

**TESIS DE MAESTRÍA**

**MODELACIÓN DINÁMICA DE INUNDACIONES URBANAS EN  
ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO**

**Jorge Alexander Garzón Díaz**

**Asesor: Juan G. Saldarriaga Valderrama**



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C.  
2019**

## AGRADECIMIENTOS

*Agradezco a las personas que me acompañaron en este camino, principalmente a mi familia que siempre me apoyó y confió en mí. A mi mamá quien siempre me cuidó. A mi papá quien me enseñó el valor del esfuerzo y a mi hermana quien me compartió tanto conocimiento y alegría.*

*Agradezco a todos mis amigos, en especial a Andrés Renjifo y Laura Martínez, quienes hicieron de esta maestría una experiencia mucho más enriquecedora y, a su manera, llenaron de felicidad mi estancia en la universidad. Gracias a ellos nunca faltaron risas.*

*Agradezco a mis amigos fuera de la universidad, especialmente a Liliana Beltrán y Luis Felipe Sánchez, quienes han estado conmigo varios años. Les doy gracias por brindarme nuevamente su apoyo y amistad en esta etapa en la que cosecho un nuevo logro.*

*Deseo expresar mi agradecimiento a mis amigos y colegas del CIACUA. Me alegra haber podido compartir con profesionales de tan alto nivel con los cuales conformamos un excelente grupo de trabajo. Muchas gracias a Camilo Salcedo, un excelente profesional con quien tuve la fortuna de compartir mi participación en el CIACUA. Me siento muy afortunado de haber trabajado con él y haber contado con su guía, opinión y en especial, su amistad.*

*Finalmente, agradezco a quienes me permitieron estar aquí. A Jessica Bohórquez por darme la oportunidad de iniciar mi carrera en recursos hídricos. Un agradecimiento especial a Juan Saldarriaga de quien aprendí mucho y pude compartir conversaciones muy interesantes. Su guía y orientación me permitieron crecer no solo como profesional sino como persona. A la Universidad de los Andes por abrirme las puertas con el programa QEE y el programa de Asistencias Graduadas.*



## TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción .....	1
1.1	Objetivos .....	3
1.1.1	Objetivo General .....	3
1.1.2	Objetivos Específicos .....	3
2	Marco teórico .....	4
2.1	Inundación por desbordamiento y por encharcamiento .....	4
2.2	Cambio climático global y regional .....	8
2.3	Modelos de circulación generales (MCG) .....	10
2.4	Estimación hidrológica bajo escenarios de cambio climático en Colombia. (Acevedo Aristizábal, 2009).....	13
2.5	Fórmulas regionales para la estimación de curvas intensidad-frecuencia-duración basadas en las propiedades de escala de la lluvia (Región Andina Colombiana). Por Edicson Gonzalo Pulgarín, 2009. ....	16
2.6	Generación de Hietogramas por medio del método Intensidad instantánea (Chow, Maidment, & Mays, 1994) .....	17
2.7	Proyecto “Drenaje Urbano y Cambio Climático” (Universidad de los Andes PAVCO, 2014) 19	
2.8	Prueba de la metodología de localización de tanques de tormenta en diferentes sectores de las ciudades de Bogotá y Medellín. (Pulgarín Morales & Saldarriaga Valderrama, 2018).....	24
2.9	Modelo de inundaciones.....	27
2.10	ITZÍ .....	29
2.10.1	Características del modelo seleccionado .....	30
2.11	Resiliencia – Indicador FRI (Chen & Leandro, 2019) .....	33
2.11.1	Fase de evento .....	34
2.11.2	Fase de recuperación .....	35
2.11.3	Cálculo del FRI .....	37
3	Metodología .....	39
3.1	Definición de simulaciones.....	39



---

3.2	Información geográfica .....	41
3.2.1	Modelo digital de terreno .....	41
3.2.2	Rugosidad de la superficie.....	42
3.2.3	Condiciones de frontera .....	43
3.2.4	Red de drenaje pluvial.....	44
3.2.5	Información socioeconómica .....	46
3.3	Información hidrológica actual .....	46
3.4	Proyección con Cambio Climático .....	47
3.5	Generación de hietogramas .....	49
3.6	Simulación de inundaciones.....	54
3.7	Cálculo del FRI .....	62
4	Resultados .....	66
5	Conclusiones.....	74
6	Referencias.....	77
7	Anexos .....	80



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Mapa de Amenaza de Inundación por Desbordamiento – Escenario Actual presentado para la revisión general del POT. (IDIGER, 2019).....	5
Ilustración 2. Amenaza de Inundación en perspectiva de Cambio Climático, escenario prospectivo. (IDIGER, 2019).....	5
Ilustración 3. Densidad de eventos de encharcamiento por Unidades de Gestión de Alcantarillado (UGA) en la ciudad de Bogotá (Eventos/ km <sup>2</sup> ) – Periodo 2005 – 2019. (IDIGER, 2019) .....	6
Ilustración 4. Mapa de inundaciones por encharcamiento en la zona de estudio. (IDIGER, 2018).....	7
Ilustración 5. Noticia de periódico local (Izq.) y estado de la calle durante el evento (Der.)(El Espectador, 2017).....	7
Ilustración 6. Posibles cambios que ocurrirían en la precipitación anual para finales del siglo XXI en comparación con el Clima observado en 1976-2005 (IDEAM, 2018) .....	9
Ilustración 7. Ejemplo de discretización espacial 3D de un modelo de circulación general (Castro, 2007).....	10
Ilustración 8. Ajuste de un hietograma mediante curvas. (Chow et al., 1994) .....	18
Ilustración 9. Mapas de las zonas. Chicó Sur (Izq.) y Chicó Norte (Der.) .....	21
Ilustración 10. Mapa de Bogotá con los vértices de los MCGs (Universidad de los Andes PAVCO, 2014) .....	22
Ilustración 12. Red Chicó Sur y su ubicación en Bogotá (Pulgarín Morales & Saldarriaga Valderrama, 2018) 25	25
Ilustración 13. Nudos inundados en la red Chicó Sur (Pulgarín Morales & Saldarriaga Valderrama, 2018) ....	26
Ilustración 14. Resultados de localización de tanques de tormenta(Pulgarín Morales & Saldarriaga Valderrama, 2018) .....	27
Ilustración 15. Logotipos de las herramientas computacionales .....	29
Ilustración 16. Variables usadas para la resolución numérica en la dimensión x. ....	30
Ilustración 17. Variación del índice FRI para un evento de inundación (Chen & Leandro, 2019) .....	34
Ilustración 18. Diagrama de metodología .....	39
Ilustración 19. Representación del método Fill (Acosta Barragán & Saldarriaga Valderrama, 2013) .....	41
Ilustración 20. Mapa MDT Chicó Sur .....	42
Ilustración 21. Mapa de coberturas - Chicó sur.....	43
Ilustración 22. Ráster de condiciones de frontera .....	44
Ilustración 23. Mapa de la red de drenaje Chicó Sur.....	45
Ilustración 24. Mapa de manzanas Chicó Sur.....	46
Ilustración 25. Ejemplo de la hoja de cálculo utilizada para el método de la intensidad instantánea.....	51



---

Ilustración 26. Interfaz inicial GRASS GIS.....	54
Ilustración 27. Selección del tipo de proyección .....	55
Ilustración 28. MDT Chicó Sur en GRASS GIS.....	56
Ilustración 29. Ráster de condiciones de frontera en GRASS GIS.....	56
Ilustración 30. Creación STRDS.....	57
Ilustración 31. Registro de los mapas en el STRDS .....	58
Ilustración 32. Consideraciones temporales de los mapas .....	58
Ilustración 33. Mapa de lluvia uniforme en GRASS GIS.....	59
Ilustración 34. Capa de n de Manning en GRASS GIS .....	59
Ilustración 35. Ejemplo de archivo de parámetros.....	60
Ilustración 36. Pantalla de simulación con porcentaje de avance de simulación .....	61
Ilustración 37. Arreglos multidimensionales de datos .....	63
Ilustración 38. Almacenamiento de indicadores para el cálculo del FRI .....	63
Ilustración 39. Mapas de distribución de población.....	64
Ilustración 40. Mapa de Estrato Socioeconómico .....	64
Ilustración 41. Ejemplo de mapa de resiliencia para Chicó Sur en MATLAB .....	65



---

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Características principales de los modelos de circulación general atmósfera-océano (AOGCM) y modelos del sistema terrestre (ESM) que participan en la fase 5 del proyecto de intercomparación de modelos acoplados (CMIP5), y una comparación con la fase 3 del proyecto de intercomparación de modelos acoplados (CMIP3) .....	11
Gráfica 2. Ejemplo De Curvas IDF para tormentas intensas de 24 horas de duración para un pixel específico de los MCG utilizados (Acevedo Aristizábal, 2009).....	15
Gráfica 3. Curvas IDF para Chicó Sur en escenarios de Cambio Climático(Universidad de los Andes PAVCO, 2014).....	23
Gráfica 4. Hietograma sintético empleado en la red Chicó Sur (Pulgarín Morales & Saldarriaga Valderrama, 2018).....	26
Gráfica 5. Curva IDF 24 horas – EAAB.....	47
Gráfica 6. Curvas IDF para Chicó Sur en escenarios de Cambio Climático(Universidad de los Andes PAVCO, 2014).....	47
Gráfica 7. Curvas IDF sintéticas para los diferentes modelos y periodos de retorno en Chicó Sur.....	50



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Modelos climáticos globales analizados correspondientes al proyecto de intercomparación CMIP5	20
Tabla 2. Parámetros de referencia para el cálculo del FRI .....	38
Tabla 3. Factores de ponderación .....	38
Tabla 4. Simulaciones .....	40
Tabla 5. Estimativos n de Manning de las superficies .....	43
Tabla 6. Resumen de Componentes de la Red Chicó Sur. (Universidad de los Andes PAVCO, 2014) .....	45
Tabla 7. Resolución de los climáticos globales analizados correspondientes al proyecto de intercomparación CMIP5 .....	48
Tabla 8. Valores de curvas IDF para generar curvas de periodo de retorno fijo .....	49
Tabla 9. Coeficientes de las curvas IDF sintéticas.....	50
Tabla 10. Hietogramas sintéticos de 20 minutos de duración .....	52
Tabla 11. Hietogramas sintéticos de 95 minutos de duración .....	53
Tabla 12. Características de las coordenadas geográficas.....	55
Tabla 13. Profundidades máximas para escenarios de 20 minutos de duración .....	66
Tabla 14. Profundidades máximas para escenarios de 95 minutos de duración .....	67
Tabla 15. Resiliencia mínima para casos destacados .....	68
Tabla 16. Curvas de FRI Promedio para las simulaciones realizadas.....	69
Tabla 17. Mapas de diferencia de FRI.....	71
Tabla 18. Mapas de manzanas afectadas y proyección con Cambio Climático.....	72
Tabla 19. Conteo de manzanas afectadas para los diferentes escenarios .....	72
Tabla 20. Comparación de resultados obtenidos para las inundaciones de Chicó Sur .....	73
Tabla 21. Valores de las curvas IDF para Chicó Sur(Universidad de los Andes PAVCO, 2014) .....	80
Tabla 22. Hietogramas sintéticos de las simulaciones .....	80





## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Estimación de curvas IDF. (Pulgarín Dávila, 2009) .....	16
Ecuación 2. División del tiempo del evento de lluvia en dos periodos.....	17
Ecuación 3. Coeficiente de retardo .....	17
Ecuación 4. Duración del evento en función del coeficiente de retardo .....	17
Ecuación 5. Precipitación total del evento en forma integral .....	18
Ecuación 6. Precipitación total del evento en función de la intensidad promedio .....	18
Ecuación 7. Derivación de la precipitación total .....	18
Ecuación 8. Ecuación de curva IDF .....	18
Ecuación 9. Expresión para la intensidad de un evento de precipitación asumiendo intensidad instantánea	19
Ecuación 10. Lluvia ponderada de acuerdo con el criterio del cuadrado inverso de las distancias .....	22
Ecuación 11. Paso de tiempo.....	30
Ecuación 12. Caudal específico en cada dirección.....	31
Ecuación 13. Caudal específico resultante .....	31
Ecuación 14. Balance de masa para cálculo de profundidad .....	31
Ecuación 15. Indicador de profundidad de inundación para el cálculo del FRI.....	34
Ecuación 16. Indicador de profundidad acumulada de inundación para el cálculo del FRI. ....	34
Ecuación 17. Indicador de la duración de inundación para el cálculo del FRI. ....	35
Ecuación 18. Indicador de la tasa de acumulación de inundación para el cálculo del FRI. ....	35
Ecuación 19. Indicador de profundidad de inundación para el cálculo del FRI en etapa de recuperación. ....	36
Ecuación 20. Indicador de profundidad acumulada de inundación para el cálculo del FRI en etapa de recuperación.....	36
Ecuación 21. Indicador de duración de inundación para el cálculo del FRI en etapa de recuperación.....	36
Ecuación 22. Indicador de tasa de acumulación de inundación para el cálculo del FRI en etapa de recuperación.....	36
Ecuación 23. Indicador de porcentaje de niños para el cálculo del FRI en etapa de recuperación.....	36
Ecuación 24. Indicador de porcentaje de adulto mayores para el cálculo del FRI en etapa de recuperación. ....	36
Ecuación 25. Indicador de ingreso de vivienda para el cálculo del FRI en etapa de recuperación. ....	36
Ecuación 26. Cálculo del FRI en etapa de evento .....	37



---

Ecuación 27. Conjunto guía de parámetros para el cálculo del FRI en etapa de recuperación.....	37
Ecuación 28. Factor de recuperación .....	37
Ecuación 29. Cálculo del FRI en etapa de recuperación .....	37



## 1 INTRODUCCIÓN

Las inundaciones se encuentran entre las más comunes y destructivas amenazas naturales. Estos eventos generan pérdidas millonarias y tienen diversos efectos adversos en las comunidades que se ven afectadas. De acuerdo con la Organización para la cooperación y el desarrollo económico (OECD) se estima que llegan a ocasionar daños anuales por más de USD \$40 mil millones en el mundo (National Geographic, 2019). Adicionalmente a daños en infraestructura, muebles y enseres, las inundaciones ocasionan morbilidad y mortalidad de seres humanos, pérdida de movilidad vehicular y suspensión de servicios públicos (IDIGER, 2019).

En particular, las inundaciones urbanas son la ocupación, por parte del agua, de zonas en las ciudades que de manera habitual están libres de ella. Además, estas inundaciones incrementan sus potenciales peligros en las urbanizaciones debido a la pavimentación, la cual reduce la rugosidad y permeabilidad del suelo, incrementando la velocidad del agua y disminuyendo la capacidad de infiltración, respectivamente. De manera simplificada, las inundaciones urbanas por encharcamiento ocurren cuando la intensidad de la lluvia en una zona es mayor a la capacidad de drenaje de este lugar de la ciudad. Es preciso señalar que mientras la capacidad del drenaje urbano se encuentra fija desde su diseño original, la intensidad de las lluvias se espera que incremente en menos de 30 años en ciudades colombianas tales como Bogotá, de acuerdo con el estudio regional de Variabilidad y Cambio Climático (IDEAM, 2018).

Específicamente, la zona Chicó Sur, ubicada en el nororiente de Bogotá, entre las calles 92 y 100 y la carrera 7ma y la Autopista Norte, es una de las zonas más afectadas por las inundaciones por encharcamiento tal como lo evidencian más de 10 registros de estos eventos entre los años 2002 y 2017 (IDIGER, 2018), entre las cuales se destacan varios episodios de inundación del paso en desnivel de la calle 94, tal como el 14 de mayo de 2017, en cuya ocasión se inundó completamente. Esta inundación tuvo una duración de aproximadamente dos horas, ocasionó pérdidas económicas y afectó la movilidad de la ciudad. Después de este evento el Distrito instaló un sistema de bombeo automático, el cual no fue capaz de retirar toda la escorrentía de un evento de precipitación el 30 de noviembre de 2017 (El Espectador, 2017).

Si bien la alcaldía de Bogotá reconoce la amenaza de inundación en su Plan de Ordenamiento Territorial, específicamente en el Decreto 190 de 2004 Subtítulo 5: Zonas sujetas a amenazas y riesgos (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2004), únicamente considera inundaciones por desbordamiento de cauces y no define zonas ni acciones respecto a las inundaciones por encharcamiento. Así, se generó un *Plano Normativo de Amenaza por Inundación por Desbordamiento* que incluye una proyección teniendo en cuenta el Cambio Climático.



“Bogotá cuenta con el Plano Normativo de Amenaza por Inundación por Desbordamiento adoptado mediante el Decreto 190 del 2004, el cual ha sido actualizado a través de diferentes actos administrativos de la Secretaría Distrital de Planeación. Actualmente, en el marco del proceso de revisión del Plan de Ordenamiento Territorial de Bogotá (POT), se cuenta con un nuevo mapa de Amenaza por Inundación por desbordamiento en perspectiva de cambio climático” (IDIGER, 2019)

De esta manera, existe un plano normativo para el caso de desbordamiento, pero no se realizó un estudio para la amenaza de inundación por encharcamiento. Es relevante estudiar el comportamiento y posible efecto de las inundaciones en este sector de la ciudad debido a su vulnerabilidad y a la posibilidad de incremento de riesgo de inundación. En esta zona se encuentran hospitales, establecimientos comerciales, hoteles y organizaciones gubernamentales, además de vías principales de la ciudad, tales como la Carrera 7ma, la calle 100, la autopista norte y el ya mencionado paso en desnivel. Adicionalmente, las redes de drenaje pluvial en Colombia son diseñadas de acuerdo con el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento – RAS el cual reconoce el incremento en la intensidad de las lluvias, pero no recomienda ningún incremento en los diseños.

“El efecto invernadero genera una serie de cambios climáticos globales. De acuerdo con diferentes investigaciones realizadas a nivel mundial, este efecto causará un aumento de la intensidad de lluvia en diferentes sitios del planeta. A pesar de esto, este documento no recomienda ningún incremento en la intensidad de precipitación de diseño por causa del cambio climático” (Ministerio de Vivienda, 2016)

Es decir, el drenaje de la ciudad es diseñado sin tener en cuenta los efectos de Cambio Climático y el estudio regional de Variabilidad y Cambio Climático (IDEAM, 2018) indica que la precipitación va a incrementar en la ciudad, por lo tanto, es pertinente desarrollar una evaluación de riesgo bajo condiciones de Cambio Climático.

Para evaluar los efectos de las inundaciones se requiere un indicador que permita clasificar, comparar y decidir acerca de la gravedad de las inundaciones. Las recientes estrategias de protección a inundaciones han apuntado a la medición de factores tanto físicos (profundidad, duración, velocidad de inundación) (Mugume, Gomez, & Butler, 2014; Pulgarín Morales & Saldarriaga Valderrama, 2018) como sociales y económicos (distribución de población e ingreso) (Moghadas, Asadzadeh, Vafeidis, Fekete, & Kötter, 2019; Wiig & Fahlbruch, 2019). En esta línea, el índice de resiliencia a las inundaciones, propuesto por Chen y Leandro (2019), comprende los factores previamente mencionados e indica la capacidad de soportar los efectos adversos de estos eventos y recuperarse hasta la condición original.



Debido al reciente desarrollo del concepto de la resiliencia, aún no se han llevado a cabo evaluaciones de este indicador integral en las diferentes zonas de la capital. Estudios de este índice permiten a planificadores urbanos mejorar las estructuras de prevención y los planes de gestión de riesgo de este tipo de desastres. Estos análisis son relevantes en zonas que históricamente han presentado eventos de inundación y pueden verse perjudicadas en el futuro por efectos de cambio climático, tales como Chicó Sur. Entender el comportamiento de las inundaciones actualmente y estimar sus posibles efectos en el futuro permite identificar zonas que presentan mayor riesgo. Por lo tanto, el objetivo de la presente investigación es comparar la resiliencia a las inundaciones de Chicó Sur debido al efecto del Cambio Climático proyectado 30 años en el futuro.

Para cuantificar los efectos de las inundaciones se utilizó un modelo bidimensional dinámico llamado Itzi. Este programa permite estimar las profundidades en todo el dominio de modelación para diferentes tiempos y a partir de estos datos es posible calcular la resiliencia tanto para la condición hidrológica actual como para la situación con cambio climático. Con esta metodología fue posible calcular que la resiliencia a las inundaciones en sectores de Chicó Sur se reducirá entre 13% y 15% para eventos frecuentes y entre 24% y 28% para eventos poco frecuentes en los próximos 30 años debido a los efectos regionales del Cambio Climático.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo General

Comparar la resiliencia a las inundaciones urbanas en Chicó Sur en condiciones de Cambio Climático proyectadas a 30 años en el futuro respecto a las condiciones actuales.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Definir las capas de información necesarias para realizar las simulaciones de inundaciones en Chicó Sur
- Definir los modelos climáticos globales acordes con la zona de estudio
- Generar hietogramas representativos de eventos de precipitación para los casos de simulación
- Calcular las profundidades de inundación en los tiempos de simulación para los diferentes escenarios
- Calcular la resiliencia a las inundaciones urbanas en Chicó Sur en condiciones hidrológicas actuales
- Calcular la resiliencia a las inundaciones urbanas en Chicó Sur en escenarios de Cambio Climático
- Analizar los cambios de resiliencia a las inundaciones urbanas en Chicó Sur debido a los posibles efectos del Cambio Climático



---

## 2 MARCO TEÓRICO

A continuación, se desarrollan en mayor profundidad los conceptos, modelos, métodos e investigaciones que permitieron el desarrollo de este estudio.

### 2.1 Inundación por desbordamiento y por encharcamiento

En la ciudad de Bogotá las inundaciones son atendidas y estudiadas por el Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático – IDIGER. Esta entidad se encarga de hacer las caracterizaciones generales de riesgo por inundaciones y las clasifica en las dos categorías relevantes para la ciudad: Por desbordamiento y por encharcamiento. Aunque existen otros tipos de inundaciones, las dos previamente mencionadas son las más relevantes en el caso de la ciudad de Bogotá.

Las inundaciones por desbordamiento son de tipo fluvial. De acuerdo con el IDIGER, estas inundaciones son “lentas o de tipo aluvial, debido a que estas se producen por el desbordamiento del cauce anegando áreas planas aledañas al mismo y suelen ser originadas por crecidas progresivas y de larga duración.” (IDIGER, 2019) o por encharcamiento, en donde la intensidad de lluvia sobrepasa la capacidad hidráulica del drenaje pluvial ocasionando que el agua se desplace por encima de vías, andenes o incluso dentro de edificios.

Las inundaciones de tipo desbordamiento ocurren con mayor frecuencia en la zona occidental de la ciudad, en donde se encuentran asentamientos junto al río Bogotá tal como las identifica el artículo 128 del Decreto 190 de 2004 “aquellas localizadas en inmediaciones de los ríos y quebradas existentes en el Distrito Capital, y principalmente las que se localizan en sectores aledaños a los ríos Bogotá, Tunjuelo, Juan Amarillo y humedal de Torca.” (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2004). A continuación, se observan gráficamente las zonas de inundación en la actualidad y las mismas zonas teniendo en cuenta efectos de Cambio Climático.



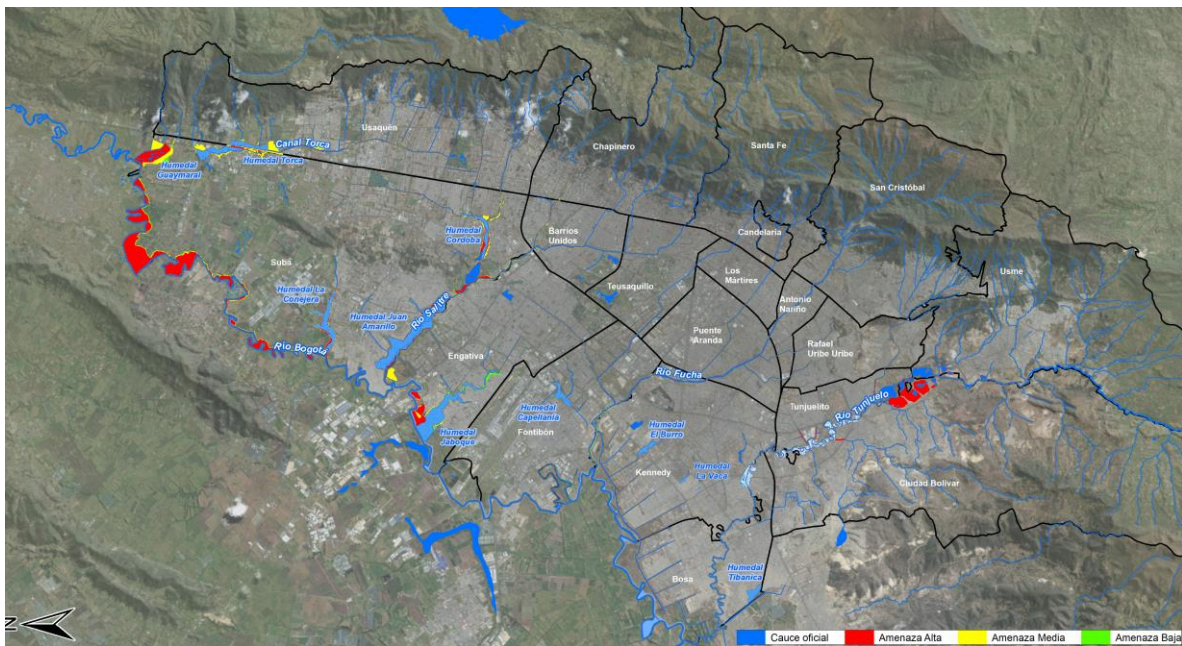


Ilustración 1. Mapa de Amenaza de Inundación por Desbordamiento – Escenario Actual presentado para la revisión general del POT. (IDIGER, 2019)

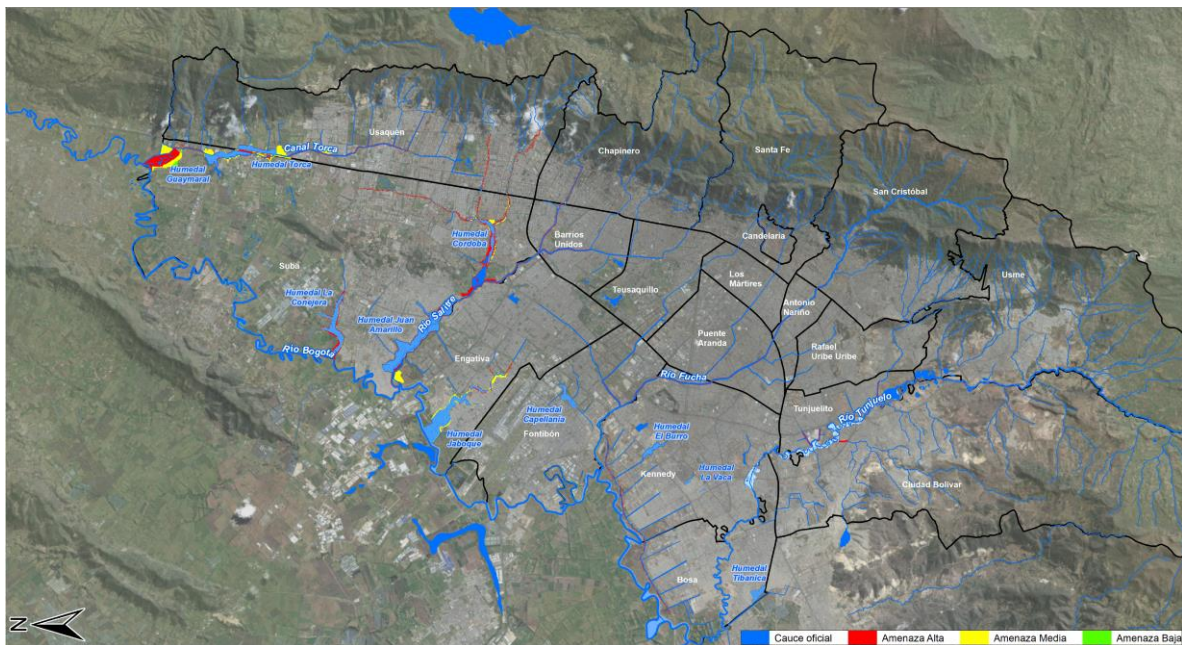
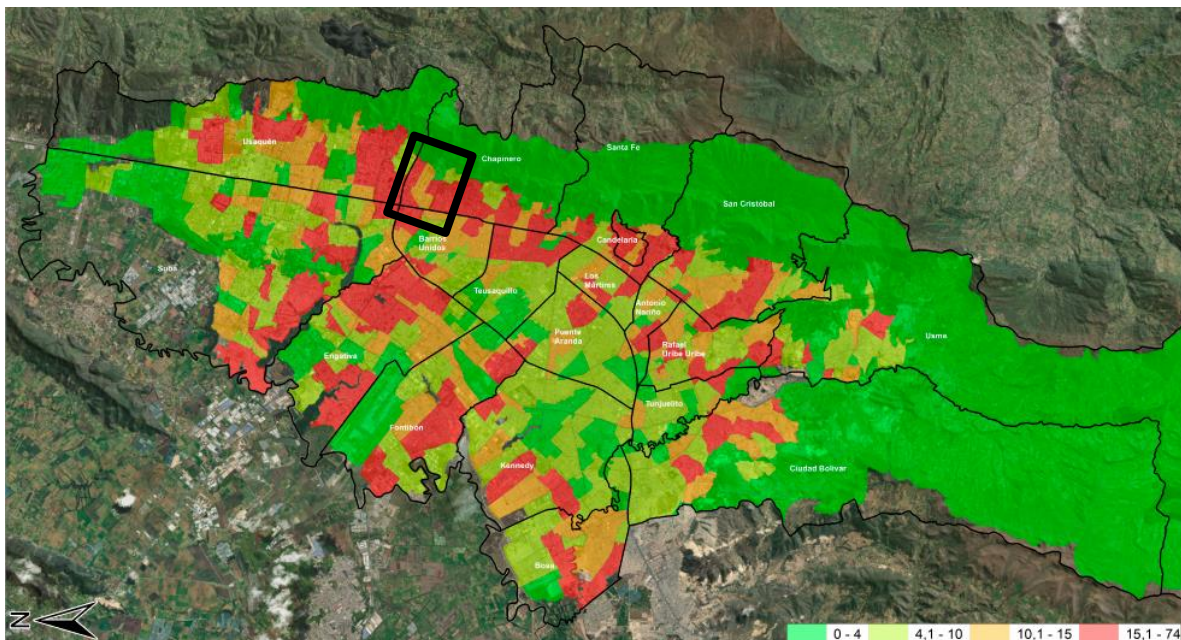


Ilustración 2. Amenaza de Inundación en perspectiva de Cambio Climático, escenario prospectivo. (IDIGER, 2019)



Es posible observar cambios entre los dos mapas previos, en general, se observa una disminución de la amenaza, pero no se indica si se debe a obras o al modelo de Cambio Climático implementado (el cual tampoco se menciona).

