relativamente de la velocidad en profundidad, dicha hipótesis se cumple razonablemente en el flujo en ríos y en corrientes generadas por las mareas en estuarios. Sin embargo puede existir zonas en las no se cumpla debido a flujos locales tridimensionales o a cuñas salinas. En estos casos es necesario estudiar la extensión de dichas zonas y su posible repercusión en los resultados del modelo. En la actualidad, los modelos numéricos basados en las ecuaciones de aguas someras bidimensionales son los más utilizados en estudios de dinámica fluvial y litoral, evaluación de zonas de inundación y cálculo de trasporte de

sedimentos y contaminantes (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino et al., 2010) .

Para poder realizar un cálculo con Iber, se requiere mínimo los siguientes datos (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino et al., 2010):

- **Creación o importación de geometría,** Iber dispone de una interfaz en la cual se puede crear una geometría desde el inicio, dibujando puntos (directamente o entrando coordenadas), líneas y superficies. Por otro lado, desde el menú "Archivo>Importar" se pueden importar distintos formatos estándar (dxf, shapefile, entre otros). Asimismo, a través del menú "Iber_Herramientas" se pueden importar modelos digitales del terreno en formato ASCII de Arc/Info.
- **Asignación de parámetros de entrada,** se debe asignar condiciones de contorno de entrada como caudales totales, específicos o cota de agua, así mismo coeficientes de rugosidad de Manning, condiciones de contorno de salida.
- **Construcción de malla de cálculo,** La malla de cálculo es un elemento fundamental para conseguir buenos resultados. Iber dispone de multitud de maneras de obtener una buena malla de cálculo, y en función de las características del problema un tipo de malla será mejor que otro.
- Iber puede trabajar tanto con elementos triangulares como con cuadriláteros, o con mallas mixtas de triángulos y cuadriláteros. Las mallas de cálculo pueden ser a su vez regulares o irregulares, así como estructuradas o no estructuradas**.**

Como ventaja principal del uso del modelo, es su capacidad de simular con mayor precisión a la realidad todas aquellas situaciones en que el flujo no es exclusivamente unidireccional, siendo muy útil para flujos extendidos donde la variación vertical de la

velocidad es pequeña y donde se presentan geometrías con irregularidades complejas(Van der Marel, 1976).

Como desventajas se reconoce que los problemas de 2D tratados con IBER se resuelven mediante ecuaciones diferenciales realizando discretización mediante el mallado de las superficies, uso de métodos de elementos finitos y métodos de diferencias finitas. Haciendo que el cálculo en este tipo de problemas sea más lento. En estos modelos, la rapidez de cálculo y precisión depende directamente del tamaño de la malla. Además que estrictamente no es útil su uso para casos en los que la velocidad vertical es apreciable como puede ser un vertedero o un orificio sumergido(Van der Marel, 1976).

2.6 Mapa de amenaza de inundación

Los mapas de inundación proveen información gráfica de la inundación esperada (profundidades, extensión, velocidad del flujo, etc.) para un evento de probabilidad dada o varias probabilidades. La información incorporada en un mapa de amenaza de inundación para una probabilidad de ocurrencia dada es: -Extensión de la inundación (áreas cubiertas por el agua) -Velocidad del flujo (m/s) -Profundidad del agua (m) Otros parámetros de amenaza representados en el mapa tales como: -Propagación de la inundación (Km/h) -Profundidad * Velocidad (m*m/s), el cual es un indicador del grado de amenaza. La escala estándar de los mapas de amenaza es de 1:2.000 a 1:25.000. Los mapas cubren principalmente áreas pobladas, desarrolladas o en desarrollo, así como rutas de tráfico. Los mapas de amenaza de inundación proporcionan información básica para desarrollar la orientación técnica sobre varios problemas de manejo de llanuras de inundación y ayudan a las diferentes partes interesadas, incluyendo los gobiernos locales a tomar decisiones en la gestión de inundaciones. Por tanto, son importantes para la evaluación del riesgo de

inundación, el desarrollo de planes de mitigación de inundaciones, la preparación de esquemas de manejo integral del riesgo de inundación y en particular para la planificación urbana local. Los mapas de amenaza de inundación forman la base para los mapas de riesgo de inundación, mapas de emergencia de inundación y otros mapas relacionados. (IDEAM, CNM 2017).

2.7 Mapa de zonificación de amenaza por inundación

Los mapas de zonificación de inundaciones pueden considerarse mapas de amenaza de inundación "adaptados" con fines de planificación. Las zonas muestran las amenazas existentes, clasificadas como amenaza baja, media o alta. Los planificadores se ocupan de localizar áreas con una exposición limitada a los peligros para diversos usos, tales como, los asentamientos humanos, las industrias, la infraestructura y la agricultura (Instituto de Hidrología y Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM & Centro Nacional de Modelamiento-CNM, 2017).

2.8 Áreas con condición de amenaza.

Las áreas en condición de amenaza se delimitan y zonifican con fundamento a la delimitación y zonificación de amenaza para aquellas áreas sin ocupar suelo urbano, de expansión urbana, rural suburbano o centros poblados rurales en las que en la revisión o en la expedición de un nuevo POT se proponga su desarrollo. (Ministerio de Vivienda Ciudad y territorio República de Colombia, 2014).

2.9 Áreas con condición de riesgo.

Las áreas en condición de riesgo se delimitan y zonifican con fundamento en la delimitación y zonificación de amenazas, a fin de priorizar las áreas en las cuales se deben realizar estudios detallados.

La identificación de las áreas con condición de riesgo se realizará a partir del análisis de las áreas zonificadas como de amenaza alta en los estudios básicos, con la información cartográfica (predial o catastral, entre otras) disponible que permita identificar la existencia de elementos expuestos, de áreas urbanizadas, ocupadas o edificadas así como de aquellas en las que se encuentren edificaciones indispensables y líneas vitales (Ministerio de Vivienda Ciudad y territorio República de Colombia, 2014).

3 Estado del Arte

El (Instituto de Hidrología y Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM & Centro Nacional de Modelamiento-CNM, 2017), realizo una Guía metodológica para la elaboración de mapas de inundación la cual contiene algunos enfoques metodológicos para el análisis de inundaciones, con el fin de suministrar una herramienta útil para el desarrollo de investigaciones. Lo anterior en consideración a las condiciones de inundación experimentadas en Colombia durante los años 2010, 2011 y 2012, asociadas con la ocurrencia del evento La Niña, que se caracterizó por anomalías marcadas en el régimen de precipitaciones, lo cual aunado a la falla y rompimiento de diques ocasionó inundaciones con una magnitud superior a los registros históricos recientes. Esta emergencia afectó amplias zonas del país, y tuvo consecuencias económicas, sociales y ambientales severas, por lo que acelero el proceso de promulgación de la Ley 1523 de 2012, por la cual se adoptó la Política Nacional de Gestión de Riesgo y Desastres, en donde el IDEAM hace parte del Comité Nacional para el Conocimiento del Riesgo, el cual es una instancia interinstitucional del sistema nacional que asesora y planifica la implementación permanente del proceso de conocimiento del riesgo.

Es así como el Gobierno Colombiano a través del Departamento Nacional de Planeación (DNP) definió una serie de lineamientos y acciones estratégicas con el fin de garantizar una adecuada Gestión del riesgo de desastres en el marco de una política de "*buen gobierno para comunidades seguras*" (Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014, Cap. VI, Titulo B, numeral 2). Dentro de estos lineamientos se consideró "*fundamental identificar los escenarios de riesgo para la previsión, control y reducción del riesgo de desastres, por tanto, se requiere mejorar el conocimiento del riesgo en el país*", por lo tanto el IDEAM ha venido haciendo parte de las siguientes acciones estratégicas: "*Ampliar, por parte del IDEAM y el Ingeominas, las redes de monitoreo y alerta temprana y actualizar los mapas de amenaza a escalas regionales y locales" y "Diseñar e implementar instrumentos metodológicos para la zonificación de las amenazas, la vulnerabilidad y el riesgo en el ámbito municipal, con el fin de generar técnicas idóneas de evaluación y análisis del riesgo, a cargo de la DGR-MIJ y en coordinación con MAVDT, IDEAM e Ingeominas*" (Instituto de Hidrología y Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM & Centro Nacional de Modelamiento-CNM, 2017).

Dado lo anterior en la guía en mención se incluyen los métodos y/o modelos para el análisis de inundaciones orientado a proveer los resultados específicos para el mapa de inundación requerido en el área de interés, así como los datos disponibles, a partir de un enfoque multimodelo y multidisciplinario, con el fin de que se convierta en una herramienta fundamental para los usuarios finales en los diferentes campos de aplicación, tanto en medidas predictivas (diseño de redes y sistemas de alerta temprana e información hidro-meteorológica), preventivas (diseño de obras, ordenación del territorio, sistemas de aseguramiento, protección civil, educación en el riesgo) y correctivas (planificación de

atención de emergencias, implementación de sistemas de ayuda a los damnificados, declaración de zonas de desastre) (Instituto de Hidrología y Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM & Centro Nacional de Modelamiento-CNM, 2017).

Por otro lado, se han desarrollado modelos hidrológicos e hidráulicos que permiten determinar el comportamiento del flujo en los cauces de los ríos, como medio para la predicción y estimación de crecientes y llanuras de inundación, a fin de generar insumos que orienten e integren estrategias y acciones que mitiguen o reduzcan los riesgos que puedan estos significar para la población vulnerable u orientar en la planeación de atención de emergencias y desastres de tipo natural o antrópicos, siendo parte fundamental del plan de desarrollo de los territorios (Ruiz Vera, 2015).

En Colombia se emplea ampliamente el sistema de modelado hidrológico (HEC- HMS) que se usa para simular la respuesta hidrológica de una cuenca y el módulo de flujo permanente del (HEC-RAS), para modelar unidimensionalmente la hidráulica del flujo del agua a través de ríos naturales y otros canales(Ruiz Vera, 2015). Como ejemplo reciente de aplicación de estos sistemas en zonas pertenecientes en la región del área de estudio, la Autoridad Ambiental Urbana y la Universidad Industrial de Santander, realizaron la actualización de los estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por inundación del río De Oro (tramo Nuevo Girón – Café Madrid) y del río Frio (tramo PTAR –Girón), contando con un análisis detallado de la amenaza por inundación, donde se construyó un modelo hidrológico con el apoyo del software HEC- GeoHMS, permitiendo simular el comportamiento de la cuenca frente a la ocurrencia de precipitación y así estimar los caudales que ingresan a los tramos de interés de las corrientes estudiadas. Asimismo con base en la información topográfica extraída del modelo digital del terreno del área de estudio y los datos

de caudales estimados, se generó un modelo hidráulico unidimensional con el software HEC-RAS, que permitió obtener datos de velocidades para diferentes periodos de retorno (2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500) (Área Metropolitana de Bucaramanga & Universidad Industrial de Santander, 2018).

No obstante, cada vez se ha hecho más frecuente la elaboración de análisis de inundación con modelos bidimensionales para el cálculo y estimación hidráulica de la crecientes utilizando las ecuaciones de Saint- Venant en dos dimensiones, que representan la dinámica de flujo en cauces naturales. Uno de estos sistema de modelización que tiene una cómoda interfaz y es compatible con los sistemas GIS es el modelo IBER (CEDEX, 2010), como resultado de la fusión del modelo CARPA, Cálculo en Alta Resolución de Propagación de Avenidas, y del modelo Turbillón. CARPA es una herramienta de cálculo numérico del flujo de agua en lámina libre y régimen variable, desarrollado en el grupo de investigación FLUMEN de la E. T. S. de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona (UPC), y Turbillón, diseñado para la simulación de flujo turbulento en lámina libre y régimen no permanente, desarrollado en el GEAMA (Grupo de Enxeñaría da Auga e do Medio Ambiente) de la Universidad de La Coruña. Por tanto, IBER tiene las capacidades de ambos y un ámbito extenso de aplicación como: hidrodinámica fluvial, simulación de rotura de presas, evaluación de zonas inundables, cálculo de transporte de sedimentos y el flujo de marea en estuarios (Fundación Nueva Cultura del Agua FUNCA, 2018). Asimismo, (HEC-RAS) en sus últimas versiones incorporó un modelo de cálculo bidimensional 2D. Sin embargo, IBER es capaz de simular tramos con tuberías que actualmente no pueden simularse con (HEC-RAS) 2D, además que dispone del módulo de turbulencia, el cual permite incluir las tensiones turbulentas en el cálculo hidrodinámico, pudiéndose utilizar para ello diferentes modelos de turbulencia para aguas someras con diferente grado de complejidad (Grupo TYC GIS, 2018).

En Colombia se ha utilizado IBER, como modelo bidimensional 2D, para el Análisis de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo en la Cuenca Alta del Río Bogotá, en el Municipio De Villapinzón, En el Municipio de Riohacha la Guajira se realizó una simulación de la crecientes del Rio Rancheria, tamo el Riíto y el análisis de su influencia sobre las inundaciones en la ciudad de Riohacha y en Santander se utilizó dicha herramienta en la elaboración de un proyecto piloto en el Río Magdalena, sector Yondó – Barrancabermeja con el objeto de identificar las zonas de riesgo por inundación, realizado por la empresa Dopec, S.L, financiado por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, en la Dirección de Gestión Integral de Recurso Hídrico (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino et al., 2015).

4 Metodología

El análisis detallado de amenaza de inundación de la corriente hídrica del río Negro en el casco urbano del municipio de Rionegro se realizó con base en una metodología que inicia con la consulta y recopilación de la información existente de las variables que intervienen dicha amenaza en la zona de estudio y posteriormente se realizó un análisis hidrológico e hidráulico que permitieron determinar y elaborar el mapa de zonificación de amenaza y una delimitación y zonificación de las áreas en condición de amenaza y condición de riesgo.

4.1 Recopilación de información

El presente análisis implicó la recopilación, el levantamiento, el procesamiento y la estructuración de un gran volumen de información topográfica, cartográfica y satelital a diferentes escalas y niveles de detalle. Asimismo información hidrológica, coberturas de la tierra, tipos de suelo y eventos históricos de inundación del área de estudio.

En la **Tabla 1** se presenta las actividades, insumos, productos, con las respectivas fuentes.

Tabla 1. Información recopilada

Actividad a realizar	Insumo	Producto	Fuente
Recolección de cartografía base.	Geodatabase de la cartografía base.	Cartografía básica 1:25.000 en formato geodatabase correspondiente a las planchas 109-II-C ,109-II-D, 109-IV-A Y 109-IV-B del IGAC del área de la subcuenca de Río Negro.	Descargada gratuita de la página web del IGAC (http://www.igac. gov.co/wps/portal/igac/raiz/iniciohome/MapasdeColombia/Descargas).
Recopilación de información hidrológica.	Record IDEAM de las estaciones: Cachiri (23190200), Matanza (23190340), San Ignacio (23190310) ,Tambor El Hda (23190570), Llano de palmas (23190350), Matajira (23190340), Matanza (23190370), Palmas (23190380), El playón (23190140), Portachuelo (23190360) y Vivero Surata (23195090).	Valores medios mensuales de precipitación máxima en 24 horas y precipitaciones totales diarias existentes en la página web del IDEAM de las estaciones en el área de influencia.	Plataforma IDEAM, por solicitud remite de manera gratuita este material técnico de acuerdo con el principio de gratuidad contemplado en la Ley 1712 del 6 de marzo de 2014.
Recopilación de fotografías satelitales, y Modelos de elevación Digital del Terreno (DEM).	Modelos de elevación Digital del Terreno (DEM).	Modelos digitales del terreno por el DEM ALOS PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) en formato CEOS con una resolución radiométrica de 16 bits y una resolución espacial de 12.5 m del área de la subcuenca de Río Negro.	Esta información descargada de la página web https://vertex.daac.asf.alaska.edu/ la cual es el portal de datos de Alaska Satellite Facility para imágenes de la Tierra con sensores remotos.
	Imágenes del Satélite.	Imágenes del Satélite de Google Maps publicadas al año 2019 en el área de influencia.	Descarga libre por medio del software SAS Planet
	Aerofoto No: 686150001506072008-1166 Aerofoto No: 686150001506072008-1167 Ortofotomosaico.	Fotografías áreas nivel de detalle de una resolución espacial de 2m del área de estudio.	Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC.
Recopilación de Información respecto a las coberturas de la tierra de la zona de estudio.	Mapa de Cobertura de la Tierra.	Mapa de Cobertura de la Tierra 2005-2009 a escala 1:100.000 del área de estudio	Elaborados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, cuya descarga gratuita de puede realizar por el Sistema de Información Ambiental de Colombia – SIAC (http://www.siac.gov.co).

Actividad a realizar	Insumo	Producto	Fuente
	Plan de Ordenamiento y Manejo Ambiental – POMCA de la subcuenca de Rio Negro.	Mapa de Coberturas y Uso actual de las tierras 2005-2008 a escala 1:25.000 del área de estudio.	Por solicitud remite de manera gratuita la Corporación Autónoma Regional Para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga – CDMB.
Recopilación de Información respecto tipos de suelo.	Mapa Digital de Suelos del Departamento de Santander.	Mapa temático representa la distribución de las características del suelo a escala 1:100.000 publicado en el año 2002 del área de estudio.	Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC.
Levantamiento de información topográfica y batimétrica.	Topobatimetría a escala 1:1000.	Topobatimetrico de un área aproximada de 70 ha, comprendida entre las coordenadas Norte 1294161 m a la 1296694 m, con secciones transversales máximo de cada 10 metros en un tramo aproximado de 3.30 Kilómetros, tomando como mínimo datos de hasta 7 metros de diferencia de nivel respecto a la cota de fondo del río.	Autor (para geo-referenciar el proyecto se empleó un equipo GPS sub métrico capturando las coordenadas en tiempo real de dos puntos materializados en campo, sirviendo como puntos de partida para el levantamiento topográfico).
Recopilación de eventos históricos (entrevistas a la comunidad-consulta al SGC).	Entrevistas e informe del Centro de Información para el Reporte de Emergencias-CIRE, 2010.	Informe de eventos históricos de inundación.	Autor y Centro de Información para el Reporte de Emergencias-CIRE.

Nota: Autor

4.2 Hidrológica

En este capítulo se presenta el procesamiento de la información hidrológica disponible en el área de estudio, con el objeto de determinar los caudales máximos de diseño.

En el desarrollo del presente estudio hidrológico se realizaron las siguientes actividades:

- Caracterización de las subcuencas que hacen parte del área aferente del estudio
- Compilación de información hidrológica de las estaciones en el área de influencia.

- Procesamiento estadístico de llenado de datos faltantes y prueba de datos dudosos, prueba de bondad de ajuste, con el fin es dar coherencia estadística a la información hidrológica compilada.
- Curvas IDF, con el fin de relacionar la intensidad, duración y la frecuencia de la lluvia con su probabilidad de ocurrencia.
- Análisis de avenidas máximas reportadas
- Distribución espacial de valores extremos de precipitación máxima en 24h
- Hietogramas de diseño, los cuales equivalen a la distribución temporal, de la profundidad de diseño considerada, usada en el modelo hidrológico para la obtención de caudales de diseño.
- Modelo hidrológico, que consiste en la construcción o representación algorítmica de las características físicas de la cuenca para dar solución a los procesos hidrológicos en consideración a través de los modelos lluvia-escorrentía.

4.2.1 Caracterización de las subcuenca

La subcuenca Río Negro se encuentra localizada en jurisdicción de los municipios de Rionegro y Matanza del departamento de Santander; entre las coordenadas 2.354.500 a 2.379.500 m Norte y 4.280.586 a 5.000.176 m Este, según el nuevo origen de proyección cartográfica CTM-12 establecido mediante la Resolución 388 de 2020, y entre las cotas 500 a 3000 m.s.n.m; hidrográficamente se localiza en el área del Magdalena- Cauca(2), zona hidrográfica del Medio Magdalena(23) y subzona del río Lebrija y otros directos al Magdalena (2319), conforme la Resolución 337 de 04 de abril del 1978 del Instituto de Hidrología, Meteorología y adecuación de tierras- HIMAT. Cubre un área de 253,68

kilómetros cuadrados, que corresponde al 2.63% del área total de la subzona del río Lebrija, cuya área total estimada es de 9.642 kilómetros cuadrados, de los cuáles cerca de la mitad se encuentran en el departamento de Santander.

Río Negro está conformada por las microcuencas río Negro Bajo Norte- Sur, Samacá y Santacruz, cuyo el territorio es compartido por los municipios de Rionegro y Matanza, ver Figura 1. La subcuenca está limitada al norte por la subcuenca del río Salamaga, al sur y oriente por la subcuenca del río Surata y al nor-oriente por la subcuenca del río Cachiri, todas de la cuenca del río Lebrija (Corporación para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga, 2008).

Con base en la cartografía disponible y a las herramientas que proporcionan los Sistema de Información Geográfica se analizó la delimitación de dicha cuenca desde diferentes puntos de referencia a fin de lograr mayor precisión para obtener una mayor calidad del presente trabajo.

El primer análisis corresponde a la cuenca delimitada en el POMCA de vigencia 2018, este fue exportado de archivo CAD a archivo shape en un Sistema de Información Geográfica para poder unificar información y facilitar comparaciones,

En segundo lugar, con las curvas de nivel a una escala 1:25000 del IGAC, se realizó el procesamiento en programa SIG transformándolas en un Modelo Digital de Elevación – DEM como una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno, de este modo se procedió a trabajar con los geoalgoritmos que permiten delimitar las áreas de cuencas mediante una serie de procesos, utilizando como insumo básico el mencionado DEM.