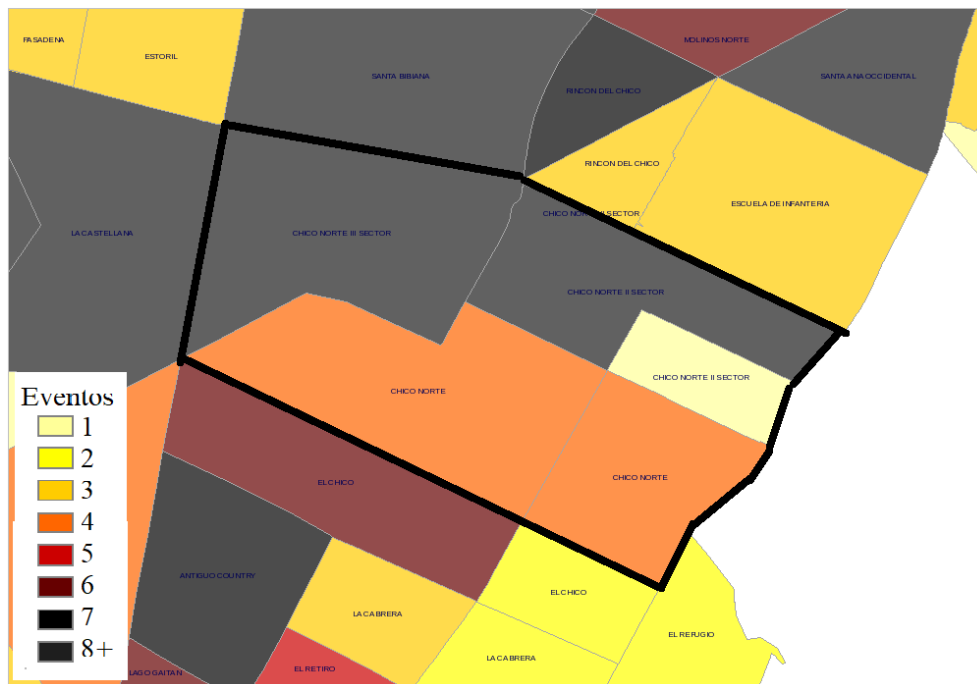
Respecto a la inundación por encharcamiento se obtiene el siguiente mapa de densidad de inundaciones



**Ilustración 3. Densidad de eventos de encharcamiento por Unidades de Gestión de Alcantarillado (UGA) en la ciudad de Bogotá (Eventos/ km<sup>2</sup>) – Periodo 2005 – 2019. (IDIGER, 2019)**

En el recuadro negro se encuentra la zona de estudio y se observan zonas con densidades entre 10 a 15 eventos de inundación por kilómetro cuadrado. Al revisar la zona con más detalle gracias a la base de datos de DesInventar se obtiene el siguiente mapa:





**Ilustración 4. Mapa de inundaciones por encharcamiento en la zona de estudio. (IDIGER, 2018)**

Esta zona ha tenido varios episodios de inundación como se muestra en el mapa anterior, tales casos han sido documentados por los medios locales, como se observa en las siguientes imágenes.



**Ilustración 5. Noticia de periódico local (Izq.) y estado de la calle durante el evento (Der.)(El Espectador, 2017)**



## 2.2 Cambio climático global y regional

La temperatura media del planeta ha incrementado en las últimas décadas y esta condición se ha denominado Cambio Climático. Este es un fenómeno global reconocido y estudiado en los últimos años tal como lo indica el Panel Intergubernamental del Cambio Climático – IPCC por sus siglas en inglés.

“El calentamiento en el sistema climático es inequívoco y, desde la década de 1950, muchos de los cambios observados no han tenido precedentes en los últimos decenios a milenios. La atmósfera y el océano se han calentado, los volúmenes de nieve y hielo han disminuido, el nivel del mar se ha elevado y las concentraciones de gases de efecto invernadero han aumentado.” (IPCC, 2014a)

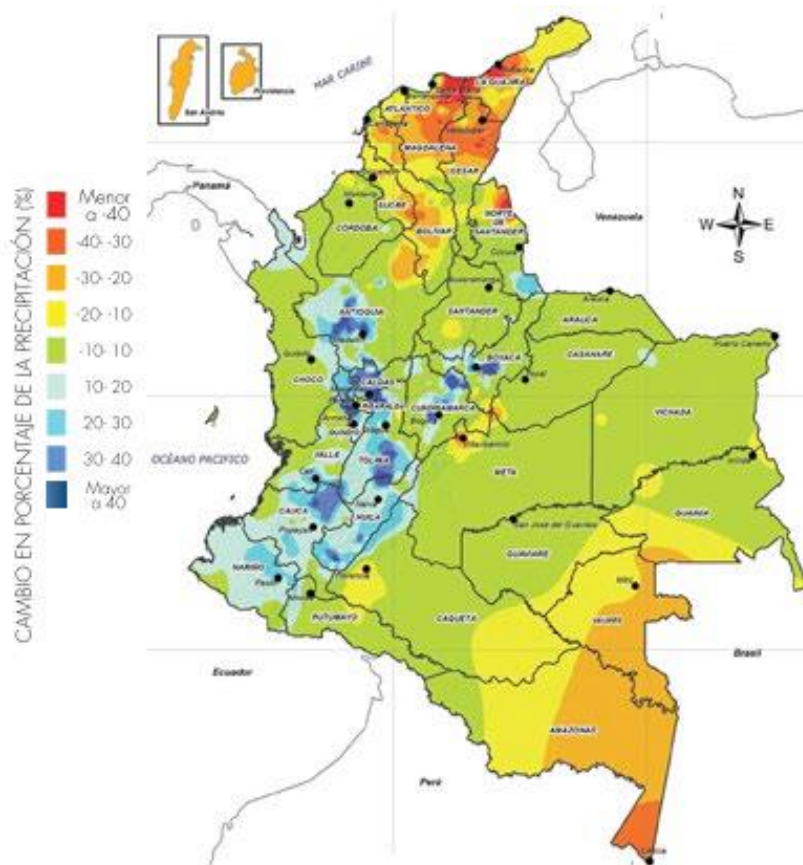
Adicionalmente señalan que la temperatura seguirá incrementando y se generarán efectos en los demás componentes del clima. “Las emisiones continuas de gases de efecto invernadero causarán un mayor calentamiento y nuevos cambios en todos los componentes del sistema climático.” (IPCC, 2014a). La certeza del incremento de la temperatura global es alta pero sus efectos en variables, tales como la lluvia, presentan mayor complejidad para una adecuada predicción. El IPCC señala que “Los cambios que se producirán en el ciclo global del agua, en respuesta al calentamiento durante el siglo XXI, no serán uniformes. Se acentuará el contraste en las precipitaciones entre las regiones húmedas y secas, si bien podrá haber excepciones regionales”. En consecuencia, es necesario implementar aproximaciones regionales a la estimación de la lluvia bajo escenarios de Cambio Climático. Para esta investigación, se requieren estudios de Colombia, la región andina, la ciudad de Bogotá o, en el mejor de los casos, sobre la zona Chicó Sur. Tales aproximaciones han sido desarrolladas por entidades gubernamentales y por la academia.

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM es el encargado de la información climatológica en Colombia, lidera investigaciones ambientales en diferentes aspectos, incluyendo las proyecciones de Cambio Climático en el país. En el año 2018 hizo la publicación del informe “Variabilidad Climática y el Cambio Climático en Colombia” en el cual se indican pronósticos variados para las diferentes regiones de Colombia, en gran parte debido a la complejidad geográfica e hidrológica del país. En particular se hace énfasis en el aumento de precipitación en la ciudad de Bogotá.

“Para la precipitación, IDEAM (2010) planteaba que en hacia el 2011-2040 habría una marcada disminución (-30% del volumen anual) en del alto y medio Magdalena, así como en el sector nor-oriental, aumento de más del 30% sobre Bogotá y Soacha (...) La precipitación hacia 2041-2070 aumentaría marcadamente (más del 40% del valor anual) sobre Bogotá, Soacha, Sabana centro y Sumapaz.” (IDEAM, 2018)



Estos pronósticos se pueden observar en el siguiente mapa de cambios porcentuales en la lluvia para las distintas regiones del país.



**Ilustración 6. Posibles cambios que ocurrirían en la precipitación anual para finales del siglo XXI en comparación con el Clima observado en 1976-2005 (IDEAM, 2018)**

Adicionalmente, el comportamiento general de las lluvias en el futuro para la ciudad de Bogotá puede ser complementado con una proyección general de las lluvias en Bogotá de 6.57%, 9.53% y 8.27% a 2040, 2070 y 2100 respectivamente, con relación al registro anual de lluvias entre 1975-2015 de acuerdo con la entidad distrital respectiva. (IDIGER, 2016)

Si bien el aumento de la lluvia anual es un indicativo de aumento en las inundaciones en el futuro no es suficiente para demostrar que los episodios de precipitación serán más intensos, puede que tan sólo sean más frecuentes. En esta misma línea se han desarrollado varios estudios relacionados con las proyecciones de las lluvias en el futuro para poder determinar los tipos de eventos que se pueden presentar en unas décadas. En la presente investigación se tendrán en cuenta tres estudios relacionados con la intensidad de las lluvias directamente en la zona de estudio o en sus alrededores: Estimación hidrológica bajo escenarios de cambio climático en Colombia, Proyecto

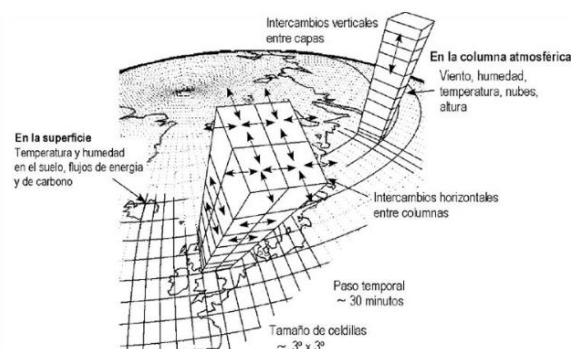


“Drenaje Urbano y Cambio Climático” y la tesis “Prueba de la metodología de localización de tanques de tormenta en diferentes sectores de las ciudades de Bogotá y Medellín”. Antes de entrar en detalle de estos estudios se revisarán los modelos de Cambio Climático sobre los cuales se basan.

## 2.3 Modelos de circulación generales (MCG)

Para obtener estimaciones de las variables climáticas y meteorológicas futuras se requiere emplear modelos que permitan dar una idea de las condiciones bajo escenarios de Cambio Climático. Por esta razón se han desarrollado Modelos de Circulación Generales (MCG), los cuales se basan en leyes fundamentales de la naturaleza (p. ej., conservación de energía, masa y momento). El IPCC indica que “Los modelos climáticos son las principales herramientas disponibles para investigar la respuesta del sistema climático a varios forzamientos, para hacer predicciones climáticas en escalas temporales de temporada a décadas y para hacer proyecciones del clima futuro durante el próximo siglo” (IPCC, 2014b). De acuerdo con el IPCC (2013), el desarrollo de estos modelos climáticos involucra tres pasos principales:

1. Expresar las leyes físicas del sistema en términos matemáticos. Esto requiere un trabajo teórico y de observación para derivar y simplificar expresiones matemáticas que mejor describen el sistema.
2. Implementar estas expresiones matemáticas en una computadora. Esto requiere el desarrollo de métodos numéricos que permitan la solución de las expresiones matemáticas discretizadas, generalmente implementadas en alguna forma de cuadrícula, como la cuadrícula latitud-longitud-altura para modelos atmosféricos u oceánicos.
3. Construyendo e implementando modelos conceptuales (generalmente conocidos como parametrizaciones) para aquellos procesos que no pueden ser representados explícitamente, ya sea por su complejidad (p. ej., procesos bioquímicos en la vegetación) o porque las escalas espaciales y / o temporales en las que ocurren no se resuelven mediante ecuaciones discretas del modelo (p. ej., procesos de nubes y turbulencia).



**Ilustración 7. Ejemplo de discretización espacial 3D de un modelo de circulación general (Castro, 2007)**



Adicionalmente, el Proyecto de intercomparación de modelos acoplados (CMIP5) ha recopilado y comparado los diversos modelos disponibles en la actualidad. En la siguiente gráfica, obtenida del capítulo 9 del 5to informe de evaluación del IPCC, se observa un resumen de los modelos incluidos en este proyecto:



Gráfica 1. Características principales de los modelos de circulación general atmósfera-oceano (AOGCM) y modelos del sistema terrestre (ESM) que participan en la fase 5 del proyecto de intercomparación de modelos acoplados (CMIP5), y una comparación con la fase 3 del proyecto de intercomparación de modelos acoplados (CMIP3)





En la gráfica anterior se utilizan nombres oficiales de modelo CMIP. HT significa atmósfera High-Top, indica que el modelo tiene una estratosfera completamente resuelta con una parte superior del modelo por encima de la estratopausa. AMIP significa modelos con atmósfera y superficie terrestre únicamente, utilizando la temperatura de la superficie del mar observada y la extensión del hielo marino. Un componente se colorea cuando incluye al menos una ecuación de pronóstico basada físicamente y al menos un acoplamiento bidireccional con otro componente, lo que permite retroalimentaciones climáticas. Para aerosoles, el sombreado más claro significa "semi-interactivo" y el sombreado más oscuro significa "completamente interactivo". La resolución de la superficie terrestre generalmente sigue a la de la atmósfera, y la resolución del hielo marino sigue a la del océano. Al pasar de CMIP3 a CMIP5, se observa una mayor complejidad y resolución, así como la ausencia de corrección de flujo artificial (FC) utilizada en algunos modelos CMIP3. (IPCC, 2014b)

En el mismo capítulo del informe del IPCC se hacen varios apuntes acerca de qué tan representativos son estos modelos y su precisión para simular los eventos de precipitación extrema. En primer lugar, indica que los modelos han mejorado desde el reporte previo (AR4) pero aun así hay dificultades para hacer modelos representativos a una escala regional.

“La simulación de patrones de precipitación a gran escala ha mejorado un poco desde el AR4, aunque los modelos continúan teniendo un rendimiento menor para la precipitación que para la temperatura de la superficie. La correlación del patrón espacial entre la precipitación media anual modelada y observada ha aumentado de 0.77 para los modelos disponibles en el momento del AR4 a 0.82 para los modelos actuales. A escalas regionales, la precipitación tampoco se simula, y la evaluación sigue siendo difícil debido a las incertidumbres de observación.” (IPCC, 2014b)

El IPCC advierte en el quinto informe que las tendencias de precipitación pueden estar subestimándose, en especial en la zona tropical. Adicionalmente, la publicación afirma que las predicciones históricas pueden no ser indicador confiable para proyecciones futuras.

“La mayoría de los modelos subestiman la sensibilidad de la precipitación extrema a la variabilidad o las tendencias de la temperatura, especialmente en los trópicos, lo que implica que los modelos pueden subestimar el aumento proyectado de la precipitación extrema en el futuro. En general, no existe un medio directo de traducir las medidas cuantitativas del desempeño pasado en declaraciones confiables sobre la fidelidad de las proyecciones climáticas futuras.”(IPCC, 2014b)

En este estudio las lluvias de interés son las correspondientes a los extremos o “realizaciones de la cola de la distribución de probabilidad del clima y la variabilidad climática. Son estadísticas de orden superior y, por lo tanto, generalmente son más difíciles de representar de manera realista en los



modelos climáticos.”(IPCC, 2014b). Aun así, en el AR4, se concluyó que los modelos podrían simular las estadísticas de eventos extremos mejor de lo esperado a partir de la resolución generalmente gruesa de los modelos en ese momento, especialmente para temperaturas extremas (Randall et al., 2007). En adición el informe indica que la precipitación extrema simulada depende en gran medida de la resolución del modelo. La creciente evidencia ha demostrado que los modelos de alta resolución (50 km o más finos en la atmósfera) pueden reproducir la intensidad observada de precipitación extrema (Wehner et al., 2010; Endo et al., 2012; Sakamoto et al., 2012). (IPCC, 2014b)

A continuación, se presenta un estudio regional de estimación hidrológica mencionado en la parte final de la sección 2.2.

## 2.4 Estimación hidrológica bajo escenarios de cambio climático en Colombia. (Acevedo Aristizábal, 2009)

El estudio de Acevedo parte de una motivación similar a la presente investigación. El diseño hidrológico se basa en la consideración probabilística de eventos extremos que se seleccionan de acuerdo con un balance entre la seguridad contra las fallas eventuales y la economía de costos de las obras. En principio, la estimación del riesgo se apoya en la extrapolación hacia el futuro de las probabilidades de falla deducidas de las condiciones históricas. Si el cambio climático trae como consecuencia el incremento de estas probabilidades, incluso las obras bien diseñadas experimentan un riesgo de falla. Es decir, la hipótesis de estacionariedad en los procesos hidrológicos colapsa ante el cambio climático. (Acevedo Aristizábal, 2009)

En esta investigación se presenta una comparación entre registros de lluvias mensuales y la simulación 20C3M (periodo 1980-2100) para 4 Modelos de Circulación General (MCG): CCSM3, HADGEM1, ECHAM5, y MIROC 3.2 HIRIES; los cuales son resultados del Reporte IV del IPCC (2007), con el fin de evaluar la capacidad de pronóstico de estos modelos en Colombia. Adicionalmente, con los modelos que arrojaron los mejores resultados en el proceso de validación durante el siglo XX (CCSM3 Y ECHAM5) se realiza la estimación de las curvas Intensidad-Frecuencia-Duración de 24 horas (IDF) para los escenarios futuros SRES A1 y SRES B1 durante el siglo XXI en los periodos 2046–2065 y 2086-2100 y para el siglo XX en el periodo 1981-2000. Se encontró que, ante los escenarios de cambio climático analizados, habría grandes cambios en las tormentas más intensas, para ambos escenarios, especialmente para el SRES B1.

El objetivo del estudio de Acevedo fue cuantificar el impacto de distintos escenarios de cambio climático propuestos en el reporte IV del IPCC del año 2007 (AR4) sobre el comportamiento de los eventos hidrológicos extremos en las cinco regiones de Colombia, y sus implicaciones en el diseño hidrológico de caudales máximos para diferente periodo de retorno y estimación de curvas de intensidad-frecuencia-duración de 24 horas. Para lograr esta cuantificación Acevedo siguió la metodología que se presenta a continuación:



- 1) Obtener una caracterización del clima actual y la estimación de las alteraciones climáticas a lo largo de siglo XXI para el territorio colombiano.

De esta manera se obtenían datos de la región con los cuales contrastar los resultados de los modelos.

- 2) Validar los resultados de las simulaciones obtenidas para los siglos XX y XXI por cuatro MCG (Modelos de Circulación General): CCSM3, ECHAM5, HADGEM1 y MIROC 3.2 HIRRES, con datos puntuales de estaciones de precipitación en Colombia para el periodo comprendido entre 1981 y 2000.

Por medio de medidas de ajuste de bondad se seleccionaron los modelos que más se parecían a los datos históricos obtenidos en el punto anterior de la metodología.

- 3) Analizar las series de intensidad de precipitación provenientes de los resultados obtenidos de dos MCG para los escenarios de cambio climático: SRES A2 y SRES B2, durante las épocas 2046 al 2065 y del 2081 al 2100 del siglo XXI, e identificar los cambios en sus parámetros estadísticos, en comparación con los resultados obtenidos para el periodo 1981 al 2000 del siglo XX.

Se analizaron las predicciones de los modelos seleccionados para contrastar los cambios esperados en los patrones de lluvia en los años posteriores.

- 4) Emplear las series pasadas y futuras de precipitación provenientes de los resultados obtenidos por los MCG CCSM3 Y ECHAM5 para los escenarios de cambio climático SRES A2 y SRES B2 propuestos en el AR4, para la estimación de curvas de Intensidad-Frecuencia-Duración de 24 horas asociadas con diferentes periodos de retorno, y comparar los resultados con aquellas “observadas” por los modelos para el siglo XX.

Con los resultados de los modelos seleccionados se hizo un análisis estadístico para obtener los valores máximos diarios para cada año y se ajustó una distribución generalizada de valor extremo (GEV) y se empleó un ajuste de parámetros por medio de L-Momentos. Se escogió esta distribución debido a sus propiedades para representar de mejor manera los valores extremos.

La función de distribución acumulada GEV se expresa como:

$$F(x) = \exp \left\{ - \left[ j * \frac{k * (x - \mu)}{\alpha} \right]^{\frac{1}{k}} \right\}, k \neq 0$$

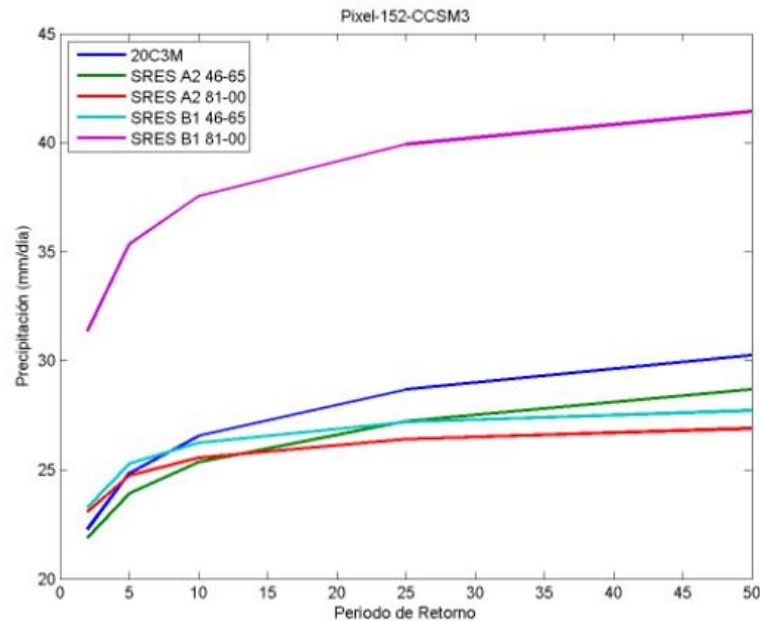
Donde  $\alpha$ ,  $\mu$  y  $k$  son los parámetros de la distribución. Al expresar la función en forma inversa se obtiene una expresión para el cuantil adimensional:





$$X_T = \mu + \frac{\alpha}{k} * (1 - \ln(F))^k$$

Al considerar la variable aleatoria  $x$  como la máxima intensidad de lluvia diaria y  $1/F$  como el periodo de retorno (T) se obtienen las siguientes curvas IDF, en las cuales la duración está fija (24 horas).



**Gráfica 2. Ejemplo De Curvas IDF para tormentas intensas de 24 horas de duración para un pixel específico de los MCG utilizados (Acevedo Aristizábal, 2009)**

Según Cao (1974) la relación existente entre las precipitaciones máximas en 24 horas y las precipitaciones máximas diarias, puede considerarse lineal, independiente de la probabilidad de ocurrencia y constante para una región específica. (Acevedo Aristizábal, 2009) En el trabajo de Wilches (2001) se encontró que existía una relación lineal que varía entre 1,01 y 1,11 entre las precipitaciones máximas diarias y las precipitaciones máximas en 24 horas para 61 estaciones de precipitación en Antioquia. En el trabajo de Acevedo se utilizó el valor máximo diario como el valor máximo para 24 horas de duración.



## 2.5 Fórmulas regionales para la estimación de curvas intensidad-frecuencia-duración basadas en las propiedades de escala de la lluvia (Región Andina Colombiana). Por Edicson Gonzalo Pulgarín, 2009.

Las curvas de Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) se construyen por medio puntos representativos de la intensidad media de precipitación para diferentes duraciones, correspondientes todos ellos a una misma frecuencia o período de retorno (Témez 1978). Mediante las curvas IDF es posible estimar la intensidad de tormentas intensas de distintas duraciones y para diferentes periodos de retorno.

Algunos autores consideran que en un sitio específico puede estimarse una sola familia de curvas para un amplio rango de duraciones, por ejemplo, entre 5 minutos y 24 horas, mientras que la gran mayoría consideran que para cada sitio específico deben determinarse dos familias de curvas. Una familia para las duraciones más cortas, entre 5 y 60 o 120 minutos y otra entre 60 o 120 minutos hasta 24 horas e incluso hasta varios días. A pesar de no tenerse ninguna demostración rigurosa, diversos autores consideran que esta subdivisión debe realizarse ya que se tienen características físicas muy diferentes en las lluvias de corta duración, entre 0 y 1 o 2 horas, las cuales son debidas a fenómenos netamente convectivos, y las de larga duración, mayores a dos horas (Bonacci 1984) citado por (Pulgarín Dávila, 2009).

El trabajo de Pulgarín pretende aplicar metodologías adecuadas a la región Andina de Colombia con énfasis en la invarianza de la escala y su relación con parámetros morfológicos, de tal manera que permitan estimar las curvas IDF con herramientas adecuadas a la alta variabilidad espacial de la lluvia en los Andes de Colombia.

En su investigación, Pulgarín propone la siguiente ecuación que permite convertir intensidades de lluvia en base 24 horas (tales como las obtenidas con la estimación hidrológica de la sección 2.4) a diferentes duraciones, teniendo en cuenta dos tipos de familias de curvas de acuerdo con la duración deseada.

$$I_t^T = \left( [0.88 * I_{24h} - 0.004] + \left[ 0.12 * \frac{I_{24h}}{0.5772} * -\ln \left[ -\ln \left( 1 - \left( \frac{1}{T} \right) \right) \right] \right] \right) * \left( \frac{t}{1440} \right)^{-0.829} \quad \text{si } t \geq 60$$

$$I_{60} * (0.54t^{0.25} - 0.5) \quad \text{si } t < 60$$

**Ecuación 1.**  
**Estimación de curvas IDF.**  
 (Pulgarín Dávila, 2009)

En la ecuación anterior  $I_{24}$  corresponde a la intensidad promedio diaria en mm/hr, T es el periodo de retorno considerado en años, t es la duración para la cual se quiere determinar la intensidad en minutos e  $I_{60}$  corresponde a la intensidad para un evento de precipitación con una duración de una hora. Estas ecuaciones son estimaciones regionales de curvas IDF de 1 a 24 horas válidas para la zona Andina Colombiana.



## 2.6 Generación de Hietogramas por medio del método Intensidad instantánea (Chow, Maidment, & Mays, 1994)

Para simular las inundaciones se requieren hietogramas de eventos representativos a partir de las curvas IDF. Estos hietogramas son representaciones sintéticas de la precipitación del área de interés y se utilizan para diseñar estructuras hidráulicas. La obtención de hietogramas de precipitación se puede hacer de diferentes formas, por ejemplo, utilizando el método de la intensidad instantánea o el método de bloques alternos.

En este trabajo, se va a emplear el método de Intensidad Instantánea, el cual consiste en suponer que la lámina de agua es igual al valor dado por la curva IDF para un periodo de duración  $T_d$  alrededor del pico de la tormenta, suponiendo que la intensidad varía de manera continua durante el evento de precipitación.

El tiempo total del evento de precipitación se determina con la siguiente ecuación:

$$T_d = t_a + t_b \quad \text{Ecuación 2. División del tiempo del evento de lluvia en dos periodos}$$

Donde  $t_a$  es el tiempo antes del pico y  $t_b$  es el tiempo después del pico.

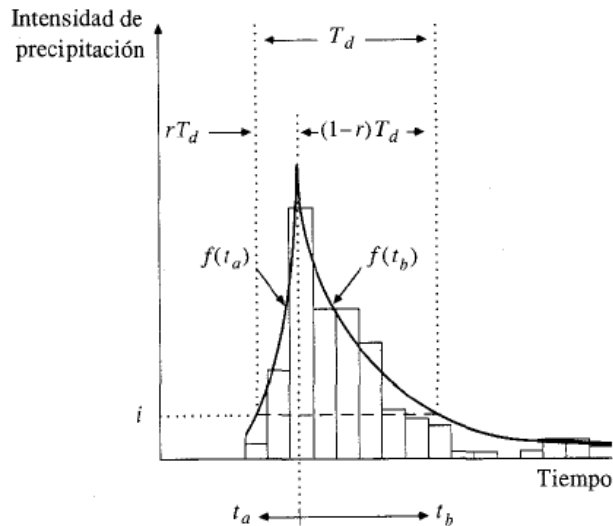
Además, se define un coeficiente de retardo de precipitación ( $r$ ), el cual es la relación entre el tiempo antes y después del pico:

$$r = \frac{t_a}{t_b} \quad \text{Ecuación 3. Coeficiente de retardo}$$

Las ecuaciones anteriores se pueden reescribir de la siguiente forma:

$$T_d = \frac{t_a}{r} = \frac{t_b}{1-r} \quad \text{Ecuación 4. Duración del evento en función del coeficiente de retardo}$$

Se supone que existen dos curvas de intensidad, la primera en función del tiempo antes del pico ( $f(t_a)$ ) y la segunda en función del tiempo después del pico ( $f(t_b)$ ), que se ajustan a las intensidades de precipitación del hietograma. En la siguiente ilustración se observa gráficamente la representación del hietograma de acuerdo con esta metodología.