La delimitación de la cuenca se realizó a partir de criterios meramente topográficos e hidrográficos (red de drenaje superficial) aplicando un método de carácter numérico el cual

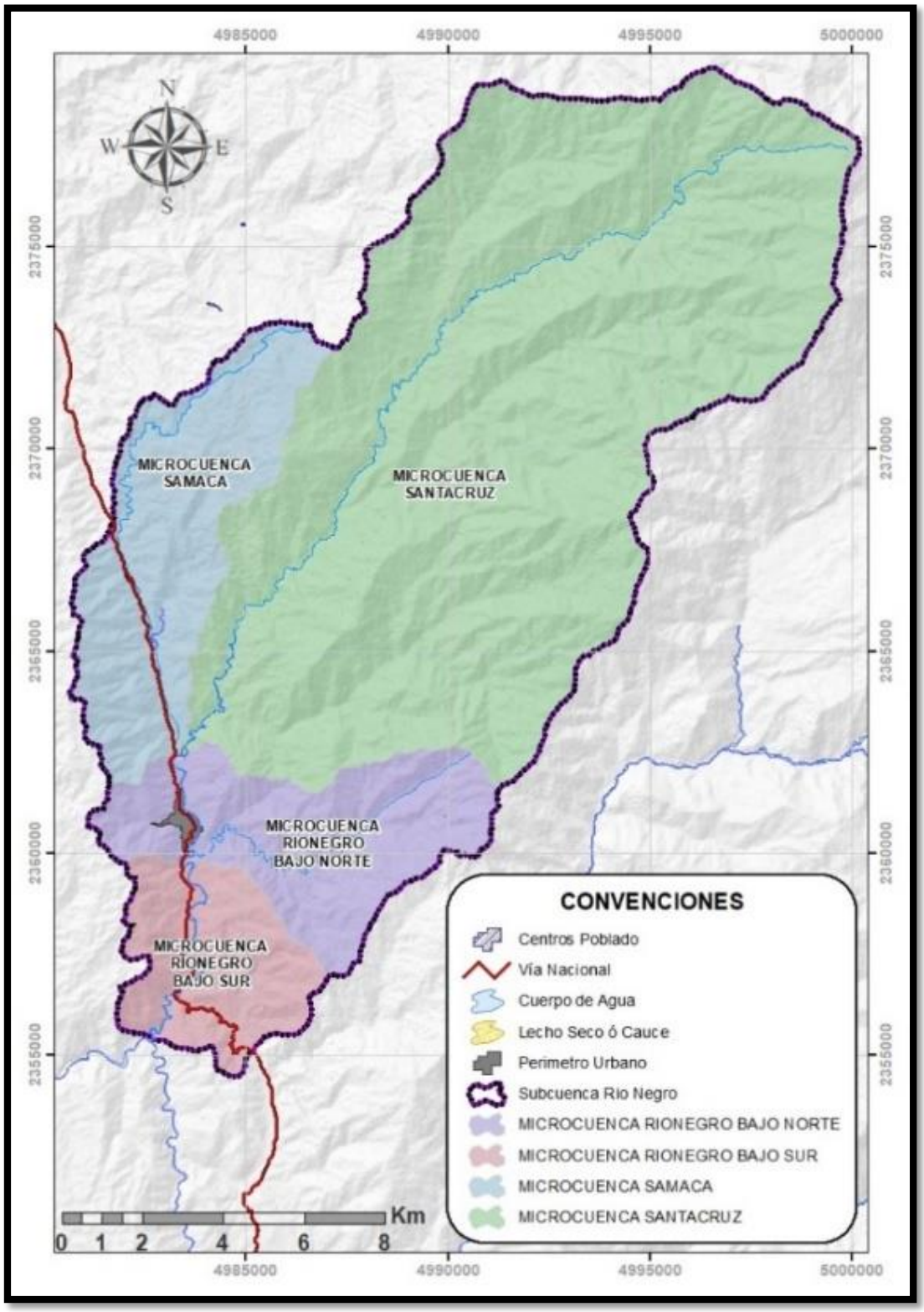
procede mediante el cálculo de la dirección de flujo y a partir de esté obtener la acumulación de los mismos, para finalmente delimitar la cuenca vertiente a un punto y así proceder al cálculo de los parámetros geométricos de interés hidrológico requeridos en el modelo objeto de este proyecto.

Finalmente, se realizó este mismo procesamiento con un DEM ALOS PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) del área de estudio el cual está cubierto con un imagen de resolución espacial 12.5m, este sensor colectó imágenes de radar en escenas de 50 km x 70 km cada 45 días aproximadamente, por lo que se consideró un buen insumo para detallar el análisis hidrológico.

Una vez obtenida las delimitaciones de la cuenca con los diferentes productos y geo-procesamientos anteriormente mencionados, se optó por acoger la delimitación obtenida en el geo-procesamiento realizado con las curvas de nivel del IGAC, debido a que estos insumos hacen parte de la cartografía oficial de Colombia, y por lo tanto tienen una mayor grado de confiabilidad de la representación de la realidad geográfica del territorio. Sin embargo la delimitación en mención fue ajustada en ciertos tramos al realizar las verificaciones con las demás delimitaciones producto del POMCA 2018 y el DEM ALOS PALSAR e imágenes satelitales.

El la **Figura 1**se muestra el área de estudio de la Subcuenca Rio Negro identificando las microcuencas que la componen.

Figura 1. Área de estudio Subcuenca Rio Negro



Fuente: Autor

El análisis morfométrico de la subcuenca se realizó a fin de proporcionar sus características y mediante ellas poder evaluar criterios para conocer el comportamiento hidrológico en los respectivos tramos de río Negro perteneciente al área objeto de estudios, en respuesta a la ocurrencia de precipitaciones.

La morfología se definió en base en parámetros generales, de forma y relativos a la red hidrográfica. En el informe de hidrología se precisas los cálculos correspondientes a la **Tabla 2**.

A continuación, se definen estos parámetros para cada una de las microcuencas seleccionadas para este estudio **Tabla 2**.

Tabla 2. Caracterización morfométrica de la cuenca

PARÁMETROS GENERALES					PARÁMETROS DE FORMA	PARÁMETROS RELATIVOS A LA RED HIDROGRÁFICA	
					Coeficiente de Gravelius	Tiempo de concentración	Pendiente media cauce
Microcuenca	**Forma**	**Área [Km^2]**	**Perímetro**	**Longitud Cauce**	**Ce**	**Tc [hora]**	**j**
Samacá	Irregular	33,60	36,17	16,94	1,76	5,05	35,57
Santacruz	Ovalada	171,45	69,00	31,70	1,48	3,35	25,31
Rio Negro Bajo Norte	Oblonga	29,84	32,95	10,85	1,70	2,24	35,05
Rio Negro Bajo Sur	Ovalada	18,78	19,99	7,45	1,30	1,9	18,88

Nota: Autor

4.2.2 Información hidrológica

El IDEAM cuenta con tres estaciones de categoría pluviométrica y una de categoría Limnigrafica distribuida a lo largo y ancho de la subcuenca Río Negro y solo dos se

encuentran activas, de las cuales una es pluviométrica y la otra Limnigrafica. Por otro lado se encuentran seis estaciones de categoría pluviométrica en áreas aferentes al área de estudio.

Es entonces que, a partir de la información solicitada al IDEAM y suministradas al presente trabajo, que se logra compilar información pluviométrica máxima en 24 Hrs mensuales multianuales, además de valores máximos diarios de caudales de la información correspondiente a la estación Limnigrafica - Puente Sardinas de la corriente Santa Cruz tributaria del Río.

4.2.2.1 Información Pluviométrica

En la **Tabla 3** se presenta el listado de las estaciones pluviométricas y climatológicas que hacen parte de la instrumentación del IDEAM y que se encuentran dentro de la zona de estudio y sus áreas aferentes. La distribución espacial se presenta en la **Figura 2**

Tabla 3. Localización de Estaciones Pluviométricas

CODIGO	NOMBRE	CATEGORIA	COORDENADAS (m)			
			Origen Magna Colombia Bogotá		CTM12	
			N	E	N	E
23190200	CACHIRI	Pluviométrica	1319419.986	1117099.646	2384898.81	4998161.84
23195200	CACHIRI	Climatológica	1318382.199	1119923.468	2383855.13	5000980.37
23190350	LLANO DE PALMAS	Pluviométrica	1292477.832	1097426.081	2358029.44	4978441.97
23190340	MATAJIRA	Pluviométrica	1289542.979	1111862.069	2355063.21	4992857.52
23190370	MATANZA	Pluviométrica	1306511.003	1115290.112	2372006.74	4996322.72
23190380	PALMAS	Pluviométrica	1289259.405	1094943.948	2354819.81	4975954.49
23190140	EL PLAYON	Pluviométrica	1317316.596	1096711.699	2382847.23	4977787.97
23190360	PORTACHUELO	Pluviométrica	1302208.544	1100759.858	2367743.27	4981795.87
23190310	SAN IGNACIO	Pluviométrica	1291735.069	1102437.806	2357275.5	4983447.32
23190570	TAMBOR EL HDA	Pluviométrica	1299087.32	1091379.127	2364647.32	4972416.21
23195090	VIVERO SURATA	Climatológica Ordinaria	1306430.913	1117099.646	2371914.54	5001378.98

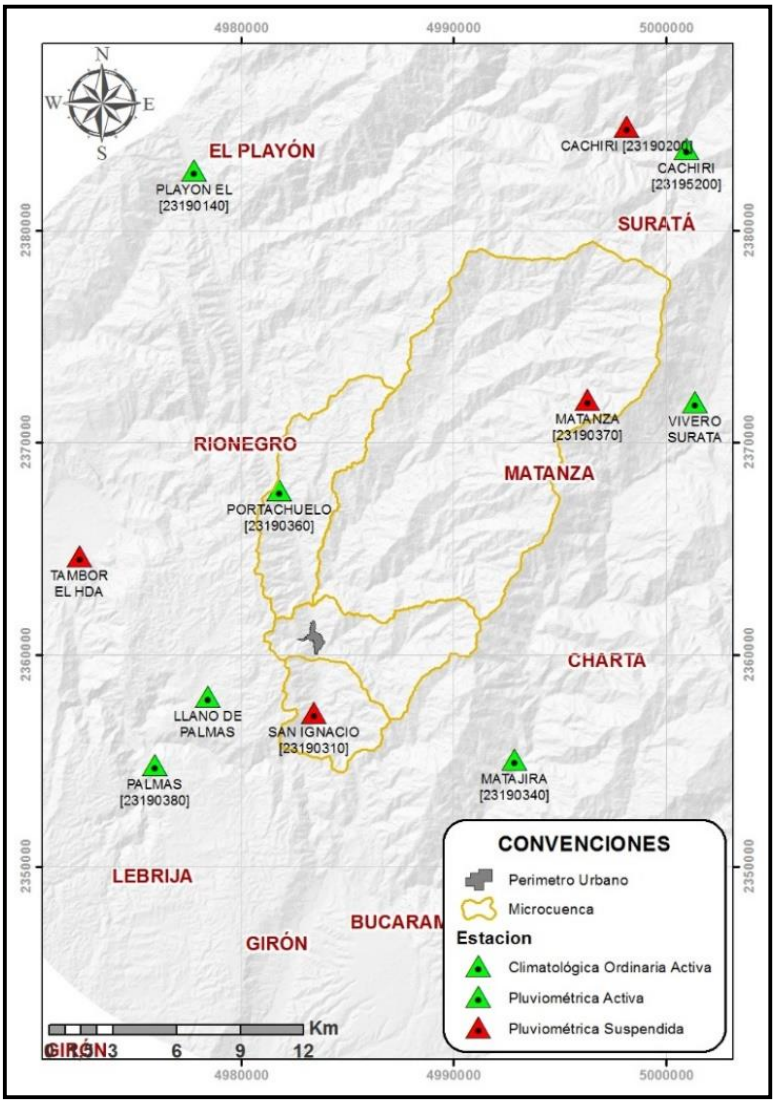
Nota: Elaboración Propia

Del listado anterior Las estaciones de Cachiri (23190200), Matanza (23190340), San Ignacio (23190310) y Tambor El Hda (23190570) se encuentran suspendidas. Por lo tanto

para los análisis estadísticos se trabajara con las estaciones de Cachirí (23195200), Llano de palmas (23190350), Matajira (23190340), Matanza (23190370), Palmas (23190380), El playón (23190140), Portachuelo (23190360) y Vivero Surata (23195090). Ver **Tabla 4**.

En la **Figura 2** se representa espacialmente la localización de las estaciones Pluviométricas.

Figura 2. Localización de Estaciones Pluviométricas.



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4. Estado de operatividad de las Estaciones Pluviométricas

CODIGO	NOMBRE	CATEGORIA	FECHA DE INSTALACION	FECHA DE SUSPENSION	Estación
23190200	CACHIRI	Pluviométrica	15/10/1959	15/08/1972	Suspendida
23195200	CACHIRI	Climatológica	15/06/1971		Activa
23190350	LLANO DE PALMAS	Pluviométrica	15/11/1967		Activa
23190340	MATAJIRA	Pluviométrica	15/10/1967		Activa
23190370	MATANZA	Pluviométrica	15/10/1967	15/12/1969	Suspendida
23190380	PALMAS	Pluviométrica	15/11/1967		Activa
23190140	EL PLAYON	Pluviométrica	15/05/1958		Activa
23190360	PORTACHUELO	Pluviométrica	15/10/1967		Activa
23190310	SAN IGNACIO	Pluviométrica	15/09/1967	15/09/1971	Suspendida
23190570	TAMBOR EL HDA	Pluviométrica	15/03/1980	15/04/1995	Suspendida
23195090	VIVERO SURATA	Climatológica Ordinaria	15/09/1968		Activa

Nota: Elaboración Propia

4.2.3 Procesamiento estadístico de la información pluviométrica

4.2.3.1 Llenado de datos faltantes

Se consultó los registros históricos de las estaciones operadas por el IDEAM, lográndose encontrar datos con fechas coincidentes y sin un número significativo de datos faltantes para las estaciones Cachiri, Llano de Palma, Portachuelo, Vivero Surata, El Playón y Las Palmas; para el periodo que va desde 01 de Noviembre de 1967 al 31 de Diciembre de 2016.

Sin embargo, se optó por estimar el llenado de datos faltantes mediante el uso del método de la razón normal. Los cálculos pueden ser encontrados en el Volumen III - Anexo I.2.3, observado un llenado del 6% de datos.

4.2.3.2 Precipitaciones máximas en 24 Hrs

A continuación se relaciona la información los datos máximos en 24 Hrs de las estaciones analizadas, los resultados presentados en este informe hacen referencia es a la información

pluviométrica y al procesamiento estadístico de datos faltantes, para mayor información remitirse al Volumen III - Anexo I.2.4

4.2.3.2.1 Prueba de Datos Dudosos

La precipitación de la precipitación máxima en 24 horas, debe ser evaluada por prueba de datos dudosos con el fin de encontrar puntos que se alejan de la tendencia de la información restante, esto debido a que la retención o eliminación de estos datos puede afectar significativamente la magnitud de los parámetros estadísticos calculados para la información, especialmente en las muestras pequeñas. El cálculo se realiza de acuerdo con el método de Water Resources Council (Council, 1981).

Para cada tamaño de muestra de datos (**n**) corresponde un **Kn,** ver **Tabla 5**.

Tabla 5. Valores Kn para la prueba de datos dudosos

Tamaño de muestra *n*	K_n	Tamaño de muestra *n*	K_n	Tamaño de muestra *n*	K_n	Tamaño de muestra *n*	K_n
10	2.036	24	2.467	38	2.661	60	2.837
11	2.088	25	2.486	39	2.671	65	2.866
12	2.134	26	2.502	40	2.682	70	2.893
13	2.175	27	2.519	41	2.692	75	2.917
14	2.213	28	2.534	42	2.700	80	2.940
15	2.247	29	2.549	43	2.710	85	2.961
16	2.279	30	2.563	44	2.719	90	2.981
17	2.309	31	2.577	45	2.727	95	3.000
18	2.335	32	2.591	46	2.736	100	3.017
19	2.361	33	2.604	47	2.744	110	3.049
20	2.385	34	2.616	48	2.753	120	3.078
21	2.408	35	2.628	49	2.760	130	3.104
22	2.429	36	2.639	50	2.768	140	3.129
23	2.448	37	2.650	55	2.804		

Nota: U.S Water resources Council, 1981. Esta tabla contiene valores de Kn de un lado con un nivel de significancia del 10% para la distribución normal

Determinándose de esta manera los umbrales de datos dudosos altos y bajos:

- *Umbral de datos dudosos altos* ***(xH: unid. logarítmicas)***

$$X_H = \bar{X} + Kn * s$$

Precipitación máxima aceptada

$$P_H = 10^{xH} \quad ;$$

- *Umbral de datos dudosos bajos* ***(xL: unid. logarítmicas)***

$$X_L = \bar{X} - Kn * s$$

Precipitación mínima aceptada

$$P_H = 10^{xH}$$

En la **Tabla 6** se presenta los resultados de la prueba de datos dudosos para cada estación analizada:

Tabla 6. Prueba de datos dudoso precipitación máxima en 24 horas

Estación	Umbral de datos dudosos altos (xH: unid. logaritmicas)	Umbral de datos dudosos bajos (xL: unid. logaritmicas)	Máximo Final	Mínimo Final	Identificación de datos dudoso	
					Año	Precipitación Máxima en 24 Horas
ESTACIÓN CACHIRI	80,7	25,9	74,6	30,0	1976 1988	18,4 103
ESTACIÓN LLANO DE PALMA	179,8	47,3	145,0	53,7	N/A	N/A
ESTACIÓN PORTACHUELO	188,2	50,4	167,0	55,0	N/A	N/A
ESTACIÓN VIVERO SURATA	93,4	23,3	90,0	28,8	N/A	N/A
ESTACIÓN EL PLAYÓN	159,1	47,2	137,0	53,0	1976	41
ESTACIÓN LAS PALMAS	190,2	41,5	208,5	50,0	N/A	N/A
ESTACIÓN MATAJIRA	101,4	26,0	87,0	28,5	2003	115

Nota: Autor

La prueba de datos dudosos se realizó en cada uno de las 7 estaciones objeto de estudio, de las cuales la estación de Portachuelo es la única ubicada dentro del área de la Subcuenca

Rio Negro. En este procedimiento se identificaron datos dudosos por fuera del umbral máximo aceptado en la estación Cachiri y Matajira, los cuales no fueron tomados en cuenta para cálculos posteriores, y datos dudosos por fuera del umbral mínimo aceptado, uno en la estación Cachiri y el otro en la estación El Playón que también fueron descartados de la serie de datos de precipitaciones. En la tabla anterior se aprecian los datos identificados como dudosos. Por otro lado, se identificó un dato extremo alto de precipitación que sobrepasa el umbral máximo en la estación Las Palmas, en octubre de 2011 de un valor de 208 mm como precipitación máxima en 24 horas, pesé a que el umbral de datos dudosos máximo corresponde a 190, esté no fue excluido, teniendo en cuenta que en este periodo se presentó una temporada invernal, que produjo fuertes aguaceros y causaron inundaciones en diferentes zonas de Colombia, ocasionados por el fenómeno de La Niña. Por tanto se considera este un registro de alto interés en el presente análisis. Para mayor información remitirse al Volumen III - Anexo I.2.4

4.2.3.2.2 Análisis de frecuencias

En base a los postulados de hidrograma unitarios donde se presume que la precipitación efectiva se distribuye uniformemente a lo largo de toda la superficie de la cuenca y que el modelo hidrológico resultante difiere un poco de la realidad ya que asume que aunque la precipitación varía en cada microcuenca, el evento de precipitación extrema inicia al mismo tiempo en todas las microcuencas, lo que de acuerdo al régimen meteorológico de la región se presume que es poco probable (Garcia-Bartual, 1989) .

Para analizar lo mencionado anteriormente se procede a determinar los valores extremos de precipitación máxima en 24h para los diferentes periodos de retorno con el objetivo de posteriormente evidenciar algún patrón recurrente de distribución espacial de precipitación.

4.2.3.2.3 Funciones de probabilidad

Con el objetivo de seleccionar la función de probabilidad más fehaciente al comportamiento de los datos hidroclimatológicos para usarla en el análisis de frecuencia, se escogieron cinco de las funciones de distribución de probabilidad más usadas, estas son: Normal, Gumbel, Lognormal, Pearson III y Logpearson III. Ver complemento en el informe de hidrología.

Los cálculos pueden ser consultados en el Volumen III - Anexo I.2.4

4.2.3.2.4 Prueba de Bondad de Ajuste

La prueba de bondad de ajuste es un cálculo de tipo no paramétrico que se fundamenta en la diferencia máxima absoluta entre la Función de Distribución Acumulada empírica y la teórica de cada una de las funciones consideradas inicialmente.

4.2.3.2.4.1 Kolmogorov-Smirnov

Esta prueba consiste en comparar el máximo valor absoluto de la diferencia (D) entre la función de la distribución de la probabilidad observada Fo(xm) y la estimada F(xm)

Su diferencial se expresa como sigue:

$$D = máx|f(x) - f_o(x)|$$

Donde;

$f(x)$ = Probabilidad teórica

$f_o(x)$ = Probabilidad Empírica

La probabilidad teórica se calcula como el inverso del cuantil para la función analizada y los parámetros obtenidos:

$$F_o(x_m) = 1 - \frac{m}{n+1}$$

En la **Tabla 7** se exponen los valores para diferentes niveles de significancia y tamaños de la muestra;

Tabla 7.Valores estadísticos de referencia para la prueba Kolmogorov-Smirnov

Tamaño de la muestra	α = 0.10	α = 0.05	α = 0.01
5	0.51	0.56	0.67
10	0.37	0.41	0.49
15	0.30	0.34	0.40
20	0.26	0.29	0.35
25	0.24	0.26	0.32
30	0.22	0.24	0.29
40	0.19	0.21	0.25
n grande	$1.22\sqrt{n}$	$1.36\sqrt{n}$	$1.63\sqrt{n}$

Nota: Applied Statics for civil and environmental Engineers - Kottegoda

La prueba de bondad de ajuste realizada a los diferentes conjuntos de datos máximos en 24 Hrs se presenta a continuación en la **Tabla 8**, en donde se resalta la de mayor ajuste, siendo esta la del valor menor de las diferencias máximas entre la función de la distribución de la probabilidad observada y la estimada, con un nivel de significancia de 0.05.

Tabla 8. Prueba de bondad de ajuste precipitación máxima en 24 horas

Estación	Dmaximo					
	Dcritico	Distrib, Normal	Distrib, Gumbel	Distrib, LogNormal	Distrib, Pearson III	Distrib, Log Pearson III
ESTACIÓN CACHIRI	0,20095	0,10123	0,06184	0,05114	0,91042	**0,0507**
ESTACIÓN LLANO DE PALMA	0,19455	0,07991	**0,05815**	0,87232	0,88193	0,07558
ESTACIÓN PORTACHUELO	0,19455	0,1274	**0,08527**	0,90349	0,90492	0,07959
ESTACIÓN VIVERO SURATA	0,19455	0,15657	0,10352	0,9381	0,91172	**0,08596**
ESTACIÓN EL PLAYÓN	**0,19455**	**0,05999**	0,0862	0,89452	0,90044	0,1157
ESTACIÓN LAS PALMAS	0,19455	0,11481	**0,05974**	0,95832	0,91619	0,05991
ESTACIÓN MATAJIRA	0,19455	0,06142	**0,04854**	0,91132	0,91182	0,06911

Nota: Autor

4.2.3.2.5 Valores extremos de precipitación máxima en 24 horas para diferentes periodos de retorno

De acuerdo a los análisis anteriormente descritos se obtuvo los siguientes valores extremos de precipitación máxima en 24 horas para diferentes periodos de retorno (ver **Tabla 9**), para mayor información remitirse al Volumen III - Anexo I.2.4

Tabla 9. Valores extremos de precipitación máxima en 24 horas para diferentes periodos de retorno

ESTACION	PERIODO DE RETORNO											
	2	**3**	**5**	**10**	**20**	**25**	**50**	**100**	**200**	**300**	**500**	**1000**
CACHIRI [23195200]	51,8	57,9	64,8	73,4	81,6	84,3	92,3	100,3	108,3	113	118,9	126,8
LLANO DE PALMAS [23190350]	104,3	115,8	127,9	142,4	155,5	159,6	171,8	183,6	195,1	201,7	209,9	221
MATAJIRA [23190340]	58,1	64,6	71,5	79,7	87,3	89,6	96,5	103,3	109,9	113,7	118,4	124,8
PALMAS [23190380]	100,4	113,2	126,8	143,3	158,5	163,2	177,5	191,4	205,1	213,1	223	236,5
PLAYON EL [23190140]	100,2	109,7	118,7	128,4	136,3	138,7	145,3	151,3	156,8	159,8	163,4	168,1
PORTACHUELO [23190360]	108,8	120,1	132,7	148,6	163,8	168,7	183,5	198,3	213	221,6	232,4	247,1
VIVERO SURATA [23195090]	52	58,2	65,2	73,9	82,2	84,9	93,1	101,2	109,3	114	119,9	128,0

Nota: Autor

4.2.3.3 Redistribución de Tormentas de Diseño

4.2.3.3.1 Valor promedio en la cuenca de las Precipitaciones máximas en 24 Hrs (Bejar, 2012)

Según Raghunath en su escrito Hidrología, Principios, Análisis y Diseño", difícilmente la precipitación ocurre de manera uniforme sobre cuencas de grandes áreas y la intensidad, al igual que la precipitación total, varía desde el centro del evento o tormenta hasta sus periferias.

Los pluviómetros registran la lluvia puntual, es decir, la que se produce en el punto en la que está instalada el aparato. Para muchos problemas hidrológicos, se requiere conocer la altura de precipitación media de una zona, la cual puede estar referida a la altura de precipitación diaria, mensual anual, media mensual, media anual.

Para calcular una precipitación media determinada, existen tres métodos de uso generalizado:

- Promedio aritmético
- Polígono de Thiessen
- Isoyetas

Para el presente estudio se optó por realizar la metodología de la Isoyetas, ver complemento en el informe de hidrología

4.2.3.3.2 Distribución espacial de valores extremos de precipitación máxima en 24 horas

Para los valores extremos de precipitación máxima en 24 horas determinados para los diferentes periodos de retorno (Ver **Tabla 9**), se calculó su distribución espacial para cada microcuenca con el usó el método de las Isoyetas, a través de herramientas SIG. Interpolando superficies raster a partir de los valores extremos de precipitación máxima en 24 horas determinados en cada una de las estaciones analizadas, utilizando la técnica de Spline de curvatura mínima bidimensional y tipo tensión la cual ajusta la rigidez del interpolante de acuerdo con el carácter del fenómeno modelado. Ver complemento en el informe hidrológico. Ver **Tabla 10**.

Tabla 10. Valores medios de precipitación máxima en 24 horas por microcuenca.

Periodo de Retorno	MICROCUENCA		
	Santa Cruz	**Samacá**	**Rionegro Bajo**
2	78,02	103,15	86,03
3	86,2	113,81	96,03
5	95,35	125,7	106,95
10	106,79	140,57	120,34

Periodo de Retorno	MICROCUENCA		
	Santa Cruz	**Samacá**	**Rionegro Bajo**
20	117,78	154,94	132,93
25	121,26	173,23	136,89
50	131,99	173,49	148,97
100	142,62	187,46	160,82
200	153,24	201,62	172,57
300	159,43	209,83	179,38
500	167,15	219,95	187,96
1000	177,76	234,27	199,53

Nota: Autor

La distribución de la precipitación como se muestra en el informe de hidrología, no permitieron encontrar un patrón recurrente de distribución de precipitación para valores extremos de precipitación máxima en 24 H sobre la subcuenca del Rionegro, sin embargo se observa que para periodos de retorno de 2, 3, 5, 20 y 25 años las precipitaciones máximas se dan en el sector occidental de la subcuenca Rio Negro en las estaciones de El Playón, Portachuelo, Llano de Palmas y Palmas. A medida que se aumenta el periodo de retorno, es decir a partir del Periodo retorno de 50 años en adelante los valores máximos de precipitación se comparten entre las zonas aferentes a las estaciones Portachuelo, Llano de Palmas y Palmas. En General los mayores valores de precipitaciones se presentan en las estaciones de Portachuelo y Llano de Palmas, las cuales son las que se encuentran en las áreas aferentes más cercanas al casco urbano del municipio de Rionegro.

La distribución espacial de los valores medios de precipitación de los periodos (2, 3, 20, 25, 50, 100, 200, 300, 500,1000) puede ser visualizada en el informe de hidrología.

4.2.3.3.3 Distribución espacial de Valores Medios Anuales de precipitación máxima en 24H.

Para los Valores Medios Anuales de precipitación máxima en 24 H (Ver **Tabla 11**), se calculó su distribución espacial para cada microcuenca con el usó el método de las Isoyetas, a través de herramientas SIG. Interpolando superficies raster a partir de los Valores Medios

Anuales de precipitación máxima en 24 H determinados en cada una de las estaciones analizadas, utilizando la técnica de Spline descrita en párrafos anteriores. Ver **Tabla 12**.

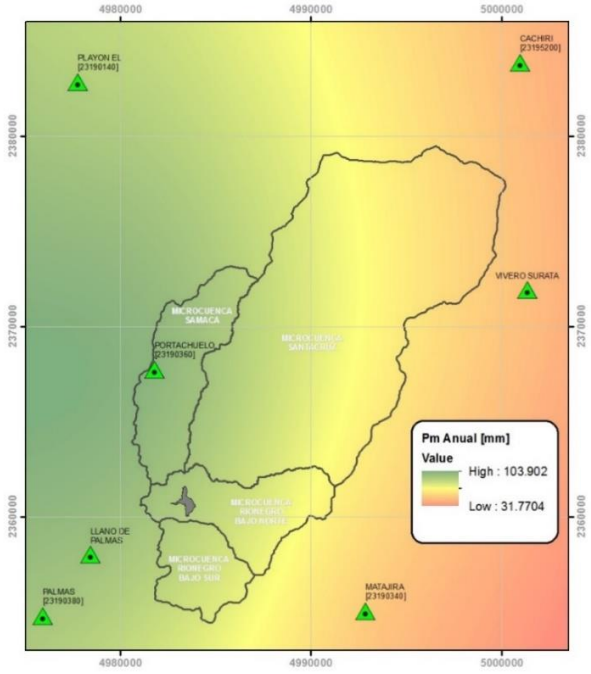
Tabla 11. Valores de precipitación máxima promedio anual en 24h a nivel multianual.

NOMBRE	Pmax Anual 24h
CACHIRI [23195200]	48,0
LLANO DE PALMAS [23190350]	95,0
MATAJIRA [23190340]	52,9
PALMAS [23190380]	92,4
PLAYON EL [23190140]	88,7
PORTACHUELO [23190360]	100,2
VIVERO SURATA [23195090]	48,2

Nota: Autor

En la **Figura 3** se representa la Distribución espacial de Valores Medios Anuales de precipitación máxima en 24 H resultado de los análisis anteriormente descritos.

Figura 3. Distribución espacial de Valores Medios Anuales de precipitación máxima en 24 H.



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 12. Valores medios anuales de precipitación máxima de 24 horas representativos por microcuenca.

Valor medio de Precipitaciones Max 24H ANUAL (mm)	MICROCUENCA			
	Santa Cruz	**Samacá**	**Rionegro Bajo Norte**	**Rionegro Bajo Sur**
	71,62	95,08	79,70	82,06

Nota: Autor

4.2.3.3.4 Reducción Espacial

Los Factores de reducción areal, según lo definido por el Natural Environmental Research Council (NERC, 1975), son "Factores que cuando se aplican a los valores de precipitaciones puntuales con una duración y un período de retorno, dan como resultado precipitaciones por área, de la misma duración y período de retorno"..

"…Mediante el análisis tradicional, en que se consideran los máximos anuales puntuales, los cálculos tienden a sobrestimar la precipitación, al no considerar el hecho de que los máximos no se presentan en el mismo momento en todas las estaciones consideradas (efecto de no simultaneidad de las lluvias), es necesario calcular factores de reducción. Esta falta de simultaneidad se acentúa conforme el área considerada es mayor"(Severiano Covarrubias, 2014).

De acuerdo con el Manual de Drenaje para Carreteras del 2009 del INVIAS (Ministerio de Transporte y Instituto Nacional de Vías, 2009) , en caso de que se cuente con precipitaciones puntuales limitadas que no permitan hacer análisis de la reducción de la lluvia por espacialidad en la hoya, tipo curvas PADF (Precipitación-Área-Duración-Frecuencia), es necesario calcular la precipitación espacial promedio en la hoya de manera empírica, mediante la siguiente expresión:

$$P_{PromHoya} = f(a)P_{puntual}$$

Para los valores de f(a) se pueden utilizar las siguientes ecuaciones:

1. Ecuación de Fhruling

$$f(A) = 1.0 - 0.0054 * A^{0.25}$$

Dónde:

A es el área de drenaje de la hoya en metros cuadrados.

2. Ecuación presentada para Inglaterra por el Institution of Civil Engineers, Proceedings, 2nd Part, "Flood Studies Report", Volume 65, Research and Theory, june 1978.

$$f(A) = 1.0 - 0.0268 * t_c^{-0.261} * A^{0.387}$$

Dónde:

A: Área de drenaje en Kilómetros cuadrados.

t_c: Tiempo de concentración de la hoya en horas.

3. Según datos de NorteAmérica

$$f(A) = 1.0 - 0.05 * t_c^{0.361} * A^{0.264}$$

Dónde:

A: Área de drenaje en Kilómetros cuadrados.

t_c: Tiempo de concentración de la hoya en horas.

Debido a que en la literatura técnica no se encontró un referente que describiera los limitantes de cada metodología, se procedió a escoger el resultado del factor de reducción de precipitación espacial más cercano al promedio de todos los valores calculado, siendo el de Inglaterra, ver

Tabla 13. Los cálculos pueden ser encontrados en el Volumen III - Anexo I.2.12

Tabla 13. Factores de reducción espacial

Microcuenca	Área		tc	Fhruling	Inglaterra	E.E.U.U	Promedio
	m²	Km²	Horas				
Santacruz	171450,52	171,45	5,05	0,89	0,87	0,65	0,80
Samacá	33601,49	33,60	3,35	0,93	0,92	0,80	0,89
Rionegro Bajo Norte	29840,00	29,84	2,24	0,94	0,93	0,85	0,91
Rionegro Bajo Sur	18780,00	18,78	1,90	0,93	0,92	0,85	0,90

Nota: Autor

Con el factor de reducción espacial se definió la magnitud de la altura de lluvia que finalmente se usara para estimar las tormentas de diseño. Ver **Tabla 14**

Tabla 14. Valores medios anuales de precipitación máxima de 24 horas representativos por microcuenca con reducción espacial.

Valor medio de Precipitaciones Max 24H ANUAL con reducción espacial (mm)	MICROCUENCA			
	Santa Cruz	Samacá	Rionegro Bajo Norte	Rionegro Bajo Sur
	62,41	87,84	74,32	75,13

Nota: Autor.

4.2.3.4 CURVAS I-D-F

Para el presente estudio las curvas IDF son construidas por el método simplificado a partir de los valores determinados como producto del análisis de las precipitaciones máximas en 24 Horas suministradas por las estaciones del IDEAM (ver **Tabla 12**, debido a que no hay disponibilidad de datos históricos pluviográficos, que permitan desarrollar el método de cálculo de curvas IDF con datos históricos de precipitación.

Al localizar el área de estudio en la región Andina (R1), se adoptan los valores de los coeficientes a, b, c y d expuestos en la **Tabla 15** :

Tabla 15. Valores de los coeficientes a, b, c y d para el cálculo de las curvas de intensidad-duración-frecuencia, IDF, para el área de estudio de las Subcuenca de Rionegro.

REGION	a	b	c	d
Andina (R1)	0.94	0.18	0.66	0.83

Nota: Vargas M.R., Díaz-Granados, 1998.

En el informe de hidrología se pueden apreciar los resultados obtenidos de las curvas IDF obtenidas. Asimismo se puede consultar en el Volumen III - Anexo I.2.13-16 los cálculos que las representan.

4.2.3.5 Hietograma de diseño

La tormenta de diseño es un insumo del modelo hidrológico, donde específicamente para el método lluvia-escorrentía, se realiza una transformación para determinar la descarga para un punto de cierre de interés en un periodo de retorno específico. A continuación se presentan los hietogramas de diseño determinados a partir de las precipitaciones máximas en 24 horas. Los hietogramas constituyen la forma de la tormenta o la distribución temporal de la precipitación o profundidad total de diseño para cada microcuenca. Para tal fin, mediante las curvas de IDF relacionadas en el Volumen III - Anexo I.2.13-16, se estima tal comportamiento.

En general se realizó el siguiente procedimiento:

- Se calcula el hietograma de diseño por microcuenca mediante los valores de las Isoyetas.
- Se estima el hietograma de diseño definitivo en cada microcuenca al aplicar la reducción por distribución espacial de tormentas.

Se estima el hietograma de diseño por subcuenca con el uso de las curvas IDF obtenidas en el numeral **4.2.3.4** presentadas en el Anexo y los factores de las Isoyetas de injerencia de las estaciones pluviométricas. Posteriormente este hietograma es multiplicado por el factor de distribución espacial por el método de Inglaterra, tal y como se menciona en el inciso **0**, siendo los resultados obtenidos por microcuenca los presentados en el Volumen III - Anexo I.2.13-16. Ver complemento en el informe de hidrología.

4.2.4 Modelo lluvia-escorrentía

Para el presente estudio se desarrolló tres metodologías Soil Conservation Service (SCS), modelo lluvia escorrentía de Snyder y modelo de Clark, ver complemento en el informe de hidrología.

4.2.4.1 Numero de curva CN

El cálculo del número de curva depende de dos factores: en primer lugar está la clasificación de grupo hidrológico, el uso de suelo en el área de interés y las condiciones antecedentes de humedad que presenta el terreno. A continuación se realiza los análisis respectivos.

4.2.4.1.1 Tipos de suelos

Los tipos de suelos constituyen uno de los insumos básicos para el análisis hidrológico del estudio empleando la metodología del Soil Conservation Service.

Para efectos del presente estudio se usó el Mapa Digital de Suelos del Departamento de Santander a escala 1:100.000 publicado en el año 2002 por el IGAC, que es la información respectiva más reciente y disponible para el estudio a la fecha. Ver complemento en el informe de hidrología.

Con la información secundaria anteriormente descrita, se consultó lo consignado en el campo de CARACTERISTICAS de la capa espacial SANTANDER_SUELOS_VF del IGAC, para posteriormente reclasificarla en grupos de texturas de los suelos superficiales que junto con un ajuste de la cartografía de las zonas urbanas se elaboró el mapa de tipo de suelos de la subcuenca Rionegro para los análisis hidrológicos del presente estudio.

Tabla 16. Tipos de suelo en el Departamento de Santander a escala 1:100.000. IGAC.2002

UCS_F	COMPONENTE	TEXTURA
ZU	Zona urbana	Zona urbana
MLBg2	Grupo indiferenciado: Typic Dystropepts; Andic Humitropepts	Texturas franco arenosa, franco arcillo arenosa, arcillosa y arcillo arenosa
MLBg	Grupo indiferenciado: Typic Dystropepts; Andic Humitropepts	Texturas franco arenosa, franco arcillo arenosa, arcillosa y arcillo arenosa
MQBf	Grupo indiferenciado: Typic Troporthents; Oxic Dystropepts	Texturas franco arcillo arenosa, franco arenosa, franco arcillosa, arcillosa y franca
MVAf2	Grupo indiferenciado: Typic Dystropepts; Inceptic Hapludox	Texturas franco arcillo arenosa, arcillosa y franco arcillosa
MQMe	Consociación: Oxic Dystropepts	Texturas arcillosa, franco arcillosa
MQFbp	Complejo: Typic Tropofluvents; Fluventic Hapludolls; Aeric Tropic Fluvaquents	Texturas franco arcillosa, franco arcillo limosa, franco arenosa, franco arcillo arenosa, franca
MQBf2	Grupo indiferenciado: Typic Troporthents; Oxic Dystropepts	Texturas franco arcillo arenosa, franco arenosa, franco arcillosa, arcillosa y franca
MQBg2	Grupo indiferenciado: Typic Troporthents; Oxic Dystropepts	Texturas franco arcillo arenosa, franco arenosa, franco arcillosa, arcillosa y franca
MQBg	Grupo indiferenciado: Typic Troporthents; Oxic Dystropepts	Texturas franco arcillo arenosa, franco arenosa, franco arcillosa, arcillosa y franca
MQAf	Grupo indiferenciado: Typic Troporthents; Typic Dystropepts; Andic Humitropepts	Texturas franco arcillosa, franco arcillo arenosa, franco arenosa, arcillosa y franca
MQHe	Asociación: Typic Dystropepts; Typic Humitropepts; Typic Troporthents	Texturas franco arcillosa, arcillosa, franco arenosa, arcillo arenosa
LWAg3	Consociación: Lithic Ustorthents	Textura franco arenosa, franca, franco arcillo arenosa
MRBg2	Consociación: Typic Ustorthents	Texturas franco arenosa, franco arcillosa y franca
MWAf3	Grupo indiferenciado: Typic Ustorthents; Afloramientos rocosos	Textura arcillosa
MVBf2	Grupo indiferenciado: Typic Troporthents; Oxic Dystropepts; Lithic Troporthents	Texturas franco arcillosa, arcillosa, franco arcillo arenosa, franco arcillosa y franca

UCS_F	COMPONENTE	TEXTURA
MWDap	Complejo: Typic Ustifluvents; Fluventic Ustropepts; Typic Ustipsamments	Texturas franco arenosa, arenosa franca, franca y arenosa

Nota: Elaboración Propia

Con el objetivo de estimar la respuesta hidrológica de los suelos, el método del Soil Conservation Service (Rojas, 1986) se establecieron las categorías (adaptado de Rojas, 1986) y conforme a las recomendaciones de Rawls et al. En 1983, se agrupan la textura en estos 4 grupos hidrológicos como se muestra en la **Tabla 17** (Fernández, 2006).

Tabla 17.Grupos Hidrológicos

GRUPO HIDROLOGICO	TEXTURAS
A	Arenoso, Arenoso Franco Gravilloso, Franco Arenoso, Franco Arenoso Gravilloso
B	Franco, Franco Gravilloso, Franco Limoso
C	Franco Arcillo Arenoso, Franco Arcillo Arenoso Gravilloso, Franco Arcilloso Gravilloso
D	Arcillo Arenoso, Arcilloso, Arcilloso Gravilloso, Franco Arcilloso, Zona Urbana

Nota: Mejora de los Parámetros de Cálculo del modelo del número de curva y su validación mediante un modelo hidrológico distribuido (Fernández, 2006).

La distribución espacial de las texturas de suelos finalmente identificadas en el área de estudio y clasificadas por grupos hidrológicos como se muestra en la **Tabla 18** el informe de hidrología. El mapa de texturas de suelo – Grupo hidrológico Microcuenca Rio Negro puede ser consultado en el informe de hidrología.

Tabla 18.Porcentaje de Grupos Hidrológicos – Textura de Suelos adoptadas

GRUPO HIDROLÓGICO	TEXTURA	AREA Ha	OCUPACION %
A	Arenoso, Arenoso Franco Gravilloso, Franco Arenoso, Franco Arenoso Gravilloso	2019,75	7,96
C	Franco Arcillo Arenoso, Franco Arcillo Arenoso, Gravilloso, Franco Arcilloso Gravilloso	22418,59	88,37
D	Arcillo Arenoso, Arcilloso, Arcilloso Gravilloso, Franco, Arcilloso, Zona Urbana	929,60	3,66
	TOTAL	**25367,94**	**100**

Nota: Autor

4.2.4.1.2 Uso y cobertura del suelo

Para el presente estudio esta información temática tiene como objeto identificar las diferentes unidades de uso y cobertura vegetal existentes en el área de estudio con enfoque en las principales características que puedan influir en el análisis hidrológico de las subcuenca en estudio.

Como primera medida se procedió a consultar información oficial disponible a la fecha y que se describe a continuación:

- Mapa de Cobertura de la Tierra 2005-2009 a escala 1:100.000 elaborados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, cuya descarga gratuita de puede realizar por el Sistema de Información Ambiental de Colombia – SIAC (http://www.siac.gov.co).
    - Mapa de Coberturas y Uso actual de las tierras 2005-2008 a escala 1:25.000 elaborado en el Plan de Ordenamiento y Manejo Ambiental –POMCA de la subcuenca de Rio Negro.
    - Adicionalmente se consultó la disponibilidad de imágenes del Satélite de Google Maps, de descarga libre por medio del software SAS Planet, y actualizadas en el año 2019, las cuales ofrecen una resolución bastante considerable para nuestro el de interés.