**Ilustración 8. Ajuste de un hietograma mediante curvas.** (Chow et al., 1994)

La precipitación total durante un tiempo está representada por el área bajo esas dos curvas.

$$R = \int_0^{rT_d} f(t_a) dt_a + \int_0^{(1-r)T_d} f(t_b) dt_b$$

**Ecuación 5. Precipitación total del evento en forma integral**

Si la intensidad de lluvia promedio para la duración  $T_d$  es  $i_m$ , entonces se puede establecer una expresión alternativa para el cálculo de la profundidad de lluvia del evento:

$$R = i_m * T_d$$

**Ecuación 6. Precipitación total del evento en función de la intensidad promedio**

Es posible notar que  $(f(t_a)) = (f(t_b))$  para cualquier  $(T_d)$ , al derivar esta ecuación con respecto a la duración total se tiene que:

$$\frac{dR}{dT_d} = i_m + \frac{T_d di_m}{dT_d} = f(t_a) = f(t_b)$$

**Ecuación 7. Derivación de la precipitación total**

Adicionalmente, a las curvas IDF se les ajusta una ecuación que permita facilitar su uso, como la que se muestra a continuación:

$$i = \frac{A}{(D + B)^n}$$

**Ecuación 8. Ecuación de curva IDF**

Donde  $i$  es la intensidad de lluvia,  $D$  es la duración del evento de precipitación y  $A$ ,  $B$  y  $n$  son parámetros de la ecuación que dependen del periodo de retorno y la ubicación de la estación pluviométrica.



Al derivar la Ecuación 8 y acoplarla con la Ecuación 7 se obtiene una expresión para la intensidad  $i$  que representa las curvas que describen el hietograma:

$$i = \frac{((1 - n)T_d + B)A}{(B + T_d)^{n-1}}$$

**Ecuación 9. Expresión para la intensidad de un evento de precipitación asumiendo intensidad instantánea**

Al reemplazar en esta ecuación  $T_d$  calculado a partir de  $t_a$  y  $t_b$  se pueden encontrar las ecuaciones de las dos curvas que representan el hietograma  $i_a = f(t_a)$  y  $i_b = f(t_b)$ . Aplicando estas ecuaciones es posible determinar el hietograma a partir de las curvas IDF.

## 2.7 Proyecto “Drenaje Urbano y Cambio Climático” (Universidad de los Andes PAVCO, 2014)

Para la presente investigación se implementarán los resultados obtenidos por el segundo informe del proyecto “Drenaje Urbano y Cambio Climático: hacia los sistemas de alcantarillado del futuro” realizado por el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA) del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental y el Grupo de Investigación en Automatización para la Producción (GIAP) del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad de los Andes.

Este informe utilizó la misma metodología que la investigación de Acevedo (2009) pero se hicieron varios cambios para actualizarla y hacerla más específica espacialmente. Los tres cambios más relevantes son:

- 1) **Modelos de Circulación General (MCG):** En este proyecto se emplearon los datos de los modelos presentados en el AR5 - 5to reporte del IPCC. Tal como se indicó la sección 2.3 los nuevos modelos presentan una mejor correlación y tienen en cuenta más componentes relevantes para las proyecciones climáticas. “La nueva generación de simulaciones provistas por MCGs, conocida como CMIP5 (Stouffer, et al., 2011 & Taylor, et al., 2012), se encuentra disponible a través del Programa para el Diagnóstico e Intercomparación de Modelos (por sus siglas en inglés PCMDI, disponible en: <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>) y fue utilizada en la elaboración del Quinto Informe de Evaluación (AR5) del IPCC.” (Universidad de los Andes PAVCO, 2014) En este informe utilizaron los siguientes modelos:


**Tabla 1. Modelos climáticos globales analizados correspondientes al proyecto de intercomparación CMIP5**

<b>Modelo</b>	<b>Institución</b>
<b>BCC-CSM1.1, 2011</b>	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration, CHINA
<b>BCC-CSM1.M, 2011</b>	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration, CHINA
<b>CSIRO-Mk3.6.0 (2009)</b>	CSIRO, AUSTRALIA
<b>MIROC5 (2010)</b>	Meteorological University of Tokyo, JAPON
<b>MRI-CGCM3 (2011)</b>	Meteorological Research Institute, JAPON

- 2) **Corrección de los datos:** Adicionalmente, en este informe se agrega la consideración de corregir errores sistemáticos antes de generar las curvas IDF.

“Una de las mayores limitaciones de los MCG es que no siempre hacen una representación adecuada del clima a nivel regional. En particular, si bien los modelos son capaces de reproducir los elementos climáticos fundamentales que describen cualitativamente el campo de precipitación en el clima regional de América del Sur, en algunos casos sus errores en la cuantificación de la precipitación pueden ser importantes (Vera, et al., 2006; Gulizia, et al., 2012; Gulizia & Camilloni, 2014). Por esta razón, los distintos MCGs pueden proveer respuestas diferentes a un mismo forzamiento climático debido a las distintas formas en que modelan estos procesos. A esos errores se los denomina de aquí en adelante sistemáticos, por cuanto se supone que se extenderían de igual modo a las simulaciones del clima futuro.” (Universidad de los Andes PAVCO, 2014)

“El ajuste o calibración se realiza sobre un período con simulaciones climáticas y datos confiables observados, donde los valores de los modelos corregidos serán muy similares a los observados. Luego, este ajuste se verifica en un segundo período independiente de modo que si se observa una adecuada validación en este segundo período se puede tener una mayor confianza en las proyecciones futuras. Los datos observados considerados son los correspondientes a precipitación mensual en puntos de retícula con una resolución de 0.5° latitud x 0.5° longitud correspondientes a la base de datos conocida como CRU TS3.1, producida en el Climate Research Unit (CRU) del Reino Unido (Harris, Jones, Osborn, & Lister, 2014). Por otra parte, los datos provistos por los MCGs analizados fueron llevados a la



misma resolución a través del método "Triangle-based linear interpolation" (Watson y Philip, 1984)."

“En este estudio, de acuerdo con la disponibilidad de las simulaciones del clima pasado por parte de los cinco MCGs analizados (Tabla 3-3), se tomó el intervalo (1961-75) para el cómputo de factores de corrección (calibración) y (1976-90) para la validación de las correcciones realizadas. El método consiste en computar la distribución de percentiles de las series de precipitación acumulada mensual tanto en los datos de la base correspondientes a las observaciones como en los provistos por los modelos para el período de calibración. El vector de corrección se obtuvo a partir de multiplicar cada valor mensual de precipitación de los MCGs por el cociente entre el valor del percentil p de precipitación en las observaciones sobre el valor del percentil p en el modelo climático. El esquema de corrección se aplicó a los campos de cada uno de los doce meses de precipitación para cada uno de los MCGs analizados lo que permitió obtener luego series de precipitación diaria simulada por modelos climáticos sin errores sistemáticos.”

- 3) **Zonas específicas:** El proyecto se concentró en generar curvas IDF para sectores específicos en la ciudad de Bogotá. Se obtuvieron resultados para las zonas de Chicó Sur y Chicó Norte.



**Ilustración 9. Mapas de las zonas. Chicó Sur (Izq.) y Chicó Norte (Der.)**

La zona de interés para la presente investigación es Chicó Sur. La red Chicó Sur se encuentra ubicada al norte de la ciudad de Bogotá, Colombia, entre la Calle 92 y la Calle 100 en sentido Sur-Norte, y entre la Avenida 7ma y la Autopista Norte en sentido Oriente-Occidente. Debido a la resolución de los modelos y la segmentación en cuadrículas es necesario hacer coincidir los resultados de los MCGs de acuerdo con la ubicación geográfica de la zona de estudio.

“Los resultados de los MCGs se obtienen en ciertos puntos que hacen parte de una grilla cubriendo toda la superficie del planeta. Como es de esperarse estos puntos no coinciden



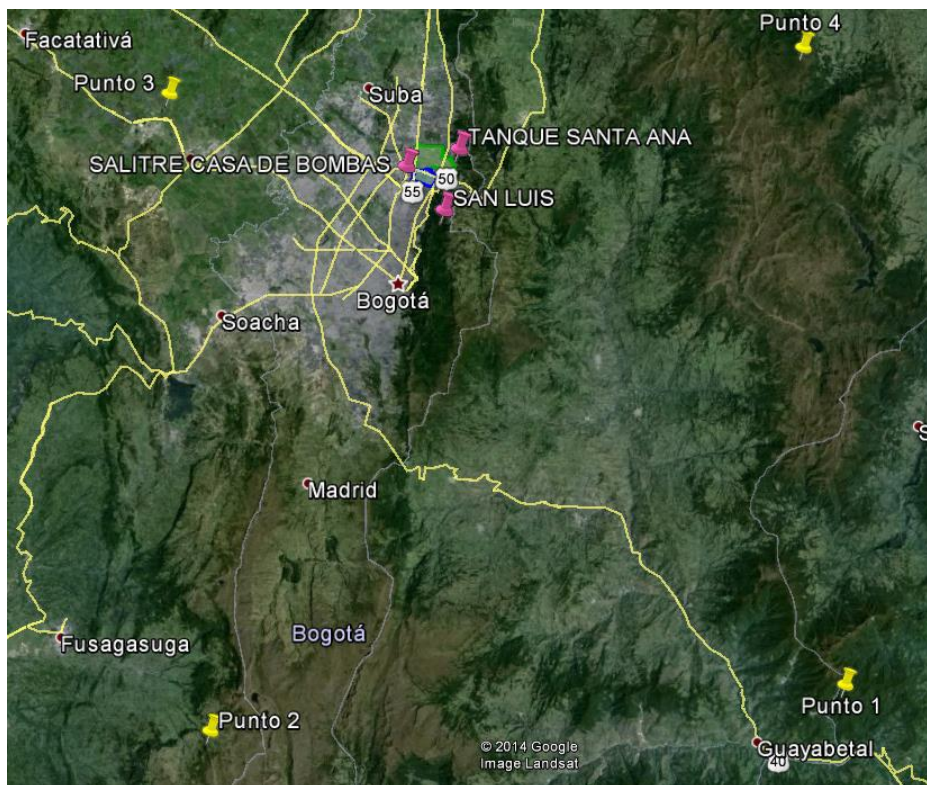


con la zona de estudio por lo que se hace necesario una interpolación de los resultados para trasladarlos a la zona de importancia para el proyecto de investigación. (...) Para todos los resultados obtenidos en los MCGs se obtuvieron los resultados trasladados a las tres estaciones pluviométricas cercanas a la zona de estudio utilizando la ponderación por el inverso de las distancias ” (Universidad de los Andes PAVCO, 2014)

La ecuación implementada fue la siguiente:

$$P_{ij} = \sum_{j=1}^n P_j * \frac{\left(\frac{1}{d_j^2}\right)}{\sum \left(\frac{1}{d_i^2}\right)}$$

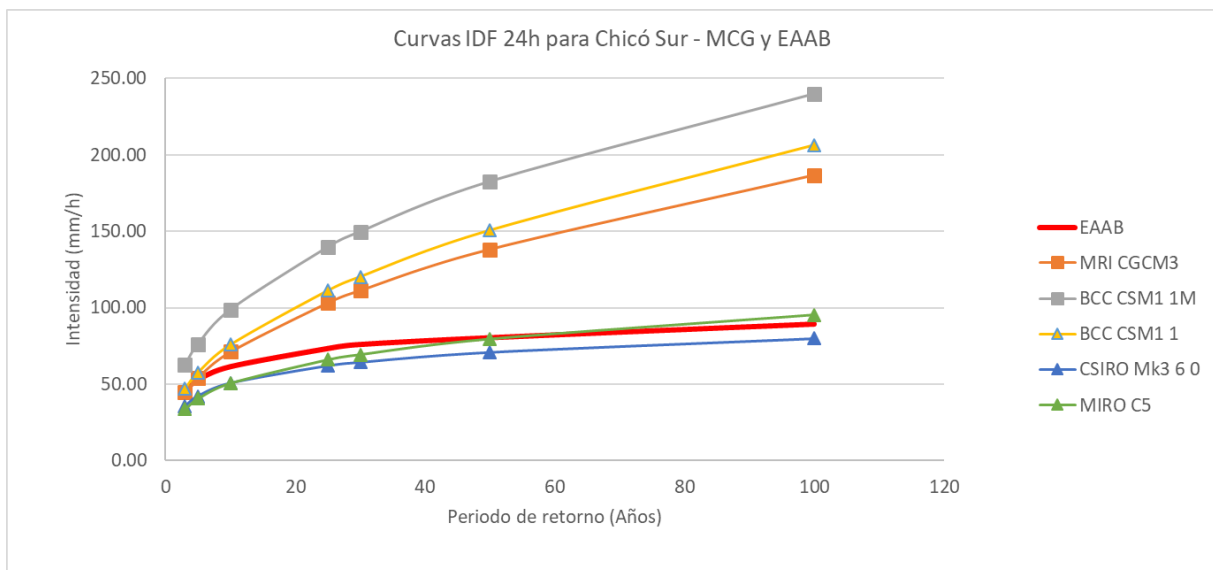
**Ecuación 10. Lluvia ponderada de acuerdo con el criterio del cuadrado inverso de las distancias**



**Ilustración 10. Mapa de Bogotá con los vértices de los MCGs (Universidad de los Andes PAVCO, 2014)**

Para este sector de la ciudad se obtuvieron las siguientes curvas IDF a partir de los modelos MCG. Adicionalmente se observa la curva IDF de la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá para esta misma zona. Los valores exactos se encuentran en Anexos.





Gráfica 3. Curvas IDF para Chicó Sur en escenarios de Cambio Climático (Universidad de los Andes PAVCO, 2014)

Estas curvas pueden transformarse a curvas IDF con duraciones variables por medio de la metodología expuesta en la sección 2.5, empleando la Ecuación 1. Una vez se tienen estas curvas se requieren los parámetros representativos de los eventos de precipitación para generar los hietogramas.

### Parámetros de los eventos de precipitación

El proyecto también investigó acerca de las características de los eventos, tales como el periodo de retorno, la duración de los eventos de precipitación y la forma de los hietogramas (coeficiente de retardo). Estos parámetros están relacionados principalmente con la cuenca aferente a la red de drenaje urbano asociada a los eventos de precipitación.

- a) **Periodo de retorno:** De acuerdo con el numeral D.4.3.1 del título D del RAS, las estructuras que se encuentran dentro de zonas de complejidad alta deben ser diseñadas o verificadas para 30 años en el futuro. Asimismo, el numeral D.4.3.2 del título D del RAS indica que el periodo de retorno de las lluvias debe encontrarse entre 3 a 5 años. (Ministerio de Vivienda, 2016)
- b) **Duración:** La duración del evento de precipitación depende principalmente de las características de la cuenca aferente al sistema estudiado. En el caso de Colombia, la duración del evento de precipitación se determina como el tiempo de concentración de la cuenca aferente.

El tiempo de concentración se define como el mínimo periodo de tiempo para alcanzar el caudal máximo a la salida de la cuenca y se conoce también como el tiempo que se demora el agua en llegar a la salida de la cuenca desde el punto más alejado (Ministerio de Vivienda,



2016) Se obtuvieron tiempos de entrada de 17 minutos y tiempo de recorrido de 78 minutos para la red Chicó Sur. (Universidad de los Andes PAVCO, 2014) De esta forma la duración total es de 95 minutos.

- c) **Coefficiente de retardo:** El coeficiente de retardo es la relación entre el tiempo antes y después del pico del evento de precipitación. (Chow et al., 1994). Para determinar este coeficiente no existe una ecuación explícita dependiente de las características de la cuenca o de la zona de estudio. Por esta razón su cálculo se realizó con base en registros pluviográficos históricos de una zona cercana a la zona de estudio.

El coeficiente de retorno utilizado en los resultados de la primera fase de la presente investigación es de 0.402 indicando que el pico si bien no se encuentra en la mitad del evento de precipitación si se encuentra cerca a este punto. (Universidad de los Andes PAVCO, 2014).

Estas características permiten generar los hietogramas de la zona de estudio y permiten hacer análisis y estudios en la zona. A continuación, se muestra un estudio generado a partir de la información de este proyecto “Drenaje y Cambio Climático”.

## 2.8 Prueba de la metodología de localización de tanques de tormenta en diferentes sectores de las ciudades de Bogotá y Medellín. (Pulgarín Morales & Saldarriaga Valderrama, 2018)

Esta investigación realizada como Tesis de Maestría de Laura Pulgarín en el año 2018 presenta la posibilidad de emplear tanques de tormenta para reducir las inundaciones en la red Chicó Sur en Bogotá y en la red Prado de la ciudad de Medellín. Se evaluó el uso de algoritmos de optimización para la localización de los tanques, de tal forma que se redujeran los volúmenes de inundación y los costos de la implementación de los tanques.

“Con el fin de evitar la saturación o sobrecarga del sistema de drenaje se han propuesto los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenibles, SUDS. En este trabajo se resume un estudio sobre los tanques de tormenta como una opción para disminuir las inundaciones urbanas. Específicamente, se evaluó el desempeño de dos metodologías diferentes de localización de estos tanques en sistemas de drenaje ubicados en las ciudades de Bogotá y Medellín, Colombia. Las metodologías difieren en utilizar o no un control hidráulico, por lo cual se busca identificar los beneficios y limitaciones de cada una de estas. Las dos metodologías, OptSU y Optitank, utilizadas para localizar los tanques en las redes de estudio lograron reducciones mayores al 60% en las inundaciones.” (Pulgarín Morales & Saldarriaga Valderrama, 2018)

La metodología de esta investigación está dividida en tres grandes partes. En la primera se obtiene el modelo hidráulico de la red de estudio, en la segunda se generan los hietogramas para las

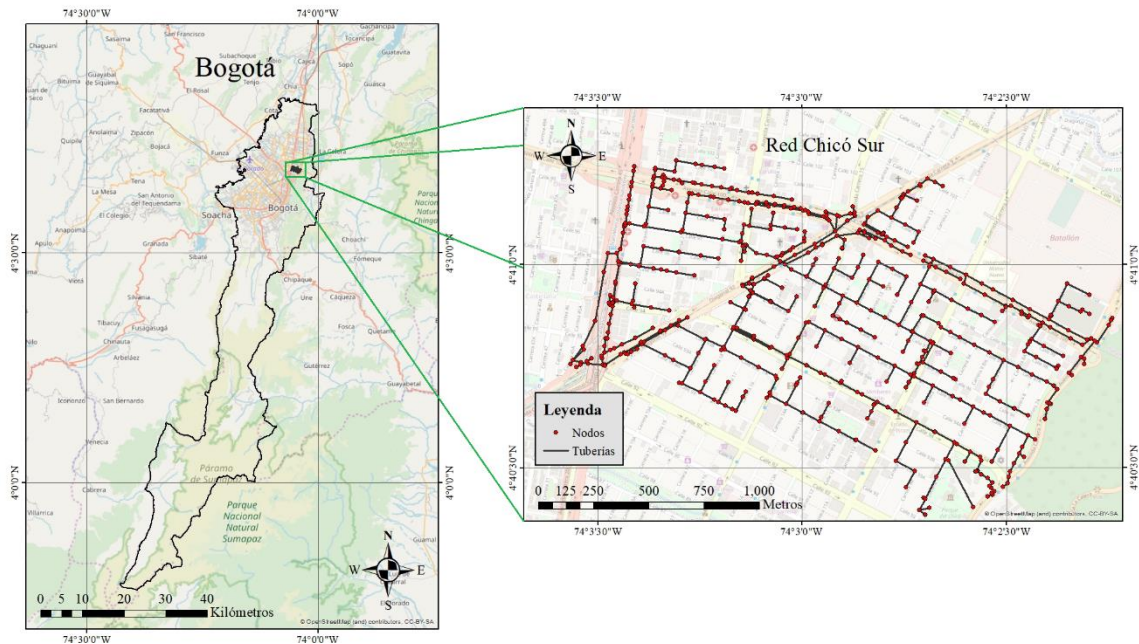


simulaciones y en la tercera parte se emplean los algoritmos de localización de los tanques de tormenta en la red.

El modelo hidráulico es una representación de las tuberías, nodos y salidas del sistema, tiene en cuenta las conexiones, diámetros y elevaciones a lo largo de la red. Pulgarín (2018) obtuvo un modelo suficientemente fiable de la empresa responsable, pero advierte que no es perfecto.

“El Modelo Hidráulico de la Red se obtiene de la empresa que se encarga de la gestión del alcantarillado pluvial de la zona de estudio. En el caso de Bogotá esta información le pertenece a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB). Debido a que hay zonas que se construyeron hace varios años y es difícil validar los datos en campo de toda la ciudad, hay zonas con información incompleta, por lo que hay que hacer las suposiciones que sean pertinentes.” (Pulgarín Morales & Saldarriaga Valderrama, 2018)

La primera red que se seleccionó en esta investigación es una red del alcantarillado pluvial de la ciudad de Bogotá, denominada Chicó Sur, la cual cuenta con 571 tuberías y 574 nudos.



**Ilustración 11. Red Chicó Sur y su ubicación en Bogotá (Pulgarín Morales & Saldarriaga Valderrama, 2018)**

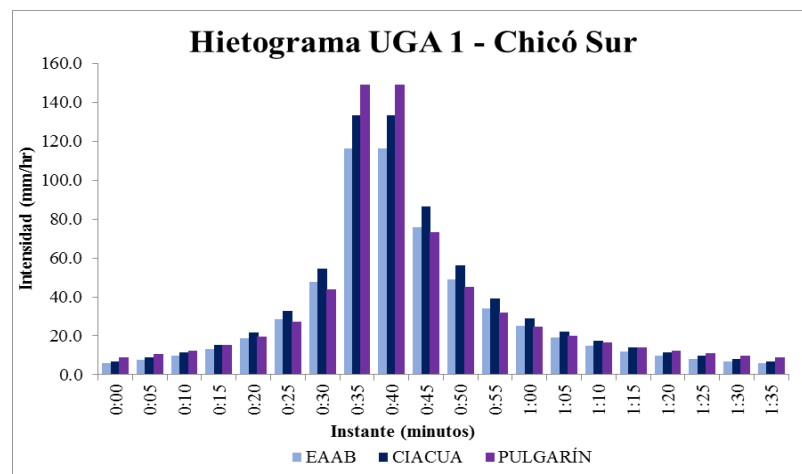
En la tesis se destacaron las siguientes características de la zona:

“De esta red se puede destacar que en los extremos del lado derecho presenta altas pendientes, mientras que en el centro y en el lado izquierdo las pendientes son bajas. Además, la red tiene pocas caídas (desniveles en las tuberías de salida). De igual forma, se puede afirmar que tiene un porcentaje de área impermeable muy alto, dada la alta



densificación urbanística de la zona, lo que desfavorece la infiltración del agua lluvia y en consecuencia incrementa la escorrentía e inundación de la zona de estudio.” (Pulgarín Morales & Saldarriaga Valderrama, 2018)

A continuación se empleó la metodología de Acevedo (Sección 2.4) junto con la aproximación de Pulgarín para estimar las Curvas IDF respectivas (Sección 2.5). Posteriormente, se generaron los hietogramas con el método de intensidad instantánea (Sección 2.6) y las consideraciones del proyecto Drenaje Urbano y Cambio Climático (Sección 2.7). A continuación se encuentra uno de los hietogramas sintéticos empleados, se puede observar que se emplearon 3 metodologías diferentes (EAAB, CIACUA y Pulgarín).



Gráfica 4. Hietograma sintético empleado en la red Chicó Sur (Pulgarín Morales & Saldarriaga Valderrama, 2018)

Antes de utilizar OptSU u OptiTank se realizó una simulación del comportamiento de la red para encontrar los nudos que en los cuales se presenta inundación.

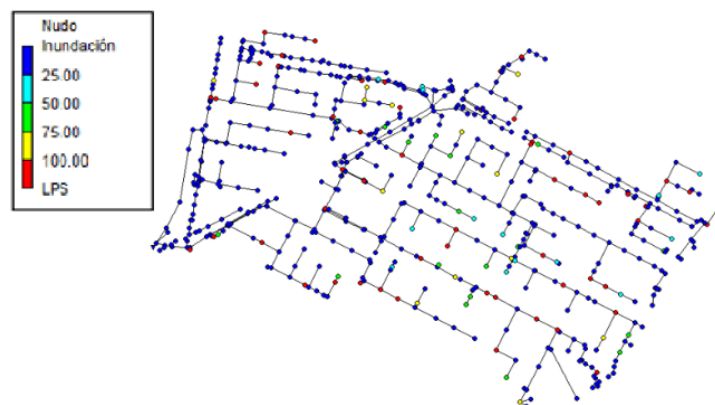
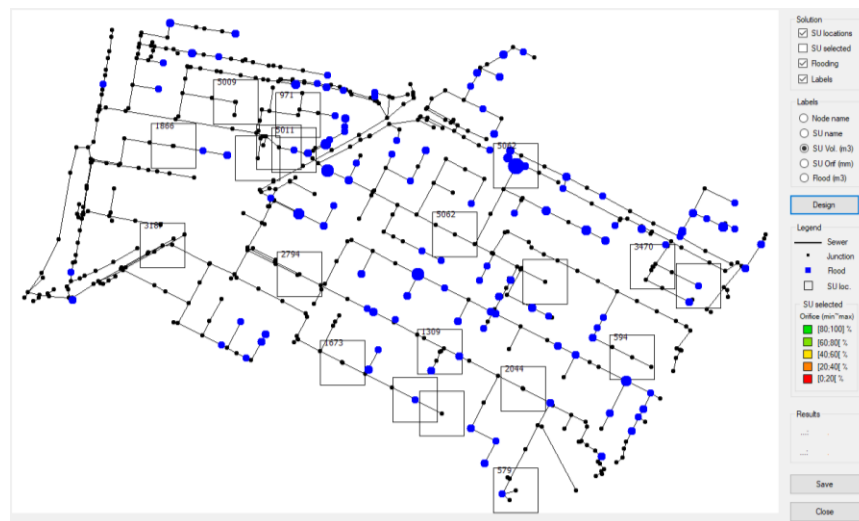


Ilustración 12. Nudos inundados en la red Chicó Sur (Pulgarín Morales & Saldarriaga Valderrama, 2018)



A continuación, Pulgarín (2018) empleó métodos de optimización para encontrar configuraciones de tanques dentro de la red. En la siguiente ilustración se observa un ejemplo de solución encontrada. Los tanques se encuentran señalados como cuadrados negros junto con su volumen (valor dentro de cada tanque).



**Ilustración 13. Resultados de localización de tanques de tormenta**(Pulgarín Morales & Saldarriaga Valderrama, 2018)

“Los resultados obtenidos muestran una reducción significativa en la inundación, la cual varía entre el 70.0% y el 99.1%. Los resultados indican que la red de Chicó Sur es muy susceptible a inundaciones, inclusive cuando se hace la simulación de la red sin considerar efectos de Cambio Climático, ya que se presentan altos volúmenes de inundación. Esto indica que se deben hacer cambios importantes en la red en los próximos años con el fin de disminuir el riesgo de pérdidas económicas importantes en la zona.” (Pulgarín Morales & Saldarriaga Valderrama, 2018)

Esta investigación sobre tanques de tormenta difiere al presente estudio principalmente en cuanto a la aproximación al Cambio Climático empleado, el modelo de inundación y el indicador de severidad de la inundación. El indicador empleado por Pulgarín (2018) fue el volumen de las inundaciones mientras que este estudio utilizó la resiliencia. A continuación, se describen en mayor profundidad el modelo (Secciones 2.9 y 2.10) y el indicador (Sección 2.11).

## 2.9 Modelo de inundaciones

En primer lugar, se realizó la selección de una herramienta de modelación que permitiera representar la transformación de lluvia a escorrentía en un entorno variable espacial y temporalmente, específicamente bidimensional dinámico. Debido a que las simulaciones se realizarían en un contexto urbano la herramienta en cuestión debería considerar la interacción entre



el sistema de drenaje y la superficie de la zona. En estos ambientes, los sistemas de evacuación de aguas lluvias son un componente clave que no puede ser obviado sin afectar de manera considerable la calidad de las simulaciones realizadas.

En 2017 Laurent Guillaume Courty y Adrián Pedrozo-Acuña, investigadores de la Universidad Nacional Autónoma de México, junto con Paul David Bates (Universidad de Bristol, Reino Unido) presentaron un programa computacional para la simulación dinámica de inundaciones urbanas en 2D. Este programa, llamado Itzi, emplea aproximaciones numéricas a ecuaciones hidráulicas e hidrológicas para calcular de manera dinámica diversas variables de los eventos de inundación simulados (tales como profundidad, velocidad del agua y caudales). Los autores probaron el software en tres circunstancias para comprobar su validez: comparación con una solución analítica, casos de inundación referencia (FCRM, Reino Unido) y un evento de inundación real del cual se tienen mediciones. En los tres casos, Itzi obtuvo errores iguales o menores que los modelos de referencia con los cuales fue comparado.

Itzi presenta las siguientes características: habilidad para procesar datos de diferentes resoluciones tanto espaciales como temporales, integración con la red de drenaje urbano y disponibilidad para utilizar y modificar el programa de manera libre bajo una licencia de público general (GPL). La herramienta computacional se encuentra integrada en el sistema de información geográfica (SIG) GRASS GIS, el cual permite visualizar, analizar y transformar información geográfica que contenga datos relevantes para las simulaciones (alturas del terreno, rugosidad de las superficies, distribución espacio-temporal de la lluvia, entre otros). Adicionalmente, el programa es capaz de emplear un modelo de la red de drenaje pluvial y su interacción con la superficie por medio del acople de Storm Water Management Model (SWMM). Este software está disponible para su libre descarga, uso, reproducción y modificación siempre y cuando las modificaciones sean disponibles para otros usuarios. Tanto Itzi como GRASS GIS y SWMM son programas gratuitos disponibles en internet.

La creación y publicación de este software es una contribución práctica a la modelación y cuantificación de los efectos de las inundaciones urbanas. Las características presentadas previamente no se encuentran disponibles en todos los programas de modelación de inundaciones, o al menos, no fácilmente al mismo tiempo. Por ejemplo, uno de los modelos referencia, LISFLOOD, no posee la capacidad de interpolar las capas de rugosidad (Bates, Trigg, Neal, & Dabrowa, 2013) y esta inhabilidad condiciona los datos que pueden ser utilizados. Por otro lado, la interacción entre la superficie y el drenaje es una de las características que modelos, tales como Hec RAS, carecen de manera explícita (Government of Ontario, n.d.). Finalmente, los programas más avanzados que contienen las dos características previamente mencionadas, tales como InfoWorks ICM, son de uso comercial, por lo cual, no pueden ser modificados libremente y requieren la compra de sus licencias (Teng et al., 2017). De acuerdo con lo anterior, Itzi presenta una combinación de tres características que no se encuentran en programas similares de manera simultánea.





Los investigadores desarrollaron un modelo dinámico de inundaciones aplicable a zonas urbanas. La configuración de rasgos del programa: capacidad de manejar los datos de entrada, interacción con la red de drenaje y licencia de público general le otorgan utilidad para diversas aplicaciones de diferentes usuarios. El software presentado en este artículo concierne a los investigadores en los campos de la hidroinformática, métodos numéricos y amenazas naturales. A su vez, Itzi brinda una alternativa a entidades de prevención de desastres naturales, empresas de seguros y planificadoras urbanas. Las potenciales aplicaciones del programa incluyen evaluación de riesgo y daños por inundación, administración de recursos hídricos, predicción de eventos de inundación, ecología de planicies de inundación, hidrología de sistemas fluviales, entre otros.

De acuerdo con la descripción anterior, la herramienta computacional seleccionada para realizar las simulaciones de inundación en esta investigación es Itzi.

## 2.10 ITZI

Itzi, es un modelo hidráulico e hidrológico completamente distribuido y dinámico que simula procesos hidrológicos como lluvia e infiltración, flujos superficiales bidimensionales y permite el acoplamiento bidireccional entre la superficie y la red de drenaje, la cual es simulada mediante el modelo *Storm Water Management Model* (SWMM) de la agencia de protección ambiental (EPA) de los Estados Unidos. (Courty Laurent, Pedrozo-Acuña Adrián, 2017).



Ilustración 14. Logotipos de las herramientas computacionales

Itzi fue programado sobre el sistema de información geográfico GRASS, el cual es software libre y está disponible principalmente para plataformas Unix (GNU/Linux). Al estar en un entorno geoespacial simplifica el procesamiento de la información antes y después de realizar las simulaciones, permite realizar cálculos y visualizarlos de manera eficiente por medio de mapas en una condición dinámica, por lo tanto, se puede observar el avance de la inundación en las zonas de estudio y los tiempos de pasaje. Toda la información de entrada puede ser representada por medio de series de tiempo de capas ráster y no es necesario que posean la misma resolución espacial. Este programa puede simular las interacciones entre los flujos superficiales y la red de drenaje en los nodos por medio de ecuaciones de presa y orificio que, a su vez, dependen de las profundidades relativas del agua en la red y en la superficie. La parte superficial y subterránea corren simultáneamente y el intercambio entre los dos es bidireccional, por lo tanto, el agua puede entrar o salir de la red de drenaje. (Courty Laurent, Pedrozo-Acuña Adrián, 2017)



Itzi es software relativamente reciente desarrollado por Laurent Guillaume Courty y Adrián Pedrozo-Acuña, ingenieros de la Universidad Nacional Autónoma de México; publicado por primera vez en 2016 con varios lanzamientos de versiones posteriores, la última versión publicada hasta la fecha fue la versión 18.2, dada a conocer el día 19 de febrero de 2018. Este programa fue publicado bajo la licencia GNU GPL, es decir, es libre de utilizarse para cualquier propósito siempre y cuando cualquier modificación de utilidad que sea desarrollada se publique para que otras personas puedan utilizarla.

### 2.10.1 Características del modelo seleccionado

“El modelo presentado resuelve las ecuaciones de aguas someras de forma simplificada, a través del método de diferencias finitas. El cálculo de flujo está compuesto por ecuaciones cuasi-bidimensionales, que resuelven de manera independiente el flujo en cada dimensión.” (L. Courty & Pedrozo-Acuña, 2016) La siguiente figura presenta un diagrama con las variables incluidas en la solución numérica implementada.

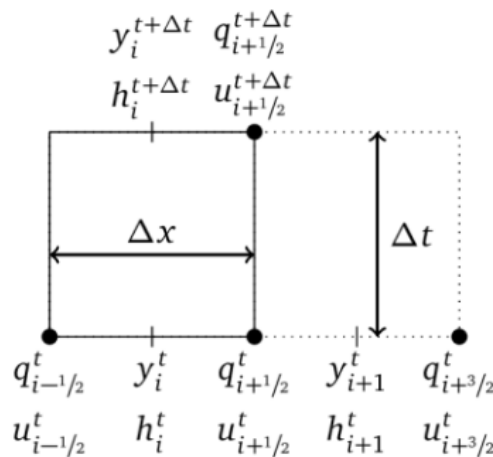


Ilustración 15. Variables usadas para la resolución numérica en la dimensión x.

El paso de tiempo empleado se calcula de tal forma que cumpla con el criterio del número de Courant-Friedrichs-Levy (CFL), el cual es una condición de estabilidad para sistemas hiperbólicos:

$$\Delta t = \alpha * \frac{\min(\Delta x, \Delta y)}{\sqrt{g * h_{max}}} \quad \text{Ecuación 11. Paso de tiempo}$$

Donde  $h_{max}$  es la profundidad máxima de agua en todo el dominio,  $g$  la aceleración de la gravedad y  $\alpha$  un coeficiente necesario para cumplir con la condición de CFL. Su valor es por defecto igual a 0.7 (de Almeida & Bates, 2013).

El flujo ( $L^2/T$ ) se calcula por medio de la Ecuación 12 donde  $n$  es el coeficiente de fricción de Manning,  $S$  la pendiente hidráulica y  $\theta$  un coeficiente que permite el peso relativo de los flujos arriba





y debajo del punto considerado. En donde  $h_f$  es la profundidad del flujo, calculada como la diferencia entre el nivel máximo de agua y la altura máxima entre las dos celdas. (de Almeida & Bates, 2013)

$$q_{i+\frac{1}{2}}^{t+\Delta t} = \frac{\left(\theta * q_{i+\frac{1}{2}}^t\right) + (1 - \theta) * \left(\frac{q_{i-\frac{1}{2}}^t + q_{i+\frac{3}{2}}^t}{2}\right) + g * h_f * \Delta t * S}{1 + g * \Delta t * n^2 * \left|q_{i+\frac{1}{2}}^t\right| / h_f^{\frac{7}{3}}}$$

**Ecuación 12. Caudal específico en cada dirección.**

La estimación del valor resultante de flujo, producto de las componentes en cada dirección cartesiana, se estima de acuerdo con la Ecuación 12. Dado que se utiliza una malla no-centrada, el flujo en la dimensión y no está calculado en el mismo lugar que el flujo en dimensión x; de esta manera, el valor resultante se calcula por medio del valor promedio de los cuatro valores de flujo más cercanos, en lo que se denomina una plantilla de cuatro puntos. (de Almeida & Bates, 2013)

$$\left|q_{i+\frac{1}{2}}^t\right| = \sqrt{\left(q_{x,i+\frac{1}{2},j}^t\right)^2 + \left(q_{y,i+\frac{1}{2},j}^t\right)^2}$$

**Ecuación 13. Caudal específico resultante**

Las celdas que presenten una profundidad de agua menor a un valor de profundidad umbral, se utiliza la regla propuesta por (Sampson, Bates, Neal, & Horritt, 2013) quienes establecen el cálculo del flujo utilizando una velocidad fija. En este caso, el valor umbral para la profundidad del agua es de 5 mm y la velocidad de 0.1 m/s. (L. Courty & Pedrozo-Acuña, 2016). De esta forma, se evita la resolución de las ecuaciones diferenciales hiperbólicas con profundidades próximas a cero, las cuales pueden ocasionar inestabilidades numéricas y errores en la ejecución del código.

Finalmente, se realiza un balance de masa en cada una de las celdas del modelo, el cual permite el cálculo de la profundidad de agua.

$$h^{t+\Delta t} = h^t + h_{ext}^t + \frac{\sum Q_{i,j}^t}{\Delta x * \Delta y} * \Delta t$$

**Ecuación 14. Balance de masa para cálculo de profundidad**

La ecuación previa indica que la profundidad (para cualquier celda del dominio de modelación) se calcula como la profundidad en el instante de tiempo anterior ( $h^t$ ) más los valores exteriores ( $h_{ext}^t$ ) como la lluvia o la infiltración y la sumatoria de los flujos entre las celdas adyacentes. (L. Courty & Pedrozo-Acuña, 2016).

Debido a que el modelo se basa en la resolución explícita de ecuaciones diferenciales con diferencias finitas tanto en el espacio como en el tiempo, se deben suministrar condiciones iniciales y condiciones de frontera que permitan calcular las variables futuras a partir de las condiciones



actuales. Para las simulaciones, Itzi considera una profundidad inicial de cero, lo cual físicamente representa que el suelo está seco y no hay ninguna zona inundada, esta suposición es razonable debido a que el tiempo entre eventos de lluvia suele ser lo suficientemente amplio para considerar un secado de la superficie.

La condición de frontera empleada presenta un mayor grado de importancia respecto a la condición inicial debido a que la relevancia de la condición de inicio decae a medida que la simulación avanza, pero la condición de frontera se mantiene para todo el tiempo. Itzi permite representar la condición de borde de tres formas diferentes: Cerrada, abierta y fija. De las condiciones previamente mencionadas, las que presentan mayor utilidad para las modelaciones a realizar son la condición abierta (en la cual la velocidad en la frontera es igual a la velocidad dentro del dominio) y la condición fija (en la cual la profundidad es definida por el usuario).

Debido a que Itzi se encuentra totalmente integrado con un sistema de información geográfico presenta varias ventajas, tal como lo plantean sus desarrolladores:

“El programa está escrito en lenguaje de programación Python y se presenta como un módulo del Sistema de Información Geográfica (SIG) de libre distribución conocido como GRASS. De esta manera, las características más destacables de Itzi son las siguientes: La integración dentro de un SIG, simplificando los pasos de preparación de los datos de entradas y el análisis de los datos de salida, La utilización de variables dinámicas en espacio y tiempo (i.e. series de mapas tipo ráster) como datos de entrada, lo que permite, por ejemplo, el empleo de eventos de lluvia espacialmente distribuida en el dominio y coeficientes de fricción que cambian en el tiempo, La posibilidad de usar referencias de tiempo absoluto, de tipo fecha y hora, para definir el inicio y el final de la simulación. Eso facilita el uso de mediciones reales y el proceso de verificación de los resultados a partir de evento real, sin cambiar los datos de entrada.” (L. Courty & Pedrozo-Acuña, 2016)

El programa es reciente y continua en desarrollo, incluso el código fuente se encuentra bajo una licencia que autoriza el uso y la modificación del software por parte de otros miembros de la comunidad científica y el público en general (L. Courty & Pedrozo-Acuña, 2016). Los ejercicios de verificación realizados consistieron en tres pruebas diferentes: Dos soluciones analíticas de las ecuaciones no lineales para aguas poco profundas y una reproducción de un caso de estudio ampliamente aceptado publicado en el reporte de la *UK Environment Agency*. En los tres casos se comprobó la validez numérica del modelo debido a que representó de manera adecuada el comportamiento de la inundación, justificado por medio de los bajos errores calculados. (L. G. Courty, Pedrozo-Acuña, & Bates, 2017)

En resumen, Itzi se presenta como un modelo que cumple con las características necesarias para cumplir los objetivos de modelación, siendo un programa de libre acceso tanto para su uso como a



su código, permitiendo simulaciones con variación espacial, temporal y de la red de drenaje al estar acoplado a SWMM.

## 2.11 Resiliencia – Indicador FRI (Chen & Leandro, 2019)

La resiliencia es un concepto que recientemente ha tomado relevancia en una amplia gama de campos del conocimiento. Se originó en la ecología donde Holling lo definió como la medida de la capacidad de un ecosistema para absorber cambios y persistir (Holling, 1973). Desde entonces, las variaciones del concepto de resiliencia comenzaron a surgir en diferentes campos de investigación.

Incluso la alcaldía de Bogotá ha tomado este concepto para generar el nuevo plan de ordenamiento territorial. (Secretaría Distrital de Planeación, 2018). Aunque se menciona, no se define a qué se refiere o cuáles serán las estrategias o acciones para aumentarla. De esta manera, en primer lugar, es clave contar con una definición de resiliencia.

En el contexto del riesgo de inundación y la gestión de inundaciones, recientemente se han introducido varias definiciones. Según la literatura, las definiciones de resiliencia a las inundaciones difieren entre sí. (Chen & Leandro, 2019). Sin embargo, generalmente comprenden dos elementos principales:

1. La capacidad de afrontar un evento de inundación.
2. La capacidad de recuperación después del evento de inundación.

Por lo tanto, se requiere un indicador que permita combinar estas dos características de manera cuantitativa. Tal trabajo fue propuesto por Chen y Leandro (2019) al crear el *Flood Resilience Index* (FRI). Este indicador que varía de 0 a 1 como valor mínimo y máximo, respectivamente, permite cuantificar la resiliencia de las viviendas de zonas urbanas de manera dinámica, es decir, permite observar el estado del sistema a lo largo del tiempo. Adicionalmente no sólo incluye variables físicas (profundidad, velocidad, duración de la inundación) sino también variables socioeconómicas (Población e ingreso).

El cálculo del FRI se divide en dos fases: la fase del evento y la fase de recuperación. Estas se distinguen dependiendo de un tiempo  $t^*$ , el cual está determinado por la profundidad del agua en el interior de las viviendas. En la fase del evento, se incorporan indicadores físicos del modelo de inundación, es decir, la profundidad del agua, la profundidad acumulada del agua, la duración de la inundación y la tasa de acumulación de agua para evaluar los impactos de la inundación. (Chen & Leandro, 2019) En la siguiente ilustración se observa el comportamiento esperado del índice durante un evento de inundación.

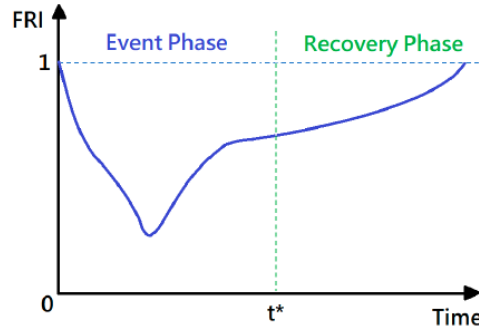


Ilustración 16. Variación del índice FRI para un evento de inundación (Chen & Leandro, 2019)

### 2.11.1 Fase de evento

En este caso, se consideran cuatro indicadores físicos para calcular el FRI: profundidad del agua ( $I_h(t)$ ), profundidad del agua acumulada ( $I_{AWD}(t)$ ), duración de la inundación ( $I_D(t)$ ) y tasa de acumulación de agua ( $I_{WAR}(t)$ ). A continuación, se describen estos cuatro indicadores con sus respectivas ecuaciones:

**Profundidad del agua:** El indicador de profundidad del agua indica la gravedad de las inundaciones en cada paso de tiempo. Cuanto mayor es la profundidad del agua, más se ven afectados los hogares, los humanos y los elementos y, por lo tanto, el sistema se vuelve menos resistente. Se asigna un valor a un parámetro de referencia, que indica la profundidad máxima del agua que el edificio puede soportar.  $h_{ref}$  [m].

$$I_h(t) = \begin{cases} 1 - \frac{h_{in}(t)}{h_{ref}}, & \text{si } h_{ref} \geq h_{in}(t) \\ 0, & \text{d. l. c} \end{cases}$$

Ecuación 15. Indicador de profundidad de inundación para el cálculo del FRI.

**Profundidad acumulada del agua:** También es importante investigar el alcance completo del impacto que ha causado el evento de inundación. Por lo tanto, se desarrolla el indicador de profundidad de agua acumulada. Se inserta un parámetro de referencia que indica la profundidad de agua máxima acumulada que el edificio puede soportar ( $AWD_{ref}$ ). La variable  $t_s$  indica el tiempo inicial de inundación.

$$I_{AWD}(t) = \begin{cases} 1 - \frac{\sum_{t_s}^t h_{in}(t)}{AWD_{ref}}, & \text{si } AWD_{ref} \geq \sum_{t_s}^t h_{in}(t) \\ 0, & \text{d. l. c} \end{cases}$$

Ecuación 16. Indicador de profundidad acumulada de inundación para el cálculo del FRI.



**Duración:** La duración del evento de inundación juega un papel importante en la evaluación del FRI. Cuanto más dure la inundación, mayor será el daño que causará. Además de los impactos a las viviendas y enseres también existen afectaciones a la salud humana de acuerdo con la duración de la inundación, incluida la exposición a sustancias químicas tóxicas, el crecimiento de moho que causa problemas respiratorios y los mosquitos que transmiten una variedad de enfermedades (Young, 2015). El indicador de duración de la inundación ( $I_D(t)$ ) se calcula mediante la siguiente expresión:

$$I_D(t) = \begin{cases} 1 - \frac{D(t)}{D_{ref}}, & \text{si } D_{ref} \geq D(t) \\ 0, & \text{d.l.c} \end{cases}$$

**Ecuación 17. Indicador de la duración de inundación para el cálculo del FRI.**

**Tasa de acumulación:** La tasa de acumulación de la inundación es uno de los factores más influyentes que determina la magnitud del daño causado por las inundaciones. “Por ejemplo, el procedimiento de evacuación debe ejecutarse dentro de un período de tiempo limitado. Si la tasa creciente del agua de la inundación es alta, la evacuación puede ser incompleta o ejecutada con una eficiencia reducida.” (Chen & Leandro, 2019).  $r_{rise}$  representa la tasa de aumento de agua en cm/min.

$$I_{WAR}(t) = \begin{cases} 1 - \frac{r_{rise}(t)}{WAR_{ref}}, & \text{si } WAR_{ref} \geq r_{rise}(t) \\ 0, & \text{d.l.c} \end{cases}$$

**Ecuación 18. Indicador de la tasa de acumulación de inundación para el cálculo del FRI.**

### 2.11.2 Fase de recuperación

Para el caso de la etapa de recuperación no sólo los factores físicos se tienen en cuenta sino también los socioeconómicos. Los factores físicos son los cuatro descritos previamente, se agregan dos factores sociales: Porcentaje de viviendas con niños y porcentaje de viviendas con adultos mayores y se agrega un factor económico: Ingreso de la vivienda.

Los conceptos de los indicadores físicos en la fase de recuperación son similares a los de la fase del evento. Sin embargo, hay una ligera diferencia en el marco de tiempo de evaluación. En lugar de tomar valores para los numeradores en los pasos de tiempo actuales, se consideran los valores máximos o acumulados durante la anterior fase.

Para el indicador de profundidad y el indicador de la tasa máxima de acumulación de agua se consideran el valor máximo de la profundidad del agua y la tasa de acumulación de agua dentro de la anterior fase, respectivamente. En cuanto a la profundidad total de inundación y el indicador de



tiempo total de inundación, se considera un valor acumulativo de la profundidad del agua y la duración total de la inundación. (Chen & Leandro, 2019).  $t_s$  y  $t_e$  significan tiempo de inicio y tiempo de finalización del evento, respectivamente. Las ecuaciones respectivas se muestran a continuación:

$$I_{fs} = \begin{cases} e^{\left(1 - \frac{\max h(t)}{h_{ref}}\right)}, & \text{si } h_{ref} \geq \max h(t) \\ 1, & \text{d.l.c} \end{cases}$$

**Ecuación 19.** Indicador de profundidad de inundación para el cálculo del FRI en etapa de recuperación.

$$I_{TFD} = \begin{cases} e^{\left(1 - \frac{\sum h(t)}{AWD_{ref}}\right)}, & \text{si } AWD_{ref} \geq \sum h(t) \\ 1, & \text{d.l.c} \end{cases}$$

**Ecuación 20.** Indicador de profundidad acumulada de inundación para el cálculo del FRI en etapa de recuperación.

$$I_{TFT} = \begin{cases} e^{\left(1 - \frac{D(t_e)}{D_{ref}}\right)}, & \text{si } D_{ref} \geq D(t_e) \\ 1, & \text{d.l.c} \end{cases}$$

**Ecuación 21.** Indicador de duración de inundación para el cálculo del FRI en etapa de recuperación.

$$I_{WARmax} = \begin{cases} e^{\left(1 - \frac{\max r_{rise}}{WAR_{ref}}\right)}, & \text{si } WAR_{ref} \geq \max r_{rise} \\ 1, & \text{d.l.c} \end{cases}$$

**Ecuación 22.** Indicador de tasa de acumulación de inundación para el cálculo del FRI en etapa de recuperación.

Se asignan indicadores sociales y económicos para evaluar la capacidad de recuperación de las inundaciones para cada hogar según los diferentes distritos. Cuantos más niños y ancianos haya dentro de un distrito, mayor vulnerabilidad a las inundaciones y menor fuerza de recuperación tendrá la comunidad. (Chen & Leandro, 2019). Las ecuaciones que permiten estimar el impacto de estos factores se muestran a continuación:

$$I_C = \begin{cases} e^{\left(1 - \frac{C}{C_{ref}}\right)}, & \text{si } C_{ref} \geq C \\ 1, & \text{d.l.c} \end{cases}$$

**Ecuación 23.** Indicador de porcentaje de niños para el cálculo del FRI en etapa de recuperación.

$$I_E = \begin{cases} e^{\left(1 - \frac{E}{E_{ref}}\right)}, & \text{si } E_{ref} \geq E \\ 1, & \text{d.l.c} \end{cases}$$

**Ecuación 24.** Indicador de porcentaje de adulto mayores para el cálculo del FRI en etapa de recuperación.

$$I_I = \begin{cases} e^{\left(\frac{I}{I_{ref}}\right)}, & \text{si } I_{ref} \geq I \\ e^1, & \text{d.l.c} \end{cases}$$

**Ecuación 25.** Indicador de ingreso de vivienda para el cálculo del FRI en etapa de recuperación.

C [%] y E [%] representan el porcentaje de hogares con niños y ancianos, respectivamente, en el distrito en el que se encuentra el hogar.





### 2.11.3 Cálculo del FRI

Una vez que se calculan los indicadores para evaluar FRI en la fase de evento y el factor de recuperación en la fase de recuperación, se pueden calcular las series temporales de FRI. Al igual que el cálculo de los indicadores, el cálculo de la serie temporal de FRI debe dividirse en eventos y fases de recuperación. WF representa el factor de ponderación para cada indicador, que determina el nivel relativo de significancia entre los indicadores.

#### Fase de evento:

$$FRI(t) = \frac{WF_h * I_h(t) + WF_{AWD} * I_{AWD}(t) + WF_D * I_D(t) + WF_{WAR} * I_{WAR}(t)}{WF_h + WF_{AWD} + WF_D + WF_{WAR}}$$

Ecuación 26.  
Cálculo del FRI en etapa de evento

En la estructura de la ecuación se puede observar que se trata de un promedio ponderado de los diversos factores físicos. Esta ecuación es válida el intervalo de tiempo del evento. Es decir, para  $t \in [t_s, t_e]$ . Para tiempos posteriores el FRI se calcula de la siguiente forma:

#### Fase de recuperación:

$$x = \{f_s, TFD, TFT, WAR_{max}, C, E, I\}$$

Ecuación 27. Conjunto guía de parámetros para el cálculo del FRI en etapa de recuperación

$$RF = \left[ \prod (I_x)^{WF_x} \right]^{\frac{0.001}{\sum WF_x}}$$

Ecuación 28. Factor de recuperación

$$FRI(t) = FRI(t - 1) * RF$$

Ecuación 29. Cálculo del FRI en etapa de recuperación

El FRI en el tiempo t se calcula como el producto del factor de recuperación y el FRI en el paso de tiempo anterior. Tenga en cuenta que la fase de recuperación durará hasta que el valor de FRI alcance 1.



Los parámetros de referencia son:

**Tabla 2. Parámetros de referencia para el cálculo del FRI**

Parámetro	Nombre	Valor
Profundidad	$h_{ref}$	0.5 m
Profundidad acumulada	$AWD_{ref}$	3 m
Duración	$D_{ref}$	800 min
Tasa de acumulación	$WAR_{ref}$	5 cm/min
Porcentaje de hogares con niños	$C_{ref}$	20%
Porcentaje de hogares con adultos mayores	$E_{ref}$	12%
Ingreso	$I_{ref}$	80.000€

Los factores de ponderación son:

**Tabla 3. Factores de ponderación**

Factor	Nombre	Valor (Fase evento)	Valor (Fase recuperación)
Profundidad	$(WF_h/WF_{fs})$	3	3
Profundidad acumulada	$(WF_{WAD}/WF_{TFD})$	1	1
Duración	$(WF_h/WF_{TFT})$	3	2
Tasa de acumulación	$(WF_h/WF_{WARmax})$	2	1
Porcentaje de hogares con niños	$(WF_h)$	-	1
Porcentaje de hogares con adultos mayores	$(WF_h)$	-	2
Ingreso	$(WF_h)$	-	3

De esta manera se obtiene un indicador adimensional. En sí, la resiliencia no tiene una definición estricta ni físicamente basada, se debe entender como un modelo de decisión integral que permite la adecuada identificación de zonas de riesgo y la clasificación cuantitativa de las mismas.



### 3 METODOLOGÍA

La metodología empleada se dividió en varios componentes de tal manera que los resultados obtenidos logran responder la pregunta del cambio de la resiliencia en Chicó Sur debido al posible efecto del Cambio Climático. En el siguiente diagrama se observan los pasos seguidos y posteriormente se explica en más detalle cada uno de ellos.

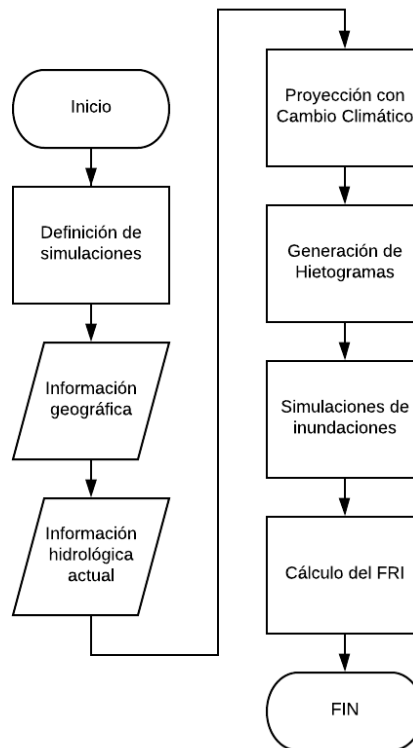


Ilustración 17. Diagrama de metodología

#### 3.1 Definición de simulaciones

Para poder hacer una comparación se deben tener escenarios base con los cuales contrastar los resultados obtenidos al incluir el componente del Cambio Climático. De acuerdo con este punto de partida se requerirían mínimo dos simulaciones para comparar, pero debido a la incertidumbre que genera emplear un solo modelo de circulación general se emplearon dos modelos diferentes. De esta manera se obtiene una visión más robusta debido a que los modelos difieren en sus aproximaciones al sistema climático y tienen en cuenta las interacciones entre ellos de manera diferente, al utilizar dos modelos se puede obtener una comparación más sólida.



Del mismo modo, el periodo de retorno del sistema está determinado por el Reglamento vigente para la ciudad. Tal como se indicó previamente en los Parámetros de los eventos de precipitación de la Sección 2.7, los periodos de retorno relevantes son 30 años (para el sistema) y 5 años (para las lluvias de diseño). Estudios precedentes (Sección 2.7 y 2.8) se limitaron a un periodo de retorno, por lo cual no se tomaron en cuenta eventos de inundación frecuentes (TR=5) o el evento que se presenta en promedio una vez en el horizonte de diseño del sistema (TR=30). Por esta razón, en el presente estudio se evaluarán ambos periodos de retorno. Esto incrementa el número de simulaciones de tres a seis.

Finalmente, un parámetro explorado fue la duración de las lluvias. Esto se debe a que los estudios previamente mencionados (Sección 2.7 y 2.8) se limitan al RAS. Por definición, los eventos de menor duración son de mayor intensidad, lo cual presenta una mayor dificultad para los sistemas de drenaje. Los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SUDS) funcionan al retener temporalmente el agua, causando un efecto amortiguador en el hidrograma de entrada de la red de drenaje, lo cual es análogo a disminuir la intensidad del evento de precipitación. Al disminuir la duración se desea generar el efecto contrario al de los SUDS y observar el comportamiento de la zona ante intensidades más altas. De acuerdo con lo anterior, el presente estudio realizó simulaciones de eventos de 95 minutos (de acuerdo con la Sección 2.7) y 20 minutos de duración. Esto incrementa el número de simulaciones de seis a doce. Las características de las simulaciones se resumen en la Tabla 4.

**Tabla 4. Simulaciones**

ID	Duración (min)	Periodo de retorno (años)	Modelo
1	20	5	Caso Base
2	20	5	C. C #1
3	20	5	C. C #2
4	20	30	Caso Base
5	20	30	C. C #1
6	20	30	C. C #2
7	95	5	Caso Base
8	95	5	C. C #1
9	95	5	C. C #2
10	95	30	Caso Base
11	95	30	C. C #1
12	95	30	C. C #2

Estas son las simulaciones que permitirán comparar los efectos de las inundaciones en la resiliencia bajo diversas características de la lluvia y el efecto del Cambio Climático. Para hacer dichas simulaciones se requieren las capas de información necesarias para el programa Itzi, tanto geográficas como hidrológicas, en la actualidad y bajo escenarios de Cambio Climático.



## 3.2 Información geográfica

Las capas de información geográfica que requiere el programa Itzi para hacer las simulaciones de inundaciones son:

- Modelo Digital de Terreno
- Rugosidad de la superficie
- Condiciones de frontera
- Red de drenaje pluvial
- Lluvia

Estas capas serán expuestas a continuación a excepción de la capa de lluvia la cual se verá a mayor profundidad en la sección 3.3.