Una vez realizada la confrontación de la información tanto del Mapa de Cobertura de la Tierra 2005-2009 a escala 1:100.000 del IDEAM como la del Mapa de Coberturas y Uso actual de las tierras 2005-2008 a escala 1:25.000 del POMCA de la subcuenca de Rio Negro con las imágenes satelitales, se verificó que la capa espacial con mayor coherencia es la del POMCA.

Finalmente, para la delimitación de las unidades de uso y cobertura se tomó como base la metodología utilizada para el cálculo de las abstracciones de agua de las tormentas propuesta por el Soil Conservation Service de Estados Unidos en el National Engineering Handbook Section 5 - Hydraulics (capitulo 9), conocida como método del número de curva (CN), adaptada por Chow et al. (1988). Ver complemento informe de hidrología.

Las categorías adoptadas para el presente estudio se mencionan en la **Tabla 19**.

Tabla 19.Porcentaje de Ocupación de Unidades de Uso y Cobertura adoptadas

SIMBOLO	USO Y COBERTURA (SCS)	AREA Ha	OCUPACION %
Bb	Bosque Cubierta Buena	8514,00	33,6
Bp	Bosques Troncos delgados Cubierta pobre Sin Hierba	72,26	0,3
P	Pastos Naturales	6310,87	24,9
C	Tierra Cultivada Sin Tratamiento	10420,66	41,1
R	Zona Urbana	50,18	0,2
	TOTAL	**25367,9**	**100**

Nota: Autor

4.2.4.1.3 Calculo del Número de curva CN

De acuerdo al grupo hidrológico y a la cobertura de suelos, constan referencias bibliográficas para seleccionar el número de curva CN correspondiente a una condición antecedente de humedad normal (CAH-II) y que son característicos de las condiciones promedio que tienen la posibilidad de presentarse en la cuenca.

4.2.4.1.3.1 Análisis de Avenidas Máximas Reportadas

Dentro de la revisión de los registros diarios de precipitación y la búsqueda de los días de mayor pluviosidad registrada en la subcuenca, se observó que algunos de esos días de altas precipitaciones eran consecutivos o con una separación de unos pocos días; adicional a lo anterior se hizo una revisión de reportes de prensa para determinar las fechas en las que se registraron avenidas que causaron daños en las riberas del río Negro y se encontraron las expuestas a continuación.

En la **Tabla 20** se presentan los reportes de afectaciones asociadas a crecientes en el río Negro reportadas, el listado hasta el año 2010 fue tomado del Informe del reporte del centro de información para el reporte de emergencias-CIRE.

Tabla 20. Relación de las precipitaciones registradas respecto a los valores extremos de precipitación máxima en 24 horas.

FECHA DEL EVENTO	OBSERVACIONES	FUENTE
01 de Diciembre de 2010	Se presentaron inundaciones debido al desbordamiento del río Negro cerca al sector conocido como Sardinas en la vía que comunica a Rionegro con El Playón.	Informe del reporte del centro de información para el reporte de emergencias-CIRE
20 de Diciembre de 2010	Inundaciones causadas por la creciente del caudal del río Negro en los sectores ribereños del casco urbano del municipio de Rionegro.	
21 de Diciembre de 2010	Crecimiento del río Negro sobre la Vía Bucaramanga - Rionegro en el sector llamado El Grama.	
21 de Diciembre de 2010	Deslizamiento Sobre la Vía Bucaramanga - Rionegro debido al crecimiento del caudal del río Negro, provocando caída de la banca cerca al sector conocido como Sardinas.	
21 de Diciembre de 2010	Se presentó la inundación por el crecimiento del caudal del río Negro provocando deslizamientos de tierra en la vereda Barcelona del municipio Rionegro	

Nota: Autor

Con base en la información anterior, se procedió a consultar los registros históricos de precipitación en las diferentes estaciones con influencia sobre la cuenca para los días de los reportes, encontrándose información parcial para los 3 eventos reportados en el año 2010, como se muestra en la **Tabla 21**, donde algunos de los eventos coinciden con los días seleccionados para el análisis espacial realizado en el presente capitulo; sin embargo, no siempre el día del reporte del evento coincidió con el día de la precipitación, como es el caso del evento reportado el 21 de diciembre que fue provocado por la alta precipitación que se presentaban días atrás.

Tabla 21. Valores totales diarios de precipitación registrados en días con eventos de inundación reportados.

Valores diarios de precipitación registrados en días con reporte de inundación en el río negro							
FECHA	P(Cachiri _mm)	P(Llano de Palma_mm)	P(Portachuel o_mm)	P(VivSurata _mm)	P(El Playon_mm)	P(Matajira_ mm)	P(Las Palmas _mm)
01/12/2010	2,52	0,00	2,54	2,42	0,00	23,5	5,00
20/12/2010	0,20	0,11	3,67	0,35	0,00	5,60	0,00
21/12/2010	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Nota: Autor

De esta revisión de la información se pudo concluir que los eventos de inundación reportados que se han presentado en la ribera del río Negro, aparentemente no son provocados por un evento puntual y aislado de precipitación, sino que cuando se presentan dichos eventos es porque desde días previos se viene presentando un aumento significativo de las precipitaciones en la cuenca, tal como se muestra en la **Tabla 22**.

Tabla 22. Precipitaciones totales diarias registradas en días previos al reporte de inundaciones en la ribera del río Negro.

Precipitación días previos al reporte de evento de inundación en el río negro							
FECHA	P(Cachiri _cm)	P(Llano de Palma_mm)	P(Portach uelo_mm)	P(VivSur ata_cm)	P(El Playon_m m)	P(Mataj ira_mm)	P(Las Palmas _mm)
25/11/2010	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0
26/11/2010	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0
27/11/2010	2,33	0,16	0,20	0,86	0,00	5,4	0,0
28/11/2010	6,43	0,21	3,62	2,02	0,00	2,2	45,2
29/11/2010	1,50	0,68	0,07	0,42	0,00	2,1	0,0
30/11/2010	2,30	0,00	0,08	0,20	0,00	22,5	14,6
1/12/2010	2,52	0,00	2,54	2,42	0,00	23,5	5,0
2/12/2010	6,89	0,77	0,65	0,32	0,00	1,5	80,0
3/12/2010	2,80	0,56	1,04	1,22	0,00	3,1	25,5
4/12/2010	0,22	0,81	0,22	0,27	0,00	0,3	40,7
5/12/2010	0,15	0,07	0,00	0,00	0,00	0,0	7,9
6/12/2010	0,86	0,00	0,00	0,06	0,00	0,0	0,0
7/12/2010	0,06	0,00	0,09	0,44	0,00	0,0	0,0
8/12/2010	0,00	0,21	0,04	0,00	0,00	0,0	0,0
9/12/2010	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	1,9	0,0
10/12/2010	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0

Precipitación días previos al reporte de evento de inundación en el río negro							
FECHA	P(Cachiri_cm)	P(Llano de Palma_mm)	P(Portachuelo_mm)	P(VivSurata_cm)	P(El Playon_mm)	P(Matajira_mm)	P(Las Palmas_mm)
11/12/2010	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,0	0,0
12/12/2010	0,00	0,02	2,89	0,06	0,00	0,0	6,3
13/12/2010	0,52	0,26	0,00	0,18	0,00	1,3	5,2
14/12/2010	0,63	0,00	0,12	1,28	0,00	0,0	57,9
15/12/2010	0,21	0,08	4,78	1,78	0,00	3,8	23,6
16/12/2010	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,0	15,2
17/12/2010	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	2,5
18/12/2010	0,51	0,00	7,76	1,69	0,00	0,0	0,0
19/12/2010	0,00	0,31	6,51	0,44	1,00	3,7	0,0
20/12/2010	0,20	0,11	3,67	0,35	0,00	5,6	0,0
21/12/2010	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0
22/12/2010	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	0,0	0,0
23/12/2010	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	1,6	0,0
24/12/2010	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0
25/12/2010	0,14	0,02	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0
26/12/2010	0,00	0,06	0,09	0,00	0,00	0,0	0,0
27/12/2010	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0
28/12/2010	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0
29/12/2010	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0
30/12/2010	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0

Nota: Autor

De acuerdo a lo expuesto anteriormente en la subcuenca de estudio se observa que las condiciones de humedad que se presentan son CAH I y CAH II (ver **Tabla 23**).

Tabla 23 Condiciones de humedad antecedente en la subcuenca de Rio Negro.

Evento	Estación	Precipitación Acumulada de los 5 días previos al evento en consideración (mm)	CAH
1/01/2010	Cachiri	12,56	I
1/01/2010	Llano de palma	1,05	I
1/01/2010	Portachuelo	3,97	I
1/01/2010	VivSurata	3,50	I
1/01/2010	El Playon	0,00	I
1/01/2010	Matajira	32,20	I
1/01/2010	Las Palmas	59,80	II

Evento	Estación	Precipitación Acumulada de los 5 días previos al evento en consideración (mm)	CAH
20/12/2010	Cachiri	0,72	I
20/12/2010	Llano de palma	0,39	I
20/12/2010	Portachuelo	19,06	I
20/12/2010	VivSurata	3,91	I
20/12/2010	El Playon	1,00	I
20/12/2010	Matajira	7,50	I
20/12/2010	Las Palmas	41,30	II
21/12/2010	Cachiri	0,71	I
21/12/2010	Llano de palma	0,50	I
21/12/2010	Portachuelo	17,95	I
21/12/2010	VivSurata	2,48	I
21/12/2010	El Playon	1,00	I
21/12/2010	Matajira	9,30	I
21/12/2010	Las Palmas	17,70	I

Nota: Autor

En el informe de hidrología se presenta mayor información del analisia del represente análisis correpondiente alnúmero de curva obtenido en relación a las condiciones de antecedentes de humedad de acuerdo al uso y coberturas del suelo y los tipos de suelo.

4.2.4.1.3.2 Valores del número de curva CN

En la **Tabla 24** se lista por subcuenca los números de curva por microcuenca determinados por promedios ponderados para cada una de las condiciones de antecedentes, y en el informe hidrológico se presenta su distribución espacial.

Tabla 24. Valores de número de curva por Microcuenca

Subcuenca	CN CAH I	CN CAH II	CN CAH III
Santacruz	58,92	76,3	88,73
Samacá	62,85	79,28	90,41
Bajo Rio Negro Norte	63,19	79,47	90,44
Bajo Rio Negro Sur	65,76	81,01	90,9

Nota: Autor

4.2.4.2 Tiempo de retardo

4.2.4.2.1 Tiempo de retardo SCS

Se determinaron los valores de tiempo de retardo por el método de SCS para cada una de las microcuencas los cuales se muestran en la **Tabla 25**:

Tabla 25. Valor de Tiempo de Retardo SCS

Subcuenca	T l(Horas) CAH (I)	Tl (Horas) CAH (II)	T l(Horas) CAH (III)
Santacruz	3,19	2,63	2,35
Samacá	2,18	1,84	1,66
Rio Negro Bajo Norte	1,29	1,09	0,99
Rio Negro Bajo Sur	1,27	1,08	0,99

Nota: Autor

4.2.4.2.2 Tiempo de retardo Snyder

Se determinaron los valores de tiempo de retardo por el método de Snyder para cada una de las microcuencas los cuales se muestran en **Tabla 26**.

Tabla 26. Valor de Tiempo de Retardo Snyder

Subcuenca	Tl (Horas)
Samacá	3,81
Santacruz	6,58
Rio Negro Norte	3,00
Rio Negro Sur	3,02

Nota: Autor

El coeficiente al pico es asumido igual a 0.60.

4.2.4.3 Coeficiente de almacenamiento clark

Se determinaron los valores de coeficiente de almacenamiento por el método de Clark para cada una de las microcuencas los cuales se muestran en **Tabla 27**

Tabla 27. Coeficiente de Almacenamiento

Subcuenca	Coeficiente de Almacenamiento
Santacruz	3,79
Samacá	2,51
Rio Negro Norte	1,68

Subcuenca	Coeficiente de Almacenamiento
Rio Negro Sur	1,43

Nota: Autor

4.2.5 Modelo HEC-HMS

Una vez obtenidos los parámetros producto de los análisis realizados anteriormente, fueron ingresados en el sistema de modelamiento hidrológico, Hydrologic Engineering Center (HEC) del U.S. Army Corps of Engineers HEC- HMS versión 4.2.1, por medio del cual se realiza la transformación de la lluvia en hidrogramas de salida.

Para el presente análisis, existen los siguientes condicionantes

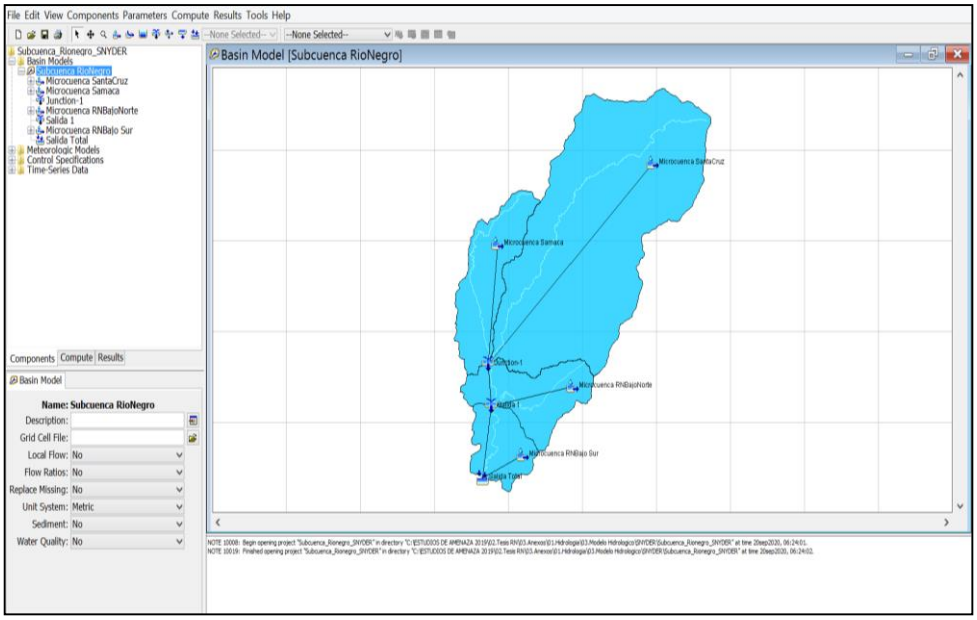
- La simulación se limita a eventos de lluvia, consecuencia de la propia aplicación del modelo a la simulación de avenidas.
- En la modelación no se incluye la escorrentía subsuperficial al no disponer de datos de los parámetros que caracterizan el mismo.

Los parámetros ingresados para la simulación del modelo son:

- Valor de área de drenaje. **Tabla 2**
- Valor de Tiempo de Concentración. **Tabla 2**
- Valores de números de curvas. **Tabla 24**
- Valor de tiempo de retardo o desfase. **Tabla 25** y **Tabla 26**
- Lluvia de diseño: Expuestos en el apartado **4.2.3.5**

Es así como se establece el modelo hidrológico de las subcuenca de estudio en el software Hec-HMS (**Figura 4**), obteniendo los resultados que se exponen a continuación.

Figura 4. Modelo Hidrológico Subcuenca Rio Negro



Fuente: Elaboración Propia

4.2.6 Estimación de caudales

Los caudales pico obtenidos a la Salida Total para los números de curva (CN) correspondientes a condiciones antecedente de humedad (CAH (I) y CAH (II)), se presentan a continuación (ver **Tabla 28** y **Nota:** Autor

Tabla 29):

Tabla 28. Caudales Máximos por periodo de retorno de la Salida Total de la subcuenca del Rio Negro (CN-CAH (I))

Caudales (m3/s) Pico Salida Total					
Método	**Tr 500**	**Tr 100**	**Tr 50**	**Tr 25**	**Tr 10**
CLARK	614,2	342,7	259,5	192,8	125,4
SNYDER	425,5	238,9	181,6	135,3	88,6
SCS	4606,5	2411,4	1735,8	1241,5	765,5
Promedio	1882,07	997,67	725,63	523,20	326,50

Nota: Autor

Tabla 29. Caudales Máximos por periodo de retorno de la Salida Total de la subcuenca del Rio Negro (CN-CAH (II))

Caudales (m3/s) Pico Salida Total					
Método	**Tr 500**	**Tr 100**	**Tr 50**	**Tr 25**	**Tr 10**
CLARK	1028,5	666,4	546,0	443,7	332,3
SNYDER	705,2	458,2	376,0	306,0	229,8
SCS	8247,0	5273,2	4276,4	3445,6	2553,5
Promedio	3326,9	2132,6	1732,8	1398,4	1038,5

Nota: Autor

Los caudales pico en la Salida 1, correspondientes a los generados por las Microcuencas de Santacruz, Samacá y Rionegro Bajo Norte, para los números de curva (CN) correspondientes a condiciones antecedentes de humedad (CAH (I) y CAH (II)), se presentan a continuación (ver **Tabla 30** y **Nota:** Autor

Tabla 31):

Tabla 30. Caudales Máximos por periodo de retorno de la Salida 1 de la subcuenca del Rio Negro (CN-CAH (I))

Caudales (m3/s) Pico Salida 1					
Método	**Tr 500**	**Tr 100**	**Tr 50**	**Tr 25**	**Tr 10**
CLARK	534,6	293,8	220,7	162,3	103,9
SNYDER	360,4	199,6	150,6	111,3	71,9
SCS	3824,3	2141,2	1607,2	1168,2	712,9
Promedio	1573,10	878,20	659,50	480,60	296,23

Nota: Autor

Tabla 31. Caudales Máximos por periodo de retorno de la Salida 1 de la subcuenca del Rio Negro (CN-CAH (II))

Caudales (m3/s) Pico Salida 1					
Método	**Tr 500**	**Tr 100**	**Tr 50**	**Tr 25**	**Tr 10**
CLARK	917,70	590,7	482,4	390,4	290,7
SNYDER	611,9	394,9	323,0	261,9	195,6
SCS	7206,40	4573,3	3693,7	2944,8	2130,2
Promedio	2912,0	1852,9	1499,7	1199,0	872,2

Nota: Autor

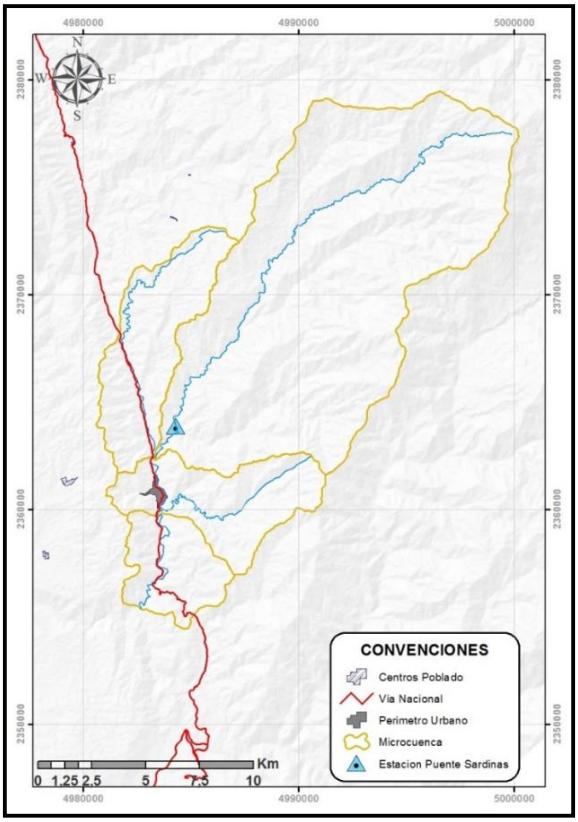
Ahora bien, se observa que conforme a los registros precipitación acumulada de los 5 días previos al evento considerados en el numeral 4.2.4.1.3.1 del presente informe, la condición

antecedente de humedad en la subcuenca de Rio Negro más recurrente corresponde a la condición antecedente de humedad número uno-(CAH I) (Ver **Tabla 23**). Es así, como se opta por acoger los modelos desarrollados con el número de curva (CN) correspondientes a la condición antecedente mencionada (CAH I). (Ver **Tabla 30**)

4.2.7 Caudales extremos a partir de información hidrométrica.

En base en la información que suministra la plataforma DHIME del IDEAM, del área de estudio se obtuvo caudales máximos mensuales correspondientes al periodo de 1990 a 2019 con el 96% de completitud, registrados por el limnigrafo de la Estación Puente Sardinas [23197130] para mayor información remitirse al Volumen III - Anexo I.4.1, localizada en la microcuenca Santacruz en la coordenadas geográficas de Latitud: 7.2930555560° y Longitud: -73.14222222° (N: 2363874,761954 m ; E: 4984307,680001 m, Origen CTM-12), la cual monitorea la corriente Quebrada Santacruz (Ver **Figura 5**).