### 3.2.1 Modelo digital de terreno

Una de las capas de información más importantes para la simulación de los eventos de inundación es la altura sobre el nivel del mar para conocer la cota de cada uno de los puntos dentro de las zonas de estudio. Se utilizó un ráster, el cual es una matriz de celdas organizadas en filas y columnas en la que cada celda contiene un valor que representa información, en este caso, altura. La capa fue proporcionada por la Infraestructura de Datos Espaciales para el Distrito Capital – IDECA, la cual es la entidad encargada de la gestión de la información geográfica en las entidades del Distrito Capital.

Para asegurar un comportamiento adecuado de la hidráulica dentro del entorno de modelación se debe realizar la corrección del terreno en donde se pueden presentar algunas irregularidades. La función empleada para corregir los MDT es Fill, la cual se puede ver gráficamente en la siguiente figura.

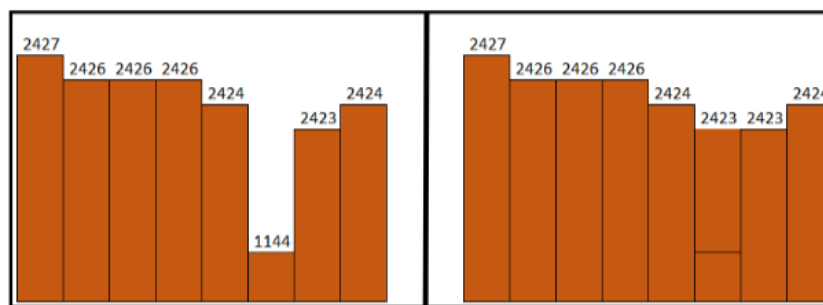
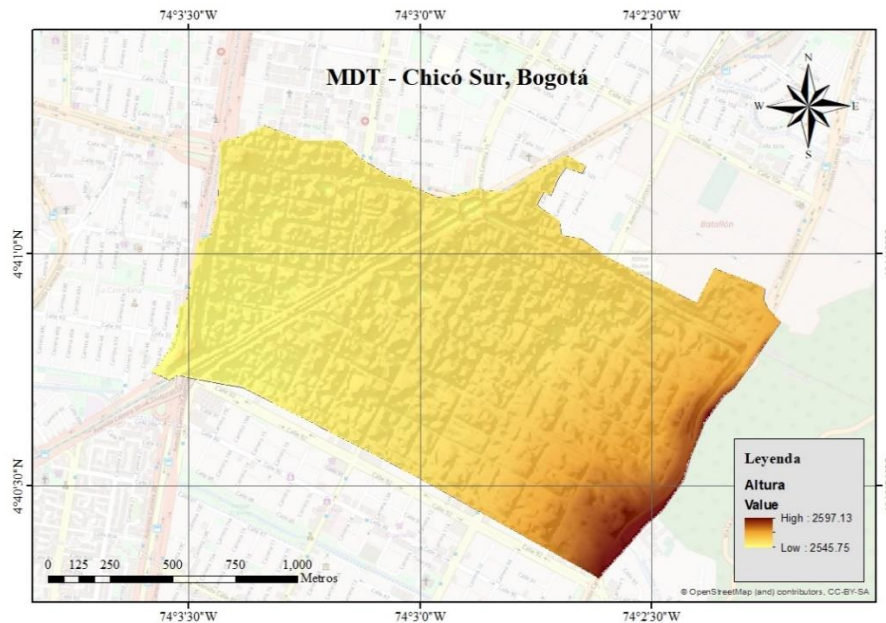


Ilustración 18. Representación del método Fill (Acosta Barragán & Saldarriaga Valderrama, 2013)

A continuación, se muestra un mapa del modelo digital de terreno acotado a la zona de estudio, es posible observar que la zona oriental presenta las mayores alturas, lo cual coincide con el inicio de



los cerros orientales. En la zona occidental hay elevaciones más bajas y tiende a ser una zona más plana.



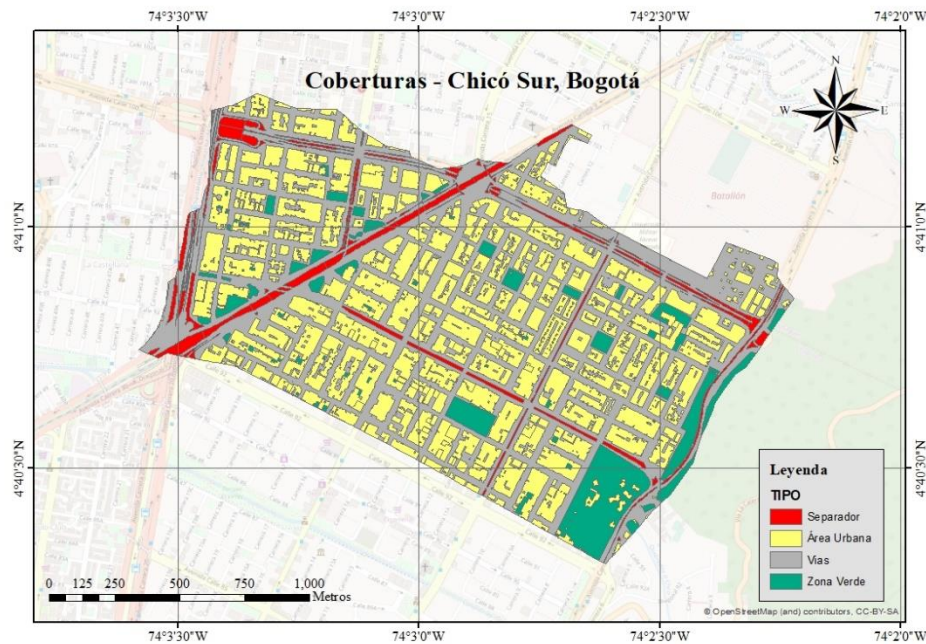
**Ilustración 19. Mapa MDT Chicó Sur**

Este ráster cuenta con una resolución de 5x5 metros, la cual es la resolución óptima para el programa debido a que previene inestabilidades dadas por altas pendientes (L. Courty, 2017). Adicionalmente, esta resolución es adecuada debido a que resoluciones más altas podrían generar problemas en la resolución de las ecuaciones diferenciales y un aumento innecesario del tiempo de computación sin obtener ganancia en la precisión de los resultados.

### 3.2.2 Rugosidad de la superficie

Otro de los parámetros de entrada importantes al modelo es el coeficiente de rugosidad  $n$  de Manning, el cual no fue directamente medido debido a la dificultad que representaría esta labor. En su lugar, este coeficiente fue estimado a partir de las coberturas del suelo presentes en las zonas de estudio. En primer lugar, se obtuvieron las capas de usos del suelo y coberturas en la ciudad de Bogotá, posteriormente, se cortaron a la zona de interés y finalmente se relacionó cada tipo de superficie con un  $n$  de Manning.





**Ilustración 20. Mapa de coberturas - Chicó sur**

Esta metodología es razonable debido a que el coeficiente de Manning es un valor representativo pero dependiente de la hidráulica y la rugosidad de las superficies, por lo tanto, medirlo directamente de manera precisa no sería sensato y aproximarlos como una relación de tipo de superficie es una opción efectiva que fue implementada por los desarrolladores del programa al verificar el modelo. (L. G. Courty et al., 2017).

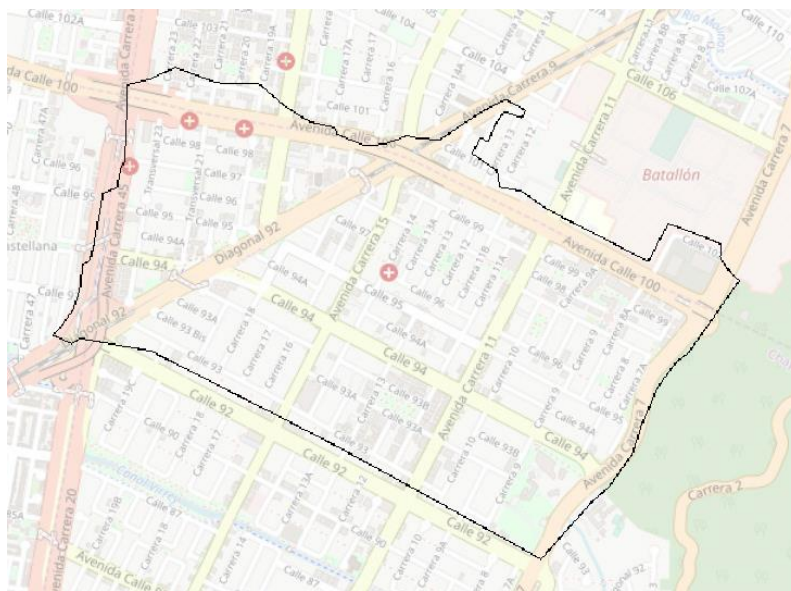
Las capas de cobertura con su respectivo n de Manning estimado se encuentran en la Tabla 5.

**Tabla 5. Estimativos n de Manning de las superficies**

Superficie	Estimativo n de Manning	Fuente
Vías	0.014	(Noriega, 2013)
Área Urbana	0.019	(L. G. Courty et al., 2017)
Zonas Verdes	0.030	(L. G. Courty et al., 2017)
Separadores	0.017	(Noriega, 2013)

### 3.2.3 Condiciones de frontera

En este caso, se deben utilizar dos capas diferentes, una que indica el tipo de condición y otra capa que contiene el valor numérico de la profundidad en la frontera.

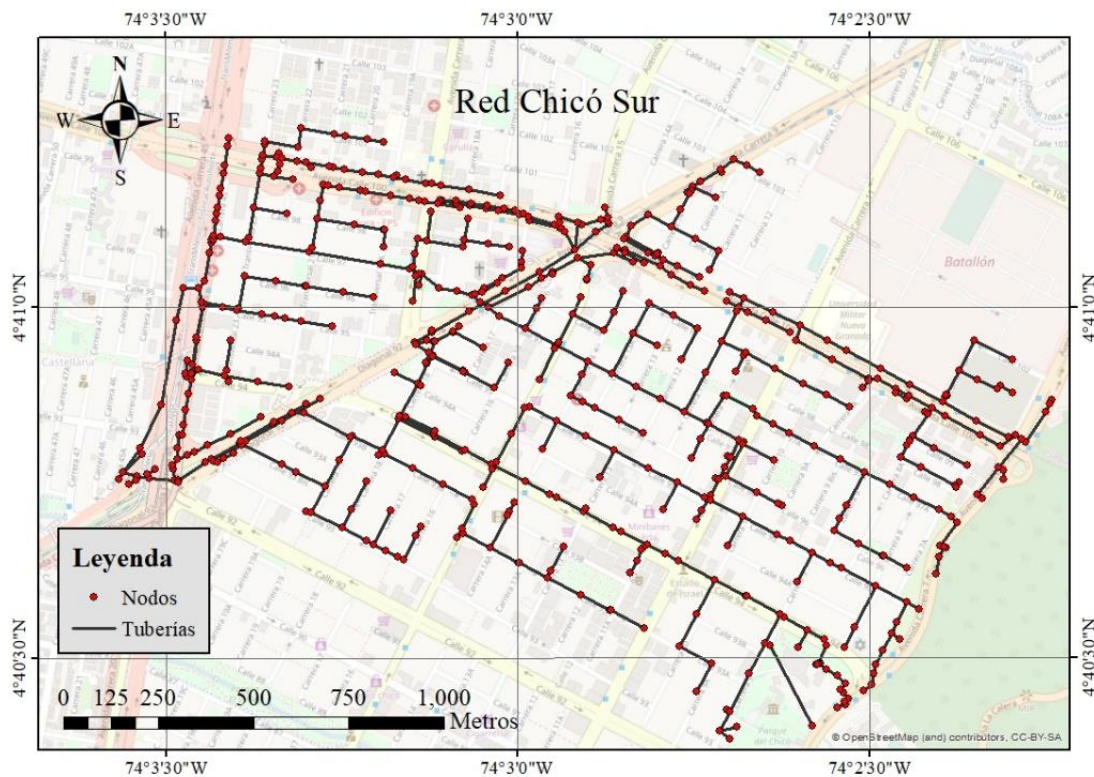


**Ilustración 21. Ráster de condiciones de frontera**

En este caso se utilizó un valor de 4 para el tipo de condición de frontera, el cual indica que la profundidad es definida por el usuario. El valor de frontera seleccionado es cero, lo cual indica que la profundidad en la frontera se mantendrá en cero para todo tiempo. Físicamente, esta consideración indica que en la frontera el agua no encuentra cotas superiores que puedan hacer devolver el flujo, lo cual ocurre en el caso en que no se presente precipitación en las cuencas aledañas a la estudiada. Esta condición de frontera refleja independencia con respecto a las otras zonas y un evento de precipitación localizado específicamente sobre el dominio de interés.

### 3.2.4 Red de drenaje pluvial

Se cuenta con una red de drenaje en formato inp empleada por Laura Pulgarín en su tesis de maestría. Este documento es compatible con SWMM y por lo tanto es posible acoplarlo a Itzi. Este archivo cuenta con la longitud, diámetro, rugosidad y coordenadas de las tuberías y sus nodos de entrada y salida. En el siguiente mapa se observa la topología de la red de drenaje.



**Ilustración 22. Mapa de la red de drenaje Chicó Sur**

La red troncal de drenaje está compuesta por grandes colectores y canales abiertos, la red local de drenaje urbano está conformada totalmente por tuberías de diámetros entre 200 y 900 milímetros. El punto de entrega es el Canal Rionegro que se ubica en la parte suroccidental de la red.

**Tabla 6. Resumen de Componentes de la Red Chicó Sur. (Universidad de los Andes PAVCO, 2014)**

Componente	Cantidad
Tuberías y Conductos	510
Cámaras de Inspección (Pozos)	509
Punto de Descarga	1

Esta red está en permanente interacción con la superficie, de tal manera que se tiene en cuenta el agua que ingresa (o sale) del sistema de drenaje y los puntos en donde lo está haciendo.





### 3.2.5 Información socioeconómica

Adicionalmente, para calcular el FRI durante la etapa de recuperación se requieren capas con distribución de población e ingreso. El siguiente mapa contiene polígonos (un polígono por manzana) que tienen la información asociada al censo poblacional del año 2010 clasificado por edades. Adicionalmente se conoce el estrato de cada manzana.

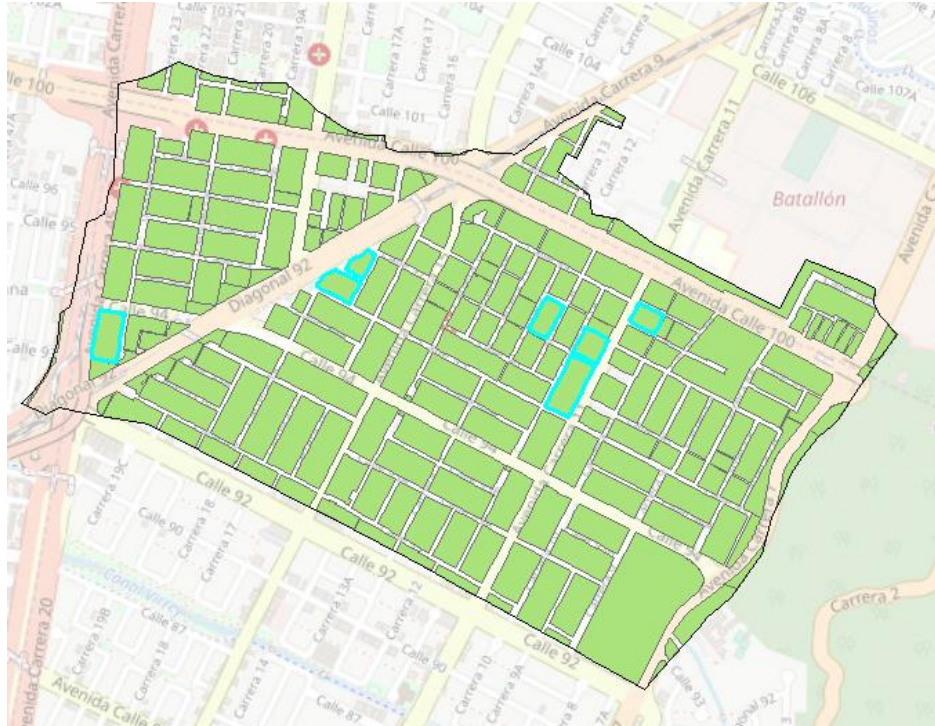
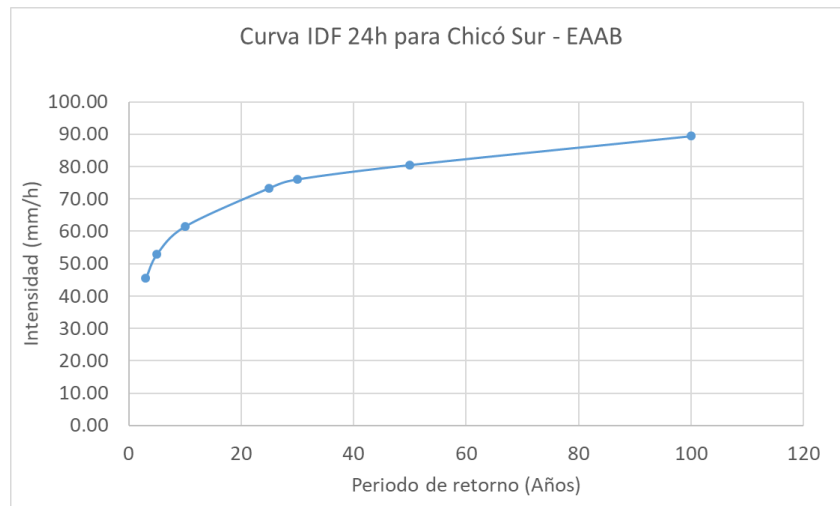


Ilustración 23. Mapa de manzanas Chicó Sur

Esta capa proveniente del Censo del año 2010 permite establecer la cantidad total de personas y la cantidad por edad. Esta información socioeconómica permite generar tres capas ráster diferentes necesarias para el cálculo del FRI: Porcentaje infantil de la población, Porcentaje de ancianos y Estrato (el cual está asociado al ingreso económico).

### 3.3 Información hidrológica actual

Para establecer un caso de inundación base se requieren las Curvas IDF generadas con los registros históricos. Esta información se obtuvo de la entidad responsable del drenaje de la ciudad, la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá – EAAB.

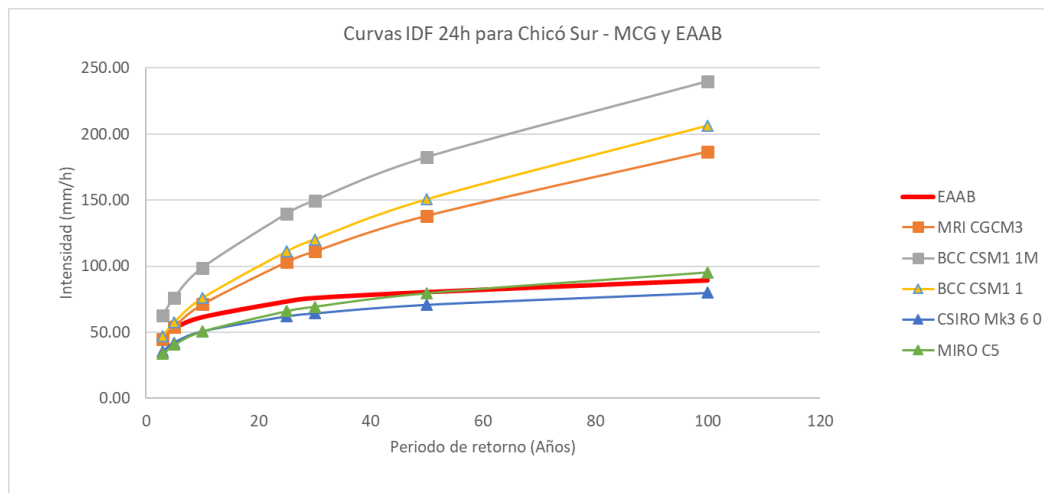


Gráfica 5. Curva IDF 24 horas – EAAB

Con esta curva IDF de duración de 24 horas se pueden generar las curvas IDF de diferentes duraciones a partir del procedimiento propuesto por Pulgarín en la sección 2.5. Para poder realizar las comparaciones pertinentes al estudio se requieren las curvas IDF equivalentes a la anterior, pero con las proyecciones climáticas respectivas.

### 3.4 Proyección con Cambio Climático

La obtención de esta información se apoya en el Proyecto de Drenaje Urbano y Cambio Climático (Sección 2.7) que a su vez emplea la metodología de Acevedo (Sección 2.4) pero haciendo las correcciones estadísticas necesarias para adaptarla a la zona de Chicó Sur. Se obtuvieron los siguientes resultados para los cinco MCGs considerados:



Gráfica 6. Curvas IDF para Chicó Sur en escenarios de Cambio Climático (Universidad de los Andes PAVCO, 2014)



De esos modelos, el proyecto de Drenaje Urbano realizó un proceso de validación que indicaba que el mejor modelo era CSIRO Mk3.6.0. El proceso de validación consistió en comparar la serie temporal de lluvia del siglo XX del modelo con los registros históricos de los pluviómetros de la zona. Pero tal como se indicó en la sección 2.3: “En general, no existe un medio directo de traducir las medidas cuantitativas del desempeño pasado en declaraciones confiables sobre la fidelidad de las proyecciones climáticas futuras”. Por lo tanto, se empleó un criterio diferente para la selección de los MCGs empleados para generar las curvas IDF con efecto del Cambio Climático.

En primer lugar, se revisó la resolución de los modelos debido a que la precipitación extrema simulada depende en gran medida de la resolución del modelo, tal como se indicó en la sección 2.3. En segundo lugar, se revisó la fecha de los modelos, de tal forma que se prefieran los más recientes. Finalmente, se revisó la complejidad del sistema climático que tuvieron en cuenta para su desarrollo. A continuación, se observan los años de lanzamiento junto con las resoluciones aproximadas de los modelos disponibles:

**Tabla 7. Resolución de los climáticos globales analizados correspondientes al proyecto de intercomparación CMIP5**

<b>Modelo</b>	<b>Año</b>	<b>Resolución</b>	<b>Institución</b>
<b>BCC-CSM1.1</b>	2011	2.82° x 2.82°	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration, CHINA
<b>BCC-CSM1.M</b>	2011	1.125°x1.125°	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration, CHINA
<b>CSIRO-Mk3.6.0</b>	2009	1.875°x1.875°	CSIRO, AUSTRALIA
<b>MIROC5</b>	2010	1.41°x1.41°	Meteorological University of Tokyo, JAPON
<b>MRI-CGCM3</b>	2011	1°x1°	Meteorological Research Institute, JAPON

En la tabla anterior se observa que los modelos MRI CGCM3 y BCC CSM 1M son los modelos más recientes y presentan un nivel de resolución mayor. Para confirmar su selección se tuvo en cuenta la Gráfica 1 de la sección 2.3. En ella se indica que los modelos MRI CGCM3 y BCC CSM 1M tuvieron en cuenta una resolución más alta tanto en el componente atmosférico como en el oceánico en comparación con los otros tres modelos.





De igual manera, es posible observar que las curvas IDF seleccionadas para hacer las simulaciones (EAAB, MRI CGCM3 y BCC CSM 1M) comparten características de los modelos descartados o se muestran representativos. Por ejemplo, la curva de la empresa EAAB es muy similar (e incluso mayor) a las curvas de los modelos CSIRO-Mk3.6.0 y MIROC5, por lo tanto, los eventos de inundación derivados de este escenario serán similares a los escenarios empleando los modelos descartados. Adicionalmente, la curva IDF relacionada con el modelo BCC CSM 1M tiene las intensidades más altas (aunque similares al modelo BCC CSM 1), por lo tanto, al emplear este modelo se estaría evaluando el peor escenario obtenido hasta el momento.

De acuerdo con estas tres curvas IDF (EAAB, MRI CGCM3 y BCC CSM 1M) se generarán las nuevas curvas IDF para diferentes duraciones y posteriormente los hietogramas de diseño.

### 3.5 Generación de hietogramas

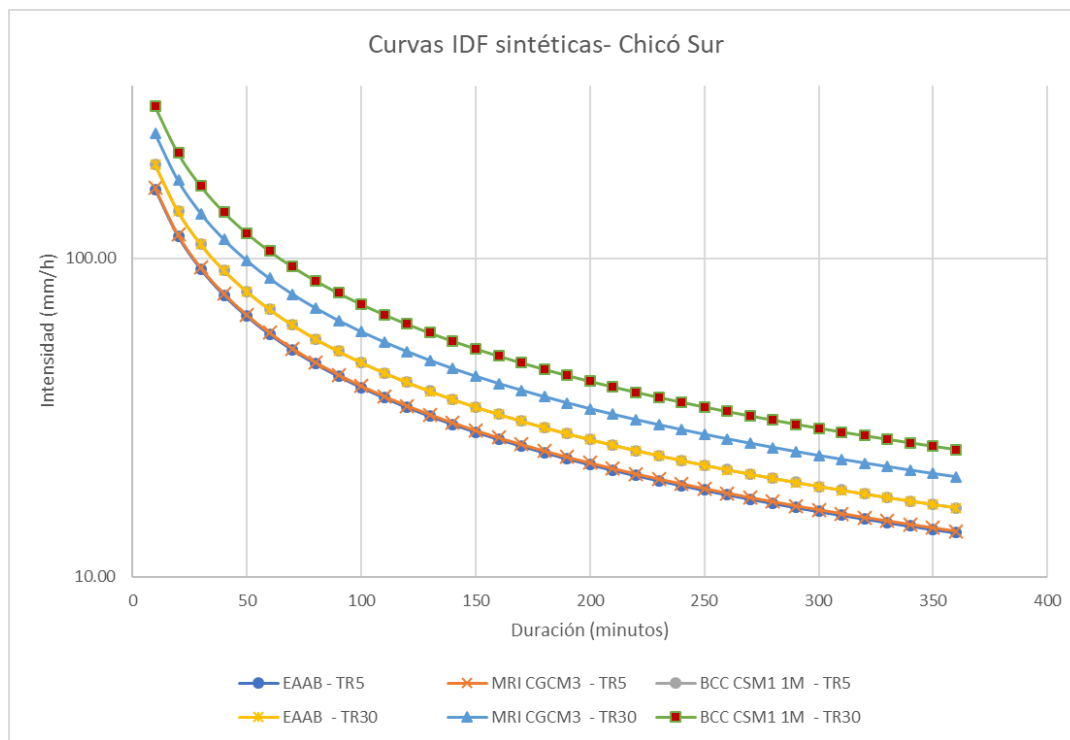
Con las curvas IDF previamente obtenidas se deben generar nuevas curvas IDF en diferentes duraciones para un mismo periodo de retorno. Este procedimiento se hizo utilizando la Ecuación 1 expuesta en la sección 2.5. La metodología planteada en esa sección permite crear curvas IDF de diferentes duraciones a partir de un valor de intensidad de 24 horas. Al ser una aproximación a la región Andina es posible implementarse para la zona de estudio ubicada en aquella región.

Los valores de las intensidades requeridos se encuentran destacados en la siguiente tabla:

**Tabla 8. Valores de curvas IDF para generar curvas de periodo de retorno fijo**

CHICO SUR - CURVAS IDF (mm/día)						
PERIODO DE RETORNO	BASE	MODELO				
	EAAB	MRI CGCM3	BCC CSM1 1M	BCC CSM1 1	CSIRO Mk3 6 0	MIRO C5
3	45.46	44.50	62.72	47.11	35.53	33.48
5	52.98	54.22	76.17	57.46	42.09	40.42
10	61.55	71.08	98.70	75.71	50.65	50.52
25	73.40	103.08	139.63	111.13	61.99	65.87
30	76.09	111.228	149.760	120.261	64.279	69.268
50	80.51	138.11	182.60	150.69	70.79	79.48
100	89.40	186.63	240.04	206.48	79.86	95.20

Cada uno de estos valores resaltados genera una nueva curva IDF. Por ejemplo, el valor 52.98 genera la curva IDF para un periodo de retorno de 5 años y esa curva está asociada con el caso EAAB. Aplicando el método de la sección 2.5 se obtienen las siguientes curvas IDF.



**Gráfica 7. Curvas IDF sintéticas para los diferentes modelos y periodos de retorno en Chicó Sur**

A cada una de estas curvas se le puede asociar una ecuación de la siguiente forma:

$$I\left(\frac{mm}{h}\right) = \frac{A}{(B + D^n)}$$

Así se puede implementar el método de intensidad instantánea cubierto en la sección 2.6. Los valores de los coeficientes A, B y n de las curvas IDF mostradas en la Gráfica 7 se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 9. Coeficientes de las curvas IDF sintéticas**

Periodo de retorno	5 años			30 años		
	EAAB	MRI CGCM3	BCC CSM1 1M	EAAB	MRI CGCM3	BCC CSM1 1M
<b>A</b>	2719.30	2750.51	3261.62	3259.55	4073.61	4972.42
<b>B</b>	8.7392	8.7510	8.7587	8.7551	8.7517	8.7618
<b>n</b>	0.8905	0.8907	0.8907	0.8908	0.8907	0.8908

En la siguiente página se observa el ejemplo para el caso EAAB con un periodo de retorno de 5 años y una duración de 20 minutos. Cabe mencionar que el coeficiente de retardo empleado fue 0.4 en todos los casos, tal como se indicó en la sección 2.7.



MÉTODO DE LA INTENSIDAD INSTANTÁNEA											
Curva IDF		$I = \frac{A}{D^n + B}$									
Unidades											
I	mm/h										
D	minutos										
Datos a rellenar											
Curva IDF		Lluvia S1									
A	2719.29637	Duración (minutos)		20		Suma Pulsos		38.87568004			
B	8.74	Coef. Retardo (r)		0.4		Profundidad C		39.15948538			
n	0.89052895										
t	ta, tb	d(t)	d'(t)	I (T=10)	h (T=10)	¿En intervalo?	Tiempo (min)	Intensidad (mm/h)			
(min)	(min)	(min)	(min)	(mm/h)	(mm)						
0	8.00	20.00	20.00	52.36			0:00	52.36			
5	3.00	7.50	10.00	164.70	9.04	1	0:05	164.70			
10	2.00	3.33	10.00	164.70	13.72	1	0:10	164.70			
15	7.00	11.67	11.67	84.76	10.39	1	0:15	84.76			
20	12.00	20.00	20.00	52.36	5.71	1	0:20	52.36			
25	17.00	28.33	28.33	36.75	3.71	0	0:25	36.75			
30	22.00	36.67	36.67	27.80	2.69	0	0:30	27.80			
35	27.00	45.00	45.00	22.10	2.08	0	0:35	22.10			
40	32.00	53.33	53.33	18.20	1.68	0	0:40	18.20			
45	37.00	61.67	61.67	15.38	1.40	0	0:45	15.38			
50	42.00	70.00	70.00	13.27	1.19	0	0:50	13.27			
55	47.00	78.33	78.33	11.63	1.04	0	0:55	11.63			
60	52.00	86.67	86.67	10.33	0.91	0	1:00	10.33			
65	57.00	95.00	95.00	9.27	0.82	0	1:05	9.27			
70	62.00	103.33	103.33	8.40	0.74	0	1:10	8.40			
75	67.00	111.67	111.67	7.67	0.67	0	1:15	7.67			
80	72.00	120.00	120.00	7.05	0.61	0	1:20	7.05			
85	77.00	128.33	128.33	6.52	0.57	0	1:25	6.52			
90	82.00	136.67	136.67	6.06	0.52	0	1:30	6.06			
95	87.00	145.00	145.00	5.66	0.49	0	1:35	5.66			
100	92.00	153.33	153.33	5.31	0.46	0	1:40	5.31			
105	97.00	161.67	161.67	4.99	0.43	0	1:45	4.99			
110	102.00	170.00	170.00	4.71	0.40	0	1:50	4.71			
115	107.00	178.33	178.33	4.46	0.38	0	1:55	4.46			
120	112.00	186.67	186.67	4.24	0.36	0	2:00	4.24			

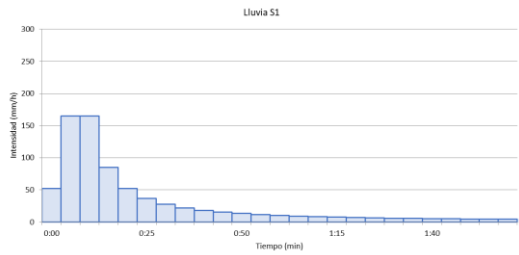
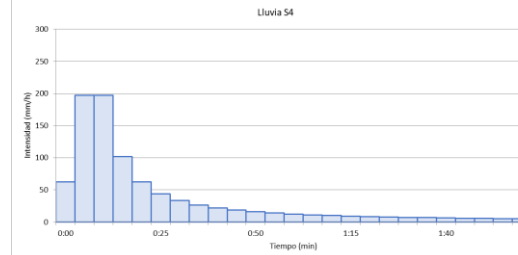
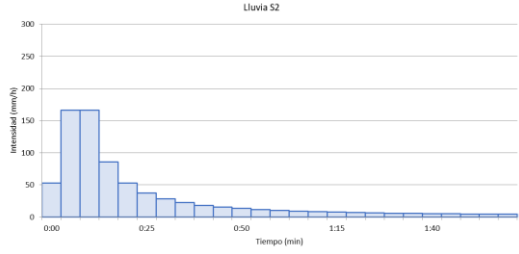
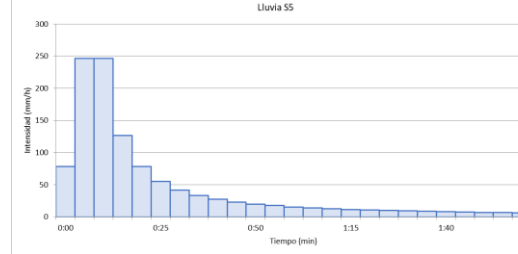
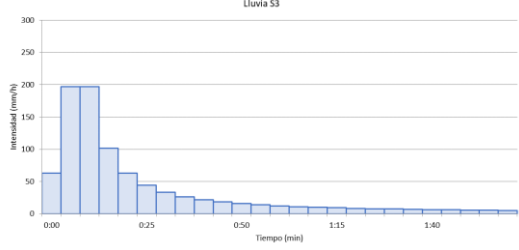
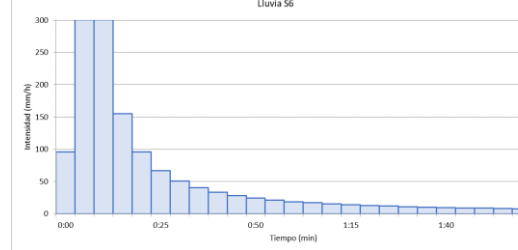
Ilustración 24. Ejemplo de la hoja de cálculo utilizada para el método de la intensidad instantánea



Repitiendo este proceso para cada una de las simulaciones mencionadas en la Tabla 4 se obtienen los siguientes Hietogramas.

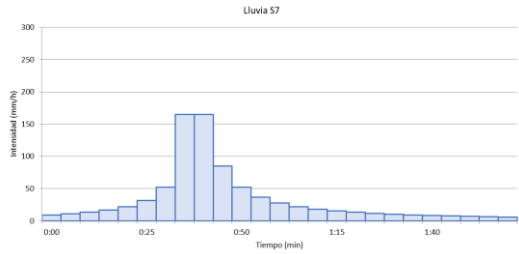
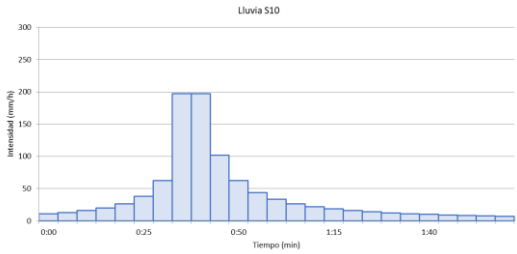
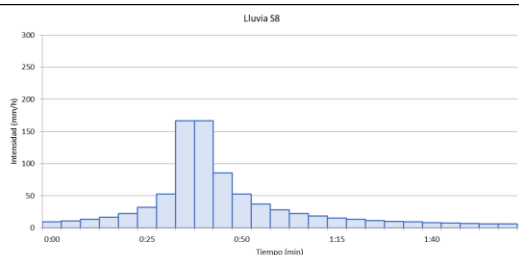
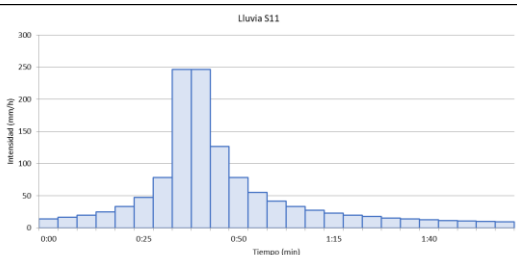
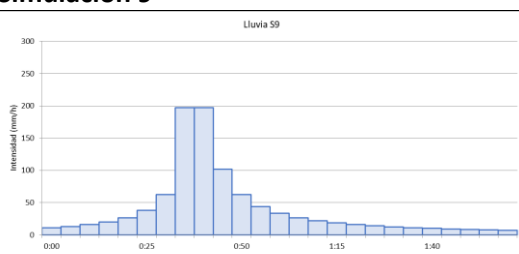
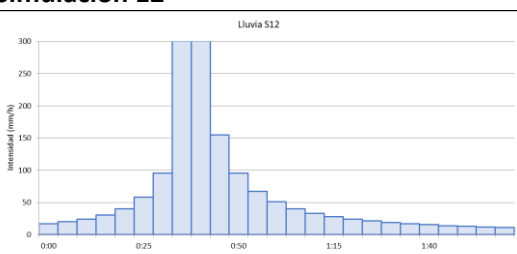
La escala vertical se encuentra entre 0 y 300 mm/h, con intervalos de 50 mm/h. En la primera tabla se encuentran los hietogramas con duración de 20 minutos y en la segunda se encuentran los hietogramas de 95 minutos.

**Tabla 10. Hietogramas sintéticos de 20 minutos de duración**

Mod.	Periodo de Retorno: 5 Años	Periodo de Retorno: 30 Años
	<b>Simulación 1</b>	<b>Simulación 4</b>
<b>EAAB</b>		
	<b>Simulación 2</b>	<b>Simulación 5</b>
<b>MRI</b>		
	<b>Simulación 3</b>	<b>Simulación 6</b>
<b>BCC</b>		

En estos hietogramas es posible observar que entre modelos el cambio de intensidad del pico en el periodo de retorno de 5 años es menos drástico en comparación con el cambio de intensidad con el periodo de retorno de 30 años. Esto se debe a que las curvas IDF divergen cada vez más a medida que el periodo de retorno aumenta.


**Tabla 11. Hietogramas sintéticos de 95 minutos de duración**

Mod.	Periodo de Retorno: 5 Años	Periodo de Retorno: 30 Años
	<b>Simulación 7</b>	<b>Simulación 10</b>
<b>EAAB</b>		
	<b>Simulación 8</b>	<b>Simulación 11</b>
<b>MRI</b>		
	<b>Simulación 9</b>	<b>Simulación 12</b>
<b>BCC</b>		

Es posible observar que los hietogramas de los casos base con 30 años de periodo de retorno (Simulaciones 4 y 10) son muy similares a los hietogramas del modelo BCC con 5 años de periodo de retorno (Simulación 3 y 9), esto indica que el efecto del cambio climático puede interpretarse de manera equivalente al aumento de la frecuencia de lluvias fuertes. Es decir, la misma lluvia que se esperaba cada 30 años ahora ocurriría cada 5 años.

Los valores numéricos de todos los hietogramas previos se encuentran en Anexos.



### 3.6 Simulación de inundaciones

Para realizar una simulación de inundación en el programa Itzi se deben seguir los siguientes pasos:

- 1) Iniciar un proyecto en GRASS GIS con las coordenadas geográficas deseadas
- 2) Cargar el modelo digital de terreno
- 3) Cargar una capa de condiciones de frontera
- 4) Crear STRDS de lluvia
- 5) Cargar capa de rugosidad
- 6) Cargar capa de drenaje
- 7) Generar un archivo de parámetros

Este procedimiento se realizó para cada una de las simulaciones variando algunos datos de entrada para poder simular diferentes comportamientos, especialmente el efecto del cambio climático.

Para este trabajo de investigación se emplearon tres máquinas virtuales en el ambiente Ubuntu con 4 GB de memoria RAM y 2 núcleos, lo cual aumenta la velocidad de cálculo de forma notable.

#### 1) Iniciar un proyecto en GRASS GIS con las coordenadas geográficas deseadas

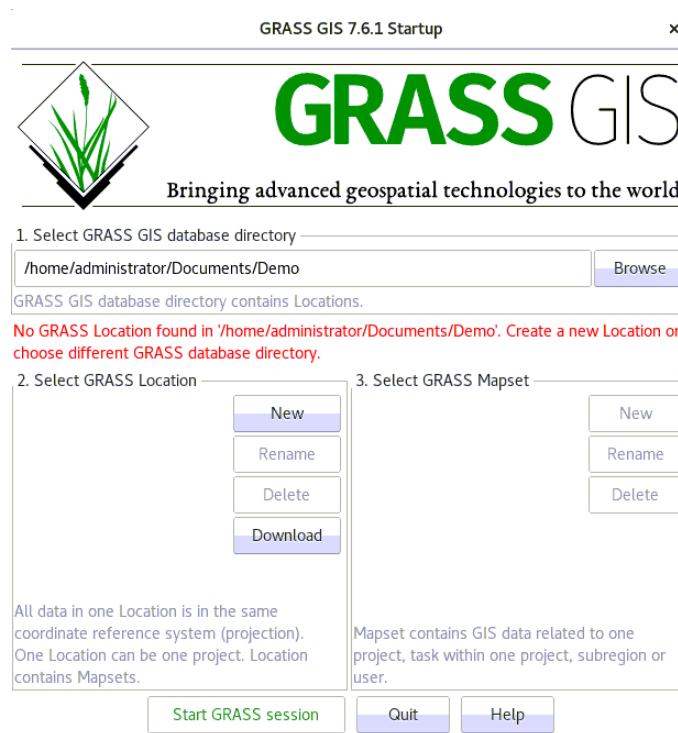
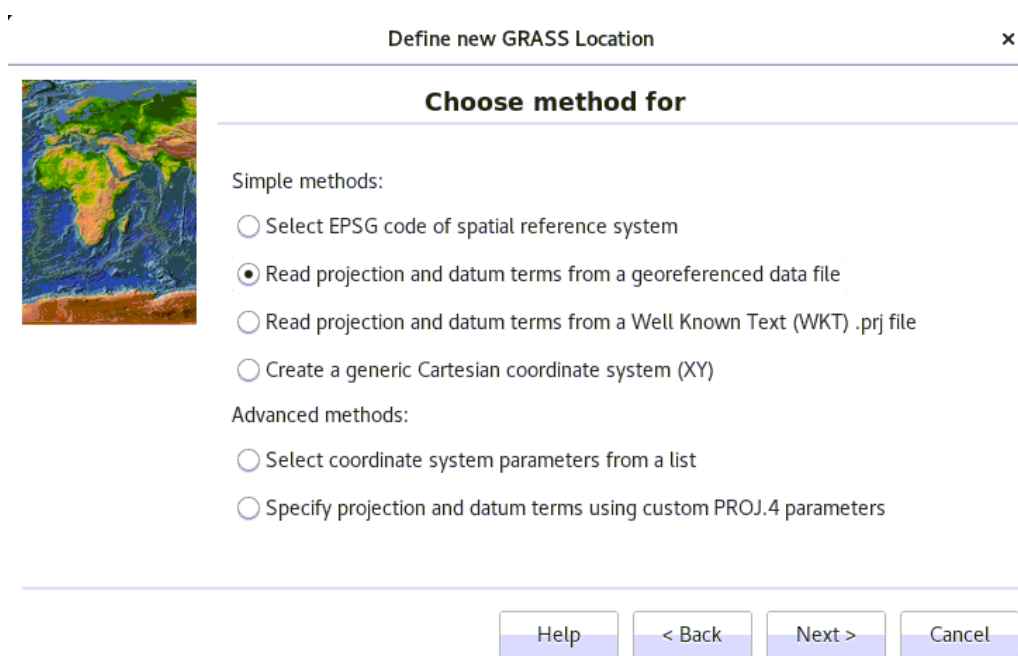


Ilustración 25. Interfaz inicial GRASS GIS





**Ilustración 26. Selección del tipo de proyección**

Las coordenadas geográficas utilizadas se resumen en la siguiente tabla:

**Tabla 12. Características de las coordenadas geográficas**

<b>Nombre</b>	MAGNA Colombia Bogotá
<b>WKID</b>	3116
<b>Autoridad</b>	EPSG
<b>Proyección</b>	Transverse Mercator
<b>Falso Este</b>	1000000
<b>Falso Norte</b>	1000000
<b>Meridiano central</b>	- 74.07750791666666
<b>Factor de escala</b>	1.0
<b>Latitud de origen</b>	4.596200416666666
<b>Unidad lineal</b>	Metro (1.0)



## 2) Cargar el modelo digital de terreno

Esta capa ráster contiene la información de las alturas, fue previamente corregido con la función Fill y se encuentra en las coordenadas previamente mencionadas.

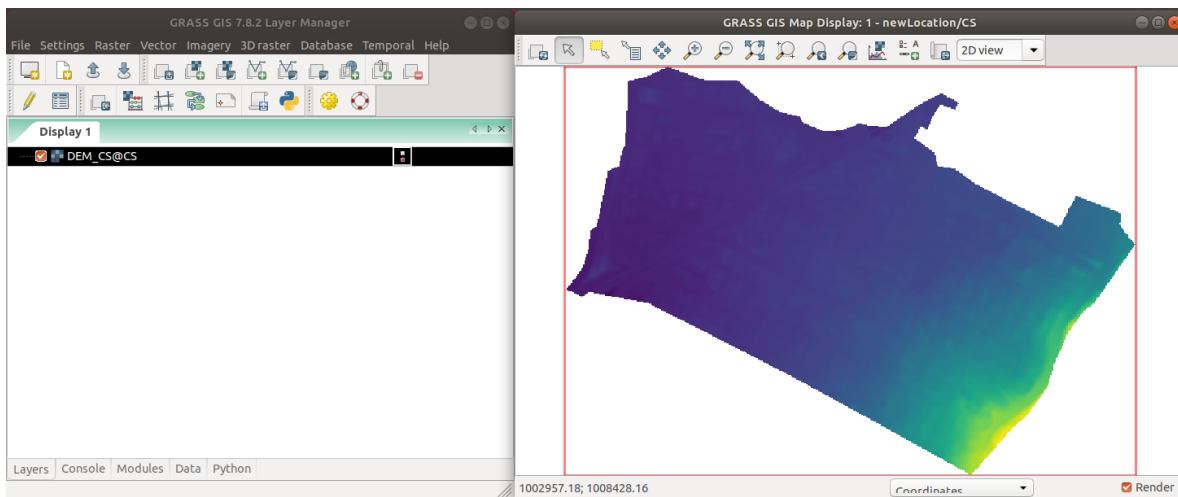


Ilustración 27. MDT Chicó Sur en GRASS GIS

Con el comando `r.mask` se puede seleccionar el MDT como el entorno de modelación evitando que se realicen cálculos por fuera de la cuenca deseada.

## 3) Cargar las capas de condición de frontera

En este caso, se deben utilizar dos capas diferentes, una que indica el tipo de condición y otra capa que contiene el valor numérico de la profundidad en la frontera, tal como se indicó en la sección 3.2.3.

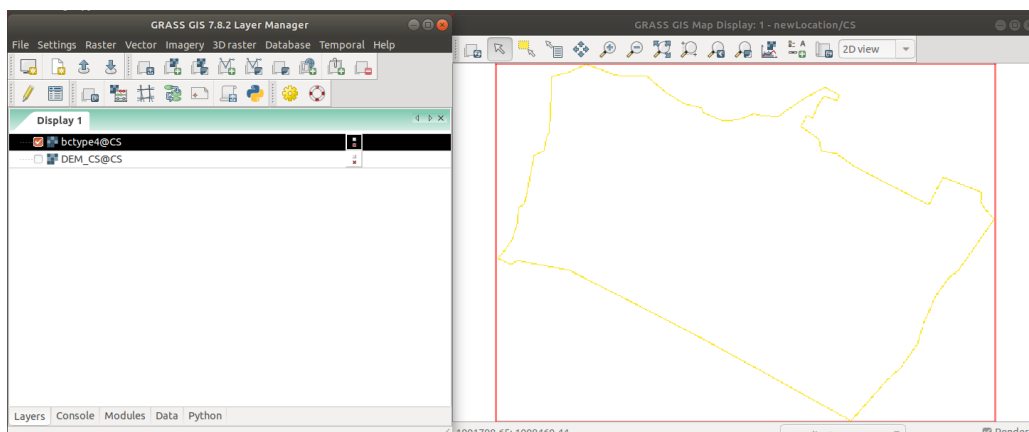


Ilustración 28. Ráster de condiciones de frontera en GRASS GIS




#### 4) Crear STRDS de lluvia

Para representar la lluvia se crea un Space Time Raster Dataset (STRDS), el cual es una colección de mapas ráster organizados temporalmente. En este caso, cada pulso de un hietograma se convierte en un mapa de intensidad constante sobre todo el terreno y después se asigna una huella temporal a cada mapa de acuerdo con el hietograma original.

Se debe crear el STRDS en el cual se van a almacenar los mapas. Se debe seleccionar el tipo de temporalidad: absoluta o relativa. En este caso los hietogramas no son eventos históricos por lo tanto se selecciona un evento relativo.

t.create [temporal, map management, create, time] ×


Creates a space time dataset.

<div style="text-align: center; font-weight: bold; padding: 5px;">Required</div> <div style="text-align: center; font-weight: bold; padding: 5px;">Optional</div> <div style="text-align: center; font-weight: bold; padding: 5px;">Command output</div> <div style="text-align: center; font-weight: bold; padding: 5px;">Manual</div>	<div style="border-bottom: 1px solid #ccc; padding: 5px;"> <span style="font-weight: bold;">Name of the output space time dataset: *</span> <span style="float: right;">(output=name)</span>  <input style="width: 90%;" type="text" value="Lluvia_Zona_Centro"/> </div> <div style="border-bottom: 1px solid #ccc; padding: 5px;"> <span style="font-weight: bold;">Semantic type of the space time dataset: *</span> <span style="float: right;">(semantictype=string)</span>  <input style="width: 90%;" type="text" value="mean"/> </div> <div style="border-bottom: 1px solid #ccc; padding: 5px;"> <span style="font-weight: bold;">Title of the new space time dataset: *</span> <span style="float: right;">(title=string)</span>  <input style="width: 90%;" type="text" value="Lluvia_Zona_Centro"/> </div> <div style="padding: 5px;"> <span style="font-weight: bold;">Description of the new space time dataset: *</span> <span style="float: right;">(description=string)</span>  <input style="width: 90%;" type="text" value="Lluvia_Zona_Centro"/> </div>
---	--

Close dialog on finish

**Ilustración 29. Creación STRDS**

Cada mapa se crea con el comando `r.mapcalc` expression, donde cada pulso del hietograma se inserta, por ejemplo, para el primer pulso del hietograma el comando sería así: `r.mapcalc expression="map1=52.36"`.

Una vez creados todos los mapas se procede a realizar el registro de todos los mapas



t.register [temporal, map management, register, time] x

📌 Assigns timestamps and registers raster, vector and raster3d maps in a space time dataset.

Input	Name of the input space time dataset: <span style="float: right; font-size: small;">(input=name)</span>
Time Date	[multiple] Name of the input maps: <span style="float: right; font-size: small;">(maps=name)</span>
Optional	Type of the input map: <span style="float: right; font-size: small;">(type=name)</span>
Command output	Input file with map names, one per line: <span style="float: right; font-size: small;">(file=name)</span>
Manual	or enter values directly:

Close
Run
Copy
Help

```
t.register -i input=Lluvia_Zona_Centro@JA maps=map1_ZC@JA,map2_ZC@JA,map3_ZC@JA,map4_ZC@JA,map5_ZC@JA,map6_ZC@JA
```

Ilustración 30. Registro de los mapas en el STRDS

t.register [temporal, map management, register, time] x

📌 Assigns timestamps and registers raster, vector and raster3d maps in a space time dataset.

Input	<input checked="" type="checkbox"/> Create an interval (start and end time) in case an increment and the start time are provided <span style="float: right; font-size: small;">(!)</span>
Time Date	Valid start date and time of the first map: <span style="float: right; font-size: small;">(start=string)</span>
Optional	Valid end date and time of all map: <span style="float: right; font-size: small;">(end=string)</span>
Command output	Time stamp unit: <span style="float: right; font-size: small;">(unit=string)</span>
Manual	Time increment, works only in conjunction with start option: <span style="float: right; font-size: small;">(increment=string)</span>

Close
Run
Copy
Help

```
t.register -i input=Lluvia_Zona_Centro@JA maps=map1_ZC@JA,map2_ZC@JA,map3_ZC@JA,map4_ZC@JA,map5_ZC@JA,map6_ZC@JA
```

Ilustración 31. Consideraciones temporales de los mapas

En el mapa de lluvia es posible observar que el valor del pulso es uniforme en todo el espacio.

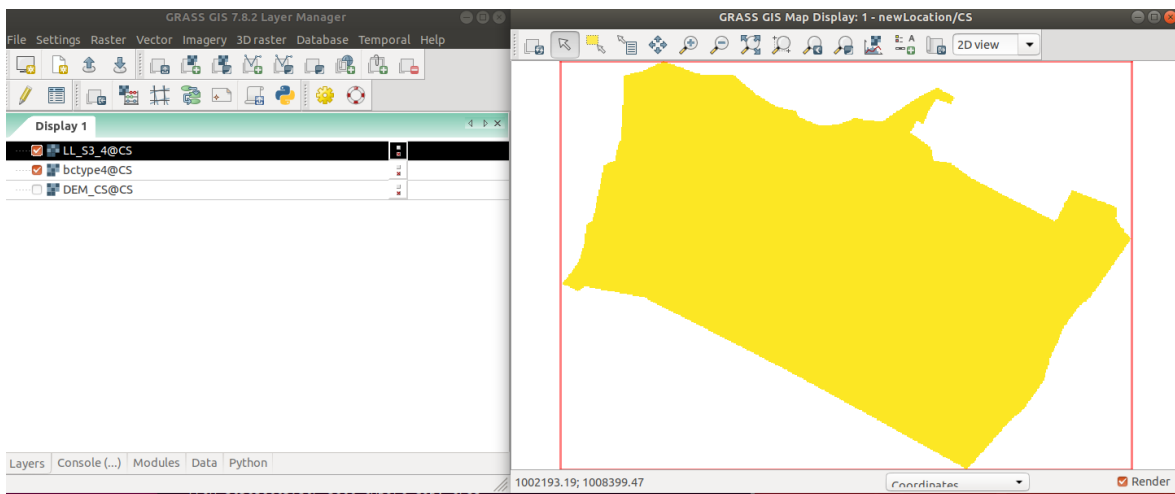


Ilustración 32. Mapa de lluvia uniforme en GRASS GIS

## 5) Cargar capa de rugosidad

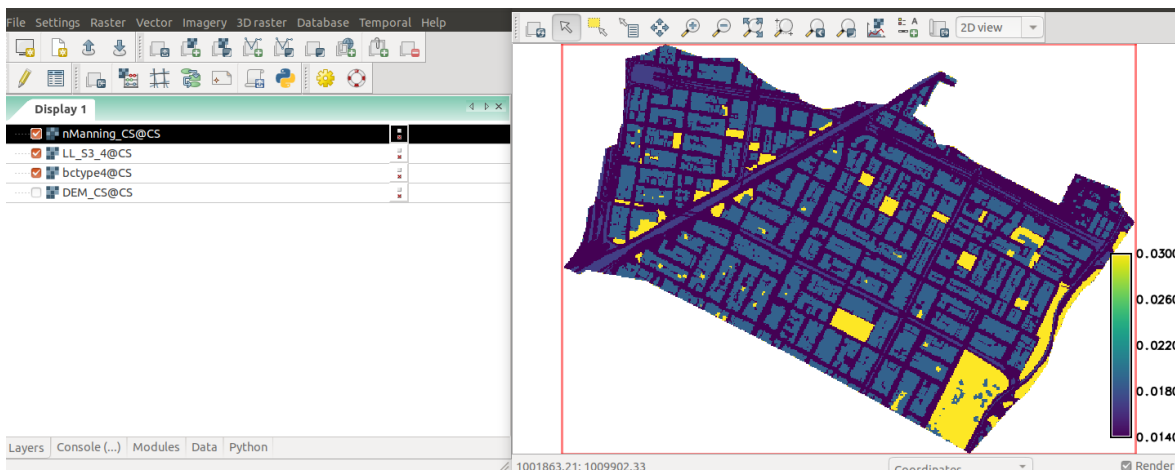


Ilustración 33. Capa de n de Manning en GRASS GIS

## 6) Generar un archivo de parámetros

Finalmente, se deben especificar las condiciones de entrada al modelo para relacionar las diferentes capas de entrada al programa. A continuación, se muestra el archivo de entrada empleado para la última simulación.



```
[time]
duration = 02:30:00
record_step = 00:05:00

[input]
dem = DEM_CS@CS
friction = nManning_CS@CS
rain = LL_S12@CS
bctype = bctype4@CS
bcval = bcvalue0@CS

[output]
prefix = S_12
values = h, drainage_stats, inflow, v

[statistics]
stats_file = CS_S_12.csv

[drainage]
swmm_inp= ChicoSur_CIACUA_No_Inflow.inp
output= DR_S_12

[options]
dtmax=0.05
```

#### Ilustración 34. Ejemplo de archivo de parámetros

Se puede observar que los primeros datos hacen referencia al tiempo de la simulación, su duración total y el paso de tiempo empleado para guardar los resultados, el cual es diferente al paso de tiempo empleado para avanzar en la resolución de las ecuaciones diferenciales. Las simulaciones 1-6 se hicieron con un tiempo de simulación de 2.5 horas y las simulaciones 7-12 con 3 horas de simulación. Esta diferencia se debe principalmente a la cantidad de pulsos de lluvia en cada aproximación.

La sección de *input* relaciona todas las capas de datos que entran al programa. En orden descendente, se encuentra el modelo digital de terreno de la zona, la capa de *n* de Manning, el STRDS de lluvia, el tipo de frontera y el valor de la condición de borde.

La sección de *output* relaciona la información que quiere ser calculada y almacenada, en este caso particular se indicó que los resultados fueran la profundidad (*h*), las estadísticas del drenaje, el inflow al sistema y la velocidad (*v*).

El componente de estadísticas hace referencia al archivo de salida que se desea obtener con el resumen de la simulación, tiempo empleado, pasos de tiempo, volumen de agua a través de la frontera, lluvia y drenaje. A su vez, el drenaje es indicado en la siguiente sección, se emplea la dirección y nombre del archivo que contiene el inp.