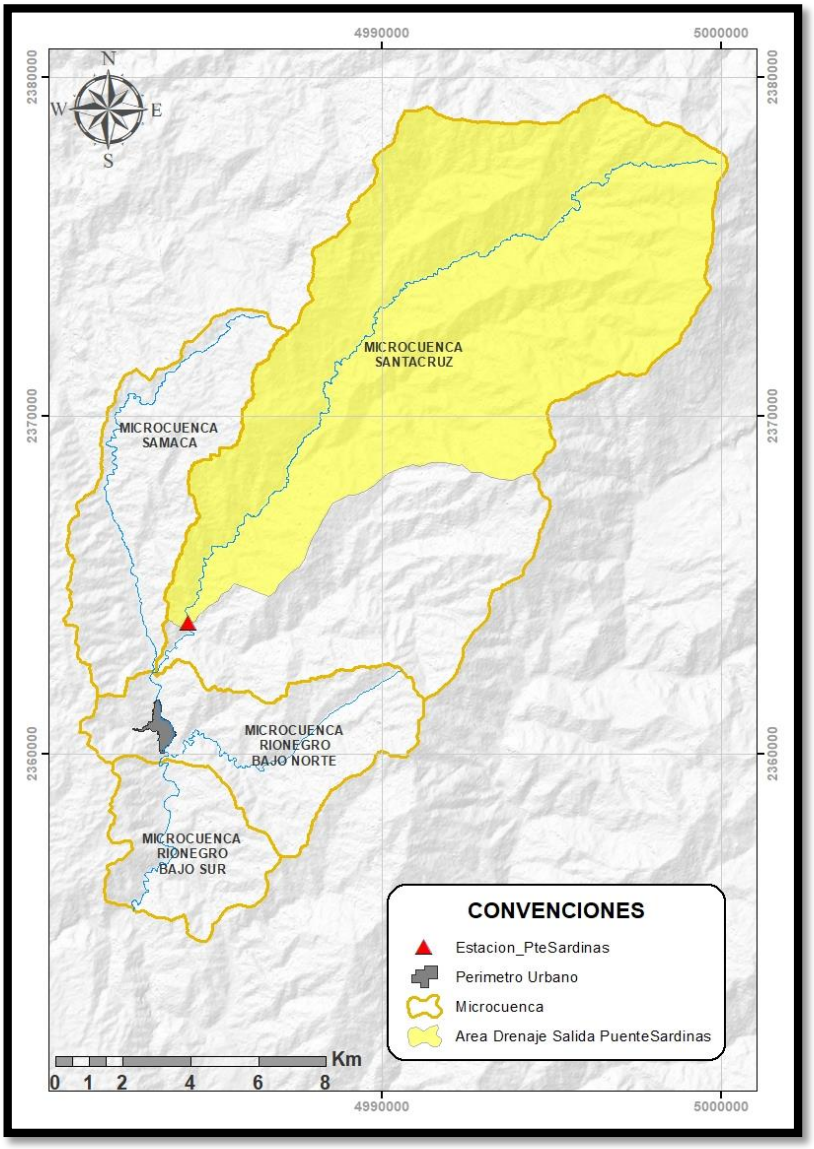
Figura 5. Estación Limnigrafica Puente Sardinas, Corriente Quebrada Santa Cruz



Fuente: Elaboración Propia

Es importante precisar que la estación Puente Sardinas no se encuentra ubicada en el punto de cierre de la Microcuenca Santacruz. El área de drenaje teniendo como punto de salida la localización de dicha estación, abarca un área aproximada de 126,066 km^2 equivalente al 73.53% del área total de la Microcuenca en mención (Ver **Figura 6**).

Figura 6. Área de drenaje al punto de salida de la Estación Limnigráfica Puente Sardinas



Fuente: Elaboración Propia

4.2.7.1 Distribución de valores extremos

Una vez realizada el procesamiento estadístico de los registros históricos de caudales máximos mensuales de la estación Puente Sardinas [23197130] (Prueba de datos dudosas por el método de Water Resources Council y prueba de bondad de ajuste por el método de Kolmogorov Smirnov), como se describen en el numeral 4.2.3.2.1 al 4.2.3.2.4, se obtiene que

de las siguientes funciones de probabilidad aplicadas Normal, Gumbel, Lognormal, Pearson III y Logpearson III, la que más se ajusta es distribución Normal (**Tabla 32**).

Tabla 32. Prueba de bondad de ajuste Caudales máximos Estación Puente Sardinas.

Estación	Distrib. Normal	Distrib. Gumbel	Distrib. LogNormal	Distrib. Pearson III	Distrib. Log Pearson III
Puente Sardinas	**0.11403**	0.13357	0.13357	0.13566	0.15488

Nota: Autor

De acuerdo a lo anterior, se determinó el caudal máximo para los distintos períodos de retorno (ver **Tabla 33**). Para mayor información remitirse al Volumen III - Anexo I.2.4

Tabla 33. Caudales máximos para diferentes periodos de retorno de la estación hidrométrica Puente Sardinas – Quebrada Santa Cruz

ESTACION	CAUDAL MAXIMOS (Q m3/s) de la estación Puente Sardinas				
	Tr 10	Tr 25	Tr 50	Tr 100	Tr 500
Estación Puente Sardinas	66,1	75	80,7	85,9	96,3

Nota: Autor

4.2.8 Caudal adoptado

Los modelos pueden confirmarse mediante la demostración de concordancia entre la observación y la predicción, pero la confirmación es inherentemente parcial. La confirmación completa está lógicamente excluida por la falacia de afirmar lo consecuente y por el acceso incompleto a los fenómenos naturales. Los modelos solo pueden evaluarse en términos relativos y su valor predictivo siempre está abierto a incertidumbres (Oreskes et al., 1994).

Por lo anterior, con el objeto de verificar los datos determinados por los métodos de hidrograma unitario sintético de Clark, Snyder y SCS, usando los valores de números de curva (CN) correspondientes a las condiciones antecedentes de humedad CAH I, se realizó una comparación entre los valores de los caudales pico de la microcuenca de Santacruz y los

caudales extremos para diferentes periodos de retorno calculados con el método de la transposición de caudales a partir de la información hidrométrica de la estación Puente Sardinas.

Para proceder determinar la transposición de datos de caudal, se adopta la recomendación dada por el manual de drenaje del INVIAS 2009*;* donde sugiere que *"cuando la estación hidrométrica sobre la corriente de agua que cruza la vía que se estudia no se encuentre exactamente en el sitio de proyecto de la obra de drenaje vial, sino en la misma hoya hidrográfica, en otra ubicación. Se pueden transferir caudales máximos instantáneos anuales de diferentes periodos de retorno de esta estación hasta el sitio de proyecto, mediante relaciones de áreas de drenaje, así:*

$$Q_{SP} = Q_{EH} \, x \, (A_{SP}/A_{EH})^{X}$$

Donde:

Q_{SP}: Caudal en el sitio de proyecto, en metros cúbicos por segundo (m^3/s).
Q_{EH}: Caudal en la estación hidrométrica, en metros cúbicos por segundo (m^3/s).
A_{SP}: Área hoya hidrográfica hasta el sitio de proyecto, en kilómetros cuadrados (km^2).
A_{EH}: Área hoya hidrográfica hasta la estación hidrométrica, en kilómetros (km^2).

El exponente x es un valor que fluctúa usualmente entre 0.5 y 0.75. A falta de datos de investigación, se acostumbra tomar un valor igual a 0.5.

En todo caso, para la aplicación de esta metodología es imperativo que las áreas de drenaje no sean muy diferentes. En general, esta diferencia no podrá ser mayor o menor al 50 % del valor original del área de drenaje.

La misma metodología se puede aplicar para hoyas hidrográficas que sean hidrológica y climatológicamente homogéneas".

Para el área de estudio, se tiene que el valor original del área de drenaje, es decir el área de la microcuenca de Santa Cruz al punto de salida de la Estación Limnigráfica Puente Sardinas, es de 126,066 km^2 teniendo una diferencia del 26,47% del área total de la microcuenca Santa Cruz (Ver **Figura 6**). Es así que es válido el uso de este método dado que no supera el 50% del valor original, como se menciona en el Manual de drenajes INVIAS 2019.

Tabla 34. Caudales máximos para diferentes periodos de retorno Microcuenca Santa Cruz –Transposición de datos de caudal de la estación Puente Sardinas.

CAUDAL MAXIMOS (Q m3/s) Transposición de Caudales				
Tr 10	**Tr 25**	**Tr 50**	**Tr 100**	**Tr 500**
77,08	87,43	94,12	100,14	112,33

Nota: Autor

Una vez obtenidos los resultados de caudales máximos para diferentes periodos de retorno de la Microcuenca Santa Cruz por medio de la Transposición de datos de caudal de la estación Puente Sardinas (Ver **Tabla 34**), se procede a confrontar con los datos obtenidos por los diferentes métodos de hidrograma unitario desarrollados en el presente estudio a la salida de la Microcuenca Santa Cruz (CN-CAH (I)) (Ver **Tabla 35**).

Tabla 35 Caudales Máximos por periodo de retorno de la Salida de la Microcuenca Santa Cruz (CN-CAH (I)) Modelos hidrogramas unitarios.

CAUDAL MAXIMOS (Q m3/s) Transposición de Caudales					
Método	**Tr 500**	**Tr 100**	**Tr 50**	**Tr 25**	**Tr 10**
CLARK	310,0	160,0	115,8	81,2	47,8
SNYDER	199,3	102,9	74,5	52,3	30,7
SCS	3146,1	1716,3	1266,8	899,6	521,9

Nota: Autor

Con los resultados expuestos anteriormente, se puede observar que el promedio diferencial entre dichos valores para el método Clark corresponde al 33%, para el método Snyder al 35% y para el método de SCS un diferencial superior al 300%. Que estos valores de diferencia no sean menores obedece a la incertidumbre estadística dada a la posible aleatoriedad de los datos, no hay métodos estándares, estos proporciona una variedad proveniente de varias fuentes relacionadas en la medición, en los procesamientos, métodos usados y estimaciones. Sumado a la variabilidad temporal y diferencia del número de registros de monitoreo entre la estación Limnigráfica Puente Sardinas y las estaciones pluviométricas analizadas, teniendo un registro de datos de 29 años y 47 años respectivamente.

Asimismo, se suma que en el área de estudio a la fecha, no se cuenta con estudios previos que permitan contar con un antecedente del análisis del comportamiento de los caudales extremos de la subcuenca para diferentes periodos de retorno. Además, de no contar con registros de monitoreo continuos de las corrientes principales en los puntos de cierre de las microcuenca respectivas. Lo que no permite obtener insumos suficientes para calibrar óptimamente los modelos aplicados.

Así las cosas, la mejor asimilación de los resultados obtenidos para los fines del presente estudio corresponde a los obtenidos por el Modelo del hidrograma Unitario de Clark , además de ser este el más cercano al promedio de las metodologías anteriormente desarrolladas (Ver **Tabla 28**, **Tabla 30** y **Tabla 36**).

Tabla 36. Caudales Máximos adoptados por periodo de retorno subcuenca del Rio Negro.

Caudales Pico (m3/s)					
Punto de Salida	**Tr 500**	**Tr 100**	**Tr 50**	**Tr 25**	**Tr 10**
Salida 1	534,6	293,8	220,7	162,3	103,9
Salida Total	614,2	342,7	259,5	192,8	125,4

Nota: Autor

Finalmente teniendo en cuenta lo expuesto por Posada (1994), el cual indica que el caudal que representa la banca llena, es decir, aquel que ocupa el canal principal de la corriente, corresponde a un caudal con periodo de retorno que oscila entre 1.5 años y 2.33 años. Se ejecutó por este mismo método los calculó de los caudales picos esperados para un periodo de retorno de 2.33 años con el objetivo de validar el modelamiento hidráulico, evaluando el llenado de la banca llena de la corriente.

Tabla 37. Caudales Máximos Adoptados por periodo de retorno de la salida total de la subcuenca del Rio Negro

Caudales (m3/s) Pico Salida Total						
Método	**Tr 500**	**Tr 100**	**Tr 50**	**Tr 25**	**Tr 10**	**Tr 2.33**
CLARK	492,7	342,7	259,5	192,8	125,4	56,6

Nota: Autor

Tabla 38. Caudales Máximos Adoptados por periodo de retorno de la Salida 1 de la subcuenca del Rio Negro

Caudales (m3/s) Pico Salida 1						
Método	**Tr 500**	**Tr 100**	**Tr 50**	**Tr 25**	**Tr 10**	**Tr 2.33**
CLARK	438,0	293,8	220,7	162,3	103,9	45.1

Nota: Autor

4.3 Hidraulica

El desarrollo metodológico de la modelación hidráulica se basó en el diagrama de flujo de modelación hidráulica de inundaciones de Arbeláez Salazar y Díaz Granados 2011 como se presenta en el informe hidráulico.

El tipo de modelo que se utilizó es bidimensional con el uso de software IBER, este consta de 3 módulos de cálculo principales (hidrodinámico, turbulencia y transporte de sedimentos), que trabajan sobre una malla no estructurada de volúmenes finitos formada por elementos triangulares o cuadriláteros. El modulo que se empleó para el desarrollo del modelo es el

Módulo hidrodinámico que resuelven las ecuaciones de aguas someras bidimensionales promediadas en profundidad (ecuaciones de St. Venant 2D). (Gobierno de España, CEDEX, Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, FLUMEN CIMNE 2010).Ver complemento en el informe hidráulico.

El estudio se desarrolló en el siguiente orden operacional que se describe en el Manual Básico de usuario (Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas).

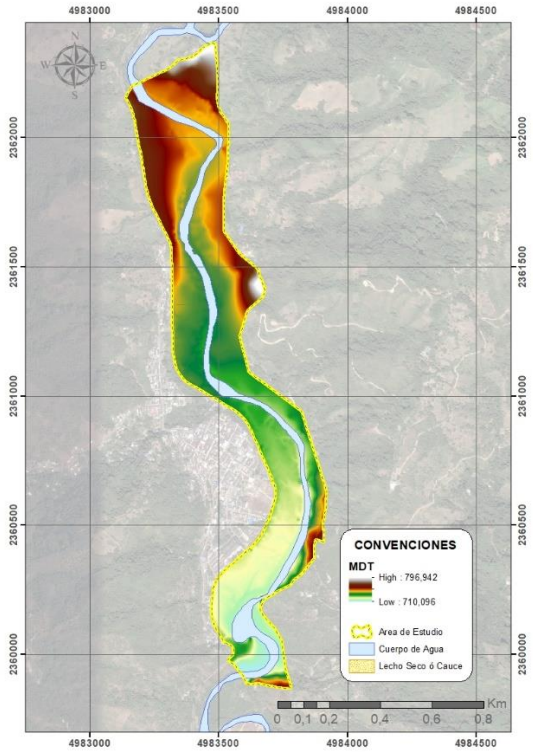
1. Creación de la Geometría y Obtención de la RTIN
2. Definición de las Condiciones de Contorno
3. Condiciones Iniciales del Modelo IBER,
4. Generación de la Malla de Cálculo
5. Asignación de los Usos del Suelo y Definición de la Rugosidad del Río
6. Asignación de los Caudales Máximos Instantáneos de Entrada en Régimen Permanente Para el Modelo IBER,
7. Comparación con la huella de inundación de la obtención de información gráfica de eventos
8. Obtención de las Manchas de Inundación para Diferentes Periodos de Retorno

4.4 Modelo geométrico y obtención del RTIN

El Modelo Digital de Elevaciones (MDT) define la topografía del área de estudio mediante la representación de la elevación de cualquier punto a una resolución espacial específica. Para el presente estudio a partir del topo-batimetría realizada se construyó el MDT en formato TIN y Raster con un tamaño de celda de 1.0*1.0 m lo que proporciona un buen detalle representativo de terreno tanto del cauce como de sus áreas aferentes. (Ver **Figura 7**)

Para mayor información remitirse al Volumen III - Anexo II.03 (Nube de puntos) e informe topográfico Anexo II.08.

Figura 7. Modelo Digital de Elevaciones / TIN



Fuente: Autor

4.5 AFOROS

Para el presente estudio se realizaron dos aforos con fecha de 26 de julio de 2019 y 14 de octubre de 2019. Las fechas de estos aforos fueron escogidas basándose en que para el área de estudio se originan dos períodos de lluvia, uno seco intermedio durante los meses de julio y agosto y un segundo más seco que el anterior, durante los meses de diciembre, enero, febrero y parte de marzo. Por tanto, el aforo de Julio se realizó en periodo seco, y el aforo de Octubre se realizó en periodo húmedo.

La localización de la sección de aforos se muestra en la **Tabla 39**

Tabla 39. Ubicación de sección de aforos

PUNTO	N	E	COTA
A1	2361426,847	4983446,373	734,949
A2	2361437,522	4983463,232	734,574
A3	1295890,257	1102429,485	734,821
A4	1295896,31	1102446,609	734,577

Nota: Autor

Los resultados obtenidos se pueden aprecia en la **Tabla 40**. Para mayor información remitirse al Volumen III - Anexo II.02 (Aforos).

Tabla 40. Tabla de aforos

Aforo	Fecha	Q [m³/s]		Calado promedio
		Q Superficial (A*V_S)	Q Medio (A*0.85V_S)	
1	26-jul-19	9,66	8,20	0,67
2	26-jul-19	8,55	7,27	0,62
	Promedio	**9,11**	**7,73**	**0,64**
3	14-oct-19	11,27	9,58	0,76
4	14-oct-19	10,62	9,02	0,74
	Promedio	**10,94**	**9,30**	**0,75**

Nota: Autor

4.6 Condiciones de Contorno

En un modelo bidimensional, es necesario distinguir entre dos tipos de contornos: abiertos y cerrados. Los contornos cerrados, también llamados contornos de tipo pared, son impermeables, no permitiendo el paso del fluido a través de ellos (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino et al., 2010).

En los contornos abiertos, como lo es presente estudio se pueden imponer diferentes tipos de condiciones de contorno. Para que las ecuaciones de aguas someras bidimensionales estén bien planteadas desde el punto de vista matemático, el número de condiciones a imponer en los contornos abiertos depende de si se trata de un contorno de entrada o de salida de flujo,

así como del tipo de régimen en el contorno (rápido/lento). En un contorno de entrada es necesario imponer 3 condiciones de contorno si el régimen es supercrítico (una para cada una de las tres ecuaciones de St.Venant), mientras que si se produce régimen subcrítico es suficiente con imponer 2 condiciones. En un contorno de salida es suficiente con imponer una única condición si el régimen es subcrítico, mientras que no es necesario imponer ninguna condición si el régimen es supercrítico (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino et al., 2010).

Lo más habitual en hidráulica fluvial es que el flujo discurra en régimen lento en los contornos del tramo modelado. En este caso lo más habitual es imponer el calado o el nivel de la superficie libre en el contorno de aguas abajo. En el contorno aguas arriba se suele imponer el caudal total de entrada (m^3/s) y la dirección del flujo, que en general, a falta de datos más precisos, se asume perpendicular al contorno de entrada. Aunque menos habitual, también es posible introducir aguas arriba las componentes de la velocidad (m/s) o del caudal específico (m^2/s). En el caso de que se imponga el caudal total en el contorno de entrada, se realiza una distribución del caudal unitario (m^2/s) en el contorno de entrada, según la siguiente expresión (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino et al., 2010):

$$q_n = \frac{h^{5/3}}{\int h^{5/3} dy} Q$$

En donde qn es el caudal específico (m^2/s) normal en cada punto del contorno de entrada, y Q es el caudal total de entrada por dicho contorno. La integral en el denominador se extiende a lo largo de todo el contorno considerado.

4.6.1 Condiciones de entrada del modelo

Para el presente estudio el contorno aguas arriba se impuso con un caudal total de entrada (m3/s) correspondiente a cada periodo de retorno de 10, 25, 50,100 y 500 años y una dirección de flujo asumida como perpendicular al contorno de entrada.

4.6.2 Condiciones de salida del modelo

El contorno de salida no fue necesario imponer alguna condición debido a que se consideró esa salida en régimen supercrítico/critico, además de tener en cuenta que no se conoce la curva de gastos en la sección de salida del modelo, esto debido a que no es una sección aforada.

4.7 Condiciones Iniciales

Las condiciones iniciales representan el estado del terreno al inicio de la simulación, indicando si presenta estado seco o mojado. Iber como condición inicial permite fijar un calado (altura de la lámina de agua con respecto al terreno) o una cota (cota absoluta del agua respecto al sistema de referencia del Modelo Digital del Terreno)(Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino et al., 2010).

Teniendo en cuenta que la malla de cálculo es muy robusta debido topografía del área de estudio, el procedimiento de asignación de cotas a lo largo del trayecto analizado se considera dispendioso, ya que debería asignarse estos valores a cada triangulo resultante. Por lo tanto, se opta por asignar la condición inicial en modo calado, ya que se puede realizar la asignación a la geometría y este es transferido a la malla al crearla. Se fijó como condición inicial un calado de 0.64 m al área propia del cauce definido en el levantamiento topo-batimétrico. El valor del calado asumido está justificado en los aforos realizados a la correntie en Julio y Octubre de 2019.Explícitamente el calado de 0.64m, se escogió del promedio de los calados

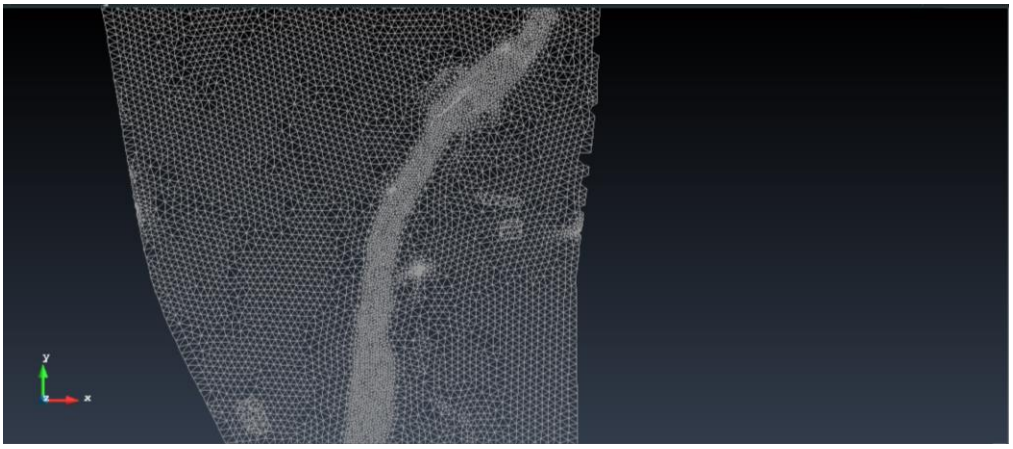
medidos en el aforo realizado en el periodo seco (Julio 2019). Ver apartado 4.5 4.5Aforos y para mayor información ver Volumen III - Anexo II.02 (Aforos).