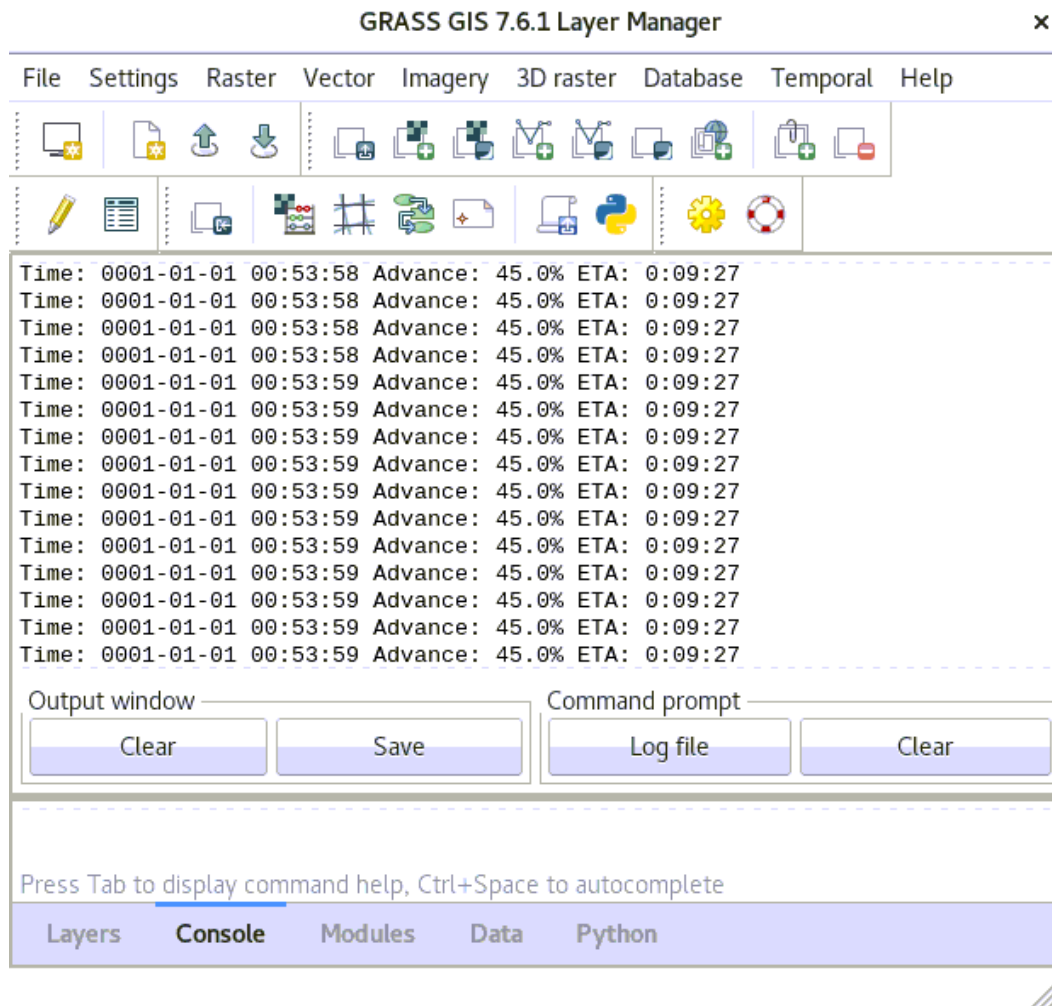
Finalmente, uno de los parámetros más importantes es el delta de tiempo máximo (*dtmax*) debido a que tiene impacto directo en la estabilidad numérica de la solución, por ejemplo, con 0.1 segundos





se presenta inestabilidad numérica para esta simulación, por lo cual se redujo el paso máximo a 0.05 segundos.

Esta metodología se siguió para obtener los resultados de las inundaciones en Chicó Sur bajo efectos de Cambio Climático y en condiciones que no tuvieran en cuenta este fenómeno global.



**Ilustración 35. Pantalla de simulación con porcentaje de avance de simulación**

Con estas simulaciones se obtienen las profundidades de inundación para todos los pasos de tiempo. Es decir, la profundidad de inundación es conocida para las 2.5 horas cada cinco minutos. Estos mapas se exportan en un formato tiff y se usan como el principal componente para el cálculo del FRI.



### 3.7 Cálculo del FRI

Finalmente, para el cálculo del *Flood Resilience Index* (FRI) se requiere la información de la profundidad de la inundación en el tiempo (la cual se obtuvo con Itz'i) y las capas socioeconómicas del sitio. En este punto se hicieron unas modificaciones en cuanto al FRI original propuesto por Chan y Leandro (2019) para adaptarlo de mejor manera al contexto del presente estudio.

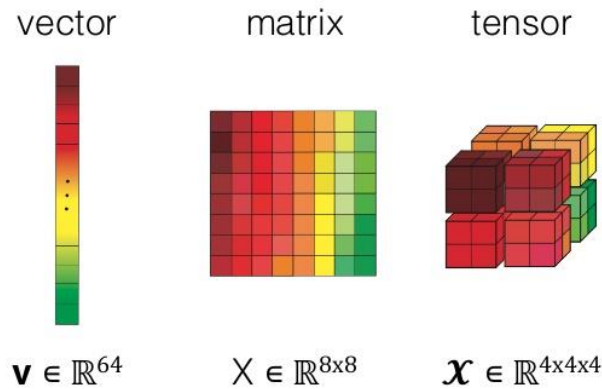
Las modificaciones consistieron en la interpretación de los índices socioeconómicos. El porcentaje de viviendas con niños fue reemplazado con el porcentaje de niños dentro de la población de cada manzana. Se hizo esta misma aproximación con el porcentaje de adultos mayores. La última modificación realizada consistió en cambiar el ingreso promedio de las viviendas, el cual estaba fijado como referencia a 80.000 euros anuales, y utilizar el estrato socioeconómico en su lugar. Esta modificación es acorde con lo dispuesto por el DANE, el cual indica que

“los ingresos por persona y por hogar son inmanejables para la estratificación requerida, entre otras razones, por el volumen de datos que habría que recolectar, por su variabilidad a corto plazo, porque no constituyen información confiable dada la magnitud de la informalidad y el desplazamiento continuo de las familias.” (DANE, n.d.)

Adicionalmente, se ha encontrado correlación entre el estrato de los inmuebles residenciales y los ingresos de las personas que los habitan (DANE, n.d.), por lo tanto, es un indicador que captura la variable que se está reemplazando de la metodología original.

#### Cálculo del FRI

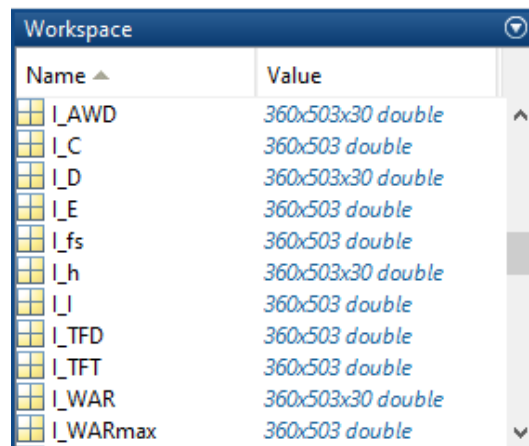
Para calcular el FRI se programó un Script en MATLAB que permitiera manejar volúmenes de datos relativamente grandes y hacer operaciones aprovechando la capacidad matricial del software. En primer lugar, se importan los datos de profundidades, resultado del paso previo de la metodología. Cada simulación genera un mapa completo de profundidades por cada paso de tiempo en el cual se especificó que se guardaran los resultados. Por ejemplo, para la primera simulación se generaron 30 mapas, los cuales corresponden a dos horas y media de simulación con un paso de tiempo de 5 minutos para el registro. Estos datos son almacenados en una variable de tipo tensor, el cual puede ser entendido como un vector de matrices. Cada mapa de profundidades es una matriz y su posición dentro del vector indica su instante en el tiempo. El tamaño es (Longitud x Latitud x Tiempo) Su representación gráfica es la siguiente:



**Ilustración 36. Arreglos multidimensionales de datos**

En este caso los tensores tienen un tamaño de 360x503x30, para un total de 5'432.400 datos por cada simulación de 2 horas y 30 minutos. En caso de las simulaciones de mayor duración se tienen tensores de 360x503x36, para un total de 6'518.880 datos de profundidad de agua por simulación.

El script de MATLAB sigue la metodología descrita en la sección 2.11. Los indicadores de la fase de evento ( $I_h, I_{AWD}, I_D, I_{WAR}$ ) son calculados con las ecuaciones Ecuación 15 a Ecuación 18. Cada uno de los indicadores es almacenado en un tensor separado. Esta estructura de datos se requiere debido a que existe variación espacial y temporal. Posteriormente, se calculan los indicadores de la fase de recuperación ( $I_{fs}, I_{TFD}, I_{TFT}, I_{WARmax}, I_C, I_E, I_I$ ) empleando las ecuaciones Ecuación 19 a Ecuación 25. Cada uno de estos indicadores es almacenado en una matriz debido a que no tienen variación en el tiempo.

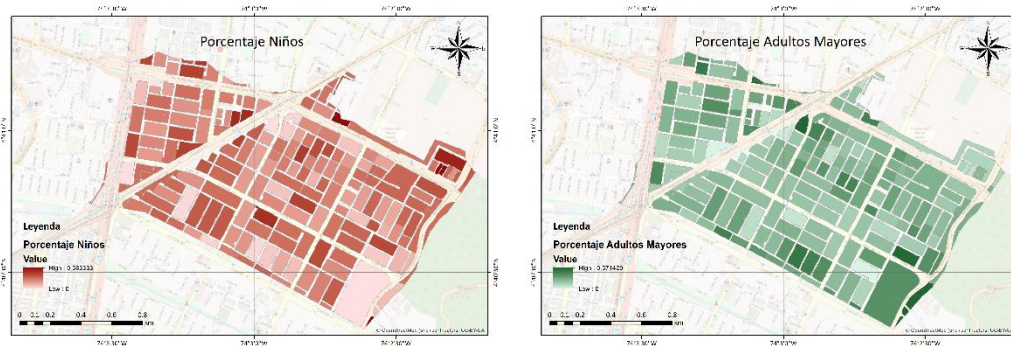


**Ilustración 37. Almacenamiento de indicadores para el cálculo del FRI**

Para calcular el FRI en la etapa de recuperación es necesario conocer las características socioeconómicas de la zona, en particular la distribución de población y el Estrato. En los siguientes

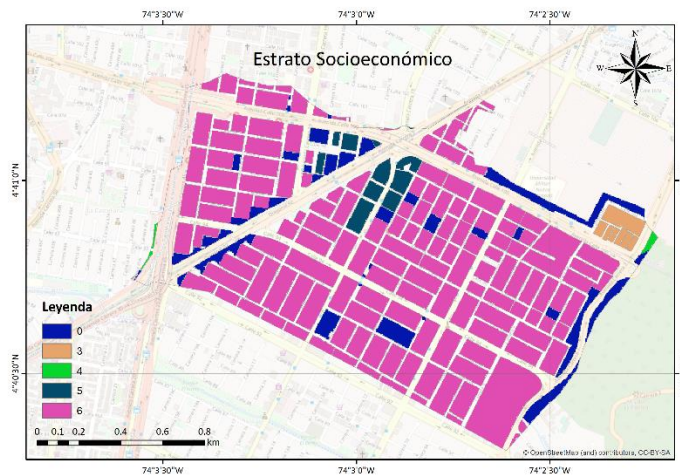


mapas se observa el porcentaje de población infantil (De 0 a 18 años) y el porcentaje de adultos mayores (Mayores a 55 años). Entre más intenso sea el color, el porcentaje es mayor.



**Ilustración 38. Mapas de distribución de población**

Una de las capas necesarias para calcular el factor de recuperación es el estrato socioeconómico. En el siguiente mapa se encuentra la sectorización por manzanas utilizada. En este caso, el indicador 0 se refiere a manzanas que no tienen una asignación de Estrato. Debido a que este factor fue el que más se modificó con respecto a la metodología de Chan y Leandro se definió el valor de referencia como el estrato 6, debido a que con esa asignación se obtienen comportamientos diferentes para cada estrato.



**Ilustración 39. Mapa de Estrato Socioeconómico**

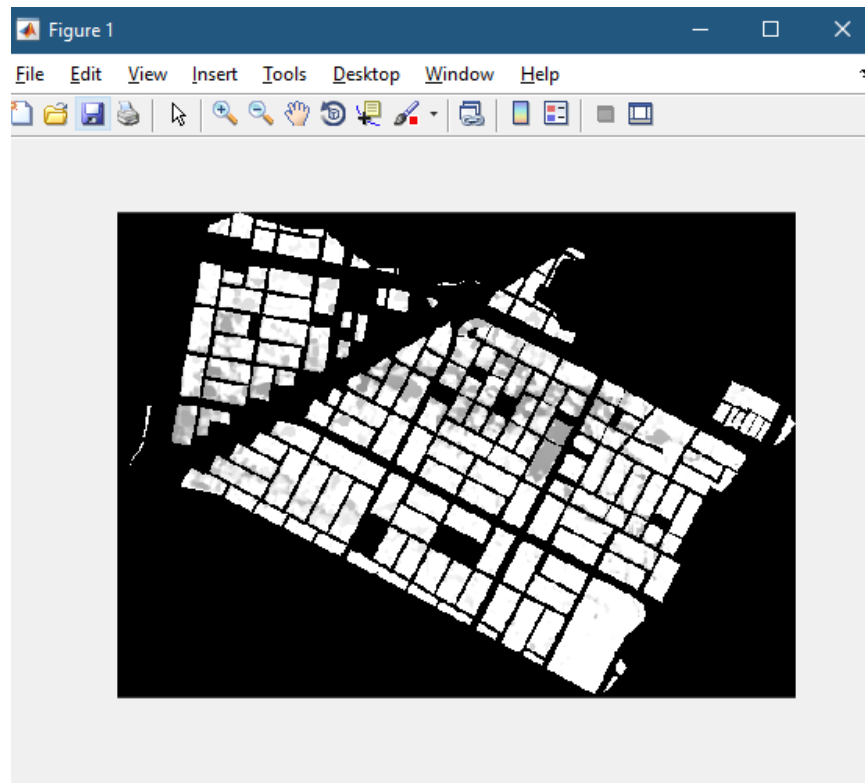
Con estos valores es posible calcular el Factor de Recuperación (RF), el cual indica qué tan rápido puede recuperarse una zona. Este factor, es calculado con la Ecuación 28 y es almacenado en una



matriz. Esta matriz de factor de recuperación es permanente en el tiempo para un evento de inundación específico debido a que depende de los valores máximos de la inundación registrada.

Posteriormente, se procede a realizar el cálculo del FRI dependiendo de la fase en que se encuentre el píxel específico. Si la profundidad de inundación es superior a una profundidad umbral cercana a cero entonces se indica que la zona se encuentra en estado de evento, luego de que la profundidad vuelva a ser menor a este umbral se encontrará en etapa de recuperación.

Finalmente, los resultados de FRI son almacenados en un tensor de tal forma que se tiene información del cambio de este indicador para toda la zona de estudio durante el tiempo de la inundación y posterior a él. El siguiente mapa es el gráfico de una matriz de FRI (es decir, el tensor de FRI en un momento específico) generado en MATLAB.



**Ilustración 40. Ejemplo de mapa de resiliencia para Chicó Sur en MATLAB**

Estos resultados pueden ser graficados nuevamente en forma de mapa, sus estadísticas pueden ser analizadas y, tal como se indicó en el objetivo del estudio, comparadas para conocer el impacto de los escenarios de Cambio Climático en las inundaciones de Chicó Sur.

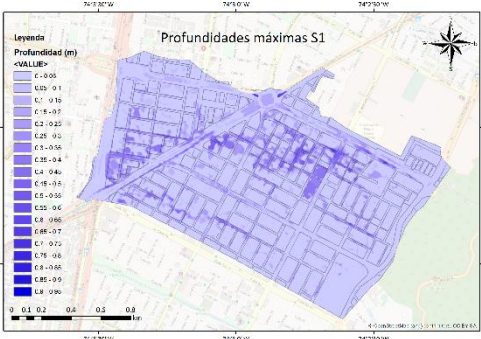
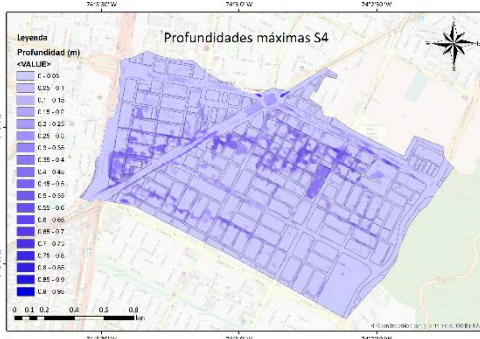
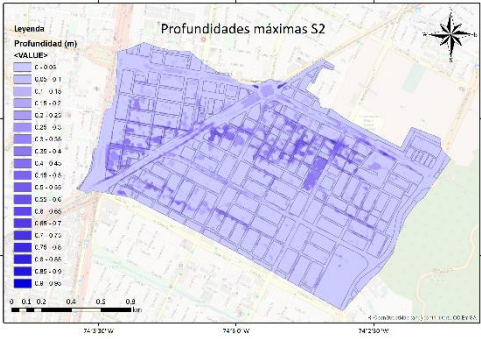
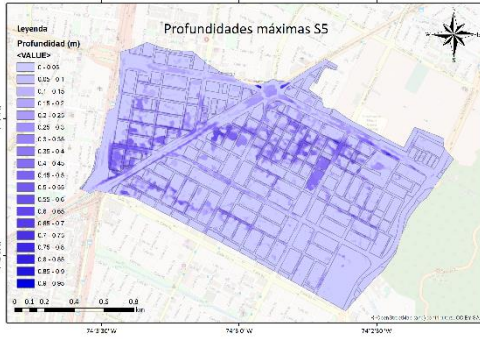
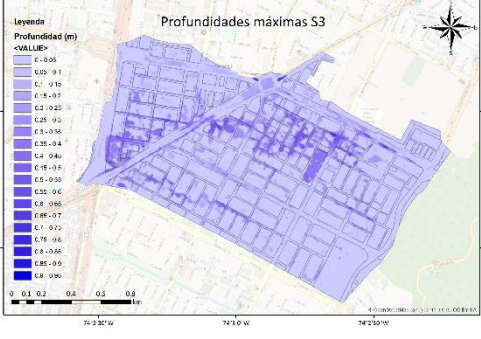
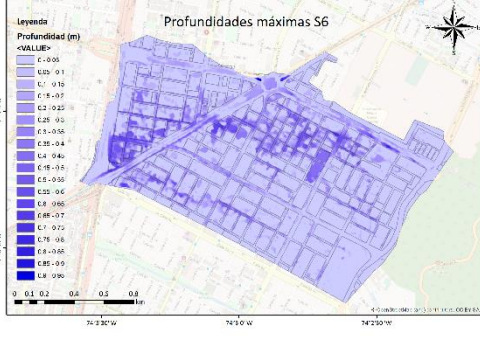




## 4 RESULTADOS

En primer lugar, se mostrarán los resultados de las profundidades de inundación para las simulaciones realizadas. En la primera tabla se encuentran los resultados de las simulaciones asociados a los hietogramas con duración de 20 minutos.

**Tabla 13. Profundidades máximas para escenarios de 20 minutos de duración**

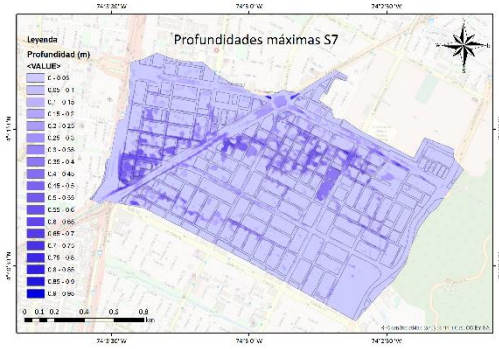
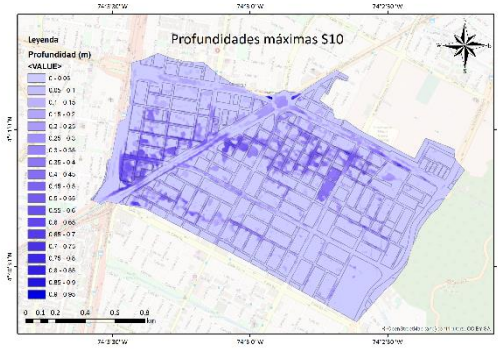
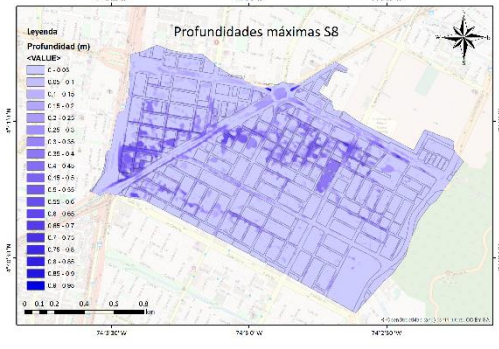
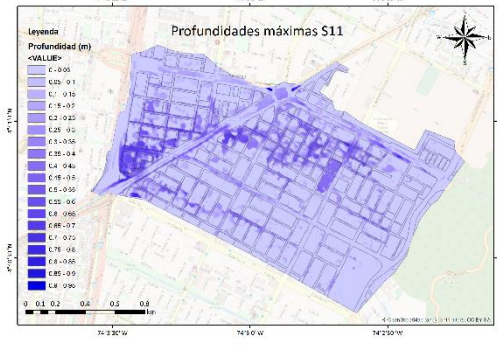
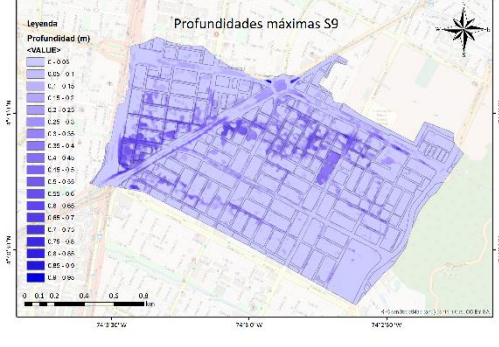
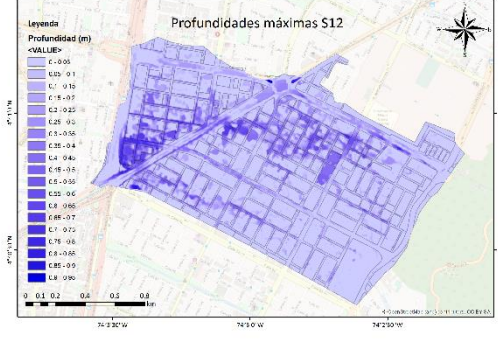
Mod.	Periodo de Retorno: 5 Años	Periodo de Retorno: 30 Años
	<b>Simulación 1</b>	<b>Simulación 4</b>
<b>EAAB</b>		
	<b>Simulación 2</b>	<b>Simulación 5</b>
<b>MRI</b>		
	<b>Simulación 3</b>	<b>Simulación 6</b>
<b>BCC</b>		





En la segunda se encuentran los resultados de profundidades máximas asociados a hietogramas de 95 minutos.

**Tabla 14. Profundidades máximas para escenarios de 95 minutos de duración**

Mod.	Periodo de Retorno: 5 Años	Periodo de Retorno: 30 Años
	<b>Simulación 7</b>	<b>Simulación 10</b>
<b>EAAB</b>		
	<b>Simulación 8</b>	<b>Simulación 11</b>
<b>MRI</b>		
	<b>Simulación 9</b>	<b>Simulación 12</b>
<b>BCC</b>		

A simple vista no es posible encontrar mayores diferencias en las profundidades, las diferencias más marcadas se encuentran entre los periodos de retorno, lo cual era esperable desde el análisis de los



hietogramas. En los mapas de profundidades sólo es posible destacar que independiente del modelo, duración o periodo de retorno, las mismas zonas se ven afectadas por las inundaciones. El patrón es claro, se observan mayores inundaciones en la zona centro y occidental. Esto se debe a las altas pendientes que se encuentran en la zona oriental, las cuales favorecen el desplazamiento del agua hasta las zonas más planas e inundables.

A continuación, se mostrarán los mapas de mínima resiliencia. Debido a que la misma tendencia se repite, es decir, no se obtiene un contraste suficiente entre los casos, se muestran los mapas más destacados: Simulaciones 1, 3, 10 y 12.

**Tabla 15. Resiliencia mínima para casos destacados**

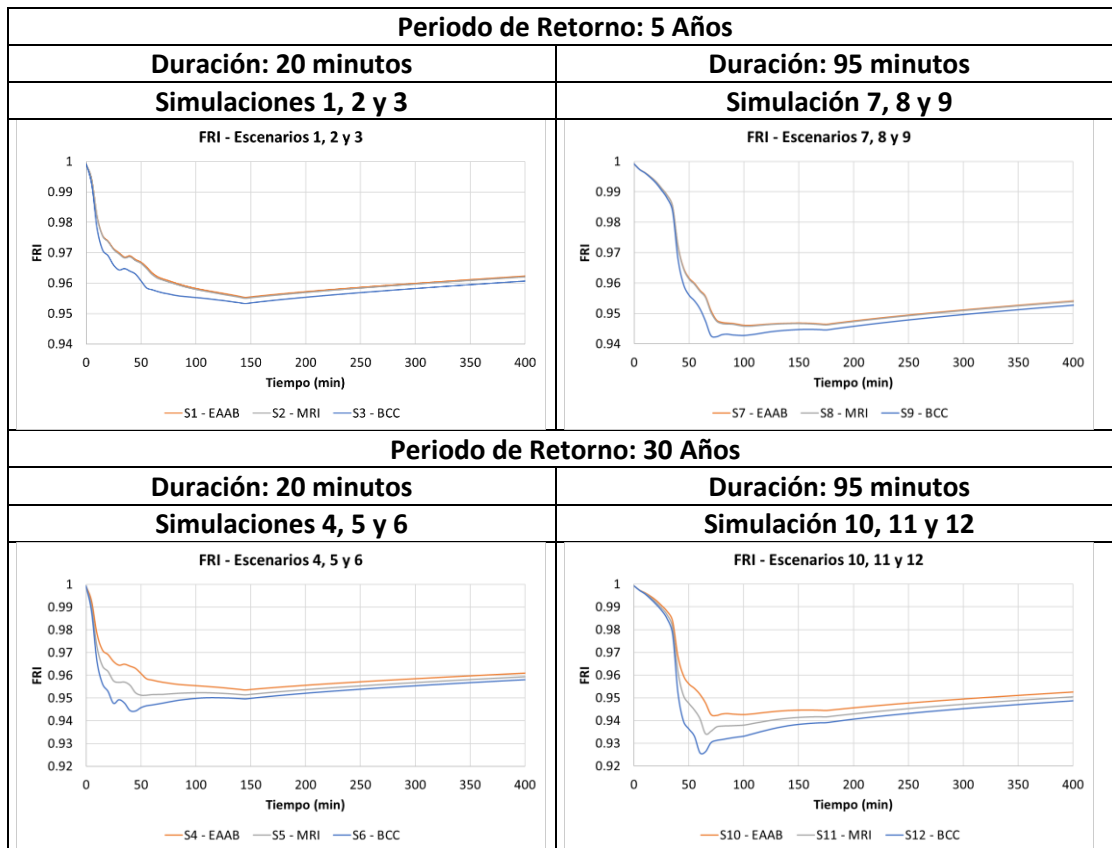
	<b>Periodo de Retorno: 5 Años</b>	<b>Periodo de Retorno: 30 Años</b>
	<b>Duración: 20 minutos</b>	<b>Duración: 95 minutos</b>
<b>Mod.</b>	<b>Simulación 1</b>	<b>Simulación 10</b>
<b>EAAB</b>		
<b>BCC</b>		

El color azul indica un índice de resiliencia igual o cercano a uno, los tonos más cálidos indican bajos niveles de resiliencia, siendo el color rojo el menor nivel (36% fue el menor calculado). Para observar de mejor manera el comportamiento general del índice de resiliencia se calculó el promedio de



todos los valores de resiliencia en el espacio para cada paso de tiempo. A continuación, se observan las curvas del FRI promedio para los diferentes casos.

**Tabla 16. Curvas de FRI Promedio para las simulaciones realizadas**



De manera general es posible indicar que el comportamiento de todas las curvas de resiliencia sigue el mismo patrón: Desciende hasta llegar a un mínimo ligeramente desfasado del pico del hietograma que se empleó para generar la inundación y posteriormente sigue una etapa de recuperación. En la etapa de recuperación se observa que las tres curvas de cada gráfica convergen. Este comportamiento se debe a que las zonas inundadas empiezan a secarse posterior al evento de lluvia, cada vez más zonas recuperan su resiliencia y únicamente las zonas que permanecen inundadas mantienen el índice por debajo de uno. Tal como se observó en las tablas Tabla 13 y Tabla 14 las zonas inundadas son prácticamente las mismas.

Al comparar las gráficas de la izquierda con las gráficas de la derecha en la Tabla 16 se puede observar el efecto de la duración del evento. A mayor duración se observa una menor resiliencia, esto se debe a que la severidad de la inundación responde más a la cantidad total de agua que a la intensidad de la lluvia.



Las gráficas de la parte superior de la Tabla 16 muestran las curvas de resiliencia para los eventos con periodo de retorno de 5 años, es posible observar que existe una separación entre los escenarios simulados con el modelo BCC CSM1 1M tal como se esperaba debido a que en este modelo se tienen las intensidades más altas. No obstante, las curvas de FRI de los modelos EAAB (Sin Cambio Climático) y MRI CGCM3 son iguales en términos prácticos. Esto se debe a la gran similitud de los hietogramas de entrada presentados en la Tabla 10, lo cual a su vez se explica por la semejanza de las curvas IDF de la EAAB y el modelo MRI CGCM3 para periodos de retorno bajos.

Las gráficas de la parte inferior de la Tabla 16 muestran las curvas de resiliencia para los eventos con periodo de retorno de 30 años. Es posible observar que las tres líneas se separan en ambas gráficas en orden de intensidad, siendo la curva del modelo BCC CSM1 1M la más afectada, luego la curva del modelo MRI CGCM3 y finalmente el caso base muestra el menor impacto.

Estos resultados permiten responder a la pregunta sobre el efecto del cambio climático sobre la resiliencia a las inundaciones en Chicó Sur. Para eventos de bajo periodo de retorno no habrá cambios drásticos y la resiliencia se verá afectada en menos del 1% en términos generales. Para eventos poco frecuentes la resiliencia puede verse afectada en aproximadamente 2% para un promedio general de la zona.

Estos resultados indican que sí se generaran cambios en la resiliencia teniendo en cuenta la totalidad de la zona. Aun así, es posible ver que las variaciones del FRI se mantienen por encima del 90% al hacer promedio sobre toda la zona. Este comportamiento se explica al observar los mapas de resiliencia que se encuentran en la Tabla 15. Gran cantidad de área tiene baja afectación, por lo tanto, el índice de resiliencia es muy cercano a uno para la mayoría de las manzanas. Sin embargo, existen manzanas que presentan índices críticos, llegando a índices de 40% o menos. Para analizar con mayor detalle el efecto estas manzanas se hizo un análisis sectorizado para reconocer las manzanas con peor resiliencia y cuantificar el cambio de su resiliencia por efecto del Cambio Climático.

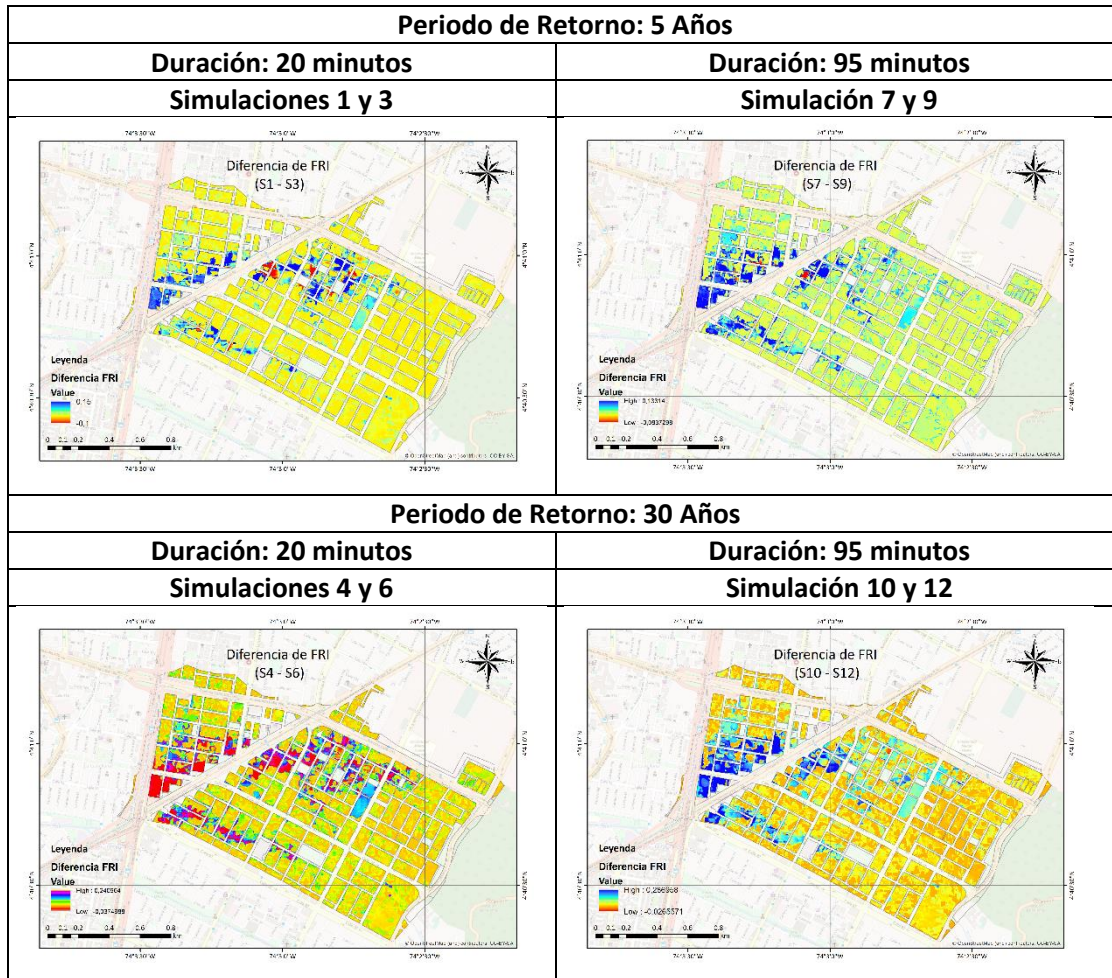
Para visualizar mejor el cambio de la resiliencia debido al efecto del cambio climático se restaron los mapas de FRI para ver los cambios en este indicador. La operación se hizo restando el caso del modelo BCC CSM1 1M al caso base EAAB.

Los tonos amarillos representan un cambio de resiliencia cercano a cero, los tonos azules representan disminuciones de resiliencia debido al efecto del cambio climático y los tonos rojos indican zonas que tuvieron un aumento en la resiliencia.



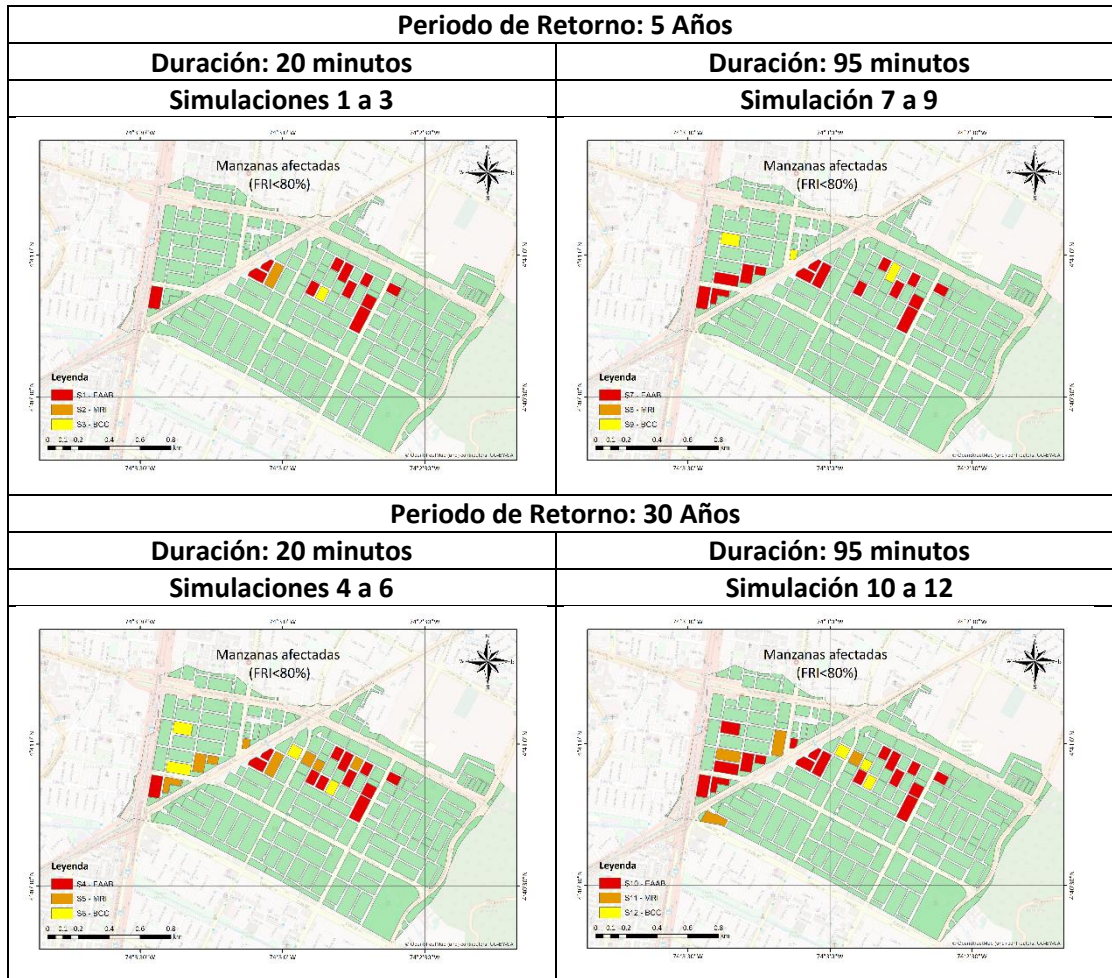


**Tabla 17. Mapas de diferencia de FRI**



En los mapas es posible observar que los tonos amarillos predominan en la zona oriental mientras que la zona occidental presenta tonos más azules que pueden llegar a disminuciones de 15% (Sim. 1 y 3), 13% (Sim. 7 y 9), 24% (Sim. 4 y 6) y 28% (Sim. 10 y 12). De esta manera es posible indicar que el efecto no es homogéneo en toda la zona de Chicó Sur y hay manzanas que se ven más afectadas que otras.

A continuación, se presentan los mapas por afectación de manzanas, en el cual se pueden observar las manzanas propensas a afectaciones que las lleven por debajo de un FRI de 80%. En rojo se muestran las manzanas afectadas incluso sin considerar Cambio Climático, en naranja se indican las manzanas adicionales que se verían afectadas al considerar los resultados del modelo MRI CGCM3 y en amarillo las manzanas adicionales considerando el modelo BCC CSM1 1M.


**Tabla 18. Mapas de manzanas afectadas y proyección con Cambio Climático**


En los mapas es posible observar las manzanas afectadas aumenta al considerar el efecto del Cambio Climático. Tal como mapas previos indicaron, el efecto de cambio climático aumenta con el periodo de retorno de los eventos considerados. A continuación, se hace el conteo de las manzanas afectadas para los distintos escenarios.

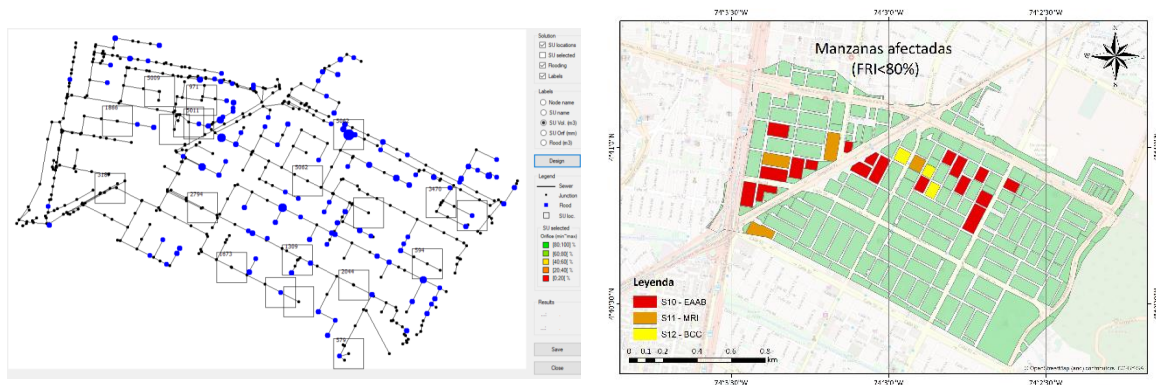
**Tabla 19. Conteo de manzanas afectadas para los diferentes escenarios**

Escenario	Número de Manzanas afectadas	Escenario	Número de Manzanas afectadas	Escenario	Número de Manzanas afectadas	Escenario	Número de Manzanas afectadas
<b>S1 - EAAB</b>	11	<b>S4 - EAAB</b>	12	<b>S7 - EAAB</b>	15	<b>S10 - EAAB</b>	18
<b>S2 - MRI</b>	12	<b>S5 - MRI</b>	19	<b>S8 - MRI</b>	15	<b>S11 - MRI</b>	22
<b>S3 - BCC</b>	12	<b>S6 - BCC</b>	24	<b>S9 - BCC</b>	18	<b>S12 - BCC</b>	25



Finalmente, se hace la comparación con el trabajo de investigación inmediatamente anterior acerca de las inundaciones en la zona de Chicó Sur. La tesis de maestría de Laura Pulgarín realizada en 2018, descrita en la sección 2.8, obtuvo la siguiente configuración de tanques de tormenta para reducir las inundaciones.

**Tabla 20. Comparación de resultados obtenidos para las inundaciones de Chicó Sur**



Al observar los resultados de la tesis previa (izquierda) se puede observar una disposición de tanques que atiende a principales zonas de inundación, pero también tanques distribuidos a lo largo de la red. Este tipo de configuración mejora las condiciones de la red para amortiguar las inundaciones, pero puede llegar a ser costosa por lo que un análisis de zonas vulnerables (derecha) como el realizado en el presente estudio puede ser útil para priorizar los tanques a implementar.





## 5 CONCLUSIONES

Con frecuencia, la ciudad de Bogotá experimenta eventos de inundación. Estas amenazas naturales son causa de pérdidas económicas y materiales, de movilidad e incluso pueden llegar a ocasionar pérdidas de vidas humanas. El gobierno ha enfrentado esta problemática al definir los procedimientos y acciones para reducir el riesgo de las inundaciones por desbordamiento, sin embargo, no ha tenido la misma respuesta al tratar inundaciones por encharcamiento. Aun así, la agenda gubernamental apunta hacia una “ciudad más resiliente” sin tener en cuenta la adecuada definición de este objetivo. Esta investigación presentó un estudio de resiliencia en la zona Chicó Sur, al nororiente de Bogotá en donde se han presentado inundaciones y se espera que puedan ser incrementar en el futuro cercano debido al Cambio Climático.

El Cambio Climático es un fenómeno global que afecta los diferentes componentes climáticos, lo cual interviene con el ciclo del agua y por consiguiente con las lluvias. En comparación con la temperatura, la intensidad de la precipitación es una variable aún más incierta por lo cual se requirieron estudios regionales para estimar el cambio de las lluvias en el futuro. Los estudios revisados se basaron en Modelos de Circulación General que permiten simular el comportamiento de los diferentes componentes del sistema climático y sus interacciones. A partir de ellos se establecieron proyecciones de lluvia para la zona de estudio, en particular se revisaron cinco modelos, pero dadas las consideraciones del IPCC acerca de estos se seleccionaron dos para las proyecciones de lluvias futuras.

A partir de la información hidrológica actual y de las estimaciones de las lluvias futuras fue posible generar hietogramas de diferentes características, tales como duración, periodo de retorno y aproximación al Cambio Climático. Los hietogramas fueron utilizados para hacer simulaciones de inundación con el modelo Itzi, el cual permitió obtener profundidades de inundación en diferentes tiempos. Itzi fue una herramienta adecuada para las simulaciones en condiciones urbanas debido a que permite tener en cuenta la interacción entre el drenaje y la superficie, adicionalmente se obtienen los resultados en un entorno de sistema de información geográfico que facilita el análisis y presentación de estos. Las profundidades de inundación fueron empleadas para calcular la resiliencia en toda la zona de estudio y discriminar por manzanas de la zona. De esta manera se hizo un análisis tanto global como específico de los cambios de la resiliencia en Chicó Sur.

El índice de resiliencia empleado para este estudio tuvo en cuenta las características de la inundación y también una aproximación a la condición socioeconómica de las personas y sus viviendas. El FRI permitió observar la gravedad de las inundaciones simuladas y clasificar las manzanas más críticas para los diferentes escenarios propuestos. En términos generales se identificó que la resiliencia efectivamente disminuye al considerar el efecto del Cambio Climático, pero lo hace de forma heterogénea en el espacio. La zona oriental mantiene índices de resiliencia



altos frente a la mayoría de los escenarios simulados, por el contrario, la zona centro y la zona occidental se ven más afectadas por el cambio en la intensidad de los hietogramas que consideran el Cambio Climático.

Adicionalmente, en este estudio se encontraron algunas relaciones entre la severidad de la inundación y las características de la lluvia. Las inundaciones generadas a partir de hietogramas de mayor duración tuvieron mayor impacto en la resiliencia que las inundaciones generadas a partir de lluvias cortas. Por otro lado, el efecto del periodo de retorno fue el esperado, debido a que las inundaciones con periodo de retorno de 30 años fueron más graves que las inundaciones generadas a partir de hietogramas de 5 años de periodo de retorno.

La última variable considerada fue el modelo de Cambio Climático, en este campo se pudo evidenciar que las inundaciones con bajo periodo de retorno que consideraban los MCGs no diferían en gran medida con las inundaciones generadas a partir del modelo de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado, pero a medida que el periodo de retorno incrementó, las diferencias fueron más grandes. Lo anterior indica que el Cambio Climático no tendrá gran efecto sobre las lluvias frecuentes pero los eventos de precipitación extremos serán más intensos. Lo anterior es equivalente a indicar que los eventos de gran intensidad en la ciudad de Bogotá disminuyen su periodo de retorno. Esta consideración puede ser importante al hacer los diseños de obras hidráulicas en la capital en los próximos años.

Al comparar los resultados obtenidos con la solución de Tanques de Tormenta se puede observar que la cantidad de tanques propuesta puede ser disminuida para priorizar las zonas con mayores afectaciones al índice de resiliencia, esto puede permitir una reducción del costo de la solución o indicar la zona que primero debe atenderse en caso de las obras de adecuación. Este tipo de análisis se recomienda realizar posterior a esta investigación, adicionalmente, se pueden tener en cuenta otro tipo de soluciones, tales como otros sistemas de drenaje urbano sostenible (SUDS).

## 5.1 Trabajo Futuro

A partir de lo indicado en esta investigación, estudios posteriores pueden plantear soluciones teniendo el índice de resiliencia como objetivo de ejercicios de optimización. Gracias a la interacción del suelo con el drenaje del modelo de inundaciones, se pueden proponer diseños o modificaciones con la red de SWMM para encontrar alternativas que mejoren la resiliencia de las manzanas críticas en Chicó Sur.

De igual manera, todo ejercicio de modelación está sujeto a restricciones, suposiciones y simplificaciones de la realidad y por lo tanto es posible implementar mejoras. En el caso del ejercicio de modelación de este estudio se propone actualizar los modelos de circulación general implementados en este estudio y utilizar los modelos del CMIP6, próximo a publicarse.



Adicionalmente, las aproximaciones de Cambio Climático presentan incertidumbre inherente debido a que se están estimando condiciones futuras, por lo anterior, se recomienda hacer un análisis de variabilidad climática que incluya la incertidumbre de manera adecuada.

Entre otras mejoras al ejercicio de modelación realizado se encuentra utilizar capas de información actualizadas, debido a que el ambiente urbano es dinámico y se realizan cambios y modificaciones al ambiente constantemente. Toda la información que se utilizó en este estudio puede cambiar, desde la elevación del terreno hasta la rugosidad y la red de drenaje. La información actualizada, precisa y exacta es vital para la calidad de los resultados.

El índice de resiliencia empleado, FRI, puede ser estudiado con mayor profundidad y adaptarse a las condiciones regionales de la ciudad de Bogotá o a subsectores de la misma. Este indicador presenta múltiples parámetros, valores de referencia, estructura matemática y pesos de ponderación que pueden ser sujetos de tal manera que el índice represente de mejor manera el efecto de las inundaciones en las viviendas. Tales ejercicios de adaptación del índice pueden apuntar a un índice interpretable que indique la afectación y posible retribución por parte del Estado o compañías aseguradoras.

Este estudio puede ser implementado por las entidades encargadas de hacer este tipo de investigaciones en la ciudad, tales como: IDIGER, IDEAM y la Alcaldía de la ciudad. El presente estudio describe una metodología para estimar el riesgo por inundaciones urbanas que puede ser replicada en otras zonas de la ciudad e incluso en otras ciudades. Esta metodología puede ser empleada como herramienta de priorización de intervención para generar mapas de amenaza, riesgo y así evitar los daños generados por las inundaciones urbanas.

Finalmente, es muy importante resaltar la necesidad de hacer investigaciones futuras en diferentes zonas de la ciudad, bajo diferentes condiciones y generando acciones eficaces mediante ejercicios de planeación y construcción de infraestructura que permita efectivamente incrementar la resiliencia a las inundaciones urbanas de la ciudad de Bogotá tanto para la actualidad como para el futuro.



## 6 REFERENCIAS

- Acevedo Aristizábal, L. A. (2009). *Estimación hidrológica bajo escenarios de cambio climático en Colombia*.
- Acosta Barragán, J. C., & Saldarriaga Valderrama, J. G. (2013). *Cálculo de escorrentía urbana para el centro de Bogotá por medio de Sistemas de información Geográfico*. Universidad de los Andes.
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2004). Decreto 190 de 2004. Retrieved January 5, 2020, from 2004 website: <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=13935>
- Bates, P., Trigg, M., Neal, J., & Dabrowa, A. (2013). *LISFLOOD-FP User manual: Code release 5.9.6* (pp. 1–49). pp. 1–49.
- Castro, M. (2007). Los modelos climáticos globales. *Cursos de Verano de La Universidad de Cantabria*.
- Chen, K. F., & Leandro, J. (2019). A Conceptual time-varying flood resilience index for urban areas: Munich city. *Water (Switzerland)*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/w11040830>
- Chow, V. Te, Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada*.
- Courty, L. (2017). Tutorial — Itzi 17.11 documentation. Retrieved June 9, 2019, from <https://itzi.readthedocs.io/en/latest/tutorial.html#get-ready>
- Courty, L. G., Pedrozo-Acuña, A., & Bates, P. D. (2017). Itzi (version 17.1): an open-source, distributed GIS model for dynamic flood simulation. *Geoscientific Model Development*, 10(4), 1835–1847. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-1835-2017>
- Courty, L., & Pedrozo-Acuña, A. (2016). *Modelo numérico para la simulación dinámica de inundaciones urbanas en SIG*. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.159619>
- Courty Laurent, Pedrozo-Acuña Adrián, B. P. (2017). Itzi. Retrieved June 3, 2019, from itzi.org website: <https://www.itzi.org/about/>
- DANE. (n.d.). Estratificación Socioeconómica - Preguntas Frecuentes. Retrieved January 8, 2020, from <https://www.dane.gov.co/index.php/servicios-al-ciudadano/116-espanol/informacion-georreferenciada/2421-estratificacion-socioeconomica-preguntas-frecuentes>
- de Almeida, G. A. M., & Bates, P. (2013). Applicability of the local inertial approximation of the shallow water equations to flood modeling. *Water Resources Research*, 49(8), 4833–4844. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20366>



- El Espectador. (2017). Por segunda vez en el año se inundó el deprimido de la calle 94, en el norte de Bogotá - ELESPECTADOR.COM. Retrieved June 9, 2019, from <https://www.elespectador.com/noticias/bogota/por-segunda-vez-en-el-ano-se-inundando-el-deprimido-de-la-calle-94-en-el-norte-de-bogota-articulo-726048>
- Government of Ontario, M. of T. (n.d.). *HEC-RAS*. Retrieved from <http://www.mto.gov.on.ca/english/publications/drainage/software/hecrasc.shtml#minimum-requirements>
- Holling, C. S. (1973). of Ecological Systems. *Source: Annual Review of Ecology and Systematics*, 4(1973), 1–23. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/2096802>  
<http://www.jstor.org/page/info/about/policies/terms.jsp>  
<http://www.jstor.org>
- IDEAM. (2018). *La variabilidad climática y el cambio climático en Colombia*. 28.
- IDIGER. (2016). Cambio Climático. Retrieved January 5, 2020, from <https://www.idiger.gov.co/rcc>
- IDIGER. (2018). DesInventar | Colombia - Inventario histórico de desastres - Bogotá DC. IDIGER - SIRE. Retrieved January 4, 2020, from 2018 website: <https://online.desinventar.org/desinventar/#COL-20180227192609>
- IDIGER. (2019). Riesgo por Inundación - Idiger. Retrieved January 4, 2020, from <https://www.idiger.gov.co/rinundacion>
- IPCC. (2014a). Cambio climático 2013: bases de la ciencia física. *Livestock Research for Rural Development*, 2. Retrieved from [https://www.ipcc.ch/news\\_and\\_events/docs/ar5/ar5\\_wg1\\_headlines\\_es.pdf](https://www.ipcc.ch/news_and_events/docs/ar5/ar5_wg1_headlines_es.pdf)
- IPCC. (2014b). Evaluation of climate models. *Climate Change 2013 the Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 9781107057, 741–866. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.020>
- Ministerio de Vivienda, C. y T. (2016). Título D - Sistemas de recolección y evacuación de aguas residuales domésticas y aguas lluvias. In *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico*. Retrieved from [http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/TITULO\\_D.pdf](http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/TITULO_D.pdf)
- Moghadas, M., Asadzadeh, A., Vafeidis, A., Fekete, A., & Kötter, T. (2019). A multi-criteria approach for assessing urban flood resilience in Tehran, Iran. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 35. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101069>
- Mugume, S., Gomez, D., & Butler, D. (2014). Quantifying the Resilience of Urban Drainage Systems Using a Hydraulic Performance Assessment Approach. *13th International*



*Conference on Urban Drainage*, (September), 7–12.  
<https://doi.org/10.13140/2.1.3291.1047>

National Geographic. (2019). Floods—facts and information. Retrieved January 4, 2020, from <https://www.nationalgeographic.com/environment/natural-disasters/floods/>

Noriega, J. (2013). Coeficientes n de Manning. Retrieved June 9, 2019, from <https://es.scribd.com/doc/167771562/Coeficientes-n-de-Manning>

Pulgarín Dávila, E. G. (2009). *Fórmulas regionales para la estimación de curvas intensidad - frecuencia - duración basadas en las propiedades de escala de la lluvia (región andina colombiana)*. Retrieved from <http://bdigital.unal.edu.co/2467/>

Pulgarín Morales, L., & Saldarriaga Valderrama, J. G. (2018). *Prueba de la metodología de localización de tanques de tormenta en diferentes sectores de las ciudades de Bogotá y Medellín*. Universidad de los Andes.

Sampson, C. C., Bates, P. D., Neal, J. C., & Horritt, M. S. (2013). An automated routing methodology to enable direct rainfall in high resolution shallow water models. *Hydrological Processes*, 27(3), 467–476. <https://doi.org/10.1002/hyp.9515>

Secretaría Distrital de Planeación. (2018). Documentos POT Chapinero . Retrieved January 7, 2020, from <http://www.sdp.gov.co/micrositios/pot/documentos>

Teng, J., Jakeman, A. J., Vaze, J., Croke, B. F. W., Dutta, D., & Kim, S. (2017). Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental Modelling and Software*, 90, 201–216. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.006>

Universidad de los Andes PAVCO. (2014). *Drenaje Urbano y Cambio Climático FASE I-II: Hacia los sistemas de alcantarillado del futuro*. Bogotá.

Wiig, S., & Fahlbruch, B. (2019). *Exploring Resilience A Scientific Journey from Practice to Theory*. Retrieved from <http://www.springer.com/series/15119>

Young, G. (2015). Flooding Can Have Long-Lasting Impact on Health, Environment. Retrieved January 7, 2020, from 2015 website: <https://today.ttu.edu/posts/2015/06/flooding-long-term-impact-health-environment>



## 7 ANEXOS

**Tabla 21. Valores de las curvas IDF para Chicó Sur(Universidad de los Andes PAVCO, 2014)**

CHICO SUR - CURVAS IDF (mm/día)						
PERIODO DE RETORNO	BASE	MODELO				
	EAAB	MRI CGCM3	BCC CSM1 1M	BCC CSM1 1	CSIRO Mk3 6 0	MIRO C5
3	45.46	44.50	62.72	47.11	35.53	33.48
5	52.98	54.22	76.17	57.46	42.09	40.42
10	61.55	71.08	98.70	75.71	50.65	50.52
25	73.40	103.08	139.63	111.13	61.99	65.87
30	76.09	111.23	149.76	120.26	64.28	69.27
50	80.51	138.11	182.60	150.69	70.79	79.48
100	89.40	186.63	240.04	206.48	79.86	95.20

**Tabla 22. Hietogramas sintéticos de las simulaciones**

Hietogramas sintéticos - Chicó Sur												
Simulación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0:00	52.36	52.93	62.75	62.69	78.39	95.63	9.27	9.37	11.11	11.09	13.88	16.92
0:05	164.70	166.44	197.26	197.17	246.50	300.65	10.94	11.06	13.11	13.09	16.38	19.97
0:10	164.70	166.44	197.26	197.17	246.50	300.65	13.27	13.41	15.89	15.87	19.86	24.21
0:15	84.76	85.68	101.57	101.50	126.90	154.80	16.68	16.86	19.99	19.96	24.97	30.45
0:20	52.36	52.93	62.75	62.69	78.39	95.63	22.10	22.34	26.48	26.45	33.09	40.35
0:25	36.75	37.15	44.04	44.00	55.02	67.11	31.73	32.07	38.02	37.98	47.50	57.94
0:30	27.80	28.10	33.32	33.28	41.62	50.77	52.36	52.93	62.75	62.69	78.39	95.63
0:35	22.10	22.34	26.48	26.45	33.09	40.35	164.70	166.44	197.26	197.17	246.50	300.65
0:40	18.20	18.39	21.80	21.78	27.24	33.22	164.70	166.44	197.26	197.17	246.50	300.65
0:45	15.38	15.55	18.43	18.41	23.02	28.08	84.76	85.68	101.57	101.50	126.90	154.80
0:50	13.27	13.41	15.89	15.87	19.86	24.21	52.36	52.93	62.75	62.69	78.39	95.63
0:55	11.63	11.75	13.93	13.91	17.41	21.22	36.75	37.15	44.04	44.00	55.02	67.11
1:00	10.33	10.44	12.37	12.36	15.46	18.85	27.80	28.10	33.32	33.28	41.62	50.77
1:05	9.27	9.37	11.11	11.09	13.88	16.92	22.10	22.34	26.48	26.45	33.09	40.35
1:10	8.40	8.49	10.06	10.05	12.58	15.33	18.20	18.39	21.80	21.78	27.24	33.22
1:15	7.67	7.75	9.19	9.18	11.48	14.00	15.38	15.55	18.43	18.41	23.02	28.08
1:20	7.05	7.13	8.45	8.44	10.56	12.87	13.27	13.41	15.89	15.87	19.86	24.21
1:25	6.52	6.59	7.81	7.80	9.76	11.90	11.63	11.75	13.93	13.91	17.41	21.22
1:30	6.06	6.13	7.26	7.25	9.07	11.06	10.33	10.44	12.37	12.36	15.46	18.85
1:35	5.66	5.72	6.78	6.77	8.47	10.33	9.27	9.37	11.11	11.09	13.88	16.92