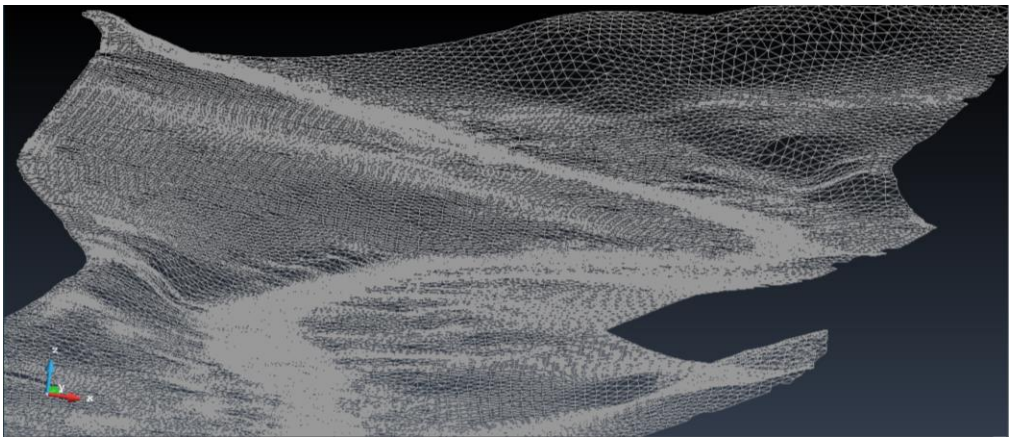
4.8 Generación de la malla de cálculo

Para resolver una ecuación diferencial por el método de volúmenes finitos es necesario realizar previamente una discretización espacial del dominio del área de estudio. Para ello se divide en celdas de tamaño relativamente pequeño (malla de cálculo). El modelo Iber trabaja con mallas no estructuradas formadas por elementos que pueden tener 3 o 4 lados. Se pueden combinar elementos irregulares de 3 y 4 lados dentro de la misma malla. La principal ventaja de trabajar con mallas no estructuradas es la facilidad con que se adecúan a cualquier geometría, ya que no es necesario que la malla tenga ningún tipo de estructura interna u organización. Esta característica las hace especialmente indicadas para su utilización en hidráulica fluvial (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino et al., 2010).

Para el área de estudio la geometría se ha formado por medio del RTIN generando una malla no estructurada como se muestra a continuación:

Figura 8. Malla de cálculo -RTIN





Fuente: Autor

4.9 Coeficiente de Manning

Para el modelamiento hidráulico de la corriente hídrica o cauce es importante definir el coeficiente de manning (n) el cual representa los efectos de la rugosidad a lo largo del canal.

El uso de métodos directos de medición, aunque da como resultado estimaciones confiables, estos no logran la estimación del coeficiente para situaciones críticas, dado a que las mediciones que se realizan en el cauce se hacen en condiciones diferentes a las críticas, resultando en imprecisión o subestimación del parámetro para las condiciones extremas de diseño de los modelos hidráulicos. Las mediciones realizadas para la estimación del coeficiente de rugosidad resultan ser poco precisas para los casos en los que la sección hidráulica del rio es muy variante, o se presentan llanuras de inundación, resultando en la medición del parámetro en muchos tramos y complicando el trabajo para la estimación del coeficiente (Rubio, 2011).

Para el área de estudio del presente trabajo se realiza un análisis de los coeficientes de rugosidad por métodos indirectos debido a que estos resultan en una mayor confiabilidad para la estimación de los coeficientes de rugosidad del cauce, ya que permiten el análisis de

diferentes escenarios a lo largo del cauce, con el objetivo de determinar las condiciones directas de diseño.

El coeficiente de Manning (n), entendido como una expresión cuantitativa de todos los efectos que retardan el flujo aumentan su profundidad, incluyendo equivalentes a las pérdidas de energía y la turbulencia. Sin embargo las pérdidas de energía están afectadas por distintos factores, por lo tanto el coeficiente de rugosidad de Manning (n) debe incluir el efecto de todos los factores que intervienen en la resistencia hidráulica de un río para determinado tramo. Estos factores se determinan individualmente para posteriormente ser sumados y establecer el valor único integral para cada tramo. Por tanto la sumatoria de las resistencias por diferentes factores conduce al cálculo de la resistencia total del tramo. De modo que la sumatoria de las resistencias por diferentes factores conduce al cálculo de la resistencia total para cada tramo (Rubio, 2011).

El método de Cowan o multiparamétrico es recomendado, considerando todas las variables que afectan la sección en estudio, el coeficiente de Manning (n) puede ser determinado para una zona representativa de un río para una sección transversal.

La relación de Cowan para el cauce principal del rio está dada por la siguiente ecuación: (Chow, 1984)

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m_5$$

Dónde:

n0: valor básico de n para canal recto, uniforme y liso en los materiales naturales involucrados

n_1: valor que debe agregarse a nm para corregir el efecto de las rugosidades superficiales

n_2: valor para considerar las variaciones en forma y tamaño de la sección transversal del canal

n_3: valor para considerar las obstrucciones

n_4: valor para considerar la vegetación y las condiciones de flujo

m_5: factor de corrección de los efectos por meandros en el canal

Los valores de n_0, n_1, n_2, n_3, n_4 y m_5 pueden seleccionarse de la Tabla 41.

Tabla 41.Valores para el cálculo del coeficiente de rugosidad mediante la ecuación de Cowan.

Condiciones del canal		Valores	
Material involucrado	Tierra	n_0	0.020
	Corte en roca		0.025
	Grava fina		0.024
	Grava gruesa		0.028
Grado de irregularidad	Suave	n_1	0.000
	Menor		0.005
	Moderado		0.010
	Severo		0.020
Variaciones de la sección transversal	Gradual	n_2	0.000
	Ocasionalmente alternante		0.005
	Frecuentemente alternante		0.010-0.015
Efecto relativo de las obstrucciones	Insignificante	n_3	0.000
	Menor		0.010-0.015
	Apreciable		0.020-0.030
	Severo		0.040-0.060
Vegetación	Baja	n_4	0.005-0.010
	Media		0.010-0.025
	Alta		0.025-0.050
	Muy alta		0.050-0.100
Grado de los efectos por meandros	Menor	m_5	1.000
	Apreciable		1.150
	Severo		1.300

Nota: *Ven Te Chow (1994).*

De acuerdo a lo anterior y con base información a las visitas de campo realizadas y fotografías aéreas se realizó la zonificación del coeficiente de rugosidad a lo largo del cauce canal del Rio Negro en el tramo de interés. Obteniendo un valor de Manning promedio calculado de 0.035 (Ver Tabla 42). Para mayor información ver Volumen III - Anexo II.04 (n de Manning).

Tabla 42. Valores para el cálculo del coeficiente de rugosidad mediante la ecuación de Cowan a lo largo del cauce canal del Rio Negro.

Nombre	**Cauce**												
	n0		**n1**		**n2**		**n3**		**n4**		**m5**		**n**
	grado	**valor**	**grado**	**valor**	**grado**	**valor**	**grado**	**valor**	**grado**	**valor**	**grado**	**valor**	
T1	3	0,024	2	0,005	1	0,000	2	0,012	1	0,000	1	1,000	**0,041**
T2	3	0,024	2	0,005	1	0,000	1	0,000	1	0,000	1	1,000	**0,029**

Nombre	Cauce												
	n0		n1		n2		n3		n4		m5		n
	grado	valor	grado	valor	grado	valor	grado	valor	grado	valor	grado	valor	
T3	4	0,028	2	0,005	1	0,000	2	0,012	1	0,000	1	1,000	**0,045**
T4	5	0,023	3	0,010	1	0,000	2	0,012	1	0,000	1	1,000	**0,045**
T5	3	0,024	2	0,005	2	0,005	1	0,000	1	0,000	1	1,000	**0,034**
T6	3	0,024	2	0,005	2	0,005	1	0,000	1	0,000	1	1,000	**0,034**
T7	3	0,024	2	0,005	1	0,000	1	0,000	1	0,000	1	1,000	**0,029**
T8	3	0,024	2	0,005	1	0,000	1	0,000	1	0,000	1	1,000	**0,029**
T9	5	0,023	2	0,005	2	0,005	1	0,000	1	0,000	1	1,000	**0,033**
T10	3	0,024	2	0,005	1	0,000	1	0,000	1	0,000	1	1,000	**0,029**
											Promedio		**0,035**

Nota: Autor.

4.9.1 Valores n de las planicies de inundación

Valores de rugosidad para canales y llanuras aluviales debe determinarse por separado. La composición, forma física, y la vegetación de una llanura aluvial puede ser muy diferente de los de un canal (Hornchen et al., 1993).

La ecuación de Cowan (1956) expuesta en el apartado anterior puede usarse para estimar n valores para una llanura inundación, realizando un ajuste para el parámetro de forma y el tamaño de la sección transversal (n_2), considerándolo no aplicable y definiendo con un valor de 0 y un ajuste al parámetro de Grados de efectos por meandros (m5), suponiendo que el meandro es 1.0 porque puede haber poco flujo en un canal serpenteante cuando hay llanura aluvial (Hornchen et al., 1993).

. **Tabla 43.**Valores para el cálculo del coeficiente de rugosidad mediante la ecuación de Cowan en la planicie de inundación.

Nombre	Planicie de Inundación												
	n0		n1		n2		n3		n4		m5		n
	grado	valor	grado	valor	grado	valor	grado	valor	grado	valor	grado	valor	
Arboles	1	0,020	3	0,010	No aplicable	0,00	4	0,055	3	0,037	No aplicable	1,00	**0,12**
Pastos	1	0,020	2	0,005		0,00	2	0,012	3	0,017		1,00	**0,05**
Pavimento	3	0,024	1	0,000		0,00	1	0,000	1	0,000		1,00	**0,02**
Suelo desnudo	5	0,023	1	0,000		0,00	1	0,000	1	0,000		1,00	**0,023**
Viviendas	4	0,028	4	0,020		0,00	4	0,055	1	0,000		1,00	**0,10**

Nota: Autor.

Por otra parte, para los mismos usos de suelo se consultó la librería incluida en el modelo de IBER, encontrando los valores n expuestos en la Tabla 44 , observando que los valores son similares entre ambas fuentes. Por lo anterior, para el desarrollo del presente estudio se opta por acoger los valores sugeridos por el modelo a utilizar. Ver Tabla 44.

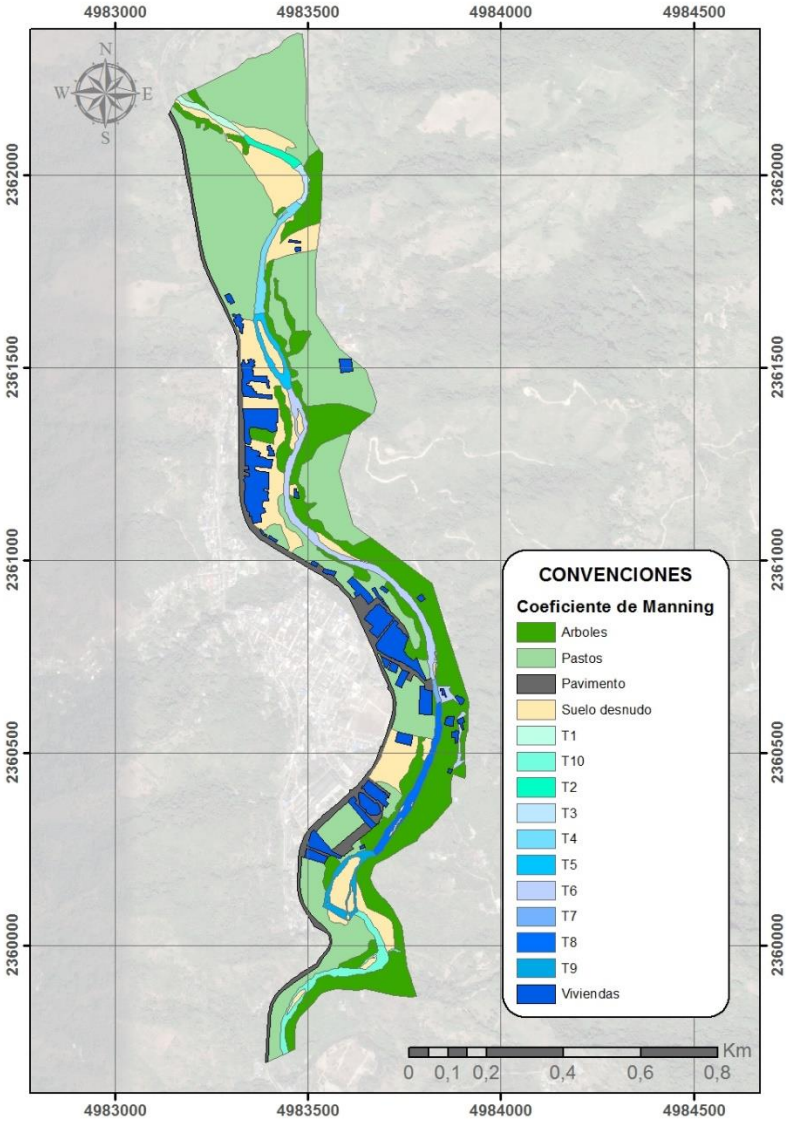
Tabla 44. Valores para el cálculo del coeficiente de rugosidad, librería de usos de suelo IBER.

Nombre	Coeficiente de Manning, n
Arboles	0,12
Pastos	0,05
Pavimento	0,02
Suelo desnudo	0,023
Viviendas	0,15

Nota: Autor.

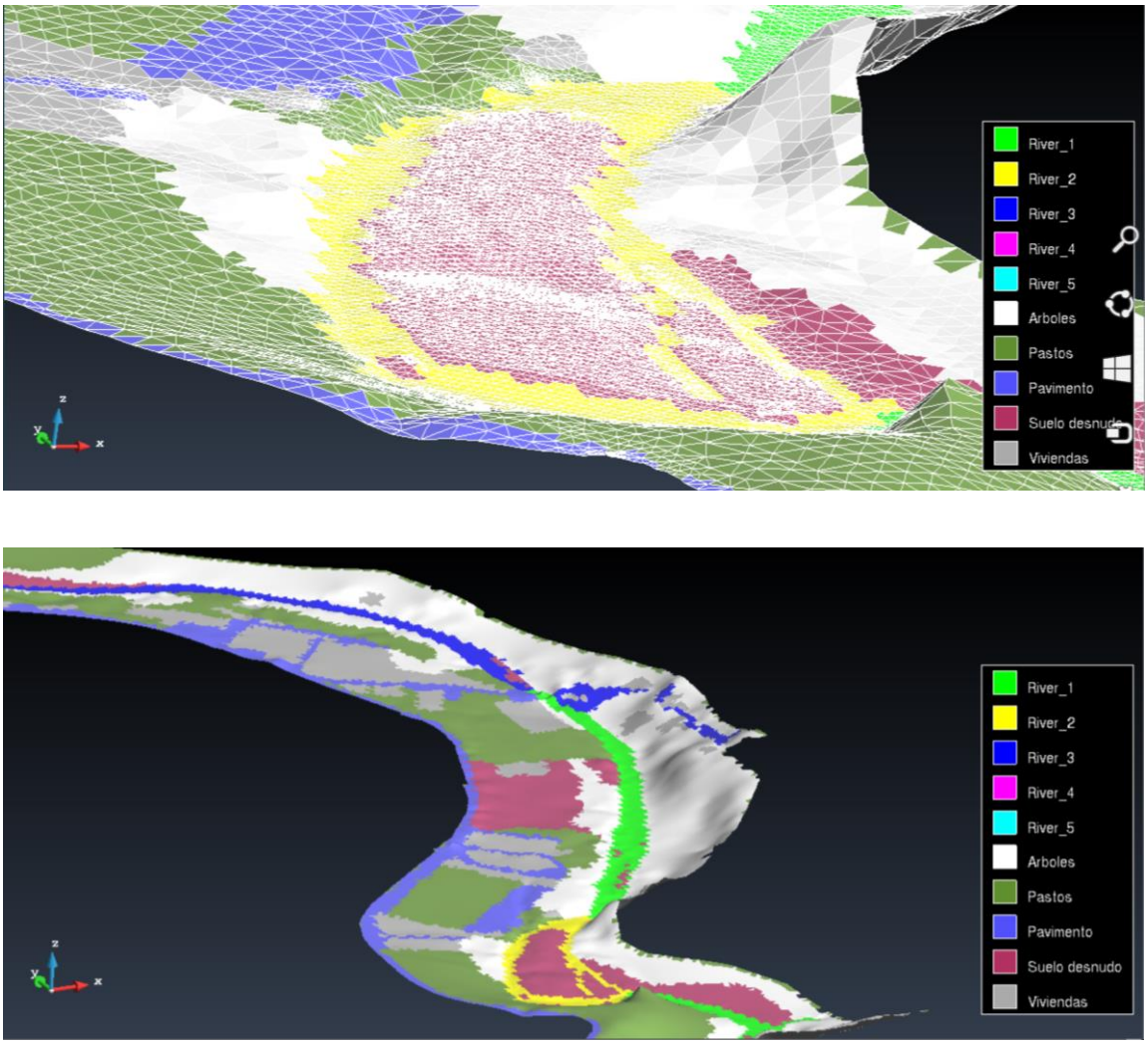
Finalmente en la **Figura 9** tal se muestra la distribución espacial de los usos de suelos distribuidos en el modelo IBER.

Figura 9. Usos del suelo ingresados en el modelo Iber



Fuente: Autor

Figura 10. Usos del suelo integrados en la malla de cálculo

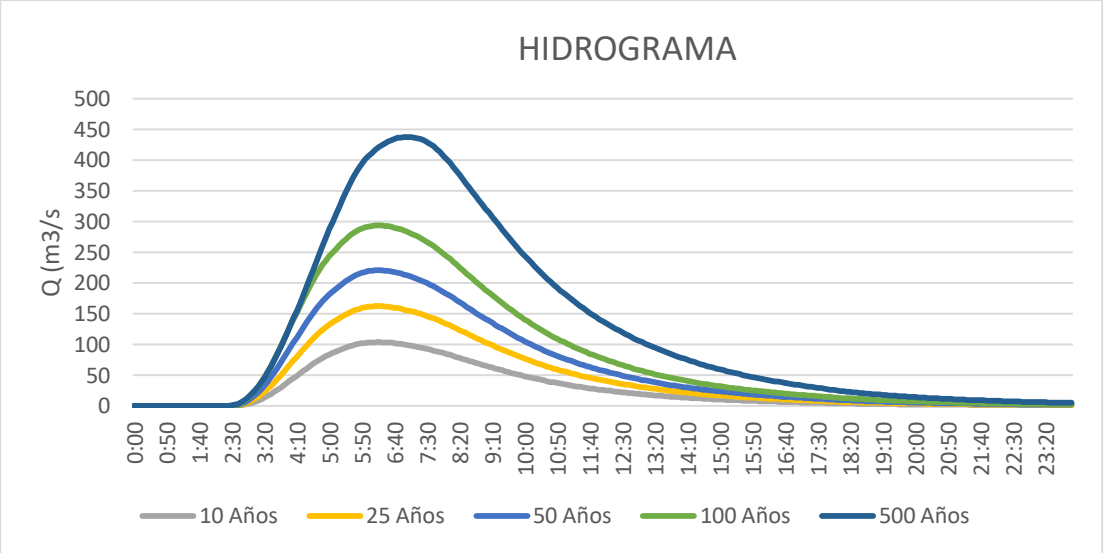


Fuente: Autor

4.10 Caudales

Los caudales asignados al modelo hidráulico corresponden a los determinados en el informe de hidrología, donde se extrajeron del modelo hidrológico, los hidrogramas de caudales con sus picos respectivos correspondientes al punto denominado “Salida 1” de la subcuenca del Rio Negro.

Figura 11. Hidrogramas ingresados en el modelo Iber



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 45. Valores pico de caudales por periodo de retorno de la Salida 1 de la subcuenca del Rio Negro

Caudales (m3/s) Pico Salida 1					
Tr 500	**Tr 100**	**Tr 50**	**Tr 25**	**Tr 10**	**Tr 2.33**
438,0	293,8	220,7	162,3	103,9	45.1

Nota: Autor.

4.11 Resultados del modelo hidráulico

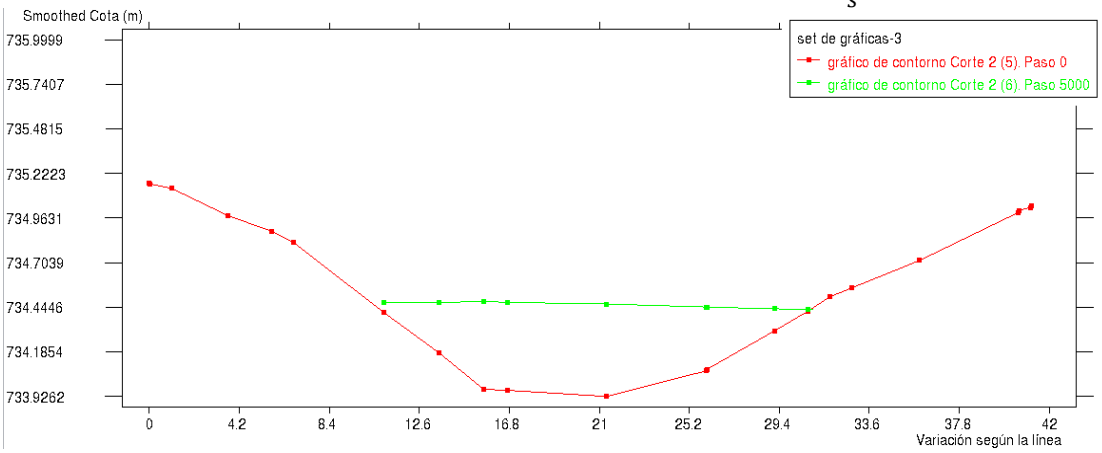
Una vez definido el modelo geométrico, las condiciones de contorno, las condiciones iniciales, los usos del suelo y la malla de cálculo, se procede a realizar la modelación hidráulica bidimensional en IBER, primero realizando la calibración del modelo y posteriormente la determinando las extensiones de inundación para los periodos de retorno 10, 25, 50,100 y 500 años.

4.11.1 Verificación del modelo hidráulico

Al no tener monitoreo continuo de la corriente se imposibilita la calibración del modelo hidráulico ya que si se contara con hidrogramas en diferentes puntos de los cauces, se podría

realizar una validación del modelo implementado. Sin embargo, con el objeto de realizar una verificación de la capacidad del modelo de representar las condiciones reales de la corriente analizada, se evaluó el modelo hidráulico fijando como condición de entrada el caudal promedio determinado en el aforo realizado en julio del 2019, cuyo valor es de 7.73 $\frac{m^3}{s}$ .Y una vez realizada la modelación se procedió a revisar los valores de lámina de agua obtenidos en una sección que coincidiera con la ubicación de los aforos realizados, obtenido un calado máximo de 0.58 m (Ver **Figura 12**).

Figura 12. Sección de calado para un Q: 7.73 $\frac{m^3}{s}$



Fuente: Elaboración Propia

Determinándose un error absoluto de 0.06 m y un error relativo de 0.09, considerando como valor experimental 0.58 m y valor real 0.64 m el cual corresponde al calado registrado en los aforos realizados en julio de 2019, (Ver **Tabla 40**). Que estos valores de diferencia no sean menores obedece a la incertidumbre estadística dada a la posible aleatoriedad de los datos, a la variedad proveniente de varias fuentes relacionadas en la medición, en los procesamientos, métodos usados y estimaciones. Sin embargo, pese a que no se considera un elemento suficiente para determinar que el modelo obedece a algún tipo calibración, si se

observa que la adecuación de los parámetros del modelo hidráulico da como resultado valores de alturas de lámina de agua cercanos a los observados en el aforo.

4.11.2 Profundidades de la lámina de agua y Velocidades de flujo

En las extensiones de inundación obtenidas para los periodos de retorno de 10, 25, 50,100 y 500 años se presentan desbordamientos en ambas márgenes del rio, como se puede observar en los mapas anexos de calados y velocidades. Para mayor información remitirse al Volumen II - Cartografía III.03 (Mapas Documento Hidráulica).

Se pudo registrar por entrevistas a la comunidad y análisis de ortófotos e imágenes satelitales, que en la ola invernal del 2010-2011 dos viviendas situadas en áreas aferentes a Puerto Amor, fueron gravemente afectadas, al punto de ser removidas del lugar.

Figura 13.Viviendas afectadas por ola invernal 2010-2011

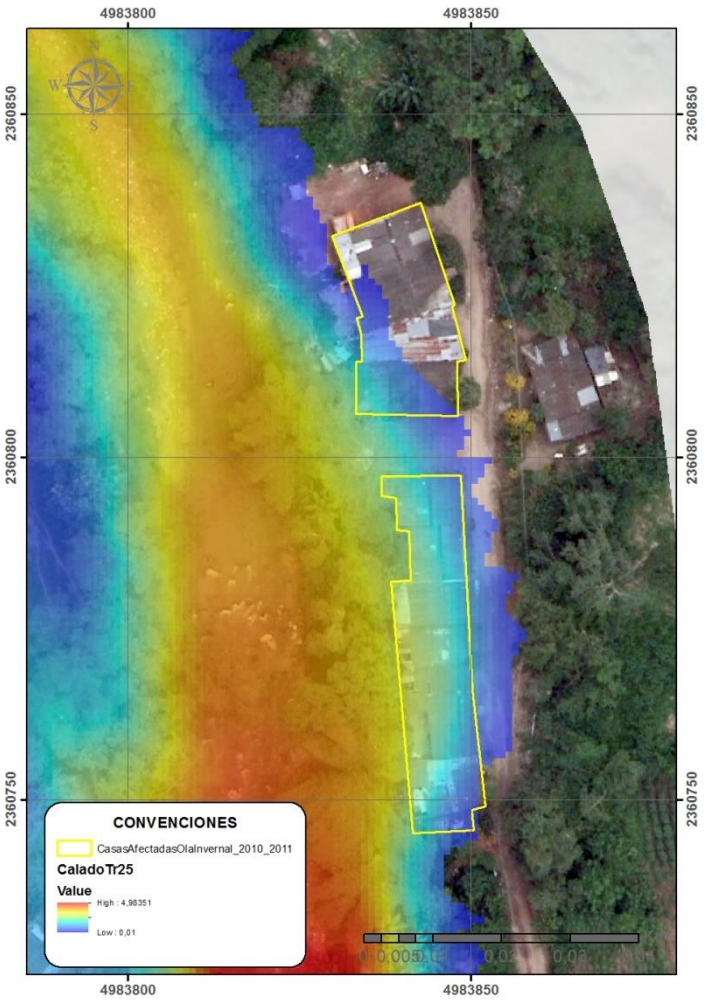
Fotografía antes de Ola invernal 2010-2011 - Con presencia de las viviendas

Fotografía después de Ola invernal 2010-2011 - Sin presencia de las viviendas

Fuente: Autor

Estas áreas son cubiertas por las manchas de inundación desde un periodo de retorno de 25 años y van aumentando progresivamente con el periodo de retorno. Ver **Figura 14**.

Figura 14.Viviendas afectadas por ola invernal 2010-2011



Fuente: Autor

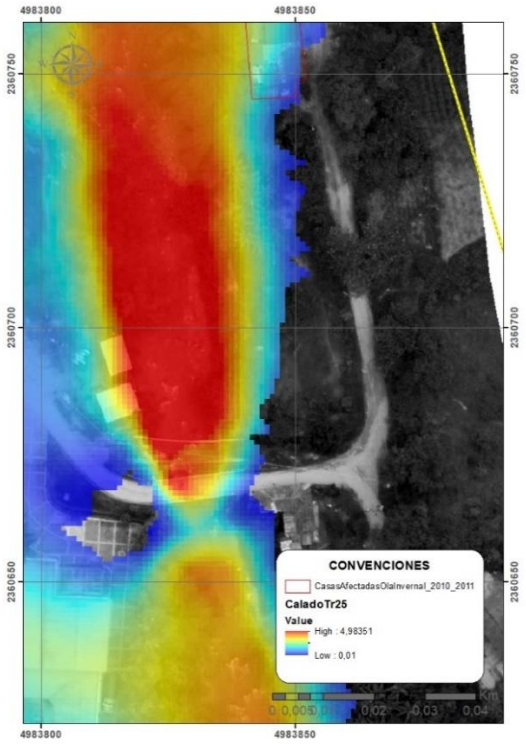
Igualmente por entrevistas realizadas a la comunidad, se registró que en la ola invernal 2010-2011, se presentó un represamiento en el sector del puente vehicular sobre el cauce del rio Negro, alcanzando una altura de lámina de agua aproximada de 5.0 metros (ver **Figura 15**).

En este sector se presentan valores máximos de calado de 4.98 m desde un periodo de retorno de 25 años y van aumentando progresivamente con el periodo de retorno (Ver **Figura 16**)

Figura 15.Registro fotográfico Sector Puente vehicular sobre el cauce del rio Negro

Fuente: Autor

Figura 16. Profundidades de la lámina de agua para periodo de retorno de 25 años en el sector Puente vehicular sobre el cauce del rio Negro



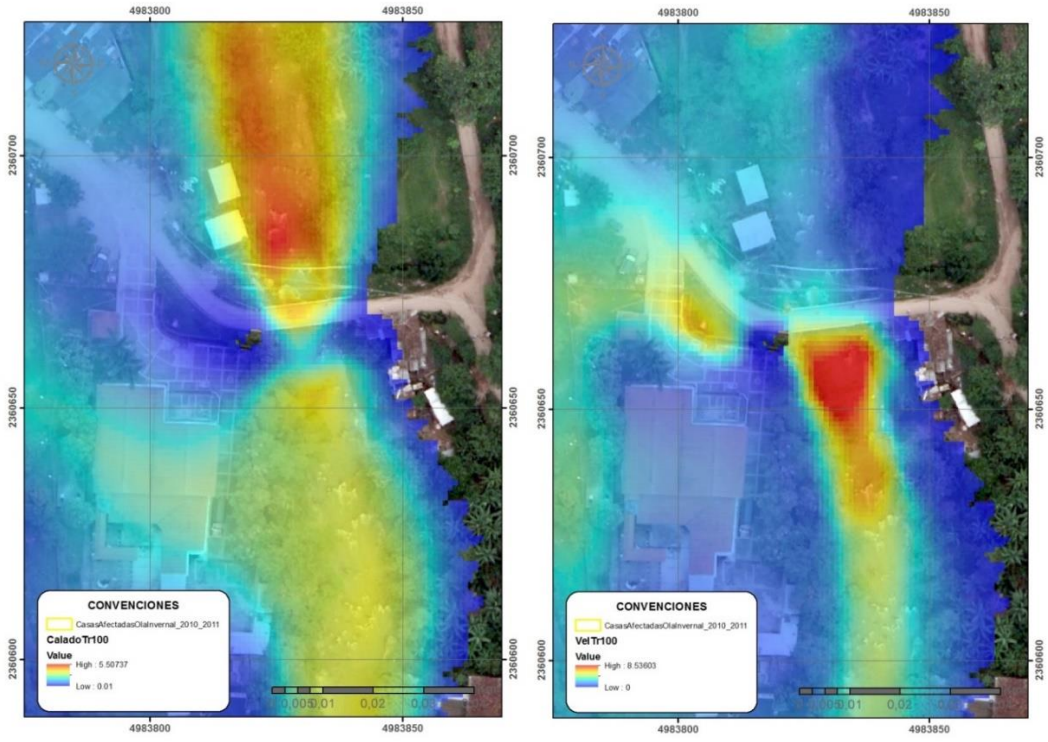
Fuente: Autor

Por lo tanto, en base a los análisis anteriores existe la posibilidad de considerar que los caudales máximos estimados para el periodo de retorno de 25 años, son equiparables a lo sucedido en la ola invernal de 2010-2011.

En el área donde se localiza el puente vehicular sobre el cauce del rio Negro se generan represamientos del flujo para para todos los caudales modelados, los valores de las alturas de lámina de agua o calado antes y después del represamiento para el caudal de Tr 100 años son de 5.50 y 2.80 m respectivamente. Y los valores de la velocidad antes y después del represamiento para el caudal de Tr 100 años son de 1.30 y 8.53 m/s correspondientemente. Siendo en este tramo donde se presentan los valores máximo en todo el tramo del cauce analizado.

Figura 17.Efectos de *represamiento causados en el sector del Puente vehicular sobre el cauce para periodo de retorno de 100 años*

Calados generados por represamiento - Velocidades generadas por represamiento



Fuente: Autor

En el informe hidráulico se puede apreciar las plantas con las profundidades de las láminas de agua y velocidades de flujo para los diferentes periodos de retorno.

4.1 Mapa de zonificación de amenaza por inundación

Los mapas de zonificación de inundaciones pueden considerarse mapas de amenaza de inundación "adaptados" con fines de planificación. Las zonas muestran las amenazas existentes, clasificadas como amenaza baja, media o alta. Los planificadores se ocupan de localizar áreas con una exposición limitada a los peligros para diversos usos, tales como, los asentamientos humanos, las industrias, la infraestructura y la agricultura. (Instituto de Hidrología y Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM & Centro Nacional de Modelamiento-CNM, 2017).

La metodología para el análisis de la amenaza por inundación del presente estudio se basó en el proyecto europeo SUFRI (Sustainable Strategies of Urban Flood Risk), el cual nació con el principal objetivo de mejorar la gestión de riesgo de inundación mediante medidas no estructurales tales como previsión de inundaciones, alerta, gestión de emergencias, entre otras...(Escuder-Bueno et al., 2012).

Según este método, las herramientas para la estimación de la probabilidad de la amenaza se fundamentan en la ocurrencia de eventos históricos de inundación o en cálculos hidráulicos e hidrológicos simplificados. Es primordial la definición de áreas en función de la pérdida potencial de vidas humanas o bien a partir de la estimación de las consecuencias económicas directas(Escuder-Bueno et al., 2012).

En la metodología SUFRI, los niveles de severidad de la inundación (S) se definen en función de las características de la inundación relacionada con la población expuesta y las

tasas de mortalidad , a partir de la combinación de diversos criterios vulnerabilidad (Gomez and Ruso, 2013), (Reiter, 2001), (Nanía, 2002) y (Temez, 1991), estableciendo cinco zonas de severidad de la inundación, delimitadas por determinados valores de velocidad y altura de la lámina de agua para diferentes grados de estabilidad peatonal y resistencia al flujo(Escuder-Bueno et al., 2012).

Las características de la inundación (altura de la lámina de agua y velocidad) para cada escenario de inundación y área identificada definen el nivel de severidad correspondiente ver **Tabla 46**. Por ejemplo, el nivel de severidad extrema, S4, siendo el mayor nivel de severidad, está asociado a la existencia de elevados daños estructurales en viviendas y edificaciones.

En la **Tabla 46** muestra la distribución del nivel de severidad en inundación pluvial en función de la altura de la lámina de agua y de la velocidad.

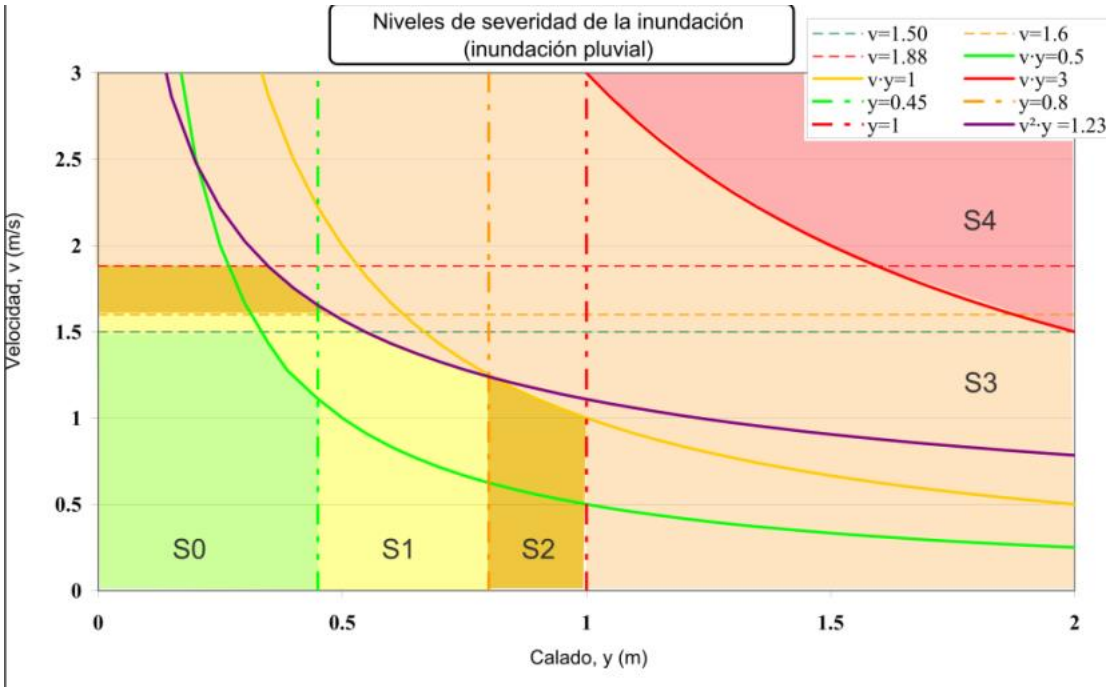
Tabla 46. Niveles de severidad de la Inundación.

Nivel de severidad (S)		Altura del agua y (m)	Velocidad v (m/s)	Parámetro vuelco v*y (m^2/s)	Parámetro deslizamiento v2*y (m^3*s^2)
S0	No se esperan víctimas	<0,45	<1,50	<0,50	<1,23
S1	***Severidad leve*** Peatones pueden sufrir pérdida de estabilidad y dificultades para caminar	<0,80	<1,60	<1,00	<1,23
S2	***Severidad media*** Significativas pérdidas de estabilidad. Vehículos pierden adherencia	<1,00	<1,88	<1,00	<1,23
S3	***Severidad elevada*** Alto riesgo para personas situadas en el exterior. Arrastre.	>1.00	>1,88	>1,00	>1,23
S4	***Severidad extrema***	>1.00	>1,88	>3,00	>1,23

	Nivel de severidad (S)	Altura del agua y (m)	Velocidad v (m/s)	Parámetro vuelco v*y (m^2/s)	Parámetro deslizamiento v2*y (m^3*s^2)
	Daños estructurales a edificios				

Nota: (Escuder-Bueno et al., 2012)

Figura 18. Gráfica obtención de niveles de severidad en inundación



Fuente: (Escuder-Bueno et al., 2012)

Para el presente estudio los niveles de severidad descritos anteriormente se adaptaron a la siguiente categorización de la amenaza por inundación:

Figura 19. Categorización de niveles de amenaza

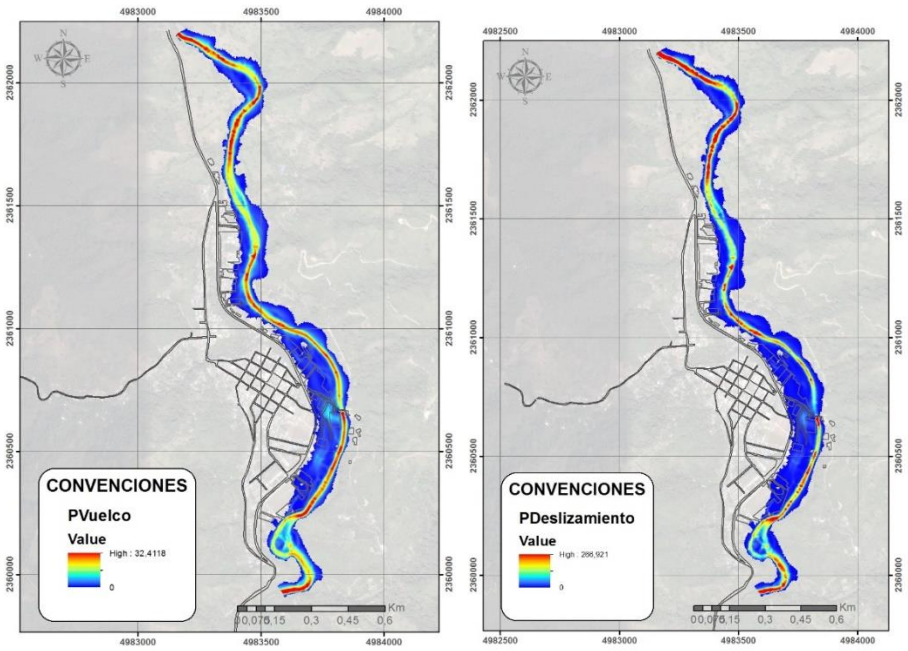
AMENAZA BAJA	*S0*
AMENAZA MEDIA	*S1*
	S2
AMENAZA ALTA	*S3*
	S4

Fuente: Autor

5 Resultados y Discusiones

Siguiendo la metodología anteriormente descrita y teniendo en cuenta los calados y velocidades obtenidas para el periodo de retorno de 100 años, así como la generación de los raster de los parámetros de vuelco (y*v) y deslizamiento (y*v2), respectivos, se reclasificaron dichos valores según los niveles de severidad en inundación establecidos por Escuder-Bueno et al. 2012. Para finalmente fusionarlos, asignando a cada pixel el valor más alto de dicha clasificación y con ello obteniendo el mapa de amenaza por inundación (Ver **Figura 21**).

Figura 20. Distribución espacial de los parámetros de vuelco y deslizamiento



Fuente: Autor

En la *Tabla 47* se muestra las áreas y porcentajes de ocupación de las categorías de amenaza en el área de estudio.

Tabla 47.Áreas de ocupación de las categorías de amenaza por inundación

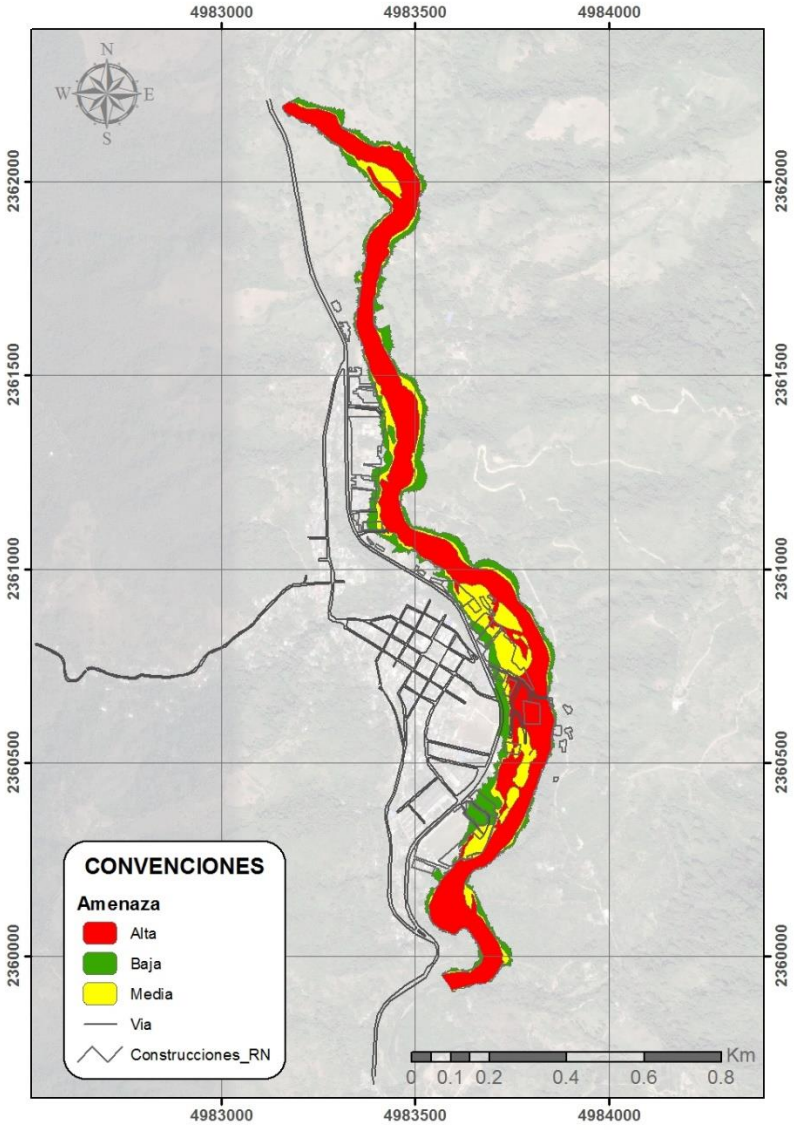
AMENAZA DE INUNDACION		
CATEGORIA	**AREA (has)**	**%**
ALTA	16,296766	58,52%

AMENAZA DE INUNDACION		
CATEGORIA	**AREA (has)**	**%**
MEDIA	5,759398	20,68%
BAJA	5,791988	20,80%
AREA TOTAL	27,85	100,00%

Nota: Autor

El mapa de amenaza resultante se muestra a continuación:

Figura 21. Distribución espacial de las categorías de amenaza por inundación



Fuente: Autor

5.1 Áreas con condición de amenaza.

Las áreas en condición de amenaza se delimitan y zonifican con fundamento a la delimitación y zonificación de amenaza para aquellas áreas sin ocupar suelo urbano, de expansión urbana, rural suburbano o centros poblados rurales en las que en la revisión o en la expedición de un nuevo POT se proponga su desarrollo (Ministerio de Vivienda Ciudad y territorio República de Colombia, 2014).

5.2 Áreas con condición de riesgo.

Las áreas en condición de riesgo se delimitan y zonifican con fundamento en la delimitación y zonificación de amenazas, a fin de priorizar las áreas en las cuales se deben realizar estudios detallados(Ministerio de Vivienda Ciudad y territorio República de Colombia, 2014).

La identificación de las áreas con condición de riesgo se realizará a partir del análisis de las áreas zonificadas como de amenaza alta en los estudios básicos, con la información cartográfica (predial o catastral, entre otras) disponible que permita identificar la existencia de elementos expuestos, de áreas urbanizadas, ocupadas o edificadas así como de aquellas en las que se encuentren edificaciones indispensables y líneas vitales (Ministerio de Vivienda Ciudad y territorio República de Colombia, 2014).

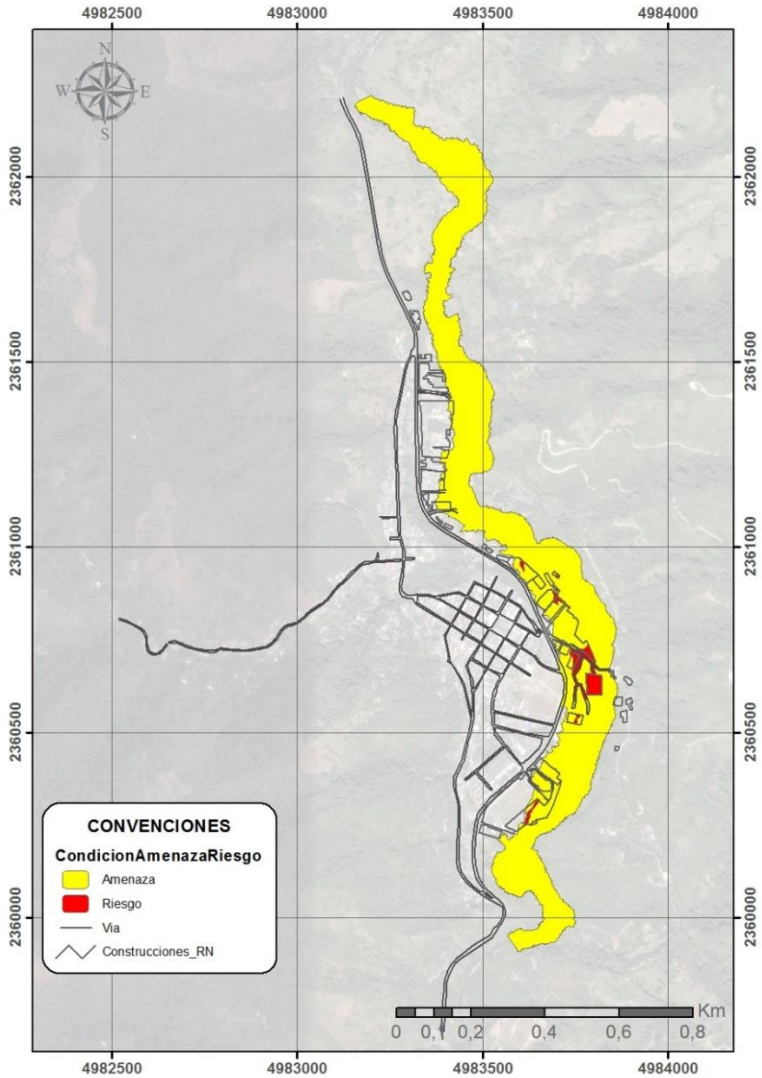
En la siguiente tabla se muestra las áreas y porcentajes de ocupación de las zonificación en condición de amenaza y riesgo en el área de estudio.

Tabla 48.Áreas de ocupación de las categorías de condición de amenaza y condición de riesgo por inundación

CONDICION AMENAZA Y RIESGO POR INUNDACION		
CATEGORIA	**AREA (has)**	**%**
CONDICION DE RIESGO	0,765041	2,75%
CONDICION DE AMENAZA	27,083111	97,25%
AREA TOTAL	27,85	100,00%

Nota: Autor

Figura 22. Distribución espacial de las zonificación de condición de amenaza y condición de riesgo por inundación



Fuente: Autor

6 Conclusiones

Teniendo en cuenta que el municipio de Rionegro ha presentado inundaciones causadas por la creciente del caudal de río Negro, en los sectores ribereños del casco urbano del municipio, se seleccionó un área aproximadamente 70 ha como caso de estudio, donde según informes y entrevistas se ha presentado inundaciones. Esta área permite comprender el funcionamiento de sistema fluvial y su impacto en el área del casco urbano esto con el fin de realizar el análisis detallado de amenaza de inundación de la corriente hídrica rio negro en el casco urbano del municipio de Rionegro- Santander, utilizando modelación hidráulica bidimensional.

Para el presente estudio las curvas IDF son construidas por el método simplificado a partir de los valores determinados como producto del análisis de las precipitaciones máximas en 24 Horas suministradas por las estaciones del IDEAM. En base a que se considera que existe una relación inversa entre la duración de una tormenta y su intensidad (a mayor duración disminuye la intensidad), se asume que la duración critica es igual al tiempo de concentración (tc). (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2015), por tanto se definió para los diferentes hietogramas el tiempo de duración igual a 300 minutos, siendo este el mayor tiempo de concentración de las microcuencas analizadas.

Una vez compilada la información hidrometereologica, se definió que al no contar con datos de caudal suficiente para el área de estudio, se procede a realizar un modelo lluvia escorrentía para diferentes periodos de retorno, con diferentes procesamientos estadísticos, que permitieron obtener datos confiables a fin de estimar los hietogramas de diseño.

El número de curva para la Subcueca a partir de las capas de uso coberturas y textura de suelos en relación a la condición de antecedente presentes en la zona de estudio

correspondiente a un valor de 58.92 para la subcuenca Santacruz , 62.85 Samacá, 63.19 Bajo Rio Negro Norte y 65.76 Bajo Rio Negro Sur

Una vez obtenidos los valor de área de drenaje, valor de tiempo de concentración, valor de número de curva, valor de tiempo de retardo o desfase y lluvia de diseño, se procedió a la estimación de los caudales máximos para diferentes periodos de retorno, por medio de la herramienta computacional HEC HMS, aplicando diferentes métodos de Hidrogramas Unitarios (SCS, Snyder y Clark).

Con los resultados expuestos anteriormente, se puede observar que el promedio diferencial entre dichos valores para el método Clark corresponde al 33%, para el método Snyder al 35% y para el método de SCS un diferencial superior al 300%. Que estos valores de diferencia no sean menores obedece a la incertidumbre estadística dada a la posible aleatoriedad de los datos, no hay métodos estándares, estos proporciona una variedad proveniente de varias fuentes relacionadas en la medición, en los procesamientos, métodos usados y estimaciones. Sumado a la variabilidad temporal y diferencia del número de registros de monitoreo entre la estación Limnigráfica Puente Sardinas y las estaciones pluviométricas analizadas, teniendo un registro de datos de 29 años y 47 años respectivamente.

Para los fines del presente estudio se consideró que los resultados obtenidos por el método de Clark son los más pertinentes a usar, debido a que obtuvo la mejor asimilación de los resultados obtenidos entre los valores de los caudales pico de la microcuenca de Santacruz por el método hidrograma unitario y los caudales extremos para diferentes periodos de retorno calculados con el método de la transposición de caudales a partir de la información hidrométrica de la estación Puente Sardinas, además de ser este el más cercano al promedio de las metodologías anteriormente desarrolladas.

Teniendo la información de la topografía del tramo de estudio y los caudales máximos instantáneos, se realizó la modelación hidráulica del río que cruza el municipio de Rio Negro, en un modelo bidimensional en el programa computacional íber, Para la implementación de estos modelos hidráulicos, se determinaron los coeficientes de rugosidad del lecho del cauce por Cowan, y se asignaron rugosidades específicas por sectores, en las zonas de las vías, zonas verdes, planicies del cauce, así mismo, se incluyeron las zonas de las viviendas aledañas al cauce, con el fin de tener una mayor precisión en cuanto a los resultados de la extensión de inundación

En el área donde se localiza el puente vehicular sobre el cauce del rio Negro se generan represamientos del flujo para para todos los caudales modelados, los valores de las alturas de lámina de agua o calado antes y después del represamiento para el caudal de Tr 100 años son de 5.50 y 2.80 m respectivamente. Y los valores de la velocidad antes y después del represamiento para el caudal de Tr 100 años son de 1.30 y 8.53 m/s correspondientemente. Siendo en este tramo donde se presentan los valores máximo en todo el tramo del cauce analizado. Por lo tanto, en base a los análisis anteriores existe la posibilidad de considerar que los caudales máximos estimados para el periodo de retorno de 25 años, son equiparables a lo sucedido en la ola invernal de 2010-2011.

Determinándose en el modelo hidráulico un error absoluto de 0.06 m y un error relativo de 0.09, considerando como valor experimental 0.58 m y valor real 0.64 m el cual corresponde al calado registrado en los aforos realizados en julio de 2019. Que estos valores de diferencia no sean menores obedece a la incertidumbre estadística dada a la posible aleatoriedad de los datos, a la variedad proveniente de varias fuentes relacionadas en la medición, en los procesamientos, métodos usados y estimaciones. Sin embargo, pese a que

no se considera un elemento suficiente para determinar que el modelo obedece a algún tipo calibración, si se observa que la adecuación de los parámetros del modelo hidráulico da como resultado valores de alturas de lámina de agua cercanos a los observados en el aforo.

Las profundidades de lámina de agua obtenidas para los diferentes periodos de retorno corresponde a Tr 10 años de 0.01 a 3.11 m, Tr 25 de 0.01 a 4.98 m, Tr 50 de 0.01 a 5.067 m, Tr 100 de 0.01 a 5.50 m y Tr 500 de 0.01 a 6.66 m.

Las Velocidades de flujo para los diferentes periodos corresponden a Tr 10 años de 0 a 5.96 m/s, Tr 25 de 0 a 7.76 m/s, Tr 50 de 0 a 7.75 m/s, Tr 100 de 0 a 8.53 m/s y Tr 500 de 0 a 9.90 m/s.

En el área donde se localiza el puente vehicular sobre el cauce del rio Negro se generan represamientos del flujo para para todos los caudales modelados, los valores de las alturas de lámina de agua o calado antes y después del represamiento para el caudal de Tr 100 años son de 5.50 y 2.80 m respectivamente. Y los valores de la velocidad antes y después del represamiento para el caudal de Tr 100 años son de 1.30 y 8.53 m/s correspondientemente. Siendo en este tramo donde se presentan los valores máximo en todo el tramo del cauce analizado.

La metodología para el análisis de la amenaza por inundación del presente estudio se basó en el proyecto europeo SUFRI (Sustainable Strategies of Urban Flood Risk), esta se basa en una clasificación de nivel se severidad asociada a las características de la inundación (altura de la lámina de agua y velocidad).

La áreas y porcentajes de ocupación de las categorías de amenaza alta es 16.29 ha con un 58.52% del área de estudio, media 56.75 ha con un 20.68% del área de estudio y baja 5.79 con un 20.80 % del área de estudio.

La áreas y porcentajes de ocupación de las categorías de condición de amenaza corresponde a 27.05 ha con un 97.25% del área de estudio y condición de riesgo 0.76 ha con un 2.75 % del área de estudio.

El modelo hidráulico bidimensional tiene una ventaja principal y es la capacidad de simular con mayor precisión que las los modelos unidimensionales comúnmente usados; sin embargo, el costo computacional es alto. Para el presente estudio dicho procesamiento fue de aproximadamente 155 horas siendo esto un manejo robusto de información de la información analizada. No obstante se considera que al no tener mayor información del área de estudio para analizar es procedente utilizar este tipo de modelos que permiten mayor precisión en los análisis realizados.

7 Recomendaciones

Se recomienda densificar estación hidrometeorológica y a fin de generar un sistema de información, acopiado a un SIG, además de realizar un registro de eventos asociados a inundación y la actualización de la cartografía asociada a geología, usos de suelo, hidrología, topografía entre otros, para crear una base de datos sólidos que permitan optimizar los estudios asociados a amenazas por inundación y la respuesta de las instituciones y población en general a eventos que se puedan desarrollarse.

Evitar las construcciones en las áreas en condición de amenaza y si es considerado una necesidad alta de urbanización, realizar estudios detallados de ingeniería, descritos en el artículo 4 del Decreto 1807 de 2014 "Por el Reglamenta el artículo 189 del Decreto Ley 019 de 2012 en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C Colombia", estocon el fin de evitar futuros riesgos de pérdidas económicas o de vidas humanas. Asimismo, que las entidades gubernamentales del municipio realicen estudios de obras de marginalización en los sectores en condición de riesgo teniendo en cuenta la dinámica fluvial, a fin de no presentar represamiento de la corriente.

Tener un monitoreo continuo por parte de las entidades gubernamentales y este complementarlo con un sistema de alertas tempranas por inundación de la cuenca, tanto de variables hidrológicas como meteorológicas, con el fin de poder calibrar los modelos hidrológicos e hidráulicos para obtener una mayor exactitud que represente la realidad la condiciones ambientales

Tener como base de orientación el presente estudio en la planeación y el desarrollo de la población del municipio , sobre las zonas, lugares o sitios que presentan una seguridad en

cuanto a las amenazas naturales de inundación que se puedan presentar (Futuros proyectos de vivienda, industria, siembra de cultivos, etc.).

Tener como base de orientación el presente estudio para desarrollar planes de gestión del riesgo, a fin de proponer medidas de mitigación y prevención del riesgo para evitar desastres. (Obras de protección, compra de predios, etc.).

Tener como base de orientación el presente estudio para definir, restablecer y/o verificar las rondas hídricas por parte de la autoridad ambiental del municipio, a fin de contribuir en la planeación y desarrollo Municipal. (Hasta dónde llegará la inundación; definir una franja no urbanizable en las planicies que colindan.

Finalmente se recomienda a las entidades gubernamentales tengan un control sobre las ocupaciones del cauce de actividades ilegales de dragado con el fin de evitar impactos negativos de la geomorfología de cauce.

Referencias Bibliográficas

Área Metropolitana de Bucaramanga, & Universidad Industrial de Santander. (2018). *Actualización de los estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por inundación del río De Oro (tramo Nuevo Girón – Café Madrid) y del río Frio (tramo PTAR –Girón)*.

Centro de Información para el Reporte de Emergencias-CIRE. (2010). *Informe Reporte de Emergencias. Recuperado de http://garza.uis.edu.co:8080/emergencia/reports/view/18*. Recuperado de Http://Garza.Uis.Edu.Co:8080/Emergencia/Reports/View/18.

Chardon, A.-C., & González, J. L. (2002). Amenaza, vulnerabilidad, riesgo, desastre, mitigación, prevención. Primer acercamiento a conceptos, características y metodologías de análisis y evaluación. *Banco Interamericano de Desarrollo. Universidad Nacional de Colombia–Sede Manizales. Instituto de Estudios Ambientales. IDEA. p. 03-04. Manizales, Colombia*, *Volumen 1*(riesgos naturales).

Corporación para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga. (2008). Plan de ordenamiento y manejo ambiental Subcuenca Rio Negro. *Santander, Colombia*.

Council, W. R. (1981). *Guidelines for determining flood flow frequency (revised). Washington, D.C Estados Unidos*.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística-DANE. (2005). *Censo general 2005 archivo (xls) Municipios. Bogotá D.C Colombia.*

Departamento Nacional de Planeación-DNP. (2011). Conpes 3700 - Estrategia Institucional para la articulación de políticas y acciones en materia de cambio climático en Colombia. *Conpes 3700. p. 06. Bogotá D.C Colombia.*

F Javier, S. S. R. (2011). *Hidrograma unitario de Clark. Universidad Salamanca, España. 1945*, 1–38.

Fernández, R. (2006). *Mejora de los parámetros de cáculo del modelo del número de curvas y su validación medinate un modelo hidrológico distribuido*. http://rabida.uhu.es/dspace/handle/10272/2723

Fundación Nueva Cultura del Agua FUNCA. (2018). *La modelización hidrológica-hidráulica y los sistemas de información geográfica. Recuperado de https://www.fnca.eu/guia-nueva-cultura-del-agua/agua-y-territorio/la-modelizacion-hidrologica-hidraulica-y-los-sistemas-de-informacioin-geografica?&imprimir=1*.

Grupo TYC GIS. (2018). *HecRas Vs Iber. Recuperado de https://www.cursosgis.com/hecras-vs-iber/*.

Herrero, A., Laín, H. L., & Isidro, M. (2008). Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones Guía metodológica para su elaboración Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones Guía metodológica para su elaboración. *Instituto Geológico y Minero de España IGME. p. 113-118. Madrid, España*.

Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia- IDEAM. (2012). *Amenazas Inundación Recuperado de: http://www.ideam.gov.co/web/agua/amenazas-inundacion*. Recuperado de: Http://Www.Ideam.Gov.Co/Web/Agua/Amenazas-Inundacion.

Instituto de Hidrología y Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM. (2014). *Modelación Hidrológica - IDEAM. Recuperado de: http://www.ideam.gov.co/web/agua/amenazas-inundacion*. Recuperado de: Http://Www.Ideam.Gov.Co/Web/Agua/Modelacion-

Hidrologica.

Instituto de Hidrología y Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM, & Centro Nacional de Modelamiento-CNM. (2017). Guía metodológica para la elaboración de mapas de inundación. *P. 16, 20,40-42,52 Bogotá D.C. Colombia*, 110.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2002a). *http://metadatos.igac.gov.co/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/metadata/3ba3e714-f6f9-4e46-8472-e816056ddb84*. Recuperado de: Http://Metadatos.Igac.Gov.Co/Geonetwork/Srv/Spa/Catalog.Search#/Metadata/3ba3e714-F6f9-4e46-8472-E816056ddb84.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2002b). *https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-agrologia*. Recuperado de: Https://Geoportal.Igac.Gov.Co/Contenido/Datos-Abiertos-Agrologia. https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-agrologia

Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Grupo de ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, CEDEX, & FLUMEN. (2015). *Proyectos IBER*.

Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Grupo de ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, FLUMEN, CEDEX, & CIMNE. (2010). Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas -Manual básico de usuario. *España*.

Ministerio de Transporte y Comunicaciones. (2015). *Manual de Hidrología, Hidráulica Y Drenaje. Lima, Perú*. http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/normas_legales/1_0_2950.pdf

Ministerio de Transporte y Instituto Nacional de Vías. (2009). Manual de drenaje para

carreteras 2009. *Ministerio de Transporte y Instituto Nacional de Vías INVIAS. p.70-72. Colombia 2009, 2058*(1).

Ministerio de Vivienda Ciudad y territorio República de Colombia. (2014). *Decreto 1807 de 2014 "Por el Reglamenta el artículo 189 del Decreto Ley 019 de 2012 en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C Colombia".*

Observatorio de Salud Pública de Santander. (2005). Informe especial: Emergencia Invernal en Santander. *P. 02, 08. Bucaramanga, Colombia*.

ONU, BID, & CEPAL. (2007). Información para La Gestión de Riesgo de Desastres Estudio de Caso de Cinco Países Colombia. *Naciones Unidas, Banco Interamericano de Desarrollo & Comisión Económica Para América Latina y El Caribe. p.4. México.*

Organización Meteorológica Mundial. (2009). Gestion Integrada de Crecidas: Documento conceptual. In *Programa Asociado de Gestion de Crecidas (APFM) p. 07. Ginebra Suiza*.

Rojas, R. M. (1986). *Hidrología de tierras agrícolas. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial. Mérida, Venezuela.*

Ruiz Vera, D. A. (2015). Análisis de amenaza, vulnerabilidad y riesgo en la cuenca alta del Río Bogotá, en el Municipio de Villapinzón, utilizando modelación hidrológica HEC-HMS e hidráulica 1D y 2D HEC-RAS e ÍBER. *Escuela Colombiana De Ingeniería Julio Garavito. Bogotá D C. Colombia*.

Sedano Cruz, R. K. (2013). Gestión integrada del riesgo de inundaciones en Colombia. *Universidad Pontificia De Valencia. p. 22,23. España 2012.*

Straub, T. D., Melching, C. S., & Kocher, K. E. (2000). *Equations for estimating Clark unit-hydrograph parameters for small rural watersheds in Illinois (No. 4184). US Department of the Interior, US Geological Survey*.

Te Chow, V., Maidment, DR y Mays, L. (1988). *Applied Hydrology International ed., McGraw Hill Higher Education.* (Vol. 1, p. 390).

Van der Marel, H. (1976). *Simulación hidráulica entre los que se encuentran HecRas e Iber Elsevier, Amsterdam. Recuperado de: https://www.cursosgis.com/hecras-vs-iber/*.